

# TÜRKİYE İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ 18. TEKNİK KONGRE VE SERGİSİ

# 18.

TÜRKİYE  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
TEKNİK  
KONGRE VE  
SERGİSİ

# İSTANBUL

7-8-9 Kasım **2022**

İTÜ Süleyman Demirel  
Kültür Merkezi  
Ayazağa Yerleşkesi



TMMOB  
İNŞAAT  
MÜHENDİSLERİ  
ODASI

# Bildiriler Kitabı

<https://tk18.imo.org.tr> - [tk18@imo.org.tr](mailto:tk18@imo.org.tr)



# TÜRKİYE İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ 18. TEKNİK KONGRE VE SERGİSİ

# 18

TÜRKİYE  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
TEKNİK  
KONGRE VE  
SERGİSİ

# İSTANBUL

7-8-9 Kasım **2022**

İTÜ Süleyman Demirel  
Kültür Merkezi  
Ayazağa Yerleşkesi



TMMOB  
İNŞAAT  
MÜHENDİSLERİ  
ODASI

# Bildiriler Kitabı

<https://tk18.imo.org.tr> - [tk18@imo.org.tr](mailto:tk18@imo.org.tr)



**TMMOB**  
**İnşaat Mühendisleri Odası**

Necatibey Cad. No: No: 57, Kızılay / Ankara  
Tel: 0.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88  
E-posta: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr

**TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası**  
**48. Dönem Yönetim Kurulu**

Taner Yüzgeç ..... Yönetim Kurulu Başkanı  
Nusret Suna ..... Yönetim Kurulu II. Başkanı  
Özer Akkuş ..... Yönetim Kurulu Sekreter Üyesi  
Jale Alel ..... Yönetim Kurulu Sayman Üyesi  
Sıdika Gülsun Parlar ..... Yönetim Kurulu Üyesi  
Veysel Özkan ..... Yönetim Kurulu Üyesi  
Tansel Önal ..... Yönetim Kurulu Üyesi

Oda Yayın No: E/22/01

ISBN: 978-605-01-1549-9

Bildiriler Kitabının tüm hakları İnşaat Mühendisleri Odası'na aittir. İzinsiz çoğaltılamaz.

## İÇİNDEKİLER

Sunuş .....	9
Önsöz .....	11
Kongre Kurulları .....	13
Sponsorlar .....	16
Kongre Programı .....	17

### Yapı

Çift Cidarlı İçi Beton Dolu Çelik Tüplerin Eksenel Basınç Altında İnelastik Davranışı <i>Berika Ceren Cihan Yılmaz, Ebru Okşaksin, Oğuz Cem Çelik</i> .....	27
Bambu Donatılı Betonarme Kirişlerde Düşey Yükler Altında Göçmenin Deneysel İncelenmesi <i>Özlem Karakuş Zambak, Ergün Binbir, Furkan Çalım, Oğuz Cem Çelik</i> .....	43
Cam Lifi ile Güçlendirilmiş Alçı (CLGA) Panellerle Üretilen Döşeme Sisteminin İncelenmesi Döşeme Sisteminin İncelenmesi <i>Beyza Kapucu Güzelbulut, Oğuz Cem Çelik</i> .....	61
İtme Sürme Yöntemi ile Köprü ve Ayak Tasarımı <i>Alper Naycı, Kutlu Darılmaz</i> .....	71
Yanal Kuşatma Basıncı Etkisindeki Yüksek Dayanımlı Betonarme Elemanlar İçin Yeni Bir Modelleme Yaklaşımı <i>Atacan Erdoğan, Hasan Orhun Köksal</i> .....	85
Türkiye’de Kaydedilen Depremlerin Davranış Spektrumlarının Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırması <i>H. Polat Gülkan, Vesile Hatun Akansel, Erol Kalkan</i> .....	97
Çayırhan Köprüsü Yapım Danışmanlığı ve Ters Sehim Hesapları <i>Tolga Cantürk</i> .....	115
Mevcut Betonarme Bir Binanın Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi ile Sismik Risk Değerlendirmesi <i>Çağrı Çetik, Sadık Can Girgin, Esra Bengü Kenar</i> .....	129
Küresel Depolama Tanklarının Yakın Fay Yer Hareketlerinde Sismik Davranışları <i>Sezer Öztürk, Ali Sarı</i> .....	147
Makina Kütle Temellerinin Tasarımı Üzerine Bir Uygulama Çalışması <i>Mehmet Salih Ölmez, H. Hülya Kostak</i> .....	159

Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Davranışında Geometrik Önkusurlar ve Artık Gerilmelerin Önemi <i>Haşim Çayır, Cüneyt Vatansever, Muhammed Şükrü Yavaş, Zekai Celep</i> .....	169
2.5MW Rüzgâr Türbininin Dinamik Özelliklerinin Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi <i>Onur Öztürkoğlu, Veysel Yurtseven, Yaşar Taner, Özgür Özçelik, Serkan Günel</i> .....	179
Kırılgnalık Eğrisi Kullanımının Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Depremden Sonra Yeniden Ayağa Kaldırılmasına Etkisi <i>Merve Bayraktar, Burcu Güldür Erkal</i> .....	193
Tarihi Kesme Taş Binaların Düzlemdışı Sismik Performansının Değerlendirmesi İçin Deneysel Ötelenme Limitleri <i>İbrahim Serkan Mısıır, Fikret Kuran, Gökhan Yücel, Ali Cihan Demir, Ege Yeşilbaş, Cansu Beril Eser, Serap Topçu, Ömer Aldemir</i> .....	205
Betonarme Çerçeveselerde Yumuşak Kat Etkilerinin Yeni Nesil Dolgu Duvarlar ile Azaltılması <i>Prost Iverden Balenda Bakala, İbrahim Serkan Mısıır, Ömer Aldemir</i> .....	215
Deprem Dayanımı Yetersiz Riskli Binaların Hızlı Risk Tespit Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi: Elazığ İli Örneği <i>Rabia Nur Sağlam, Tuba Nur İmiş, Muhammed Ulucan, Nurbanu Demirbaş, Ayşe Ruşen Durucan, Hümeıra Şahin, Cengizhan Durucan, Kürşat Esat Alyamaç</i> .....	229
Taban İzolasyonlu Silo Yapısının Tasarımında Kullanılan İki Farklı Analiz Yönteminin Karşılaştırılması <i>Mert Hacıemiroğlu, Cenk Alhan</i> .....	241
Deprem Bölgelerinde Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel Kullanımının Yapı Uygulamaları Üzerinden İncelenmesi <i>Aygül Ceylan, Z. Canan Girgin</i> .....	251
Betonarme Kirişlerde Çelik Halat Kullanımının Yapısal Davranışa Olan Etkisinin İrdelenmesi <i>Muzaffer Yazar, Beyza Taşkın, Metin Aydoğan</i> .....	265
Az Katlı Binalar İçin Çapraz Yay Gruplarından Oluşan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi <i>Varol Karayel, Ercan Yüksel, Tansu Gökçe, Fatih Şahin</i> .....	277
Mevcut Betonarme Binaların Deprem Risklerinin Hızlı Tayinine Yönelik Bir Yaklaşım <i>Ercan Yüksel, Mustafa Altıneller, Varol Karayel, Fatih Şahin</i> .....	301
GFRP Donatı ile Güçlendirilmiş Betonarme Döşemelerin Zımbalama Dayanımının Makine Öğrenmesi ile Belirlenmesi <i>Gamze Doğan, Musa Hakan Arslan</i> .....	317
Sismik İzolasyonlu Binalardaki Rafların En Üst Kat Yerdeğiştirmelerinin Sentetik Pulslar ile Değerlendirilmesi <i>Zafer Kanbir, Z. Metehan Karslıoğlu, Onur Çevik, Cenk Alhan</i> .....	327
Betonarme Kiriş Kesme Dayanımına GFRP Katkısının Değerlendirilmesi <i>Kadir Şengün, Güray Arslan</i> .....	335
Orta Yükseklikteki Bina Sınıfı İçin Uzak ve Yakın Deprem Davranışlarının Sayısal Ortamda İncelenmesi <i>Ahmet Berkay Mostura, Kemal Beyen</i> .....	347

Taban Yalıtımlı Bir Binaın Deprem Davranışının Zaman-Frekans Ortamında Araştırılması <i>Ahmet Özenir, Kemal Beyen</i> .....	359
İki Boyutlu Doğrusal Olmayan Analizlere Dayalı Topoğrafyanın Deprem Yer Büyütmelerine Etkisi ve Hasar Gözlemleri <i>Kemal Beyen</i> .....	379

## **Kıyı ve Deniz Yapıları**

Yüzer Yapının Serbest Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketlerinin OpenFOAM ile Sayısal Modellenmesi <i>Umutcan İnal, Yalçın Yüksel, Ferdi Çakıcı, Emre Kahramanoğlu</i> .....	409
Küp Bloklı Dalgakıranlarda Dalga Yansıması <i>Bilal Ayaz, Cihan Şahin, Yalçın Yüksel</i> .....	419
Dalga Kaynaklı Deniz Tabanı Sıvılaştırmasının Gömülü Altyapılar Etrafında Sayısal Modellemesi <i>S. Utku Yılmaz, V. Ş. Özgür Kırcı, B. Mutlu Sumer</i> .....	427
Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması <i>Yalçın Yüksel, Esin Çevik, Bülent Bayram, Hüseyin Yılmaz, Serdar Beji, Burak Akpınar, Havva Anıl Güner, Yeşim Çelikoğlu, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Tolga Bakırman, Ferdi Çakıcı, Deniz Bayraktar, Fulya İşlek, Umutcan İnal, M. Utku Ögür</i> .....	439
Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi İçin Yeni Bir Platform <i>Elif Girgin, Kadir Aktaş, Salih Ak, Bergüzar Öztunalı Özbahçeci, Ünver Özkol</i> .....	451
Koruma Tabakasında Tetrapod Bloklar Kullanılan Dalgakıran Kesitinin Antifer Bloklar ile Güçlendirilmesi <i>Berkay Akyol, Günay Gazaloğlu, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Işıkhan Güler, Ahmet Cevdet Yalçiner, Ayşen Ergin</i> .....	463
İzmir Körfezinde Deniz Taşkınlarının İncelenmesi <i>Bergüzar Özbahçeci, Doğan Kısacık, Salih Ak</i> .....	473
Konteyner Terminali Yanaşma Yeri Kapasite Ölçüm Kriterlerinin Değerlendirilmesi <i>İdil Esra Elver, Esin Çevik</i> .....	487
Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Olası Etkileri <i>Fulya İşlek, Yalçın Yüksel, Cihan Şahin, Furkan Yüksel</i> .....	503
Kurupelit Yat Limanında Meydana Gelen Kıyı Şeridi Değişiminin Sayısal Modellenmesi <i>Yağız Arda Çiçek, Barış Ufuk Şentürk, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Ahmet Cevdet Yalçiner, Işıkhan Güler, Ayşen Ergin</i> .....	513
Akarsularda Tsunami Dalgası İlerlemesinin Deneysel İncelenmesi <i>H. Anıl Güner, Yalçın Yüksel, Ahmet Cevdet Yalçiner, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Şükrü Ersoy, Cem Yılmaz, Onur Altıntaş, Barış Aydın, Merve Ayaz</i> .....	523
Kılavuz Kazıklarla Sabitlenen T-Tipi Bir Yüzer İskelenin Dalga Yüğü Etkisi Altındaki Tepkilerinin Nümerik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi <i>Murat Aksel, Mehmet Yusuf Erbişim, Fatih Buğrahan Yorğun, Şevket Çokgör, Oral Yağcı</i> .....	533
Karadeniz'de Spektral Pik Enerjinin Eğilim Analizi <i>Emine Acar, Adem Akpınar, Murat Kankal, Khalid Amarouche</i> .....	545

Ölçeklendirilmiş Ocean Tec Dalgı Enerji Dönüştürücüsünün Karadeniz'in Cide Kıyısındaki Performansı <i>Bilal Bingölbali, Ajab Gul Majidi, Adem Akpınar</i> .....	553
--	-----

## **Ulaştırma**

---

E-Skuter Şarj İstasyonu Yerlerinin Seçimine İlişkin Bir Yöntem <i>Şimal Eker, Selim Dündar</i> .....	563
E-Skuterlerin Bağdat Caddesi Trafığıne Etkilerinin İncelenmesi <i>Selim Dündar, Ecem Şentürk Berktaş, Milas Ceren Höke, İrem Merve Ulu</i> .....	577
Türkiye'deki Tarihi Kent Merkezlerinde Bisikletli Ulaşım: Sorunlar ve Çözüm Önerileri <i>Gökçe Aydın, Engin Aktürk, Büşra Aktürk</i> .....	593
Bataryalı Elektrikli Otobüsler İçin Kablosuz Şarj İstasyonlu Durakların Belirlenmesi <i>İlyas Cihan Aksoy, Mehmet Metin Mutlu, Yalçın Alver</i> .....	603
Toplu Taşıma Akıllı Kart Verileri ile Yolculuk Transfer Duraklarının Kestirimi <i>Fehmi Can Özer, Hediye Tüydeş Yaman</i> .....	615
İşıksız Kavşaklarda Sürücüsüz Taşıtlarla Ağır Taşıt Etkileşimlerinin İrdelenmesi <i>Serhan Tanyel, İlgin Gökaşar, Selim Dündar, Ali Topal, Burak Şengöz</i> .....	621
Kesintisiz Akımlarda Bağlantılı Otonom Trafikte Makine Öğrenimi ile Gecikme Tahmini <i>İlgin Gökaşar, Kaan Aytakin</i> .....	629
SNS Kaza-Olay Tespit Algoritmasının Bağlı Otonom Araç Trafığındeki Performansının Değerlendirilmesi <i>İlgin Gökaşar, Sarp Semih Özkan, Alperen Timuroğulları</i> .....	637
İnsansız Teslimat Robotlarının İstanbul'da Pilot Bölge Uygulamalarının Değerlendirilmesi <i>İlgin Gökaşar, Mehmet Akıncılar</i> .....	645
Geogrid Takviyeli Yapı Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi <i>Buğra Sinmez</i> .....	653
Tren Gecikmelerinin Doğru Tahmin Edilmesinde Verinin Önemi <i>Mehmet Şirin Artan, İsmail Şahin</i> .....	663
Yüksek Hızlı Demiryolları: Dünya ve Türkiye Perspektifi <i>İsmail Şahin</i> .....	677

## **Yapı Malzemeleri**

---

Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi <i>İlbüke Uslu, Can Baran Aktaş, İsmail Özgür Yaman</i> .....	695
Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi <i>Cavit Çağatay Kızıltepe, İsa Yüksel, Serdar Aydın, Ayşenur Sığındere</i> .....	707



Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi <i>Yasin Engin</i> .....	717
Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri <i>Berna Orhon Kolukısa, Bimen Kadiroğlu, Mert Yücel Yardımcı</i> .....	731
Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi <i>Ahmet Reha Günay, Sami Karadeniz</i> .....	743
Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası <i>Mehmet Özmen, Barış Yiğit Canpolat, Hakan Karatay, Banu Yeşim Büyükkakıncı</i> .....	767
Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber <i>Tunahan Beşer, Burak Erdal, Faraz Malik, Serhat Sarıkaya</i> .....	781

## **Yapım Yönetimi**

Sürdürülebilir Döngüsel Ekonomi: Gelişimi ve Temel Prensipleri <i>Rıfat Akbıyıklı</i> .....	795
İnşaat Sektörü Proje Yöneticisi Rol ve Becerileri: Bir Literatür İncelemesi <i>Rıfat Akbıyıklı, Bilge Akbıyıklı</i> .....	811
Dünyanın ve Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretim Planı <i>Çetin Önder İncekara</i> .....	831
Kanal-İstanbul ÇED Raporundaki Yapım Yönteminin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarıyla Uzlaşmaz Çelişkileri <i>M. Necat Özgür</i> .....	845
İnşaat Mühendisliğinde Etik Kavramı ve Önemi <i>Mehmet Çakır</i> .....	859
Çelik Yapılarda Tasarım Yoluyla İş Güvenliğinin Sağlanması İçin Algoritma <i>Selçuk İz, Özgür Köylüoğlu</i> .....	867

## **Hidrolik ve Su Kaynakları**

Yıllık Standart Süreli Maksimum Yağışların Durağan Olmayan Frekans Analizi <i>Ayşegül Yarcı, Türkay Baran</i> .....	881
Gediz Havzası Örneğinde Entropi Tabanlı Bölgesel Yağış Tahmini <i>Özgür Bozoğlu, Türkay Baran, Filiz Barbaros</i> .....	889
Güncel Hidrometeorolojik Ölçüm Ağı Olmayan Bir Havzada Su Potansiyeli Hesabı: Gürcistan Örneği <i>Eray Usta, Aldonat Köksal</i> .....	899
Milas İlçesinde Rusle Yöntemi Kullanılarak Erozyon Riskinin Belirlenmesi <i>Kutay Yılmaz, Yakup Darama</i> .....	909
Termal Deşarjın Kıyı Bölgesinde Seyrelme Sürecinin Nümerik Modelleme Yöntemiyle İncelenmesi <i>Murat Aksel, Fatih Buğrahan Yorğun, Mehmet Yusuf Erbişim, Şevket Çokgör, Oral Yağcı</i> .....	919

**Geoteknik**

---

Temiz Kumlar İçerisinde Yer Alan Tünellerin Kazıklar Üzerinde Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması <i>Cansu Günday Uras, Berna Unutmaz</i> .....	931
Çok Geniş Alanlardaki Saha Beton Kaplamalarında Taşınabilecek Yük Üzerine Bir Çalışma <i>Pınar Ateş, Ali Gerçek, Gürkan Özden</i> .....	945

## SUNUŞ

İnşaat Mühendisleri Odası, kurulduğu günden bu yana meslek alanının gelişimine büyük önem vermiş, bu gelişimin yönünü tayin edecek önemli çalışmalara imza atmış, bu çalışmalarla Türkiye’de inşaat mühendisliği meslek alanının tüm alt disiplinlerinde ciddi bir bilgi birikimini bünyesinde toplamıştır. Akademiden uygulamaya tüm meslektaşları buluşturan sempozyumlar, kongreler ve konferanslar, bu birikimi sağlayan başlıca Oda etkinlikleri olmuştur.

İMO, toplumsal yararı gözetken, meslektaşlarının hak ve çıkarlarını savunan bir yapı olmasının yanı sıra, mesleki konularda oluşturduğu görüşlerle, mesleki gelişime sunduğu katkılarla alanda yürütülen tartışmaların hep merkezinde olmuştur. Hem akademide hem de uygulamada görev yapan üyelerimizin potansiyelini açığa çıkarmayı başaran etkinliklerle bu tartışmalara yön veren, belirleyici ve geliştirici bir odak noktası olmuştur.

Mesleki yetkinliğin mesleki sorumluluğun bir gereği olduğu bilinciyle mesleki-bilimsel etkinlikler düzenleme, meslek içi eğitim sınırlarını aşarak hayat boyu eğitim anlayışını uygulama çabası içinde olan İMO, inşaat mühendisliği alanına ve onun ilişkili olduğu tüm bilimsel-teknolojik gelişmelere hakim olarak, ortaya çıkan yeni sorunlara cevaplar üretmeyi görev bilmıştır.

Meslek alanımızdaki güncel vakıf olmak, buna yönelik geliştirici çalışmalar yapmak, mesleğimize ve meslektaşlarımızın gelişimine verdiğimiz önemin bir ifadesi olmakla birlikte toplumsal sorumluluğumuzun da bir gereğidir.

Bu yıl 18.’sini düzenlediğimiz Türkiye İnşaat Mühendisliği Teknik Kongre ve Sergisinin, bahsi geçen çalışmaların başında gelenlerinden biri olduğunu söylemek yerinde olacaktır. İlki 1962 yılına dayanan ve güçlü bir tarihe sahip olan kongrenin bugün de önemli bir ihtiyaca karşılık geldiği açıktır.

Geride bıraktığımız iki yılda, dünya çapında yaşanan salgın birçok etkinliği sekteye uğratmış, salgın nedeniyle kongreler ve sempozyumlar iptal edilmiş ya da çevrimiçi düzenlenmiş, ne yazık ki Odamızın düzenlediği bilimsel etkinlikler de kaçınılmaz olarak benzer sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sıkıntılı sürecin ardından Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. Teknik Kongre ve Sergisi, çeşitli ülkelerden gelen davetli konuşmacılarıyla, Türkiye’nin önde gelen bilim insanlarının katılımıyla ve çeşitli disiplinlerde sunulan onlarca bildiriyle son yıllarda düzenlenen en büyük bilimsel toplantılardan biri olarak kabul edilmektedir.

Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. Teknik Kongre ve Sergisi gibi dünya çapında saygın bir etkinliği düzenlemenin gururuyla, bu büyük etkinliğin hazırlanmasında emeği geçen değerli yürütme ve düzenleme kurullarında görev alan meslektaşlarımıza, katkılarıyla güç veren danışma ve bilim kurulu üyesi meslektaşlarımıza ve değerli bildiri sahiplerine teşekkür ediyoruz. Kongrenin, meslek alanımızın bugünü ve yarını için önemli katkılar sunacağına inanıyoruz.

**TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası**  
**48. Dönem Yönetim Kurulu**



## ÖNSÖZ

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası öncülüğünde, çok değerli meslektaşlarımızla, 1962 yılından beri birikimlerimizi ortaya koyduğumuz, deneyimlerimizi paylaştığımız, ayrıntıları tartıştığımız, uygulamalardaki sonuçları profesyonel yaşamımıza ve bilim dünyasına kazandırdığımız Teknik Kongre ve Sergilerinin on sekizincisi 7-9 Kasım 2022 tarihleri arasında, İstanbul Teknik Üniversitesi Süleyman Demirel Kültür Merkezi Salonlarında gerçekleştirilmektedir.

18. Teknik Kongre ve Sergisi kapsamında, İnşaat Mühendisliği mesleğinin toplumda yarattığı etkiler ile mesleği etkileyen unsurlar teknik ve yönetsel boyutlarıyla tartışılacaktır. İnşaat Mühendisliği faaliyetlerinin disiplin içi ve disiplinler arası planlama, tasarım, uygulama ve işletim alanlarındaki akademik ve profesyonel birikimlerini yansıtan farklı bakış açıları, İnşaat Mühendisliği öğrencileri başta olmak üzere tüm katılımcılarla düzenlenecek etkinliklerde paylaşılmaya çalışılmıştır. İnşaat Mühendisliği alanındaki gelişmelerin, kamu yararını da ön planda tutacak şekilde yaygınlaşmasını sağlamak için üniversite ve sonrasında eğitim faaliyetleri arasında bütünlük sağlamak 18. Teknik Kongre ve Sergisi'nin temel amaçları arasındadır.

Bu doğrultuda olmak üzere “İnşaat Mühendisliğinde Geçmişten Geleceğe” başlığı altında, Eğitim ve Derin Öğrenme, Etik, Bilişim, İstihdam, Sürdürülebilirlik, Planlama ve Kalkınma, Tasarım ve Uygulamada Yenilikçi Teknolojiler ve Malzemeler, Afet Dirençliliği, Kentsel Dönüşüm Yapılarda Servis Ömrü, İş Güvenliği, Yetkin Mühendislik, Yapı Kalite ve Sertifikasyonu, Finansman ve Mevzuat, Kentsel Erişilebilirlik ve Geleceğin Şehirleri, Yapılan Çevrede Karbon Ayak İzi ve Yeşil Mutabakat, Enerji, Yapım Yöntemleri ve Yap-İşlet-Devret Modeli temalarının işlenmesi hedeflenmiştir.

Düzenlenen panel ve oturumlarda, konusunda uzman katılımcılar tarafından sunulacak görüş ve önerilerin tüm meslektaş ve ilgililerce kayda değer bulunacağından eminiz. Medeniyetin temel taşlarını oluşturan inşaat mühendisleri teknik olduğu kadar sosyal temelleri ile de mesleklerini tartışacakları ortak bir platformu paylaşmanın heyecanı içerisindeyiz.

Ulusal ve uluslararası tüm gelişmeleri, değişimleri, değinilen ve öncelikli konuları, deneyim ve birikimleri ortak bir bilgi havuzunda toplama amacı ile Kongre hazırlıklarını yapan Yürütme Kurulumuz, farklı yoğunlukta gerçekleştirilecek bir program oluşturmaya çalışmıştır.

18. Teknik Kongre ve Sergisi kapsamında gönderilen bildirilerin yoğunluğu sevindirici bir ilgi göstergesi oluşturmuş, bildiriler nitelikleri doğrultusunda yüksek kriterler çerçevesinde değerlendirilerek, aralarından 73 adet bildiri seçilmiştir. Kongremizde farklı bir içerik akışı olarak bildiriler yoğun ve paralel oturumlarda sunulmuş, ulusal ve uluslararası önemli konuları kapsayan panel oturumlarda ise sektörün güncel ve ağırlıklı sorunlarına yer verilmiştir. Panel oturumları;

- Uğur Ersoy moderatörlüğünde, Mustafa Tokyay, Metin Hüsem, Mustafa Çobanoğlu, Candegir Ceylan katılımları ile “İnşaat Mühendisliği Eğitimi”
- Feyza Çinicioğlu moderatörlüğünde, Rasin Düzceer, Nurdan Memişoğlu, Cenk Alhan, Ahmet Arslan katılımları ile “İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Geotekniğin Yeri”
- Tuğrul Tankut moderatörlüğünde, Betül Çotuksöken, Beno Kuryel, Gamze Yücesan Özdemir katılımlarıyla “Toplumda Mühendisin Yeri Sorumlulukları ve Etik (Levent Darı Anısına)”

gerçekleşecektir. Tüm panel başkanları ve katılımcılarına bilgi ve deneyimleri ile katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Zorlu pandemi yılları sonrasında 18. Teknik Kongre ve Sergisi'nin gerçekleşebilmesi için kongre olanaklarını tahsis ederek önemli destek veren İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Oturum başkanlıklarını üstlenerek Kongremizi onurlandıran Erkan Özer, Cüneyt Vatansever, Alper İlki, Medine İspir, Zekai Celep, Hafzullah Aksoy, Ayşen Ergin, Özgür Kırca, Murat Kuruoğlu, Mustafa Tokyay, Özkan Şengül, Yalçın Yüksel, Güngör Evren, Ilgın Gökaşar, Işıkhan Güler, Beyza Taşkın, Cem Demir, İsmail Şahin, Nuray Aydınoglu, Eren Vuran, Murat S. Kırçıl, Oğuz Cem Çelik ve Banu İkizler'e teşekkür ederiz.

Teknik Kongremizde davetli konuşmacı olarak bizi onurlandıran Ayşen Ergin, Orak Büyüktürk, Katrin Beyer, Zekai Şen, Mehmet Ali Taşdemir, Haluk Gerçek, Michael Fardis ve Elyas Ghaffori'ye, Tema dersi sunucuları Işıkhan Güler ve Emre Örtemiz'e

Kongremizde yer alan Yürütme, Düzenleme, Danışma, Bilim Kurul Üyelerimize ve Kongre Sekreteryasına,

Değerli bildiri sahiplerine, katılımcılara, delegelere, meslektaşlara ve izleyicilerle birlikte tartışmalar yürüteceğimiz tüm bilim adamlarına, sektör yetkililerine ve temsilcilerine;

Kongremiz sponsorları, ÇİMSA Çimento Sanayi Tic. A.Ş., ABS Yapı Elemanları San. Tic. Ltd. Şti., Türkiye Prefabrik Birliği, Hilti İnşaat Malzemeleri Ticaret Anonim Şirketi, AKÇANSA Çimento Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, YAPI MERKEZİ, Altınok Müşavirlik Mühendislik Hizmetleri Anonim Şirketi, TİS Teknolojik İzolatör Sistemleri Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, BATIÇİM Batı Anadolu Çimento Sanayi Anonim Şirketi, SAS-STEEL Turkey Çelik Ticaret Ltd. Şirketi, AYES Çelik Hasır ve Çit Sanayi Anonim Şirketi, OMEGA KONSEPT Proje ve Yapı Tasarım Limited Şirketi, Beton ve Harç Kimyasal Katkı Üreticileri Derneği, MPI Mühendislik Proje İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, MEINHARDT Mühendislik ve Müşavirlik Limited Şirketi, İDE Yapı Anonim Şirketi'ne

Kongremiz planlama, düzenleme süreçlerinde mesleki görev sorumluluğunun ilerisinde sergiledikleri detaylı yoğun çalışmalarından dolayı İnşaat Mühendisleri Odası bünyesindeki mesai arkadaşlarımıza özveri dolu çalışmaları ve katkılarından dolayı teşekkür eder, ortak çalışmalarımızın devamını dileğimizi paylaşmak isteriz.

Etkin ve kapsamlı bir mesleki buluşma gerçekleştirme çabası süresince bizlerle birlikte olan Yönetim Kurulu üyemiz sevgili Levent Darı ve 48. Dönem Kıyı ve Deniz Uzmanlık Kurulu üyemiz Prof. Dr. Adnan Akyarlı'nın kaybı büyük üzüntümüzdür.

İleriye dönük süreklilik sağlayacak adımlar ve ortak tartışma platformlarında dinamizm kazandıracak mesleki atılımlar gerçekleştirmesi dileği ile 18. Teknik Kongre ve Sergisine katılan tüm meslektaşlara ve ilgililere saygılarımızı sunarız.

Prof. Dr. Ahmet Cevdet Yalçınler  
Türkiye İnşaat Mühendisliği  
18. Teknik Kongre ve Sergisi  
Yürütme Kurulu Başkanı

## 18. TEKNİK KONGRE KURULLARI

### Yürütme Kurulu

Prof. Dr. Ahmet Cevdet Yalçın (18. Teknik Kongre Başkanı)  
Taner Yüzgeç (İnşaat Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu Başkanı)  
Doç. Dr. Beyza Taşkın  
Doç. Dr. Hediye Tüydeş Yaman  
Doç. Dr. Serdar Aydın  
Nusret Suna  
Levent Darı  
Gülay Özdemir  
Gülsun Parlar  
Serap Dedeoğlu

### Düzenleme Kurulu

Prof. Dr. Alper İlki  
Prof. Dr. Berna Unutmaz  
Prof. Dr. Erdem Canbay  
Prof. Dr. Hafzullah Aksoy  
Prof. Dr. Halim Ceylan  
Prof. Dr. İsmail Şahin  
Prof. Dr. Mustafa Laman  
Prof. Dr. Nuray Denli Tokyay  
Prof. Dr. Özkan Şengül  
Prof. Dr. Rifat Akbıyıklı  
Prof. Dr. V. Şadan Özgür Kırcı  
Prof. Dr. Yalçın Yüksel  
Doç. Dr. Gürkan Emre Güranlı  
Doç. Dr. Mert Yücel Yardımcı  
Doç. Dr. R. Secer Orkun Keskin  
Doç. Dr. Sadık Can Girgin  
Dr. Öğr. Üyesi Halit Cenan Mertol  
Dr. Öğr. Üyesi Özgür Köylüoğlu

### Danışma Kurulu

Prof. Dr. Atilla Ansal  
Prof. Dr. Ayşen Ergin  
Prof. Dr. Erbil Öztekin  
Prof. Dr. Erkan Özer  
Prof. Dr. Faruk Karadoğan  
Prof. Dr. Feyza Çinicioğlu  
Prof. Dr. Güngör Evren  
Prof. Dr. Haluk Sucuoğlu  
Prof. Dr. Hulusi Özkul  
Prof. Dr. İlhan Avcı  
Prof. Dr. Kutay Özaydın  
Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir  
Prof. Dr. Mustafa Erdik  
Prof. Dr. Mustafa Tokyay  
Prof. Dr. Nesrin Yardımcı  
Prof. Dr. Mehmet Nuray Aydınoglu  
Prof. Dr. Polat Gülkan  
Prof. Dr. Sedat Kabdaşlı  
Prof. Dr. Tuğrul Tankut  
Prof. Dr. Uğur Ersoy  
Prof. Dr. Zekai Celep  
Prof. Dr. Zekeriya Polat  
Prof. Dr. Zeki Hasgür  
Dr. Engin Karaesmen  
Dr. Erhan Karaesmen

### **Bilim Kurulu**

Prof. Dr. Abdussamet Arslan	Prof. Dr. Metin Hüsem
Prof. Dr. Adem Akpınar	Prof. Dr. Murat Altuğ Erberik
Prof. Dr. Adnan Akyarlı	Prof. Dr. Mutlu Sümer
Prof. Dr. Ahmet Tortum	Prof. Dr. Nabi Yüzer
Prof. Dr. Ahmet Yakut	Prof. Dr. Nadir Yayla
Prof. Dr. Ali Payidar Akgüngör	Prof. Dr. Oğuz Cem Çelik
Prof. Dr. Ayfer Erken	Prof. Dr. Özer Çinicioğlu
Prof. Dr. Ayşe Daloğlu	Prof. Dr. Özgür Avşar
Prof. Dr. Beliz Özorhon	Prof. Dr. Özgür Özçelik
Prof. Dr. Bilge Doran	Prof. Dr. Recep İyisan
Prof. Dr. Bülent Akbaş	Prof. Dr. Sabriye Banu İkizler
Prof. Dr. Canan Taşdemir	Prof. Dr. Sadık Öztoprak
Prof. Dr. Cem Topkaya	Prof. Dr. Selçuk Türkel
Prof. Dr. Cem Yalçın	Prof. Dr. Selim Altun
Prof. Dr. Cemalettin Dönmez	Prof. Dr. Serhan Tanyel
Prof. Dr. Ebru Vesile Öcalır Akunal	Prof. Dr. Sinan T. Erdoğan
Prof. Dr. Elçin Kentel Erdoğan	Prof. Dr. Soner Haldenbilen
Prof. Dr. Emel İrtem	Prof. Dr. Şakir Erdoğan
Prof. Dr. Emine Ağar	Prof. Dr. Şemsi Yazıcı
Prof. Dr. Emine Beyhan Yeğen	Prof. Dr. Şevket Çokgör
Prof. Dr. Eray Baran	Prof. Dr. Şevket Murat Şenel
Prof. Dr. Ercan Yüksel	Prof. Dr. Taha Taşkiran
Prof. Dr. Erdal İrtem	Prof. Dr. Tayfun Dede
Prof. Dr. Ergun Gedizlioğlu	Prof. Dr. Turan Durgunoğlu
Prof. Dr. Esin Çevik	Prof. Dr. Turan Özturan
Prof. Dr. Filiz Piroğlu	Prof. Dr. Türkay Baran
Prof. Dr. Gökmen Tayfur	Prof. Dr. Uğurhan Akyüz
Prof. Dr. Güray Arslan	Prof. Dr. Yetiş Şazi Murat
Prof. Dr. Halil Karahan	Prof. Dr. Yılmaz Akkaya
Prof. Dr. Hüseyin Ceylan	Prof. Dr. Zerrin Bayrakdar
Prof. Dr. İsa Yüksel	Doç. Dr. A. Necmettin Gündüz
Prof. Dr. İsmail Aydın	Doç. Dr. Aslı Pelin Gürgün
Prof. Dr. İsmail Özgür Yaman	Doç. Dr. Baki Öztürk
Prof. Dr. Kambiz Ramyar	Doç. Dr. Barlas Özden Çağlayan
Prof. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu	Doç. Dr. Bergüzar Özbahçeci
Prof. Dr. Kemal Beyen	Doç. Dr. Cem Aydemir
Prof. Dr. Kemal Önder Çetin	Doç. Dr. Cihan Şahin
Prof. Dr. Konuralp Girgin	Doç. Dr. Cüneyt Vatansever
Prof. Dr. Kubilay Cihan	Doç. Dr. Ebru Eriş
Prof. Dr. Kutay Orakçal	Doç. Dr. Engin Aktaş
Prof. Dr. Kutlu Darılmaz	Doç. Dr. Gökçen Bombar
Prof. Dr. Melih Yanmaz	Doç. Dr. Havva Anıl Arı Güner
Prof. Dr. Mete İncecik	Doç. Dr. Havva Nur Kılıç
Prof. Dr. Metin Aydoğan	Doç. Dr. Hüseyin Yiğiter



Doç. Dr. İbrahim Serkan Mısır  
Doç. Dr. Mehmet Öztürk  
Doç. Dr. Murat Özen  
Doç. Dr. Murat Serdar Kırçıl  
Doç. Dr. Mustafa Doğan  
Doç. Dr. Niyazi Özgür Bezgin  
Doç. Dr. Onur Tezcan  
Doç. Dr. Özkan Kale  
Doç. Dr. Rıfat Tür  
Doç. Dr. Sedat Sert  
Doç. Dr. Süheyla Pelin Çalışkanelli  
Doç. Dr. Utkan Mutman  
Doç. Dr. Yalçın Alver  
Doç. Dr. Yeşim Çelikoğlu

Dr. Öğr. Üyesi Bengü Sünbül Güner  
Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt Baykal  
Dr. Öğr. Üyesi Doğan Kısacık  
Dr. Öğr. Üyesi Gülizar Özyurt Tarakçıoğlu  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rıfat Kahyaoğlu  
Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer Börekçi  
Dr. Öğr. Üyesi Ö. Tuğrul Turan  
Dr. Öğr. Üyesi Selim Dündar  
Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe Anılan  
Dr. Işıkhan Güler  
Dr. Murat Kuruoğlu  
Dr. Tuğçe Yüksel  
Yük. İnş. Müh. Cahit Kocaman

**Sekreterya**

Serap Dedeoğlu  
Ceylan Özkul  
Derya Cavunt

Yavuz Cavunt  
Cemal Çimen

## SPONSORLAR

### Resmi Sponsorlar



### Ana Sponsor



### Destekleyen Kuruluşlar



Kongremize destek veren tüm sponsorlarımıza teşekkür ederiz.

## 18. Teknik Kongre ve Sergisi Programı

### 7 Kasım 2022, Pazartesi

09.00 - 09.40	Kayıt
09.40 - 09.50	Açılış Dinletisi
09.50 - 10.20	Açılış Konuşmaları
10.20 - 11.00	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> 2023'e Doğru Vizyon - Cumhuriyetin 100. Yılında İnşaat Mühendisliği Tarihi Sürecinin Değerlendirilmesi ve Yeni Ufuklar <b>Prof. Dr. Ayşen Ergin</b>
11.00 - 11.15	<b>Toplu Fotoğraf Çekimi - Kahve Arası</b>
<b>1. Oturum</b>	
<b>A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Erkan Özer, Doç. Dr. Cüneyt Vatansever</b>	
11.15 - 11.55	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Structural Sensing and Concrete Innovations for Resilience and Sustainability (Dayanıklılık ve Sürdürülebilirlik İçin Yapısal Algılama ve Somut Yenilikler) <b>Prof. Dr. Oral Büyükoztürk</b>
11.55 - 12.10	Türkiye'de Kaydedilen Depremlerin Davranış Spektrumlarının Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırması <i>H. Polat Gülkan, Vesile Hatun Akansel, Erol Kalkan</i>
12.10 - 12.25	İki Boyutlu Doğrusal Olmayan Analizlere Dayalı Topoğrafyanın Deprem Yer Büyütmelerine Etkisi ve Hasar Gözlemleri <i>Kemal Beyen</i>
12.25 - 12.40	Çift Cidarlı İçi Beton Dolu Çelik Tüplerin Eksenel Basınç Altında İnelastik Davranışı <i>Berika Ceren Cihan Yılmaz, Ebru Okşaksin, Oğuz Cem Çelik</i>
12.40 - 13.30	<b>Yemek Arası</b>
<b>2. Oturum</b>	
<b>A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Alper İlki, Doç. Dr. Medine İspir</b>	
13.30 - 14.10	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Key Features of the Masonry Chapter of the new Eurocode 8 Part 1-2 (Yeni Eurocode 8 Bölüm 1-2'nin Yığma Yapılar Bölümünün Temel Özellikleri) <b>Assoc. Prof. Dr. Katrin Beyer</b>
14.10 - 14.25	Mevcut Betonarme Bir Binanın Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi ile Sismik Risk Değerlendirmesi <i>Çağrı Çetik, Sadık Can Girgin, Esra Bengü Kenar</i>
14.25 - 14.40	Tarihi Kesme Taş Binaların Düzlem dışı Sismik Performansının Değerlendirmesi İçin Deneysel Ötelenme Limitleri <i>İbrahim Serkan Mısıır, Fikret Kuran, Gökhan Yücel, Ali Cihan Demir, Ege Yeşilbaş, Cansu Beril Eser, Serap Topçu, Ömer Aldemir</i>
14.40 - 14.55	Betonarme Çerçevelerde Yumuşak Kat Etkilerinin Yeni Nesil Dolgu Duvarlar ile Azaltılması <i>Prost Iverden Balenda Bakala, İbrahim Serkan Mısıır, Ömer Aldemir</i>
14.55 - 15.10	Cam Lifi ile Güçlendirilmiş Alçı (CLGA) Panellerle Üretilen Döşeme Sisteminin İncelenmesi Döşeme Sisteminin İncelenmesi <i>Beyza Kapucu Güzelbulut, Oğuz Cem Çelik</i>
15.10 - 15.25	<b>Kahve Arası</b>

## 7 Kasım 2022, Pazartesi

3. Oturum	
A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Zekai Celep, Prof. Dr. Hafzullah Aksoy	
15.25 - 16.05	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Dünya ve Türkiye’de Yeraltı Suları Yönetimi <b>Prof. Dr. Zekai Şen</b>
16.05 - 16.20	Yıllık Standart Süreli Maksimum Yağışların Durağan Olmayan Frekans Analizi <i>Ayşegül Yarcı, Türkey Baran</i>
16.20 - 16.35	Gediz Havzası Örneğinde Entropi Tabanlı Bölgesel Yağış Tahmini <i>Özgür Bozoğlu, Türkey Baran, Filiz Barbaros</i>
16.35 - 16.50	Güncel Hidrometeorolojik Ölçüm Ağı Olmayan Bir Havzada Su Potansiyeli Hesabı: Gürcistan Örneği <i>Eray Usta, Aldonat Köksal</i>
16.50 - 17.05	Milas İlçesinde Rusle Yöntemi Kullanılarak Erozyon Riskinin Belirlenmesi <i>Kutay Yılmaz, Yakup Darama</i>
17.05 - 17.20	Termal Deşarjın Kıyı Bölgesinde Seyrelme Sürecinin Nümerik Modelleme Yöntemiyle İncelenmesi <i>Murat Aksel, Fatih Buğrahan Yorğun, Mehmet Yusuf Erbişim, Şevket Çokgör, Oral Yağcı</i>
17.20 - 17.30	<b>Kahve Arası</b>
Panel - İnşaat Mühendisliği Eğitimi	
17.30 - 19.00	Moderatör: Uğur Ersoy - Mustafa Tokyay - Metin Hüsem - Mustafa Çobanoğlu - Candeğer Ceylan

## 8 Kasım 2022, Salı

4. Oturum	
A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Ayşen Ergin, Prof. Dr. Özgür Kırca	
09.30 - 09.50	Tema: Kanal İstanbul <i>Işıkhan Güler</i>
09.50 - 10.05	Koruma Tabakasında Tetrapod Bloklar Kullanılan Dalgakıran Kesitinin Antifer Bloklar ile Güçlendirilmesi <i>Berkay Akyol, Günay Gazaloğlu, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Işıkhan Güler, Ahmet Cevdet Yalçiner, Ayşen Ergin</i>
10.05 - 10.20	Kurupelit Yat Limanında Meydana Gelen Kıyı Şeridi Değişiminin Sayısal Modellenmesi <i>Yağız Arda Çiçek, Barış Ufuk Şentürk, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Ahmet Cevdet Yalçiner, Işıkhan Güler, Ayşen Ergin</i>
10.20 - 10.35	Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi İçin Yeni Bir Platform <i>Elif Girgin, Kadir Aktaş, Salih Ak, Bergüzar Öztunalı Özbahçeci, Ünver Özkol</i>
10.35 - 10.50	İzmir Körfezinde Deniz Taşkınlarının İncelenmesi <i>Bergüzar Özbahçeci, Doğan Kısacık, Salih Ak</i>
B - Salonu - Oturum Başkanı: Dr. Murat Kuruoğlu	
09.30 - 09.50	Sürdürülebilir Döngüsel Ekonomi: Gelişimi ve Temel Prensipleri <i>Rifat Akbıyıklı</i>
09.50 - 10.05	İnşaat Sektörü Proje Yöneticisi Rol ve Becerileri: Bir Literatür İncelemesi <i>Rifat Akbıyıklı, Bilge Akbıyıklı</i>

10.05 - 10.20	Dünyanın ve Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretim Planı <i>Çetin Önder İncekara</i>
10.20 - 10.35	Kanal-İstanbul ÇED Raporundaki Yapım Yönteminin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarıyla Uzlaşmaz Çelişkileri <i>M. Necat Özgür</i>
10.35 - 10.50	Çelik Yapılarda Tasarım Yoluyla İş Güvenliğinin Sağlanması İçin Algoritma <i>Selçuk İz, Özgür Köylüoğlu</i>
10.50 - 11.05	<b>Kahve Arası</b>

## 8 Kasım 2022, Salı

<b>5. Oturum</b>	
<b>A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Mustafa Tokyay, Prof. Dr. Özkan Şengül</b>	
11.05 - 11.45	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Yapılarda En Az 100 Yıllık Tasarım Servis Ömrü İçin Bir Yöntem <b>Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir</b>
11.45 - 12.05	Tema: Yapı Sektöründe Dijital Dönüşüm: 3D Yazıcı Teknolojisi ile Beton Üretimi <i>Emre Örtemiz</i>
12.05 - 12.20	Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi <i>İlbüke Uslu, Can Baran Aktaş, İsmail Özgür Yaman</i>
12.20 - 12.35	Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi <i>Cavit Çağatay Kızıltepe, İsa Yüksel, Serdar Aydın, Ayşenur Sığındere</i>
12.35 - 12.50	Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber <i>Tunahan Beşer, Burak Erdal, Faraz Malik, Serhat Sarıkaya</i>
12.50 - 13.05	Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri <i>Berna Orhon Kolukisa, Bimen Kadiroğlu, Mert Yücel Yardımcı</i>
<b>B - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Yalçın Yüksel</b>	
12.05 - 12.20	Dalga Kaynaklı Deniz Tabanı Sıvılaştırmanın Gömülü Altyapılar Etrafında Sayısal Modellemesi <i>S. Utku Yılmaz, V. Ş. Özgür Kırca, B. Mutlu Sümer</i>
12.20 - 12.35	Kılavuz Kazıklarla Sabitlenen T-Tipi Bir Yüzer İskelenin Dalga Yüğü Etkisi Altındaki Tepkilerinin Nümerik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi <i>Murat Aksel, Mehmet Yusuf Erbişim, Fatih Buğrahan Yorğun, Şevket Çokgör, Oral Yağcı</i>
12.35 - 12.50	Karadeniz'de Spektral Pik Enerjinin Eğilim Analizi <i>Emine Acar, Adem Akpınar, Murat Kankal, Khalid Amarouche</i>
12.50 - 13.05	Ölçeklendirilmiş Ocean Tec Dalga Enerji Dönüştürücüsünün Karadeniz'in Cide Kıyısındaki Performansı <i>Bilal Bingölbali, Ajab Gul Majidi, Adem Akpınar</i>
13.05 - 13.50	Yemek Arası
<b>Panel - İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Geotekniğin Yeri</b>	
13.50 - 15.15	Moderatör: Feyza Çinicioğlu - Rasin Düzceer - Nurdan Memişoğlu - Cenk Alhan - Ahmet Aslan
15.15 - 15.30	Kahve Arası

## 8 Kasım 2022, Salı

6. Oturum	
A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Güngör Evren, Doç. Dr. Ilgın Göktaşar	
15.30 - 16.10	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Ulaşım planlaması sorunları ve İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı <b>Prof. Dr. Haluk Gerçek</b>
16.10 - 16.25	Tren Gecikmelerinin Doğru Tahmin Edilmesinde Verinin Önemi Mehmet <i>Şirin Artan, İsmail Şahin</i>
16.25 - 16.40	Yüksek Hızlı Demiryolları: Dünya ve Türkiye Perspektifi <i>İsmail Şahin</i>
16.40 - 16.55	Toplu Taşıma Akıllı Kart Verileri ile Yolculuk Transfer Duraklarının Kestirimi <i>Fehmi Can Özer, Hediye Tüydeş Yaman</i>
16.55 - 17.10	Kahve Arası
17.10 - 17.25	Geogrid Takviyeli Yapı Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi <i>Buğra Sinmez</i>
17.25 - 17.40	E-Skuter Şarj İstasyonu Yerlerinin Seçimine İlişkin Bir Yöntem <i>Şimal Eker, Selim Dünder</i>
17.40 - 17.55	E-Skuterlerin Bağdat Caddesi Trafiğine Etkilerinin İncelenmesi <i>Selim Dünder, Ecem Şentürk Berktaş, Milas Ceren Höke, İrem Merve Ulu</i>
17.55 - 18.10	Türkiye'deki Tarihi Kent Merkezlerinde Bisikletli Ulaşım: Sorunlar ve Çözüm Önerileri <i>Gökçe Aydın, Engin Aktürk, Büşra Aktürk</i>
B - Salonu - Oturum Başkanı: Dr. Işıkhan Güler	
16.25 - 16.40	Yüzer Yapının Serbest Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketlerinin OpenFOAM ile Sayısal Modellenmesi <i>Umutcan İnal, Yalçın Yüksel, Ferdi Çakıcı, Emre Kahramanoğlu</i>
16.40 - 16.55	Küp Bloklı Dalgakıranlarda Dalga Yansıması <i>Bilal Ayaz, Cihan Şahin, Yalçın Yüksel</i>
16.55 - 17.10	Kahve Arası
17.10 - 17.25	Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması <i>Yalçın Yüksel, Esin Çevik, Bülent Bayram, Hüseyin Yılmaz, Serdar Beji, Burak Akpınar, Havva Anıl Güner, Yeşim Çelikoğlu, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Tolga Bakırman, Ferdi Çakıcı, Deniz Bayraktar, Fulya İşlek, Umutcan İnal, M. Utku Öğür</i>
17.25 - 17.40	Konteyner Terminali Yanaşma Yeri Kapasite Ölçüm Kriterlerinin Değerlendirilmesi <i>İdil Esra Elver, Esin Çevik</i>
17.40 - 17.55	Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Olası Etkileri <i>Fulya İşlek, Yalçın Yüksel, Cihan Şahin, Furkan Yüksel</i>
17.55 - 18.10	Akarsularda Tsunami Dalgası İlerlemesinin Deneysel İncelenmesi <i>H. Anıl Güner, Yalçın Yüksel, Ahmet Cevdet Yalçiner, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Şükrü Ersoy, Cem Yılmaz, Onur Altuntaş, Barış Aydın, Merve Ayaz</i>

## 9 Kasım 2022, Çarşamba

7. Oturum	
A - Salonu - Oturum Başkanı: Doç. Dr. Beyza Taşkın, Dr. Cem Demir	
09.30 - 09.45	İtme Sürme Yöntemi ile Köprü ve Ayak Tasarımı <i>Alper Naycı, Kutlu Darılmaz</i>

09.45 - 10.00	Deprem Bölgelerinde Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel Kullanımının Yapı Uygulamaları Üzerinden İncelenmesi <i>Aygül Ceylan, Z. Canan Girgin</i>
10.00 - 10.15	Taban Yalıtımlı Bir Binanın Deprem Davranışının Zaman-Frekans Ortamında Araştırılması <i>Ahmet Özenir, Kemal Beyen</i>
10.15 - 10.30	GFRP Donatı ile Güçlendirilmiş Betonarme Döşemelerin Zımbalama Dayanımının Makine Öğrenmesi ile Belirlenmesi <i>Gamze Doğan, Musa Hakan Arslan</i>
10.30 - 10.45	Sismik İzolasyonlu Binalardaki Rafların En Üst Kat Yerdeğiştirmelerinin Sentetik Pulslar ile Değerlendirilmesi <i>Zafer Kanbir, Z. Metehan Karşlıoğlu, Onur Çevik, Cenk Alhan</i>
10.45 - 11.00	Çayırhan Köprüsü Yapım Danışmanlığı ve Ters Sehim Hesapları <i>Tolga Cantürk</i>
<b>B - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. İsmail Şahin</b>	
09.30 - 09.45	Bataryalı Elektrikli Otobüsler İçin Kablosuz Şarj İstasyonlu Durakların Belirlenmesi <i>İlyas Cihan Aksoy, Mehmet Metin Mutlu, Yalçın Alver</i>
09.45 - 10.00	İşıksız Kavşaklarda Sürücüsüz Taşıtlarla Ağır Taşıt Etkileşimlerinin İrdelenmesi <i>Serhan Tanyel, Ilgın Gökaşar, Selim Dünder, Ali Topal, Burak Şengöz</i>
10.00 - 10.15	Kesintisiz Akımlarda Bağlantılı Otonom Trafikte Makine Öğrenimi ile Gecikme Tahmini <i>Ilgın Gökaşar, Kaan AYTEKİN</i>
10.15 - 10.30	SNS Kaza-Olay Tespit Algoritmasının Bağlı Otonom Araç Trafikindeki Performansının Değerlendirilmesi <i>Ilgın Gökaşar, Sarp Semih Özkan, Alperen Timuroğulları</i>
10.30 - 10.45	İnsansız Teslimat Robotlarının İstanbul'da Pilot Bölge Uygulamalarının Değerlendirilmesi <i>Ilgın Gökaşar, Mehmet Akıncılar</i>
10.45 - 11.00	İnşaat Mühendisliğinde Etik Kavramı ve Önemi <i>Mehmet Çakır</i>
11.00 - 11.15	<b>Kahve Arası</b>

## 9 Kasım 2022, Çarşamba

<b>8. Oturum</b>	
<b>A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Nuray Aydınoglu, Dr. Eren Vuran</b>	
11.15 - 11.55	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Concrete Buildings in the Second-Generation European Standard for Design for Earthquake Resistance (Eurocode 8): Technical Developments and Computational Implementation ( <i>Depreme Dayanıklı Tasarım İçin İkinci Nesil Avrupa Standartında Beton Binalar. Eurocode 8: Teknik Gelişmeler ve Sayısal Uygulamalar</i> ) <b>Prof. Dr. Michael Fardis</b>
11.55 - 12.10	Taban İzolasyonlu Silo Yapısının Tasarımında Kullanılan İki Farklı Analiz Yönteminin Karşılaştırılması <i>Mert Hacıemiroğlu, Cenk Alhan</i>
12.10 - 12.25	Az Katlı Binalar İçin Çapraz Yay Gruplarından Oluşan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi <i>Varol Karayel, Ercan Yüksel, Tansu Gökçe, Fatih Şahin</i>
12.25 - 12.40	Yanal Kuşatma Basıncı Etkisindeki Yüksek Dayanımlı Betonarme Elemanlar İçin Yeni Bir Modelleme Yaklaşımı <i>Atacan Erdoğan, Hasan Orhun Köksal</i>
12.40 - 12.55	Küresel Depolama Tanklarının Yakın Fay Yer Hareketlerinde Sismik Davranışları <i>Sezer Öztürk, Ali Sarı</i>

12.55 - 13.10	Deprem Dayanımı Yetersiz Riskli Binaların Hızlı Risk Tespit Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi: Elazığ İli Örneği <i>Rabia Nur Sağlam, Tuba Nur İmiş, Muhammed Ulucan, Nurbanu Demirbaş, Ayşe Ruşen Durucan, Hümeysra Şahin, Cengizhan Durucan, Kürşat Esat Alyamaç</i>
<b>B - Salonu - Oturum Başkanı: Doç. Dr. Murat S. Kırçıl</b>	
12.10 - 12.25	Bambu Donatılı Betonarme Kirişlerde Düşey Yükler Altında Göçmenin Deneysel İncelenmesi <i>Özlem Karakuş Zambak, Ergün Binbir, Furkan Çalım, Oğuz Cem Çelik</i>
12.25 - 12.40	Betonarme Kiriş Kesme Dayanımına GFRP Katkısının Değerlendirilmesi <i>Kadir Şengün, Güray Arslan</i>
12.40 - 12.55	2.5MW Rüzgâr Türbininin Dinamik Özelliklerinin Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi <i>Onur Öztürkoglu, Veysel Yurtseven, Yaşar Taner, Özgür Özçelik, Serkan Günel</i>
12.55 - 13.10	Kırılgenlik Eğrisi Kullanımının Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Depremden Sonra Yeniden Ayağa Kaldırılmasına Etkisi <i>Merve Bayraktar, Burcu Güldür Erkal</i>
13.10 - 14.00	Yemek Arası

**9 Kasım 2022, Çarşamba**

<b>9. Oturum</b>	
<b>A - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Oğuz Cem Çelik</b>	
14.00 - 14.40	<b>Çağrılı Konuşmacı</b> Towards Net Zero 2050 in Steel Industry (Çelik Endüstrisinde 2050'ye Doğru Net Sıfır) <b>Prof. Dr. Elyas Ghaffori</b>
14.40 - 14.55	Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Davranışında Geometrik Önkusurlar ve Artık Gerilmelerin Önemi <i>Haşim Çayır, Cüneyt Vatanserver, Muhammed Şükrü Yavaş, Zekai Celep</i>
14.55 - 15.10	Orta Yükseklikteki Bina Sınıfı İçin Uzak ve Yakın Deprem Davranışlarının Sayısal Ortamda İncelenmesi <i>Ahmet Berkay Mostura, Kemal Beyen</i>
15.10 - 15.25	Betonarme Kirişlerde Çelik Halat Kullanımının Yapısal Davranışa Olan Etkisinin İrdelenmesi <i>Muzaffer Yazar, Beyza Taşkın, Metin Aydoğan</i>
15.25 - 15.40	Mevcut Betonarme Binaların Deprem Risklerinin Hızlı Tayinine Yönelik Bir Yaklaşım <i>Ercan Yüksel, Mustafa Altıneller, Varol Karayel, Fatih Şahin</i>
15.40 - 15.55	Makina Kütle Temellerinin Tasarımı Üzerine Bir Uygulama Çalışması <i>Mehmet Salih Ölmez, H. Hülya Kostak</i>
15.55 - 16.10	Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi <i>Yasin Engin</i>
<b>B - Salonu - Oturum Başkanı: Prof. Dr. Banu İkizler</b>	
14.55 - 15.10	İçerisinde Yer Alan Tünellerin Kazıklar Üzerinde Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması <i>Cansu Günday Uras, Berna Unutmaz</i>
15.10 - 15.25	Çok Geniş Alanlardaki Saha Beton Kaplamalarında Taşınabilecek Yük Üzerine Bir Çalışma <i>Pınar Ateş, Ali Gerçek, Gürkan Özden</i>
15.25 - 15.40	Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi <i>Ahmet Reha Günay, Sami Karadeniz</i>



15.40 - 15.55	Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası <i>Mehmet Özmen, Barış Yiğit Canpolat, Hakan Karatay, Banu Yeşim Büyükkancı</i>
16.10 - 16.25	Kahve Arası
<b>Panel - Toplumda Mühendisin Yeri Sorumlulukları ve Etik (Levent Darı Anısına)</b>	
16.25 - 18.30	Moderatör: Tuğrul Tankut - Betül Çotuksöken - Beno Kuryel - Gamze Yücesan Özdemir





# YAPI

Çift Cidarlı İçi Beton Dolu Çelik Tüplerin Eksenel Basınç Altında İnelastik Davranışı <i>Berika Ceren Cihan Yılmaz, Ebru Okşaksin, Oğuz Cem Çelik</i> .....	27
Bambu Donatılı Betonarme Kirişlerde Düşey Yükler Altında Göçmenin Deneysel İncelenmesi <i>Özlem Karakuş Zambak, Ergün Binbir, Furkan Çalım, Oğuz Cem Çelik</i> .....	43
Cam Lifi ile Güçlendirilmiş Alçı (CLGA) Panellerle Üretilen Döşeme Sisteminin İncelenmesi Döşeme Sisteminin İncelenmesi <i>Beyza Kapucu Güzelbulut, Oğuz Cem Çelik</i> .....	61
İtme Sürme Yöntemi ile Köprü ve Ayak Tasarımı <i>Alper Naycı, Kutlu Darılmaz</i> .....	71
Yanal Kuşatma Basıncı Etkisindeki Yüksek Dayanımlı Betonarme Elemanlar İçin Yeni Bir Modelleme Yaklaşımı <i>Atacan Erdoğan, Hasan Orhun Köksal</i> .....	85
Türkiye’de Kaydedilen Depremlerin Davranış Spektrumlarının Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırması <i>H. Polat Gülkan, Vesile Hatun Akansel, Erol Kalkan</i> .....	97
Çayırhan Köprüsü Yapım Danışmanlığı ve Ters Sehim Hesapları <i>Tolga Cantürk</i> .....	115
Mevcut Betonarme Bir Binanın Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi ile Sismik Risk Değerlendirmesi <i>Çağrı Çetik, Sadık Can Girgin, Esra Bengü Kenar</i> .....	129
Küresel Depolama Tanklarının Yakın Fay Yer Hareketlerinde Sismik Davranışları <i>Sezer Öztürk, Ali Sarı</i> .....	147
Makina Kütle Temellerinin Tasarımı Üzerine Bir Uygulama Çalışması <i>Mehmet Salih Ölmez, H. Hülya Kostak</i> .....	159
Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Davranışında Geometrik Önkusurlar ve Artık Gerilmelerin Önemi <i>Haşim Çayır, Cüneyt Vatansever, Muhammed Şükri Yavaş, Zekai Celep</i> .....	169
2.5MW Rüzgâr Türbininin Dinamik Özelliklerinin Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi <i>Onur Öztürkoğlu, Veysel Yurtseven, Yaşar Taner, Özgür Özçelik, Serkan Günel</i> .....	179

Kırılganlık Eğrisi Kullanımının Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Depremden Sonra Yeniden Ayağa Kaldırılmasına Etkisi <i>Merve Bayraktar, Burcu Güldür Erkal</i> .....	193
Tarihi Kesme Taş Binaların Düzlemdışı Sismik Performansının Değerlendirmesi İçin Deneysel Ötelenme Limitleri <i>İbrahim Serkan Mısıır, Fikret Kuran, Gökhan Yücel, Ali Cihan Demir, Ege Yeşilbaş, Cansu Beril Eser, Serap Topçu, Ömer Aldemir</i> .....	205
Betonarme Çerçevelede Yumuşak Kat Etkilerinin Yeni Nesil Dolgu Duvarlar ile Azaltılması <i>Prost Iverden Balenda Bakala, İbrahim Serkan Mısıır, Ömer Aldemir</i> .....	215
Deprem Dayanımı Yetersiz Riskli Binaların Hızlı Risk Tespit Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi: Elazığ İli Örneği <i>Rabia Nur Sağlam, Tuba Nur İmiş, Muhammed Ulucan, Nurbanu Demirbaş, Ayşe Ruşen Durucan, Hümeıra Şahin, Cengizhan Durucan, Kürşat Esat Alyamaç</i> .....	229
Taban İzolasyonlu Silo Yapısının Tasarımında Kullanılan İki Farklı Analiz Yönteminin Karşılaştırılması <i>Mert Hacıemiroğlu, Cenk Alhan</i> .....	241
Deprem Bölgelerinde Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel Kullanımının Yapı Uygulamaları Üzerinden İncelenmesi <i>Aygül Ceylan, Z. Canan Girgin</i> .....	251
Betonarme Kirişlerde Çelik Halat Kullanımının Yapısal Davranışa Olan Etkisinin İrdelenmesi <i>Muzaffer Yazar, Beyza Taşkın, Metin Aydoğan</i> .....	265
Az Katlı Binalar İçin Çapraz Yay Gruplarından Oluşan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi <i>Varol Karayel, Ercan Yüksel, Tansu Gökçe, Fatih Şahin</i> .....	277
Mevcut Betonarme Binaların Deprem Risklerinin Hızlı Tayinine Yönelik Bir Yaklaşım <i>Ercan Yüksel, Mustafa Altıneller, Varol Karayel, Fatih Şahin</i> .....	301
GFRP Donatı ile Güçlendirilmiş Betonarme Döşemelerin Zımbalama Dayanımının Makine Öğrenmesi ile Belirlenmesi <i>Gamze Doğan, Musa Hakan Arslan</i> .....	317
Sismik İzolasyonlu Binalardaki Rafların En Üst Kat Yerdeğiştirmelerinin Sentetik Pulslar ile Değerlendirilmesi <i>Zafer Kanbir, Z. Metehan Karslıoğlu, Onur Çevik, Cenk Alhan</i> .....	327
Betonarme Kiriş Kesme Dayanımına GFRP Katkısının Değerlendirilmesi <i>Kadir Şengün, Güray Arslan</i> .....	335
Orta Yükseklikteki Bina Sınıfı İçin Uzak ve Yakın Deprem Davranışlarının Sayısal Ortamda İncelenmesi <i>Ahmet Berkay Mostura, Kemal Beyen</i> .....	347
Taban Yalıtımlı Bir Binanın Deprem Davranışının Zaman-Frekans Ortamında Araştırılması <i>Ahmet Özenir, Kemal Beyen</i> .....	359
İki Boyutlu Doğrusal Olmayan Analizlere Dayalı Topoğrafyanın Deprem Yer Büyütmelerine Etkisi ve Hasar Gözlemleri <i>Kemal Beyen</i> .....	379

## Çift Cidarlı İçi Beton Dolu Çelik Tüplerin Eksenel Basınç Altında İnelastik Davranışı

Berika Ceren CİHAN YILMAZ<sup>1</sup>, Ebru OKŞAKSİN<sup>2</sup>, Oğuz Cem ÇELİK<sup>3</sup>

### ÖZET

DeneySEL çalışma kapsamında 2'si referans içi boş çift cidarlı çelik tüp (DST), 6'sı içi beton dolu çift cidarlı çelik tüp (CFDST) olmak üzere toplamda 8 adet numune eksenel basınç altında göçmeye dek denenmiştir. Çalışmanın parametreleri çelik tüplerin arasının beton dolu/boş olması, doluluk-boşluk oranı ( $\chi=0.46\sim0.70$ ) ve beton türüdür (referans beton, polipropilen lif donatılı beton ve çelik lif donatılı beton). Numunelerden seçilen ikisi sonlu eleman analizi ile ABAQUS programında modellenmiş, elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin tahmini eksenel yük taşıma kapasiteleri AISC 360-16, EN 1994-1-1 (EC4) ve ÇYTHYE-2016 yönetmeliklerinde yer alan bağıntılar ile hesaplanmış, deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çift cidarlı çelik tüp, Lif donatılı beton, Basınç dayanımı, Süneklik, Rijitlik, Sonlu eleman analizi.

### ABSTRACT

#### *Inelastic Behavior of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubes Under Axial Compression*

Experimental and numerical investigations were performed on the inelastic behavior of circular concrete filled double skin steel tubes (CFDSTs). 8 circular tubes including 2 DSTs (double skin steel tubes without infill) and 6 CFDSTs (concrete-filled double skin steel tubes with various parameters) were tested until failure under axial compression to explore their potential structural performance. Impact of presence/absence of infill concrete, section's hollow ratio ( $\chi= 0.46 \sim 0.70$ ), and sandwiched concrete type (plain, polypropylene, and steel fibers added) are the parameters of this work. A finite element (FE) model was developed and verified by experimental results. Expected capacities obtained using the formulas given in AISC 360-16, EN 1994-1-1 (EC4) and ÇYTHYE-2016 (Turkish Code) were compared with the experimental ones to evaluate their applicability for the studied CFDST cross-sections.

**Keywords:** Concrete-filled Tubes, Ultimate Strength, Compression Behavior, Ductility, Finite Element Model.

---

1 Ankara - berikacerencihan@hotmail.com

2 İstanbul - ebruoksaksin@gmail.com

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - celikoguz@itu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Çerçeve sistemlerde kolonlar düşey ve yatay yüklere karşı direnç gösteren en önemli yapı elemanları olmalarından dolayı göçme güvenliklerinin doğru olarak belirlenebilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle çok katlı yapılar ve köprü ayaklarında, yüksek dayanım sağlaması, kesit boyutlarını sınırlandırarak daha hafif bir taşıyıcı sistem oluşturması, yük taşıma kapasitesi yüksek ve sünek yapısal elemanlar olması, deprem yükleri altında üst düzey davranış göstermesi, yangın problemlerine iyi bir çözüm getirmesi gibi üstün yapısal davranışları nedeniyle içi beton/betonarme dolu çelik tüp (kompozit) kolonların kullanımı ve bu konuda yapılan kuramsal ve deneysel araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Çelik-betonarme kompozit kolonlar, içi beton dolu çelik tüpler (CFST) ve betona gömülü çelik profiller olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Özellikle çelik tüpün çekirdek beton üzerinde oluşturduğu sargılama etkisi ve eksenel basınç altında çekirdek betonun çelik tüpün burkulmasını geciktirmesi CFST'lerin dayanımını önemli derecede arttırmaktadır. CFST'ler yalın betonarme ve çelik kolonlara göre yüksek basınç dayanımı, yangın dayanımı, süneklik gibi üstün yapısal özelliklere sahip olsalar da dayanım/ağırlık oranı özellikle deprem bölgesinde tasarlanan yapılar için ciddi olumsuzluklar oluşturmaktadır. CFST kolonların yapısal performanslarını iyileştirmek, daha küçük kesitler ile daha yüksek dayanım sunan kolonlar tasarlamak amacıyla CFST'lerde bulunan çekirdek betonun içine ikinci bir çelik tüp konularak yeni nesil kompozit kolonlar olarak adlandırılan içi beton dolu çift cidarlı çelik tüpler (CFDST) tasarlanmıştır. CFDST'ler içi boş çift cidarlı çelik tüpler (DST) ile karşılaştırıldıklarında çelik tüplerin arasına dökülen sandviç betonun kolonun taşıma kapasitesi ve sünekliğini önemli derecede arttırdığı bilinmektedir [1]. CFDST'lerde bulunan iç ve dış çelik tüpler betona iki kat sargılama etkisi sağlamakta ve çelik tüplerin arasında bulunan sandviç beton yangın sırasında iç çelik tüpü koruyarak kolonun yangın dayanımı iyileştirilmektedir. Dayanım/ağırlık oranı, basınç dayanımı, eğilme rijitliği ve burkulma kapasitesi göz önünde bulundurulduğunda CFDST'lerin CFST'lere göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [2].

CFDST kolonlar ile ilgili bugüne kadar birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmış, CFDST'lerin yapısal performansını etkileyen beton dayanımı, kesit geometrisi, doluluk-boşluk oranı, çelik tüp dayanımı, D/t oranı gibi birçok parametre olduğu görülmüştür. CFDST'lerin geometrik formlarının yapısal performanslarına etkisini araştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar sonucunda kare/dikdörtgen kesitli CFDST kolonlar tasarım süreci ve diğer yapı elemanları ile bağlantılarının üretimindeki kolaylık nedeniyle daha çok tercih edilseler de, dairesel kesitli CFDST kolonlara göre burkulmaya daha yatkın oldukları sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, dairesel CFST kolonlarda çelik tüplerin sandviç beton üzerinde oluşturduğu sargılama etkisinin kare/dikdörtgen kesitli olanlara göre daha fazla olduğu bilinmektedir [3,4,5,6,7].

CFDST'lerin yapısal performansını etkileyen bir diğer önemli parametrenin doluluk-boşluk oranı olmasına karşın, literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar incelendiğinde ortak bir sonuca ulaşılamadığı görülmüştür. Bazı çalışmalar doluluk-boşluk oranındaki artışın CFDST kolonların eksenel basınç dayanımını arttırdığı sonucuna ulaşırken [9,10], bazıları azalttığı yönünde sonuçlar elde etmiş [11,12,13,14,15], bazıları ise hiç etkisi olmadığı sonucuna ulaşmıştır [16]. Benzer şekilde beton dayanımının CFDST kolonların performansına etkisini incelemek amacıyla normal beton ve yüksek dayanımlı betonun CFDST'lerin eksenel basınç dayanımına olan etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmış olup CFDST'lerde lif donatılı sandviç beton etkisini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Lif donatılı betonlar normal betonlar ile karşılaştırıldıklarında yüksek donma-çözülme dayanımı, büyük yangınlarda yüksek kavrama direnci, betonun plastik çatlaklarını azaltması, süneklik, yüksek eğilme ve çekme dayanımı gibi birçok yapısal üstünlüğe sahip oldukları bilinmektedir [17,18,19]. CFST'lerde lif donatılı beton kullanımına ilişkin yapılan çalışmalar incelendiğinde lif donatılı beton dolu çelik tüplerin eksenel basınç dayanımı ve süneklik açısından önemli avantajlara sahip oldukları görülmüştür [17,20].

Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında doluluk boşluk oranı, çelik tüplerin arasının beton dolu/boş olması ve lif donatılı beton kullanımının CFDST'lerin aksel yük altındaki davranışlarına olan etkisi deneysel olarak incelenmiş, güncel yönetmeliklerde verilen bağıntıların geçerliliği kontrol edilmiştir. Numunelerden seçilenler sonlu eleman analizi ile ABAQUS [21] programında modellenmiş, elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizinde beton malzeme modeli olarak Mander malzeme modeli, çelik için deneysel çalışma kapsamında yapılan çelik çekme deneyi sonuçları kullanılmıştır. Elde edilen verilerin sonucunda deneysel çalışma ile sayısal çalışma sonuçlarının tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

## 2. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmada içi beton dolu çift cidarlı çelik tüplerin yapısal performansları artırılarak daha yüksek kapasiteli taşıyıcı sistem özelliğinde, daha hafif ve daha küçük kesitli yapısal elemanlar tasarlanması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, çift cidarlı çelik tüplerin iç ve dış cidarlarının arasına beton doldurulmasının, doluluk/boşluk oranının ve polipropilen lif / çelik tel donatılı betonların CFDST'lerin aksel basınç dayanımı ve sünekliğine etkisi incelenmiştir. Parametrelerin karşılaştırmalı incelenmesi amacı ile 8 farklı tip numune üretilmesi, laboratuvar ortamında artan aksel yük altında monotonik olarak denenmesi ve böylece davranış eğrilerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Konu ile ilgili çalışmalar hızlanmakla birlikte bu çalışma kapsamında ele alındığı biçimde deneysel bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Toplamda 8 adet numune yapısal performanslarının karşılaştırılması amacıyla 4 alt gruba ayrılmıştır: 1. grupta içi boş çift cidarlı çelik tüpler (DST), 2. grupta referans beton dolu çift cidarlı çelik tüpler (CFDST-R), 3. grupta içi polipropilen lif donatılı beton dolu çift cidarlı çelik tüpler (CFDST-P) ve 4. grupta içi çelik tel donatılı beton dolu çift cidarlı çelik tüpler (CFDST-D) bulunmaktadır. Her grup 2 adet numune içermekte olup numunelerden birinin doluluk/ boşluk oranı 0.46, diğerinin 0.70'tir. Numunelerin doluluk-boşluk oranı hesaplanırken;

$$\chi = D_i / (D_o - 2t_o) \quad (2.1)$$

bağıntısından yararlanılmıştır. Burada  $\chi$  doluluk-boşluk oranını,  $D_i$  iç çelik tüp çapını,  $D_o$  dış çelik tüp çapını ve  $t_o$  dış çelik tüp kalınlığını belirtmektedir.

Numunelerin üretilmesinden önce kullanılacak çelik tüplerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çelik çekme testleri yapılmıştır. Numune parametreleri kapsamında referans beton, çelik tel donatılı beton ve polipropilen lif donatılı beton olmak üzere 3 farklı beton üretimi yapılmıştır. Beton karışımları, çelik tüplerin arasında kalan, beton dökülecek alanların dışarıdan müdahale ile yerleştirmeye elverişli olmaması nedeniyle kendiliğinden yerleşen beton olarak tasarlanmıştır. Polipropilen lif ve çelik tel donatılı betonlar, referans beton karışımına gerekli miktarlarda eklenerek oluşturulmuş ve numuneler haricinde dökülen silindirik beton numunelerine basınç testleri yapılarak beton dayanımları belirlenmiştir. Referans betonun C30 beton dayanımı vermesi hedeflenmiştir. Numunelerin hazırlanmasının ardından her bir numuneye düşey yük altında monotonik basınç deneyi uygulanmıştır. Ayrıca, tüm numuneler sonlu eleman analizi ile ABAQUS programında modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Ön Hazırlıklar

Tüm numuneler 300 mm uzunluğunda olup dış çelik tüp çapları 170 mm'dir. Her grupta 2 adet numune bulunmakta olup numunelerden biri 0.46, diğeri 0.70 doluluk boşluk oranına sahiptir.

Numunelerin geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Numune isimlendirilmeleri numunelerin tasarım parametrelerine göre yapılmıştır. Örneğin, “DST-70” olarak isimlendirilen numunede “DST” harfleri numunenin içi boş çift cidarlı çelik tüp numune olduğunu ifade etmekte, 70 ise numunenin doluluk boşluk oranının 0.70 olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde, “CFDST-R-46” olarak isimlendirilen numunede “CFDST” harfleri numunenin içi beton dolu çelik tüp numune olduğunu, “R” harfi çelik tüplerin arasında bulunan sandviç betonun referans beton olduğunu ifade etmekte ve 46 ise numunenin doluluk boşluk oranının 0.46 olduğunu belirtmektedir. “CFDST-D” isimlendirmesinde “D” harfi sandviç betonun çelik lif donatılı olduğunu, “CFDST-P” isimlendirmesinde “P” harfi ise sandviç betonun polipropilen lif donatılı olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 3.1 - Numunelerin genel özellikleri

Numune Adı	L (mm)	D <sub>o</sub> (mm)	t <sub>o</sub> (mm)	D <sub>i</sub> (mm)	t <sub>i</sub> (mm)	$\chi$	Sandviç Beton Türü	f <sub>yo</sub> (MPa)	f <sub>yi</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
DST-70	300	170	3.58	114.1	3.58	0.70	-	365	380	-
DST-46	300	170	3.58	76.1	3.58	0.46	-	365	320	-
CFDST-R-70	300	170	3.58	114.1	3.58	0.70	Referans Beton	365	380	35
CFDST-R-46	300	170	3.58	76.1	3.58	0.46	Referans Beton	365	320	35
CFDST-D-70	300	170	3.58	114.1	3.58	0.70	Çelik Lif Donatılı Beton	365	380	41
CFDST-D-46	300	170	3.58	76.1	3.58	0.46	Çelik Lif Donatılı Beton	365	320	41
CFDST-P-70	300	170	3.58	114.1	3.58	0.70	Polipropilen Lif Donatılı Beton	365	380	49
CFDST-P-46	300	170	3.58	76.1	3.58	0.46	Polipropilen Lif Donatılı Beton	365	320	49

### 3.2. Malzeme Deneyleri

Çelik tüplerin genişlik(çap)/kalınlık oranları belirlenirken AISC 360-16 (AISC 360-16, 2016a) [22] ve Eurocode 4 (EN 1994-1-1, 2004) [23] yönetmeliklerindeki kısıtlamalar esas alınmıştır. Buna göre, 170 mm, 114.1 mm ve 76.1 mm çaplarındaki çelik tüplerin D/t oranları sırası ile 47.5, 31.9 ve 21.3’tür. Numunelerde kullanılan çelik tüplerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM A370-08 [24] standardına göre her bir çelik tüpten çekme numunesi alınmış ve çekme deneyleri yapılmıştır. Toplamda 3 adet çekme (kupon) numunesi deneyi yapılmıştır. Gerilme ve birim uzama değerlerinin belirlenmesinde 0.002 kalıcı plastik deformasyona (ya da gerinim) karşılık gelen standart %0.2 offset metodu kullanılmıştır. Çekme testleri sonucunda, çelik tüplerin akma ve çekme mukavemetlerinin sırasıyla (320~380)MPa ve (400~460)MPa aralığında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca elastisite modülü değerleri (174~200)GPa’dır.

Referans beton, çelik tel donatılı beton ve polipropilen lif donatılı beton olmak üzere 3 farklı beton üretimi yapılmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton tercih edilmiştir [25,26]. Polipropilen lif ve çelik tel donatılı betonlar, referans beton karışımına gerekli miktarlarda eklenerek oluşturulmuş ve numuneler haricinde dökülen silindirik basınç dayanımı beton numunelerinin



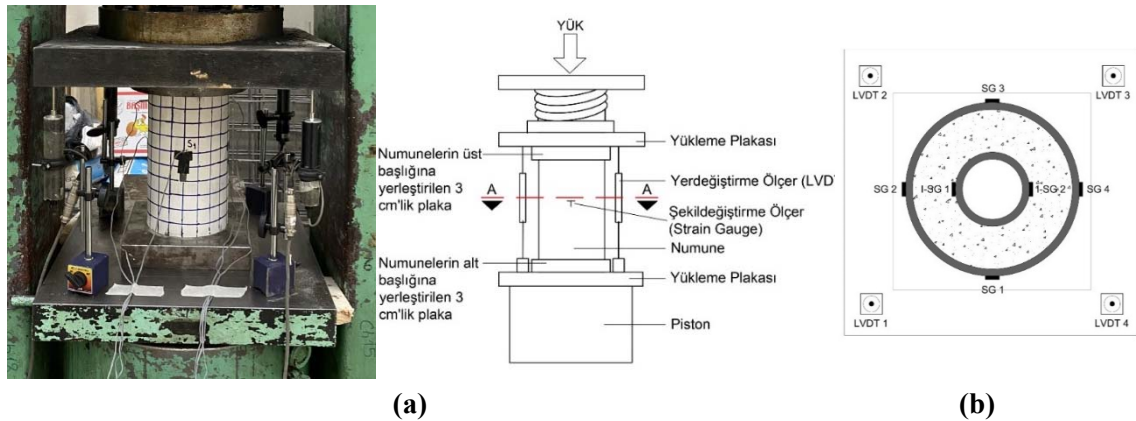
basınç testleri yardımı ile dayanımları belirlenmiştir. Referans betonun C30 beton dayanımı vermesi hedeflenmiştir. Çelik tel donatılı betonların üretilmesinde Dramix marka çelik teller kullanılmıştır. C30/37 beton sınıfı için önerilen karışım dozajı  $25 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Polipropilen lif donatılı betonların üretilmesinde Polytwist PT54 olarak isimlendirilen polipropilen lif kullanılmıştır. Çelik tel donatı ve polipropilen lif donatı malzeme özellikleri Çizelge 3.3'de görülmektedir. Betonlar döküldükten 21 gün sonra istenilen dayanıma ulaşıldığından tüm numunelerin aksenal basınç deneylerine başlanmıştır.

**Çizelge 3.3 - Çelik tel donatı ve polipropilen lif donatı malzeme özellikleri**

Tür	Uzunluk (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Lif Sayısı/kg	Özgül Ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )	Elastisite Modülü (GPa)
Çelik Tel Donatı (Dramix)	60	1600	3109	7.85	200
Polipropilen Lif Donatı (Polytwist PT54)	54	600	37000	0.91	7.2~8.5

### 3.3. Deney Düzenegi

Deneylerde TML marka akma sonrası ölçüm yapabilen şekildeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Her bir iç çelik tüpe 2 adet, dış çelik tüpe ise 4 adet olmak üzere her bir numune için toplam 6 adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Her numunenin dış tüpü üzerinde, numune boyunun  $\frac{1}{2}$ 'sinde olmak üzere tüp yüzeyinin 4 eşit noktasından şekildeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Her numunenin iç tüpü üzerinde ise, numune boyunun  $\frac{1}{2}$ 'sinde olmak üzere tüp yüzeyinin karşılıklı 2 noktasından şekildeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Beton dökümünden önce çelik tüpler kalıplara yerleştirilirken iç ve dış çelik tüplere yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerin aynı doğrultuda olacak şekilde yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Bu sistem tüm numune üzerindeki gerilme ve şekildeğiştirme dağılımını uygun biçimde vermektedir [29].



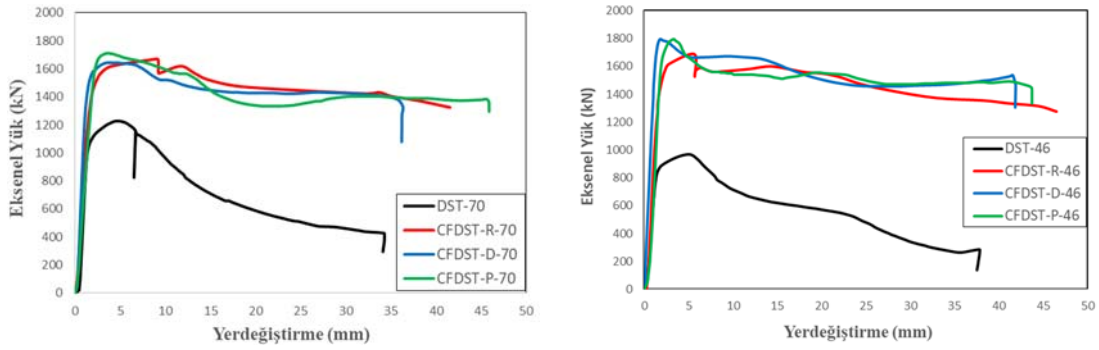
**Şekil 3.2 - (a) Deney düzeneginin genel görünüşü (b) Şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerlerin A-A kesiti üzerinde yerleşimi.**

Numunelerde eksenel kısaltmaları ölçmek amacıyla 4 adet doğrusal yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerler makinanın yükleme plakalarının arasına, 4 köşeye yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 3.2a'da şekildegıştırme ve yerdeğiştirme ölçerlerin konumlandırılması Şekil 3.2-b'de verilen A-A kesitinde görülmektedir.

## 4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

### 4.1. Sandviç Beton Etkisi

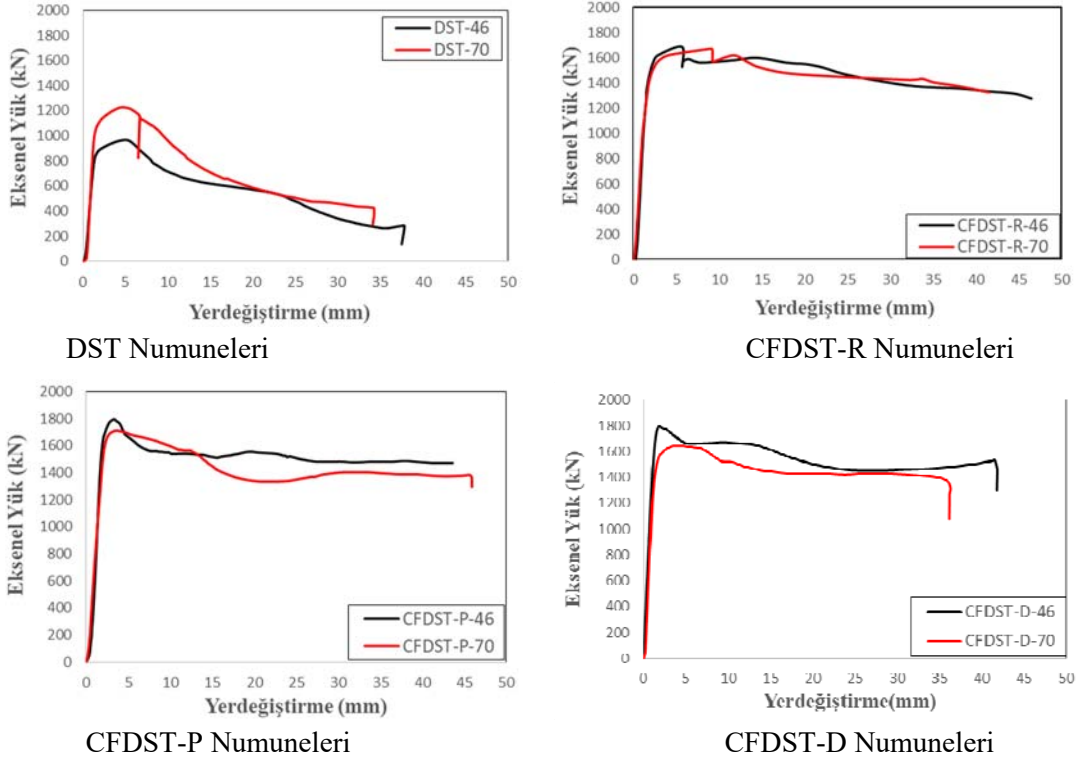
Sandviç betonun içi beton dolu çift cidarlı çelik tüplerin eksenel basınç dayanımına etkisini gözlemlenmek amacıyla aynı doluluk boşluk oranına sahip numuneler karşılaştırılmıştır. Numunelerin eksenel yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) eğrileri ise Şekil 4.1'de verilmiştir. Eğriler karşılaştırıldığında, doluluk boşluk oranı ve sandviç beton türü farketmeksizin, içi beton dolu çift cidarlı çelik tüp (CFDST) numunelerin içi beton dolu olmayan çelik tüp (DST) numunelere göre, beklendiği üzere, çok daha yüksek düşey yük dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Çelik tüplerin arasında yer alan sandviç beton numunelerin eksenel basınç dayanımında %35~85.5 oranında artış sağlamıştır. Benzer şekilde, CFDST numunelerin DST numunelere göre %306~342 oranında daha sünek davranış sergilediği görülmektedir. Bu olumlu durum sandviç beton ile sağlanan sargı/sınırlama etkisi ve böylece yerel burkulmanın gecikmesi ile açıklanabilir.



Şekil 4.1 - Doluluk-boşluk oranı 0.70 ve 0.46 olan numunelerin eksenel yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) eğrileri.

### 4.2. Doluluk-Boşluk Oranı Etkisi

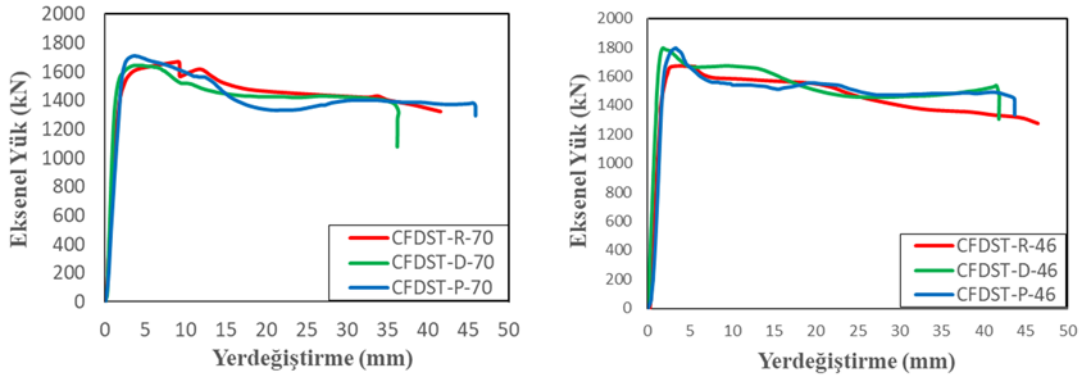
Doluluk-boşluk oranının 0.46'dan 0.70'e artmasıyla iç çelik tüp çapı 76.1'den 114.1'e çıkmış, numunenin çelik tüp enkesit alanı %15.93 oranında artmıştır. Çelik tüp kesit alanındaki bu artışa bağlı olarak, doluluk-boşluk oranının artmasıyla çift cidarlı içi boş çelik tüp numunelerin eksenel basınç dayanımının %26.9 ve süneklik oranının %19.2 oranında arttığı görülmüştür. Çift cidarlı içi beton dolu numunelerde ise, doluluk-boşluk oranının 0.46'dan 0.70'e artmasıyla çelik tüp kesit alanı %15.93 oranında artmış, ancak sandviç beton kesit alanı %34.9 azalmıştır. Beton kesit alanındaki azalmaya bağlı olarak, doluluk-boşluk oranındaki artışın beton karışımı farketmeksizin, tüm içi beton dolu çift cidarlı çelik tüp numunelerin eksenel basınç dayanımını %1.2~%8.9 aralığında azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Numunelerin genel akma yöntemine göre hesaplanan süneklik oranları Bölüm 4.4'te detaylı olarak açıklanmıştır. Numunelerinin eksenel yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 - Numunelerinin aksenal yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) grafikleri

### 4.3. Lif Donatılı Beton Etkisi

Doluluk-boşluk oranı 0.70 olan numunelerin eğrileri karşılaştırıldığında, numunelerin aksenal basınç dayanımlarında küçük miktarlarda artış/azalış olduğu, ancak süneklik oranının ise önemli miktarda değiştiği görülmüştür. CFDST-R-70 numunesinin maksimum aksenal basınç dayanımının CFDST-D-70 numunesine göre %1.18 daha fazla olduğu, CFDST-P-70 numunesinin ise CFDST-R-70 ve CFDST-D-70 numunelerine göre sırası ile %2.65 ve %3.72 daha yüksek aksenal basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Numunelerin süneklik oranları karşılaştırıldığında ise CFDST-R-70 numunesinin CFDST-P-70 numunesine göre %60.3 daha sünek davranış sergilediği görülmüştür. CFDST-P-70 numunesi ile CFDST-D-70



Şekil 4.3 - Beton türüne ve doluluk-boşluk oranına bağlı aksenal yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) eğrileri

numunelerinin süneklik oranları karşılaştırıldığında ise CFDST-D-70 numunesinin süneklik oranının %67.1 daha yüksek olduğu görülmüştür. Doluluk-boşluk oranı 0.70 ve 0.46 olan içi beton dolu numunelerin eksenel yük(kN)-yerdeğiştirme(mm) eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir.

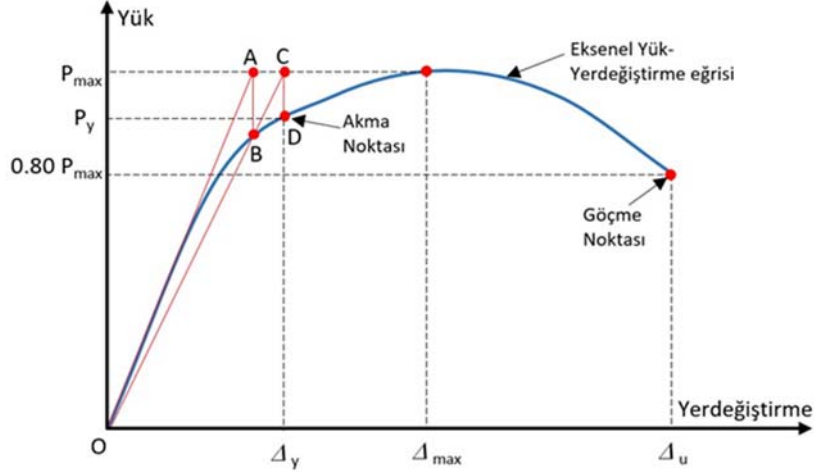
CFDST-D-46 ve CFDST-P-46 numuneleri CFDST-R-46 numunesine göre %7.65 daha yüksek eksenel basınç dayanımına sahiptir. Buna karşın, CFDST-R-46 numunesinin CFDST-P-46 ve CFDST-D-46 numunelerine göre sırası ile %27.1 ve %12.5 daha sünek davranış sergiledikleri görülmektedir. Doluluk-boşluk oranı farketmeksizin CFDST-P numunelerinin CFDST-R ve CFDST-D numunelerine göre, CFDST-R numunelerinin ise CFDST-D numunelerine göre daha sünek davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca, lif donatılı beton dolu DST'lerin eksenel basınç dayanımlarının düşük doluluk-boşluk oranına sahip numunelerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, beton hacmi arttıkça lif donatılı beton etkisinin artması ile açıklanabilir.

#### 4.4. Süneklik Oranı ve Enerji Yutma Kapasitesi

Numunelerin yerdeğiştirme-süneklik oranlarının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıdan yararlanılmıştır:

$$DI = \mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (4.1)$$

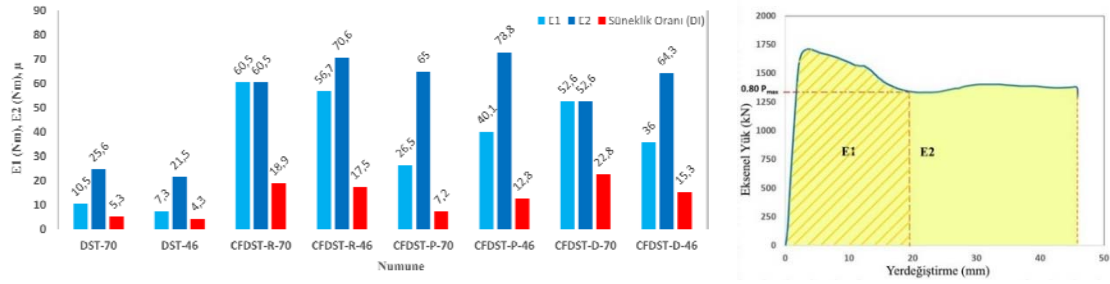
Burada  $DI=\mu$  yerdeğiştirme sünekliğini (hasar indeksi),  $\Delta_u$  nihai/son yerdeğiştirmeyi,  $\Delta_y$  ise akma yerdeğiştirmesini belirtmektedir. Numunelerin son yerdeğiştirmeleri (ya da yerdeğiştirme kapasiteleri) ve akma yerdeğiştirmeleri hesaplanırken Şekil 4.4'deki genel akma yönteminden yararlanılmıştır.



Şekil 4.4 - Genel akma yöntemi ile akma noktasının tanımı [27]

Genel akma yöntemine göre lif donatılı beton dolu DST numunelerin süneklik oranları hesaplanırken eksenel yük-yerdeğiştirme eğrilerinde görülen ani iniş/çıkışlar  $0.80P_{max}$  değerine karşılık gelen  $\Delta_u$  değerinin küçük çıkmasına, dolayısı ile süneklik oranının düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, numunelerin eksenel yük-yerdeğiştirme eğrilerinin altında kalan alan hesaplanarak enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir. E1 ve E2 olmak üzere iki adet enerji yutma kapasitesi hesaplanmıştır. E1, eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinde  $0.80P_{max}$  değerine kadar olan kısmın altında kalan alanı, E2 değeri ise tüm eğrinin altında kalan alanı belirtmektedir (Şekil 4.5). Numunelerin E1, E2 değerleri ve süneklik oranları da bu şekil üzerinde verilmiştir. Doluluk-

boşluk oranı farketmeksizin tüm CFDST numunelerin DST numunelere göre daha yüksek süneklik oranına sahip oldukları görülmektedir (%306~342). Bu durum, çelik tüplerin sandviç beton üzerinde oluşturduğu sargılama etkisi ve böylece yerel burkulmanın gecikmesi ile açıklanabilir. Doluluk-boşluk oranı azaldıkça, azalan çelik tüp enkesit alanına bağlı olarak, DST numunelerin enerji yutma kapasitelerinin %13~30.5 oranında azaldığı görülmektedir. CFDST numuneler karşılaştırıldığında, CFDST-R-70 ve CFDST-D-70 numunelerinin süneklik oranlarının CFDST-R-46 ve CFDST-D-46 numunelerine göre sırası ile %7.4 ve %32.9 daha yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, CFDST-R-70 ve CFDST-D-70 numunelerinin E1 değerlerinin CFDST-R-46 ve CFDST-D-46 numunelerine göre sırası ile %6.3 ve %31.6 daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna karşın, CFDST-P-46 numunesi CFDST-P-70 numunesine göre %43.75 daha yüksek süneklik oranı ve %83.8 daha yüksek E1 değerine sahiptir. E2 değerleri incelendiğinde ise doluluk-boşluk oranı arttıkça tüm CFDST numunelerinin E2 değerinin %12.1~22.1 azaldığı görülmektedir. Ayrıca, en yüksek E2 değerine sahip numunenin 0.46 doluluk-boşluk oranına sahip içi polipropilen lif katkılı beton dolu çift cidarlı çelik tüp numune (CFDST-P-46) olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5 - Numunelerin E1, E2 değerleri ve süneklik oranları

#### 4.5. Göçme Modları

İç çelik tüp ve sandviç betonda oluşan deformasyonların/hasarların en gerçekçi biçimde anlaşılabilmesi ve çelik tüpler ile beton arasındaki ilişki hakkında bilgi edinmek amacıyla numuneler deney sonrası ikiye kesilmiştir. DST ve CFDST numunelerinin göçme modları karşılaştırıldığında ise dış çelik tüplerin göçme modlarında farklılık görülmemekte olup DST numunelerin iç çelik tüplerinde dışa doğru burkulma görülürken CFDST numunelerin iç çelik tüplerinde içe doğru burkulma gerçekleşmiştir. Bu durum aksel basınç etkisindeki sandviç betonun yanal genişlemesinin sonucudur [30]. CFDST numunelerin dış çelik tüplerinin göçme modları karşılaştırıldığında, doluluk-boşluk oranı 0.70 olan numunelerin dış çelik tüplerinde burkulmalar h numune boyu olmak üzere genel olarak üst başlıkta yoğunlaşırken (20~30% h) doluluk-boşluk oranı 0.46 olan numunelerde ise burkulmaların numunelerin orta kısımlarında (40~60% h) meydana geldiği görülmüştür. Doluluk-boşluk oranı azaldıkça iç çelik tüp çapı küçülerek D/t oranı azalmakta, artan beton hacmi ile betonun çelik tüpler üzerinde oluşturduğu basınç artmakta, çapı küçülerek D/t oranı azalan iç çelik tüpün burkulması zorlaşmakta ve daha narin olan dış çelik tüpte yerel burkulmalar artmaktadır. 0.70 ve 0.46 doluluk-boşluk oranına sahip numunelerin yerel burkulma bölgelerindeki farklılığın bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Betonun yanal genişlemesi iç ve dış çelik tüplerde yanal basınç oluşturmakta ve iç çelik tüpün içe doğru burkulmasına neden olmaktadır. Doluluk-boşluk oranı farketmeksizin referans beton dolu DST'lerin aksel yük altında polipropilen ve çelik lif donatılı DST'lere göre daha fazla deplasman yaptığı görülmektedir. Sonuç olarak, sandviç betona eklenen lif donatılar aksel yük altında betonun yanal genişlemesini kısıtlamakta ve CFDST'lerin rijitliğini arttırmaktadır. Seçilen numunelerdeki göçme modlarına ilişkin fotoğraflar ileriki bölümlerde sonlu eleman sonuçlarıyla birlikte verilecektir.

## 5. CFDST'LER İLE İLGİLİ TASARIM YÖNETMELİKLERİ

Deney numunelerinin tasarlanmasında ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde yararlı olacağı düşüncesiyle AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings (2016) [22], EN 1994-1-1, Eurocode 4 [23] ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2017)'nda [28] beton dolgulu tek cidarlı boru kesitli kompozit elemanlar ile ilgili verilen koşullar incelenmiş, [29]'da tüm detaylar verilmiştir.

Özetle, AISC 360-16, EC4 ve ÇYTHYE'de yer alan beton dolgulu boru kesitli kompozit elemanlara ilişkin sınırlandırmalar Çizelge 5.1'de topluca verilmiştir.

**Çizelge 5.1 - Tasarım yönetmeliklerindeki malzeme sınırlandırmaları**

Parametre	AISC 360-16	EC4	ÇYTHYE
$f_y$ (MPa)	$f_y \leq 525$	$235 \leq f_y \leq 460$	$f_y \leq 460$
$f_c$ (MPa)	$21 \leq f'_c \leq 70$	$20 \leq f_c \leq 60$	$20 \leq f_{ck} \leq 70$
D/t	$\leq 0.31 (E_s/f_y)$	$\leq 90 (235/f_y)$	$\leq 0.31 (E_s/f_y)$
Çelik miktarı	$\geq$ tüm kesit alanının %1'i	$0.2 \leq \delta \leq 0.9$	$\geq$ tüm kesit alanının %1'i
Narinlik	$KL/r \leq 200$	$\lambda \leq 2$	$KL/r \leq 200$

**Çizelge 5.2 - Numunelerin yönetmelik tarafından önerilen/öngörülen bağıntılar ile hesaplanan ve deneysel sonuçlardan elde edilen eksenel basınç kapasiteleri**

Numune	$P_{u,deney}$ (kN)	$P_{AISC}$ (kN)	$P_{EC4}$ (kN)	$P_{AISC}/P_{u,deney}$	$P_{EC4}/P_{u,deney}$
DST-70	1226.25	1155.2	1155.62	0.94	0.94
DST-46	966.285	944.08	944.08	0.98	0.97
CFDST-R-70	1667.7	1498.93	1567.87	0.90	0.94
CFDST-R-46	1687.7	1471.24	1639.0	0.87	0.97
CFDST-D-70	1648.08	1570.77	1610.07	0.95	0.98
CFDST-D-46	1795.23	1581.56	1744.59	0.88	0.97
CFDST-P-70	1711.85	1652.50	1696.04	0.97	0.99
CFDST-P-46	1795.23	1707.05	1887.23	0.95	1.05
Ortalama				0.93	0.98
Standart Sapma				0.04	0.03

Yönetmelik bağıntılarıyla hesaplanan ve bu çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen eksenel basınç değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur. AISC 360-16 ve EC4 yönetmeliklerinde çift cidarlı içi beton dolu çelik tüplerin eksenel basınç kapasitelerine ilişkin bir bağıntı bulunmamaktadır. Çizelge 5.2 incelendiğinde, tek cidarlı (dışta tek tüp) içi beton dolu kesitler için EC4 yönetmeliğine göre hesaplanan numune kapasitelerinin deney sonuçları ile en yakın değerleri verdiği görülmektedir. AISC 360-16 ve EC4 sonuçlarının deney sonuçlarından küçük kalmasının önemli bir nedeni de önerilen bağıntıda içteki çelik tüpün sargı etkisinin dikkate alınmamasıdır. Böylece bu test programında dikkate alınan numuneler için EC4'de önerilen bağıntının güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Tüm sonuçlar birlikte

düşünüldüğünde aksnel kapasitenin her bir yönetmelikte verilen/öngörülen bağıntılar yardımıyla yeterli doğrulukta hesaplanabildiği görülmüştür; maksimum fark %13 ile AISC 360-16 bağıntısında ortaya çıkmaktadır.

## 6. SONLU ELEMAN MODELİ (FEM) VE DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRMA

### 6.1. Varsayımlar

CFDST'lerin aksnel basınç altında yapısal davranışını incelemek amacıyla numunelerden seçilenler (DST-46 ve CFDST-R-46) sonlu eleman analizi (FE) ile ABAQUS [21] programında modellenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yükler, sınır koşulları ve CFDST'lerin yapısal özellikleri radyal simetrik olduğundan simetrik aksnel model kullanılmıştır. CFDST'nin tüm bileşenlerini ayrıklaştırmak için azaltılmış entegrasyona sahip 4 düğümlü dörtgen aksnel simetrik eleman tipi CAX4R kullanılmıştır. İç ve dış çelik tüpler ile sandviç betonu ayırmak için üç ve beş ağ katmanı kullanılmıştır. CFDST'lerin alt yüzeyi tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiş ve deneysel sınır koşullarını temsil etmek için CFDST'lerin üst yüzeyinde yalnızca X akseni boyunca öteleme izin verilmiştir.

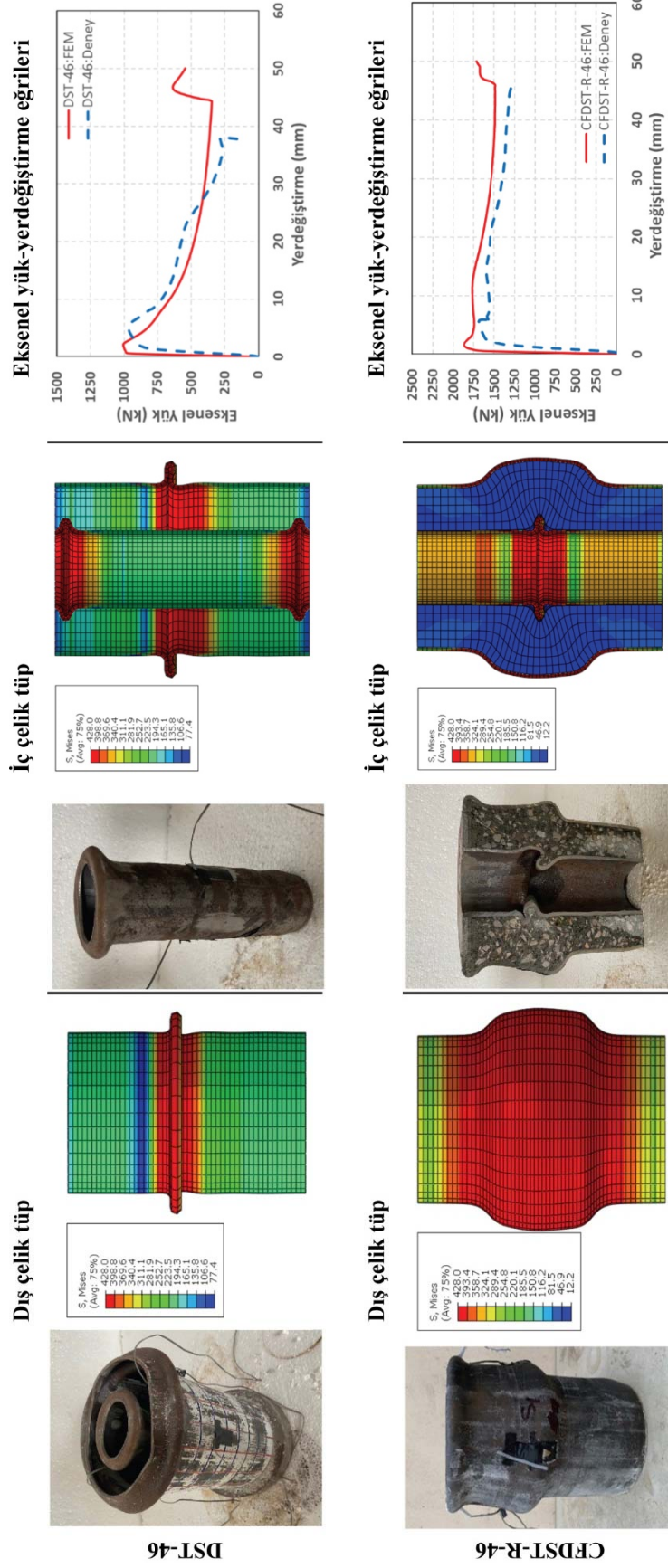
Sandviç beton ve çelik tüpler arasındaki etkileşim, yüzeyden yüzeye temas kullanılarak tanımlanmıştır. Sürtünme katsayısı 0,3[31] olarak kabul edilmiştir. Beton ve çelik boruların temas yüzeyleri bağımlı ve ana yüzeyler olarak alınmıştır. Elastisite modülü, Poisson oranı ve iç ve dış çelik tüplerin akma dayanımı sırası ile 200 GPa, 0.3 ve 365 MPa'dır. Çeliğin plastik davranışının, akma dayanımından sonra doğrusal ve %1 rijitlik ile olduğu varsayılmıştır [32]. Sandviç betonun çelik tüpler arasındaki davranışı, sargılama etkisinden dolayı normal betondan farklıdır. Sargılanmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi  $\sigma$  ve  $\epsilon$ . [33] çalışmasına göre elde edilmiştir. Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Sürtünme açısı, akma gerilme oranı ve genişleme açısı, önceki çalışmalara dayanarak sırasıyla 20, 0.8 ve 30 olarak seçilmiştir [31].

### 6.2. Karşılaştırma

Deneysel çalışma sonuçları ve DST-46 ile CFDST-R-46 numuneleri için geliştirilen sonlu eleman analiz modeli sonuçları maksimum aksnel basınç dayanımı, aksnel yük-yerdeğiştirme ve göçme modları olmak üzere 3 parametre kapsamında karşılaştırılmıştır. Modelleme için seçilen numunelerin deney sonucu ve sonlu eleman (FE) analizinden elde edilen aksnel basınç kapasiteleri ve bunların birbirine oranları Çizelge 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de DST ve CFDST numunelerinin deneysel çalışma ve sonlu eleman analizi modelinden elde edilen aksnel yük-yerdeğiştirme eğrileri ve göçme modları karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelinde numunelerin pik (aksnel yük-yerdeğiştirme eğrisinde numunenin göçmeden önce dayanabildiği maksimum/nihai yük değerine ( $P_{max}$ ) karşılık gelen noktayı ifade etmektedir.) sonrası davranışlarının deneysel sonuçlar ile bir miktar farklı olması, sonlu eleman analizinde nihai yüke ulaşıldıktan sonra malzeme davranış değişikliklerinin rastgeleliği ile ilişkilendirilebilir. Genel olarak, sonlu eleman analizi modelinin DST ve CFDST'lerin aksnel basınç altındaki davranışını iyi derecede öngördüğü söylenebilir.

**Çizelge 6.1** - Numunelerin deneysel sonuçlardan ve sonlu eleman analizinden elde edilen aksnel basınç kapasiteleri

Numune	$P_{u,deney}$ (kN)	$P_{u,FEM}$ (kN)	$P_{u,FEM}/ P_{u,deney}$
DST-46	966.29	1110	1.15
CFDST-R-46	1687.70	1870	1.11



Şekil 6.1 - DST-46 ve CFDST-R-46 numunelerinin deneysel çalışma ve sonlu eleman analizi modelinden elde edilen eksenel yük-yerdeğiştirme eğrileri ve göçme modları



Numunelerin sonlu eleman analizi modelinde meydana gelen göçme modları ile deneysel gözlemler karşılaştırıldığında, genel olarak, iç ve dış çelik boruların göçme modlarının benzer olduğu görülmektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, çift cidarlı içi beton dolu çelik tüplerin (CFDST) aksel basınç altındaki davranışlarını incelemek amacıyla dış çelik tüp çapları 170 mm ve yükseklikleri 300 mm olan toplamda 8 adet numune üretilmiş ve monotonik olarak artan aksel basınç kuvveti altında göçmeye kadar zorlanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilerle numunelerin akma sınır değerleri, aksel yük taşıma kapasiteleri ve süneklik oranları elde edilmiştir. Numunelerden seçilen ikisi sonlu eleman analizi ile ABAQUS programında modellenmiş, elde edilen verilerle deneysel numunelerin davranışları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Doluluk-boşluk oranı ve sandviç beton türü farketmeksizin, içi beton dolu çift cidarlı çelik tüp (CFDST) numunelerin içi beton dolu olmayan çelik tüp (DST) numunelere göre, beklendiği üzere, çok daha yüksek düşey yük dayanımına sahip olduğu ve daha sünek davranış sergilediği saptanmıştır. Çelik tüplerin arasına dökülen sandviç beton çift cidarlı çelik tüplerin aksel basınç dayanımını %35~85.5 oranında, süneklik oranını ise %306~333 oranında arttırmıştır.
- Doluluk-boşluk oranındaki artışın, çelik tüp kesit alanının artmasına bağlı olarak, içi boş çift cidarlı çelik tüp numunelerin (DST) aksel basınç dayanımını %26.9 oranında ve sünekliğini %19.2 oranında arttırdığı görülmüştür.
- Doluluk-boşluk oranındaki artışın, beton kesit alanının azalmasına bağlı olarak, beton karışımı farketmeksizin (lifli ya da lifsiz), tüm içi beton dolu çift cidarlı çelik tüp numunelerin (CFDST) aksel basınç dayanımını %1.8~8.9 aralığında azalttığı görülmüştür. Süneklik oranları karşılaştırıldığında ise, doluluk-boşluk oranındaki artışın içi referans beton ve çelik lif katkılı beton dolu çift cidarlı çelik tüplerin (CFDST-R, CFDST-D) süneklik oranını sırası ile %8 ve %49 arttırdığı, ancak içi polypropylene lif katkılı beton dolu numunelerin süneklik oranını %43.5 azalttığı görülmektedir. En yüksek enerji yutma kapasitesine sahip numunenin 0.46 doluluk-boşluk oranına sahip polipropilen lif donatılı beton dolu çift cidarlı çelik tüp numune (CFDST-P-46) olduğu tespit edilmiştir.
- Doluluk-boşluk oranı farketmeksizin, lif katkılı beton ile doldurulmuş çelik tüp numunelerin referans beton dolu olanlara göre bir miktar daha yüksek düşey basınç dayanımına sahip oldukları saptanmıştır.
- Numunelerin sonlu eleman analizi modelinde meydana gelen göçme modları ile deneysel gözlemler karşılaştırıldığında, genel olarak, iç ve dış çelik boruların göçme modlarının benzer olduğu görülmüştür. Dolayısı ile modelleme varsayımlarının tutarlı olduğu belirlenmiştir.

### Semboller

$\chi$	: Doluluk-boşluk oranı
$D_i$	: İç çelik tüp çapı
$D_o$	: Dış çelik tüp çapı
$t_i$	: İç çelik tüp kalınlığı
$t_o$	: Dış çelik tüp kalınlığı

L	: Numune boyu
$f_{yo}$	: Dış çelik tüp akma dayanımı
$f_{yi}$	: İç çelik tüp akma dayanımı
$f_c$	: Beton karakteristik basınç dayanımı (Eurocode 4, AIJ)
$f'_c$	: Beton karakteristik basınç dayanımı (AISC 360-16)
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı (ÇYTHYE)
$f_y$	: Çelik akma dayanımı
D/t	: Boru profiller için yerel narinlik
DI	: Süneklik oranı
$\mu$	: Süneklik oranı
$\Delta_u$	: Nihai yerdeğiştirme
$\Delta_y$	: Akma yerdeğiştirmesi
$\Delta_{max}$	: Maksimum yerdeğiştirme
0.80 P <sub>max</sub>	: Göçme sınır değeri
P <sub>y</sub>	: Akma sınır değeri
P <sub>u,deney</sub>	: Deney sonuçlarından elde edilen maksimum eksenel basınç dayanımı
P <sub>u,FEM</sub>	: Nümerik çalışma sonuçlarından elde edilen maksimum eksenel basınç dayanımı
P <sub>AISC</sub>	: AISC yönetmelik bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı
P <sub>EC4</sub>	: EC4 yönetmelik bağıntısı ile hesaplanan eksenel basınç dayanımı
E1	: Enerji yutma kapasitesi (Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinde 0.80P <sub>max</sub> değerine kadar olan kısmın altında kalan alan)
E2	: Enerji yutma kapasitesi (Eksenel yük-yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan tüm alan)
h	: Numune boyu
$\delta$	: Çelik katılım oranı $\lambda_p$
$\lambda$	: Narinlik sınır değeri (EC4)
KL/r	: Narinlik sınır değeri (AISC, ÇYTHYE)

### **Teşekkür**

Bu çalışma, İTÜ-BAP Birimi tarafından MYL-2019-42065 No'lu proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup teknik personelin yardımları için yazarlar teşekkür ederler. Beton üretimi Doç.Dr.Hasan Yıldırım'ın önerileri doğrultusunda yapılmıştır. Modellemedeki katkıları için Cem Güzelbulut'a yazarlar teşekkür ederler.

### **Kaynaklar**

1. Ayough, P., Sulong, N. H. R. and Ibrahim, Z., "Analysis and review of concrete-filled double skin steel tubes under compression", *Thin-Walled Structures*, 2020, 148, 160495.
2. Tao, Z. and Han, L.-H., "Behaviour of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns", *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62, 631-646.

3. Gayathri, V., Shanmugam, N.E. and Choo, Y.S., “Concrete-filled tubular columns part 1- cross section analysis”, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2004, 4, 459-478.
4. Huang, H., Han, L.-H., Tao, Z. and Zhao, X.-L., “Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66, 542-555.
5. Han, L.-H., Ren, Q.-X. and Li, W., “Tests on stub stainless steel-concrete-carbon steel double skin tubular (DST) columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 67, 437-452.
6. Yuan, W.B. and Yang J.J., “Experimental and numerical studies of short concrete-filled double skin composite tube columns under axially compressive loads”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80, 23-31.
7. Zhao, X.L. and Packer J.A., “Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns”, *Thin-Walled Structures*, 2009, 47, 617-628.
8. Huang, H., Han, L.-H., Tao, Z. and Zhao, X.-L., “Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66, 542-555.
9. Hassanein, M.F. and Kharoob O.F., “Analysis of circular concrete-filled double skin tubular slender columns with external stainless steel tubes”, *Thin-Walled Structures*, 2014, 79, 23-37.
10. Zhao, H., Wang, R., Lam, D., Hou, C.-C. and Zhang, R., “Behaviours of circular CFDST with stainless steel external tube: Slender columns and beams”, *Thin-Walled Structures*, 2021, 158, 107172.
11. Han, T. H., Stallings, J. M. and Kang, Y. J., “Nonlinear concrete model for double-skinned composite tubular columns”, *Construction and Building Materials*, 2010, 24, 2542-2553.
12. Hassein, M.F., Kharoob, O.F. and Liang, Q.Q., “Circular concrete-filled double skin tubular short columns with external stainless steel tubes under axial compression”, *Thin-Walled Structures*, 2013, 73, 252-263.
13. Li, W. and Cai, Y.-X., “Performance of CFDST stub columns using high-strength steel subjected to axial compression”, *Thin-Walled Structures*, 2019, 141, 411-422.
14. Li, W., Wang, D. and Han, L.-H., “Behaviour of grout-filled double skin steel tubes under compression and bending: Experiments”, *Thin-Walled Structures*, 2017, 116, 307-319.
15. Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X.H. and Lam, D., “Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns”, *Engineering Structures*, 2014, 172, 211-228.
16. Tao, Z., Han, L.-H. and Zhao, X.-L., “Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60, 1129-1158.
17. Ellobody, E. and Ghazy, M.F., “Experimental investigation of eccentrically loaded fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 76, 167-176.
18. Badogiannis, E.G., Christidis, K.I. and Tzanetatos, G.E., “Evaluation of the mechanical behavior of pumice lightweight concrete reinforced with steel and polpropylene fibers”, *Construction and Building Materials*, 2019, 196, 443-456.

19. Fantilli, A. P., Vallini, P. and Chiaia, B., “Ductility of fiber-reinforced self-consolidating concrete under multi axial compression”, *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33, 520-527.
20. Gopal, S.R. and Manoharan, P.D., “Experimental behaviour of eccentrically loaded slender circular hollow steel columns in-filled with fibre reinforced concrete”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62, 513-520.
21. ABAQUS, Standard User's Manual The Abaqus Software is a product of Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence, 2014, RI, USA: Dassault Systèmes, USA; 2008.
22. AISC 360-16 (2016a), Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2016, Chicago, IL.
23. EN 1994-1-1: Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, 2004, European Committee for Standardization, Brussels.
24. ASTM 370-8a, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2008, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
25. Yildirim, H., Sertbas, B., Berberil, V. and Naaman, A., “Effect of polypropylene and steel fibers on properties of self-compacting concrete”, *The Third North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, Challenges and Barriers to Application*, 2008, Chicago.
26. Ekmekyapar, T., Alwan, O. H., Hasan, H. G., Shehab, B. A. and Al-Eliwi, B. J. M., “Comparison of classical, double skin and double section CFST stub columns: Experiment and design formulations”, *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 155, 192-204.
27. Le, D. D., Nguyen, X.-H. and Nguyen, Q.-H., “Cyclic testing of a composite joint between a reinforced concrete column and a steel beam”, *Applied Science*, 2020, 10, 2385.
28. ÇYTHYE, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, Türk Yapısal Çelik Derneği, İstanbul.
29. Yılmaz Cihan B. C., “İçi beton dolu çift cidarlı çelik tüplerin (CFDST) aksel basınç altında deneysel olarak incelenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2022, 189 sayfa.
30. Cihan, B.C., Binbir, E., Yıldırım, H. and Celik O.C., “Compression tests on circular polypropylene and steel fiber reinforced concrete-filled double skin steel tubes, The 11th International Symposium on Steel Structures (ISSS-2021), November 3-6 2021, Jeju, Korea.
31. Patel V.I., Hassanein, M.F., Thai, H.-T., Al Abadi H., Elchalakani, M. and Bai Y., “Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design”, *Engineering Structures*, 2019, 179, 268–83. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.081>
32. Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X.H. and Lam, D., “Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns”, *Engineering Structures*, 2014, 172, 211-228.
33. Le, T.T., Patel, V.I., Liang, Q.Q. and Huynh P., “Axisymmetric simulation of circular concrete-filled double-skin steel tubular short columns incorporating outer stainless-steel tube”, *Engineering Structures*, 2021, 227, 111416.

## Bambu Donatılı Betonarme Kirişlerde Düşey Yükler Altında Göçmenin Deneysel İncelenmesi

Özlem KARAKUŞ ZAMBAK<sup>1</sup>, Ergün BİNİR<sup>2</sup>, Furkan ÇALIM<sup>3</sup>, Oğuz Cem ÇELİK<sup>4</sup>

### ÖZET

Türkiye'ye Endonezya'dan getirilen bambu türünün betonarme kirişlerdeki performansının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, tüm donatıları yüzeysel işlem görmemiş bambu olan betonarme kiriş (BBRC), tüm donatıları çelik olan betonarme kiriş (SRC), ana donatıları bambu, ancak etriyeleri çelik olan betonarme kiriş (BRC) ve donatısız betonarme referans kiriş (PCC) olmak üzere 4 adet numune üretilmiştir. Tüm kiriş numunelerine monotonik olarak artan düşey yük altında ( $L/3$ 'de) dört nokta eğilme testi uygulanmıştır. Kirişlerin ulaştıkları maksimum yükler her bir numunede BBRC=83.96 kN, BRC=101.60 kN, SRC=127.07 kN ve PCC=34.50 kN'dur. Deneyler, bambunun donatı elemanı olarak kullanılmasının referans kirişe göre yük kapasitelerini ortalama %269 oranında arttırdığını göstermiştir. Rijitlik ve süneklik, çelik donatılı klasik kirişe göre daha az etkin olmakla birlikte sınırlı süneklikte elemanların yeterli olabileceği durumlarda bambunun donatı olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bambu, Çelik, Çekme dayanımı, Kiriş, Eğilme kapasitesi, Kesme/kayma kapasitesi, Çatlak yayılımı, Sürdürülebilirlik.

### ABSTRACT

#### **Experimental Collapse Investigation of Bamboo Reinforced Concrete Beams under Vertical Loads**

It is aimed to experimentally investigate the structural performance of bamboo species brought to Turkey from Indonesia in reinforced concrete (RC) beams. In this direction, 4 types of reinforced beam specimens were produced as follows; RC beam with all reinforcements of untreated bamboo (BBRC), RC beam with all deformed steel reinforcements (SRC), RC beam with bamboo main reinforcements and steel rebar stirrups (BRC), unreinforced concrete reference beam (PCC). Four-point flexural/bending tests were applied to all beam specimens under monotonically increasing vertical load (at  $L/3$ ). The maximum capacities of the beams are obtained to be BBRC=83.96 kN, BRC=101.60 kN, SRC=127.07 kN, and PCC=34.50 kN.

---

1 Uşak Üniversitesi - ozlem.karakus@usak.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi - binbirergun@gmail.com

3 İstanbul Teknik Üniversitesi - calimf@itu.edu.tr

4 İstanbul Teknik Üniversitesi - celikoguz@itu.edu.tr

*Experiments have shown that the use of bamboo as a reinforcement component in RC beams increases the load capacity by an average of 269% compared to the reference beam. Although the stiffness and displacement ductility values were observed to be less effective when compared to classical steel RC beam, it was deemed that bamboo RC beams could be preferred in structural members when limited ductility is sufficient.*

**Keywords:** *Bamboo, Steel, Tensile strength, Beam, Flexural capacity, Crack propagation, Sustainability, Testing.*

## **1. GİRİŞ**

Çoğu ülkede beton, yüksek basınç dayanım özelliklerine sahip olması, kolay ulaşılabilir olması ve ekonomik nedenlerle yaygın olarak kullanılan taşıyıcı sistem malzemelerinden biridir. Düşük çekme dayanımı nedeniyle çelik ile güçlendirilmiş şekli olan betonarme uzun süredir kullanılmaktadır. Genellikle çelik donatılı betonarmeye, özellikle gelişmekte olan ülkelerin çeliğe erişiminin yüksek maliyetler sonucu zor olması nedeniyle, alternatif malzeme arayışı yoluna gidilmiştir.

Alternatif malzeme kapsamında günümüze dek doğal olarak temin edilen bir çok lif betonla birlikte kullanılmıştır [1-4]. Bu tür malzemelerin kullanılmasının amacı betonun mekanik özelliklerini iyileştirmektir/arttırmaktır. Son zamanlarda, içerdiği yüksek dayanım özellikleri sayesinde betonun düşük çekme dayanımını gidermek amacıyla betonda çelik donatı yerine bambu kullanılması için yoğun araştırmalar özellikle uzak doğu ülkelerinde yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda, bambu ile güçlendirilmiş yapısal elemanların (kullanılan bambu tipine çok bağlı olmakla birlikte) çelik ile güçlendirilmiş yapısal elemanlarınkine benzer yük taşıdığı sonuçlarına ulaşılmıştır [5].

Benzer kapasitelere ulaşılmasının yanısıra, bambunun çelik donatıya göre en büyük üstünlüğü korozyon sorunu bulunmaması ve sürdürülebilir olmasıdır. Yaşlı betonarme yapılarının en büyük sorunlarının başında donatı korozyonu gelmektedir [6-8]. Çelik donatının zamanla korozyonu betonarme yapıların düşey ve yatay (deprem) yükler etkisinde performansını olumsuz düzeyde etkilemektedir. Bu türden eski betonarme yapıların belki de deprem performansından daha öncelikli olarak sorgulanması gereken konu budur. Yapılan araştırmalarda bambunun üretimi için harcanan enerjinin, çelik için harcanan enerjiden 50 kat daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır [5]. Bunun yanısıra bambu, hemen hemen her tropikal ve subtropikal bölgede hızlı bir şekilde büyüdüğü ve kısa sürede olgunlaştığı için, kolayca erişilebilir durumdadır; bu sayede inşaat maliyetini de düşürebilmektedir.

Özetle, bambunun çeliğe göre ekonomik olması, gelişmekte olan ülkeler için erişiminin kolay olması, sürdürülebilir (sustainable) bir malzeme olması, yüksek dayanım özellikleri barındırmasından dolayı çeliğe alternatif çevre dostu bir malzeme konumunda olması, ülkemizde ise Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yetiştirilmeye başlanması ve bu konuda yapılan araştırmaların nadir olması bu çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmayla, ülkemizde ilk defa bambunun donatı olarak betonda kullanımını deneysel yöntemlerle ele alınmış olacaktır.

## **2. AMAÇ VE KAPSAM**

### **2.1. Çalışmanın Amaçları**

Bambu malzemesi kullanılarak farklı özelliklerde üretilen bambu donatılı betonarme kiriş davranışlarının çelik donatılı referans betonarme kiriş ve donatısız beton kiriş ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Türkiye'de ilk defa deneysel olarak gerçekleştirilecek bu çalışma ile bambu hakkındaki sınırlı literatüre katkı sağlanacaktır.

Çelik donatılı betonarme kirişlerin mekanik özellikleri ve davranışları detaylı bir şekilde incelenmiş ve iyi belgelenmiş olmasına karşın, bambu donatılı betonarme kirişler için kapsamlı/güvenilir veri bulmak güçtür. Bu deneysel çalışmada, çelik donatılı betonarme kirişler için Türkiye’de geçerli olan yönetmelikler kullanılarak bambu donatılı betonarme kirişler tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca, yapılan araştırmalardan yola çıkarak, bambunun etriye olarak kullanımıyla ilgili çalışmaların da sınırlı kaldığı görülmüştür. Etriyeleri dahil tüm donatıları bambu olan bir kiriş de üretilerek davranışa olan etkileri incelenecektir.

Bambunun bir çok üstünlüğünün yanısıra su emme kapasitesinin yüksek olması önemli bir sorundur [9]. İşlem görmeden donatı olarak kullanımı bambunun şişmesi ve daha sonra büzülüp betondan sıyrılmasına neden olabilir. Bu nedenle, bu çalışmada bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla bambu donatıların tümüne epoksi esaslı yapıştırma malzemesi (Sikadur 32 Gel) sürülerek betonda bulunan suyu emmesi önlenmiştir [10]. Bunun yanısıra, epoksi esaslı koruma malzemesi uygulanmasıyla, bambunun beton ile arasındaki bağ dayanımının artırılması ve aderans kaybı sonucu erken göçmenin oluşumunun engellenmesi hedeflenmektedir.

Üretilen toplam 4 adet kiriş numunelerine monotonik olarak artan düşey yükler altında dört nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir; böylece, bu tür kirişlerin hem eğilme hem de kesme/kayma davranışı birarada incelenebilmiştir. Yapılan dört nokta eğilme deneyleri sonucunda kiriş numunelerinin ilk çatlak yükleri, yük-yerdeğiştirme eğrileri, yük-şekildeğiştirme eğrileri, yük taşıma kapasiteleri, davranış biçimleri, çatlak dağılımı ve göçme modları elde edilmiştir.

## 2.2. Çalışmanın Kapsamı

Çalışma, bambunun betonda kullanımının deneysel olarak araştırılmasını ve deney sonuçlarından elde edilen verilerin donatısız (beton) ve çelik donatılı (betonarme) kirişlerle karşılaştırmalı olarak incelenmesini içermektedir. Bu doğrultuda, tüm donatıları yüzeyi işlem görmemiş bambu olan betonarme kiriş (BBRC), tüm donatıları çelik olan betonarme kiriş (SRC), ana donatıları bambu, ancak etriyeleri çelik olan betonarme kiriş (BRC) ve donatısız beton referans kiriş (PCC) olmak üzere 4 adet numune üretilmiştir.

Kiriş numunelerinin üretilmesinden önce kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bambu ve beton malzemelerine sırasıyla çekme ve basınç testleri yapılmıştır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinin ardından aynı beton kalitesine sahip, hazır beton kullanılarak oluşturulan kiriş numunelerine monotonik artan düşey yük altında dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI

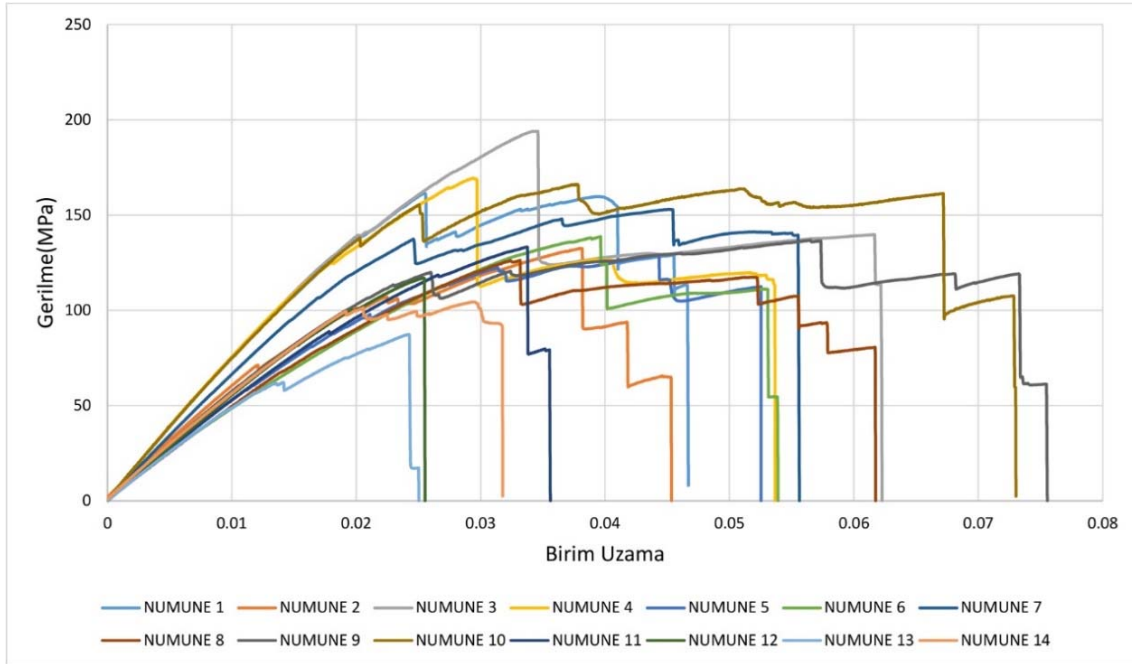
### 3.1. Bambu Çekme Testleri

Bambu donatılı betonarme kiriş numuneleri üzerinde eğilme deneyleri gerçekleştirileceğinden, bu deneyler öncesinde bambunun mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile bir dizi çekme testleri yapılmıştır. Çenelerde 4 cm kavrama kısımları ile toplamda 14 cm uzunluğunda köpek kemiği şeklinde oluşturulan bambu numuneleri ve test sırasındaki görselleri Şekil 3.1’de verilmiştir [11]. Literatürde bambu kültürlerinde bulunan düğümlerin genel olarak bambu malzemesi için göçme noktası olduğu gözlemlendiğinden, düğümsüz numunelerle karşılaştırmak amacı ile 14 numunedan 4 tanesi orta noktasında düğüm olacak şekilde boyutlandırılmıştır.



Şekil 3.1. - Bambu çekme numuneleri ve çekme testi

Bilgisayar kontrollü çekme testi cihazından (MTS Criterion-Model43) elde edilen kuvvet ve uzama verileri Excel programına yüklenerek gerilme ve birim uzama değerleri elde edilmiş ve grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 3.2). Gerilme-birim uzama grafiklerinden bambunun belirgin bir akma noktasına sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda, literatürde genellikle çelik için önerilen %0,2'lik plastik uzamaya ( $\epsilon_{plastik} = 0,002$ ) karşılık gelen çekme dayanımı akma dayanımı olarak alındığından, bu çalışmada da bambu numunelerin akma dayanımlarının belirlenmesinde %0,2 offset metodu kullanılmıştır [12].



Şekil 3.2. - Bambu numunelerin gerilme-birim uzama eğrileri\*

\*Numune 1~10 arası düğümsüz, Numune 11~14 arası düğümlüdür.

Sonuç olarak, betonarme kirişlerde donatı olarak kullanılacak olan bambu malzemesinin dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme testlerinde, tüm bambu çekme numunelerinin



ortalama çekme dayanımı, akma dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 139.29 MPa, 109.43 MPa ve 6.1 GPa olarak hesaplanmıştır.

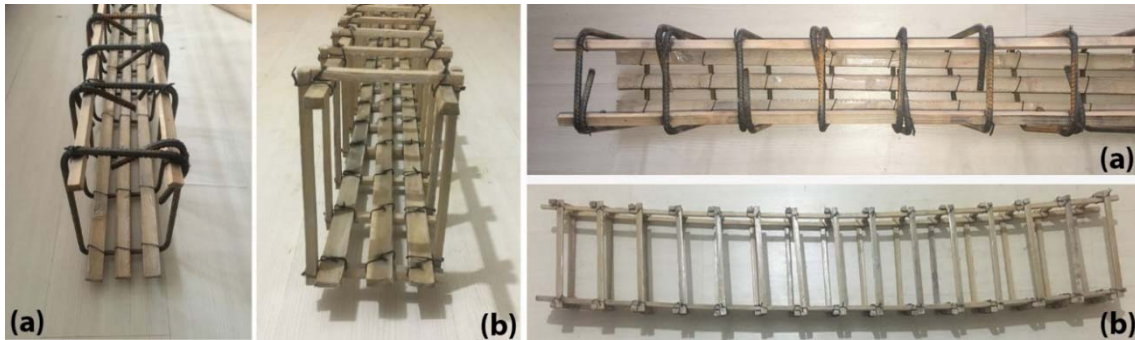
### 3.2. Beton Basınç Testleri

Bambu ve çelik donatılı betonarme kiriş numunelerinin hazırlanmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'nde önerildiği gibi minimum beton sınıfı olan C25 hazır beton kullanılmıştır [13]. Beton basınç dayanım testlerinin kiriş eğilme deneyleriyle aynı günde yapılmasına özen gösterilmiştir. Beton numunelerinin basınç testi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde ortalama basınç dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 31.3MPa ve 22967MPa olarak elde edilmiştir. Kapasite hesapları bu değerlere göre revize edilmiştir.

### 3.3. Bambu ve Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Testleri

Çalışma kapsamında üretilecek kirişler yaklaşık aynı kapasitede ve denge altı donatılı kiriş olarak tasarlanmıştır. Kirişlerin tasarım sürecinde, laboratuvar koşulları da göz önünde bulundurularak, deney yapımının pratikliğine izin verecek boyutlar olan  $L_0=170$  cm uzunluk,  $h=30$  cm yükseklik ve  $b=20$  cm genişlik seçilmiştir; mesnetler arası açıklık  $L=150$  cm'dir. Çelik donatılı betonarme kirişlerde 2 adet 12 mm çapında asal çekme donatısı, 2 adet 10 mm çapında montaj donatısı ve 10 cm aralıklarda 14 adet 8 mm çapında kayma donatısı kullanılmıştır. Kullanılan donatı, TS708 standardı uyarınca S420 (B420C) nervürlü çelik donatıdır [14]. Kesitteki çekme/ana çelik donatı oranı %0.43'tür.

Bambu donatılı betonarme kirişlerin hazırlanması aşamasında asal çekme donatıları 10x30x1650 mm, montaj donatıları 10x10x1650 mm ve kayma donatıları (etriye) ise farklı uzunluklarda olmak üzere 10x10x150 mm ve 10x10x250 mm şeklinde düzenlenmiştir; kesitteki çekme/ana bambu donatı oranı %1.7'dir. Kesim yapıldıktan sonra bambu donatıların yüzeylerinde bulunan düğüm noktalarını düzleştirmek, mümkün olduğunca homojen bir kalınlık elde etmek ve epoksi esaslı yapıştırma malzemesinin donatı yüzeyine iyi yapışmasını sağlamak amacıyla zımpara işlemi uygulanmıştır. Bambu, suyu emen bir malzeme olduğundan beton içerisinde bulunan suyun emilimini önlemesi amacıyla bambu donatı yüzeylerine, yapılan literatür taraması sonucu en iyi performansı gösteren, Sikadur 32 Gel epoksi esaslı malzeme uygulanmıştır [12,15,16]. Yapılan bu işlem ile bambunun beton ile olan bağ dayanımını arttırmak da amaçlanmıştır.

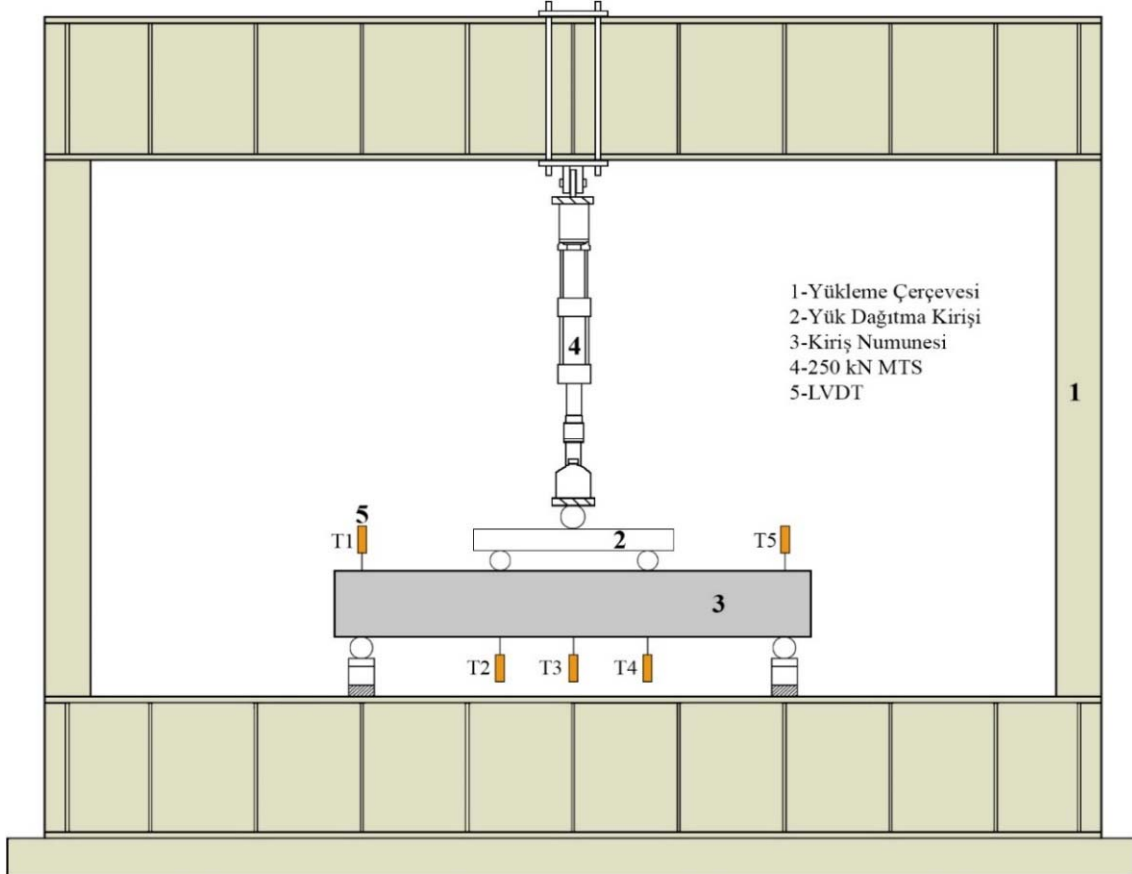


Şekil 3.3. - BRC (a) ve BBRC (b) kiriş numuneleri

Yukarıda da belirtildiği gibi çelik ve bambu donatılı kirişlerin performansı karşılaştırılacağından, moment taşıma gücü ve dolayısı ile sistem taşıma gücünün birbirine yakın değerler olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan hesaplarda çelik donatılı betonarme kirişlerin moment taşıma gücü

23,62 kNm ve taşıma yükü 94,48 kN iken, bambu donatılı betonarme kirişlerde bu değerler sırasıyla 24,46 kNm ve 97,84 kN olarak bulunmuştur; bunların yeterince yakın olduğu düşünülmektedir [17,18,19].

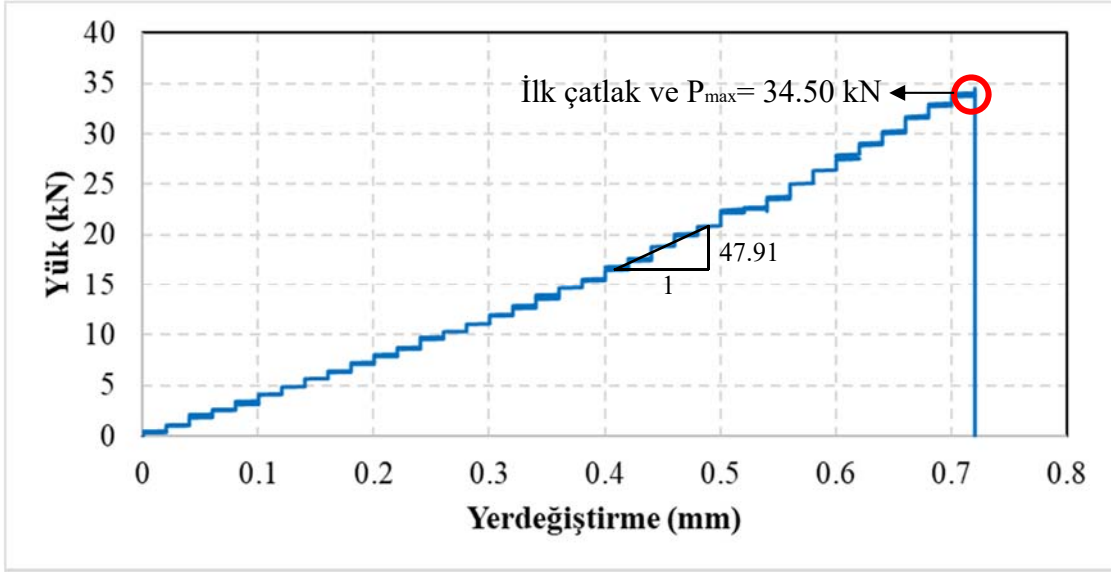
Tüm kiriş numunelerine dört nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Deneyin, monotonik artan düşey yük altında ilk çatlak oluşana kadar 0.005 mm/sn hızda, ilk çatlak oluşuktan sonra ise 0.01 mm/sn hızda gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kiriş testlerinin yapıldığı deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. - Kiriş numunesinin deney düzeneğindeki şematik görünümü

### 3.3.1. Donatısız, beton kiriş (PCC)

Bambu ve çelik donatıların betondaki durumunun donatı içermeyen kirişin davranışlarıyla karşılaştırılarak daha iyi anlaşılabilmesi için 1 adet donatısız, beton kiriş üretilmiştir. Dört nokta eğilme deneyi gerçekleştirilen kirişte ilk çatlak gözlemlenmeden 34.5 kN yükte (P) ve 0.72 mm yerdeğiştirmede ( $\delta$ ) beklendiği üzere eğilmeden kaynaklı çok ani (gevrek) göçme gerçekleşmiştir; kırılma, kirişin sağ kenarından 67 cm uzaklıkta oluşmuştur (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. - PCC kiriş numunesi yük-yerdeğiştirme grafiği

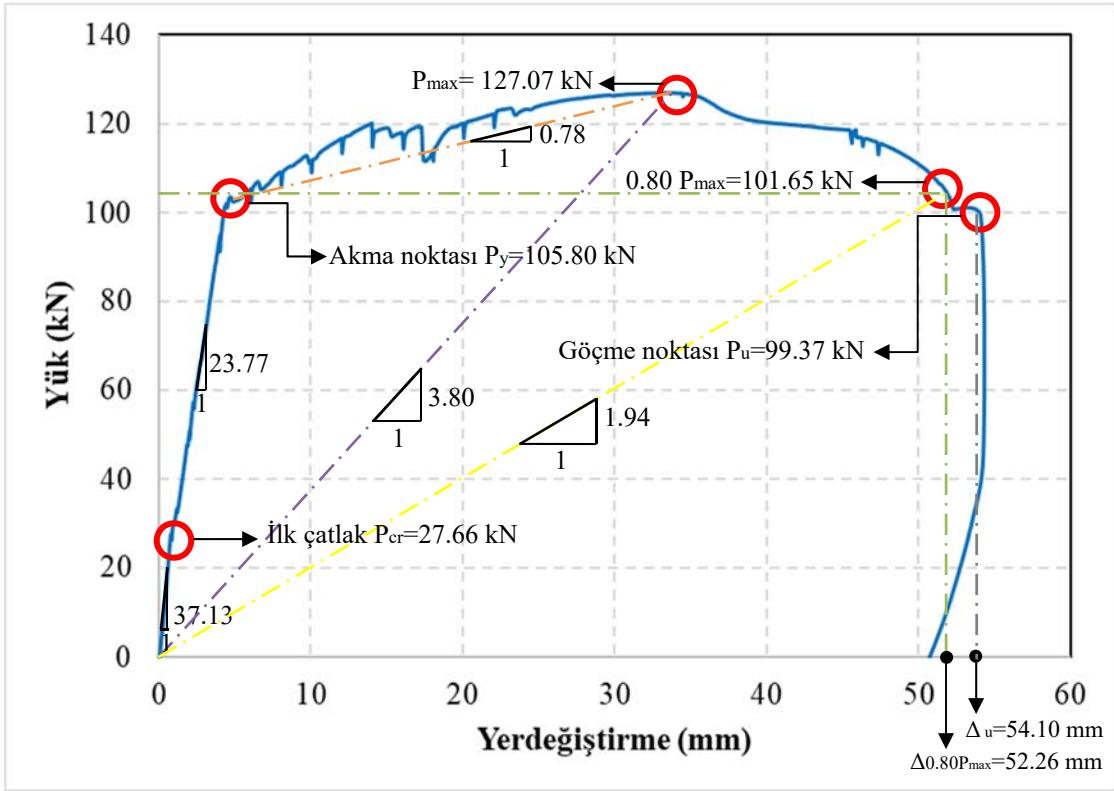


Şekil 3.6. - PCC kiriş deneyi;  $P=34.5$  kN,  $\delta=0.72$  mm

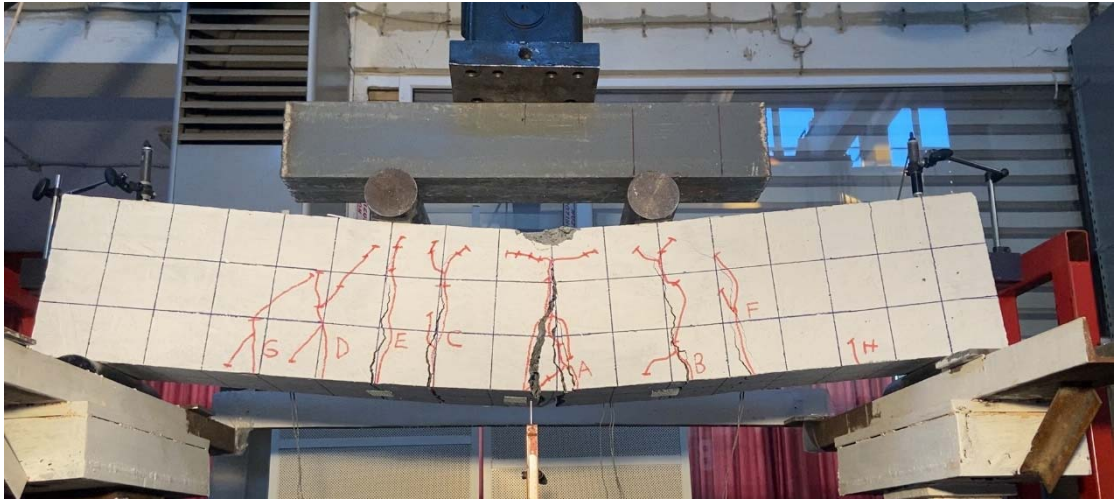
### 3.3.2. Çelik donatılı betonarme kiriş (SRC)

Çelik donatılı betonarme kiriş, bambunun betonda kullanımının görelî etkinliğini karşılaştırmalı olarak incelemek üzere tasarlanmıştır. Dört nokta eğilme deneyi sırasında elde edilen maksimum yük 127.07 kN, maksimum düşey yerdeğiştirme ise 54.3 mm'ye ulaşmıştır. Deney sonunda A çatlağının genişliği 8mm ye kadar çıkmıştır (Şekil 3.8).

SRC kirişinde yük-yerdeğiştirme grafiği oluşturulmuş ve Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu şekil üzerinde kritik noktalar altında kalan bölümlerin doğru parçalar ile birleştirilmesi sonucu elde edilen eğim (rijitlik) değerleri de gösterilmiştir. Beklendiği üzere, oldukça sünek bir davranış elde edilmiş, kirişte tasarlandığı gibi eğilme göçmesi oluşmuştur.



Şekil 3.7. - SRC kiriş numunesi yük-yerdeğiştirme grafiği

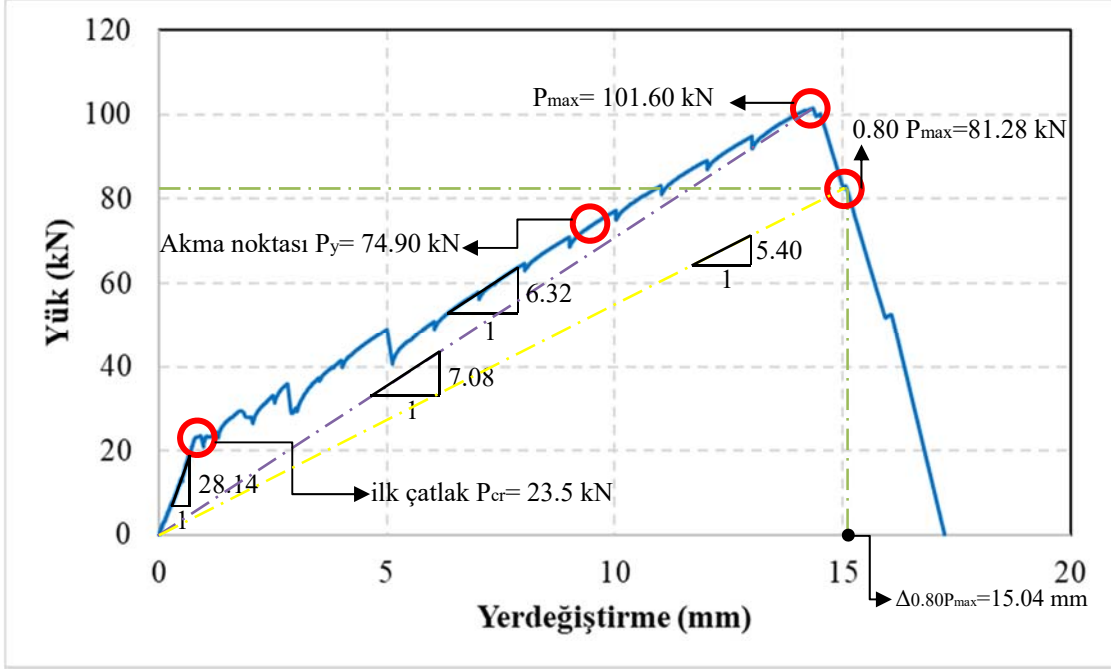


Şekil 3.8. - SRC kirişi dört nokta eğilme deneyi, göçme anı

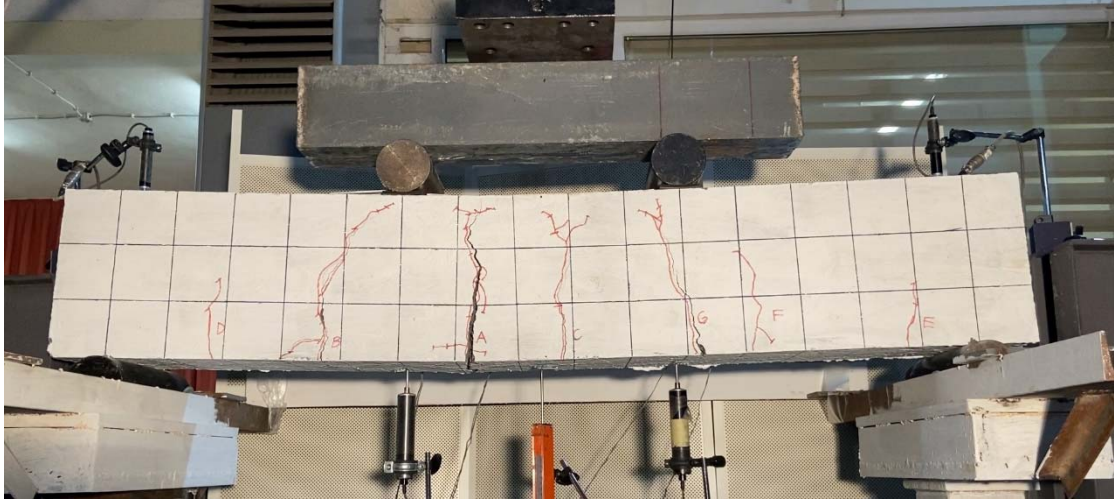
### 3.3.3. Bambu donatılı betonarme kiriş (BRC)

Bambunun betondaki davranışını gözlemlemek amacıyla 1 adet yalnızca ana ve montaj donatıları bambu olan betonarme kiriş üretilmiştir; etriyeler çelik donatıdır. Bambu donatıya beton içerisinde bulunan suyu emmesini önlemeye ve betonla aderansını arttırmaya yönelik epoksi esaslı yapıştırma malzemesi dışında herhangi bir işlem uygulanmadan sistem düz donatılarla oluşturulmuştur.

Kiriş A çatlağının bulunduğu noktada eğilmeden dolayı göçmüş ve deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında elde edilen maksimum yük değeri 101.60 kN, maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı ise 17.00 mm'ye ulaşmıştır. Yerdeğiştirme ölçerlerden yararlanılarak çizilen yük-yerdeğiştirme (açıklık ortasında) grafiği Şekil 3.9'da verilmiştir. Göçmenin, sınırlı da olsa, sünek bir biçimde gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 3.9. - BRC kiriş numunesi yük-yerdeğiştirme grafiği

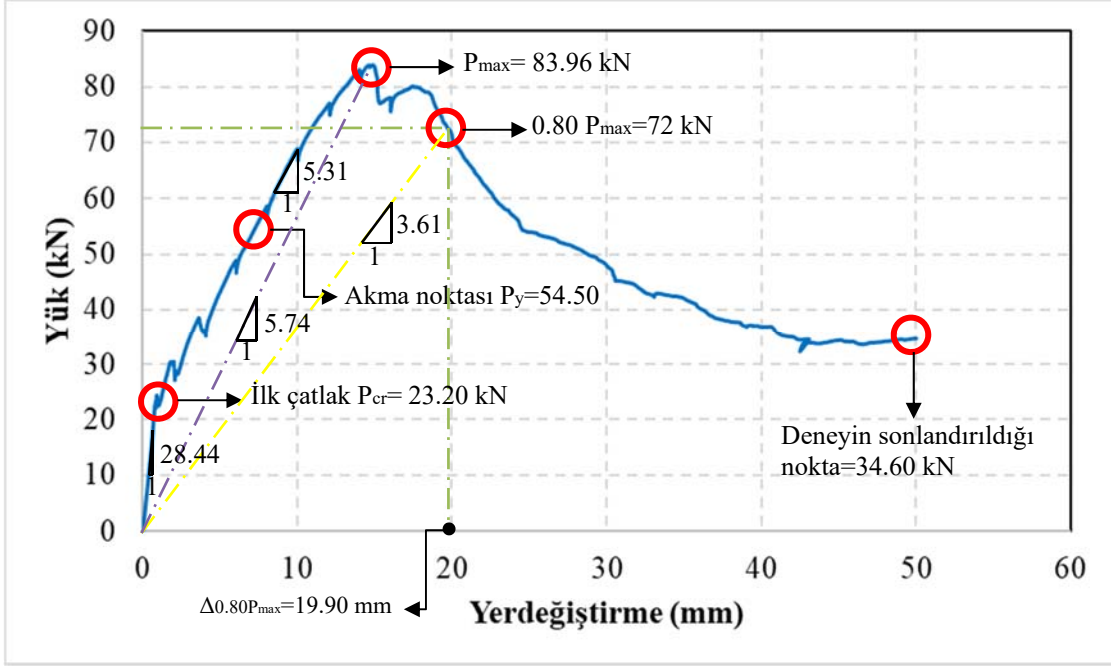


Şekil 3.10. - BRC kirişi dört nokta eğilme deneyi, göçme anı

### 3.3.4. Bambu etriyeli bambu donatılı betonarme kiriş (BBRC)

Bambunun eğilme performansının yanında kesme kapasitesini de incelemek amacıyla tüm donatıları bambu olan bir kiriş de üretilmiştir. BBRC olarak adlandırılan bambu etriyeli, bambu ana donatılı betonarme kirişe dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır.

Deney sırasında elde edilen maksimum yük miktarı 83.96 kN olmuştur. Yüklemeye devam edildiğinde maksimum kapasitesi olan 83.96 kN'dan sonra numunenin yükü düşmeye başlamış, yük 34.60 kN değerine düştüğünde yükleme durdurulmuş ve deney sonlandırılmıştır. Deney sırasında elde edilen maksimum yerdeğiştirme miktarı 50 mm'dir. Deney sonunda, yük-yerdeğiştirme grafiği oluşturulmuş ve Şekil 3.11 'de verilmiştir. Kirişte ilk çatlaklar açıklık ortasında oluşmasına karşın, ilerleyen adımlarda C ile gösterilen kayma çatlağının gelişimi daha da hızlanmış, bu çatlak, sistemin bu noktadan göçmesine neden olmuştur. Eğilme çatlaklarının gelişim hızının kayma çatlağının hızından geride kalması kirişi kayma göçmesine götürmüş, ancak göçme dayanım azalmasına karşın gevrek/ani bir biçimde olmamıştır.



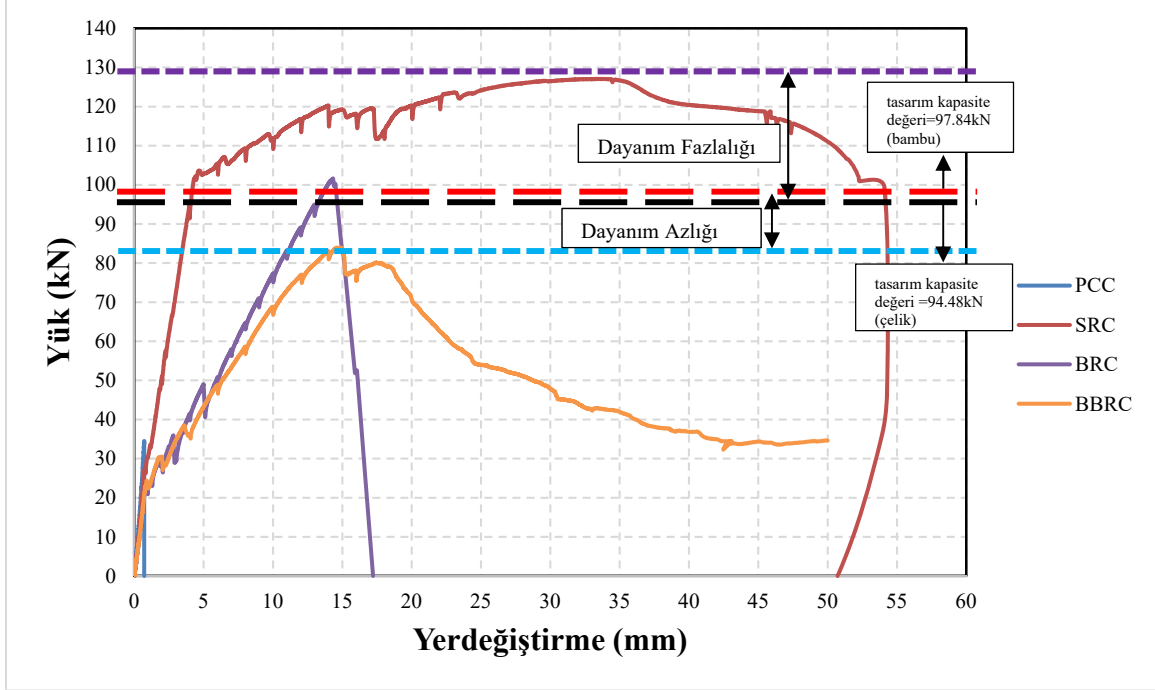
Şekil 3.11. - BBRC kiriş numunesi yük-yerdeğiştirme grafiği



Şekil 3.12. - BBRC kirişi dört nokta eğilme deneyi, göçme anı

### 3.4. Deney Sonuçlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi

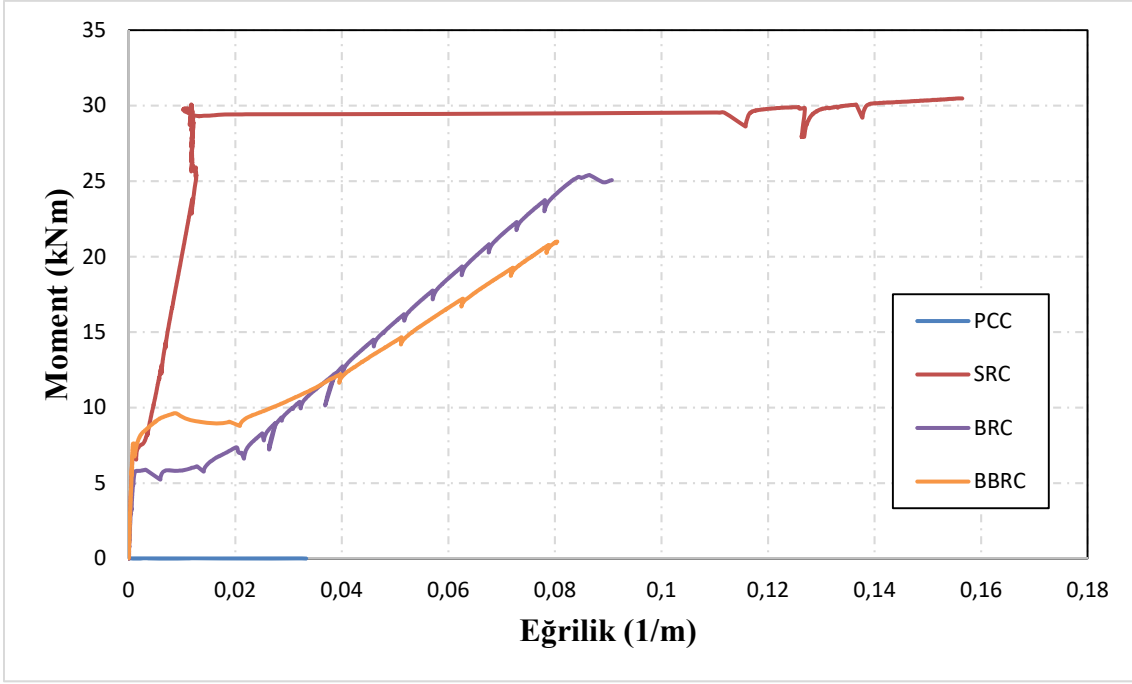
Farklı özellikteki kiriş numunelerinin performanslarını karşılaştırabilmek amacıyla tüm eğriler tek bir yük-yerdeğiştirme grafiğinde topluca verilmiş ve Şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. - Tüm kiriş numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrileri

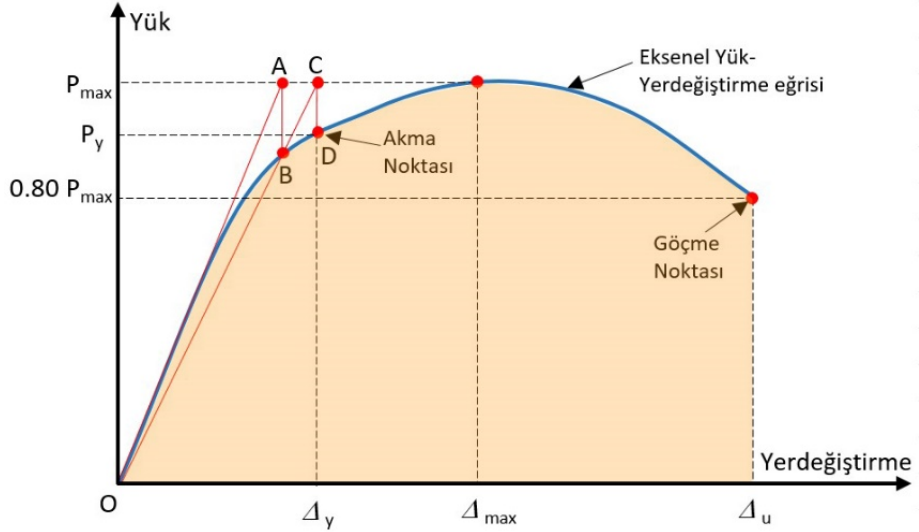
Şekil 3.13'de görüldüğü gibi tüm numuneler birlikte değerlendirildiğinde tasarım yüküne göre dayanım fazlalığı ve dayanım azlığı bantlarına giren numuneler ile karşılaşılmıştır. Dayanım fazlalığı olan çelik donatılı numunede beton dayanımındaki artışa ek olarak çelik donatının elastik ötesi davranışı (özellikle pekleşme) önemli rol oynamaktadır. Benzer şekilde, dayanım fazlalığı olan bambu donatılı numunelerde de aynı faktörler (bu kez bambu donatı) etkindir. Buna karşın, dayanım azlığı olan bambu donatılı betonarme numunelerde beton kalitesindeki olası yerel düşüklükler ve aderans kaybı sonucu bambu donatının kapasitesinden tam olarak yararlanılamaması (başka bir deyişle, gerilme-şekildeğiştirme diyagramında pik noktalara ulaşamaması) ve bunun sonucu kesme kuvvetlerinin yüksek olduğu mesnete yakın bölgelerde eğik kayma çatlaklarının açıklıkta meydana gelen eğilme çatlaklarından daha hızlı genişlemesi kirişin eğilme kapasitesine erişmeden, kayma nedeniyle düşük yüklerde göçmesine neden olmuştur. Buna karşın, kayma göçmesinin olduğu numunede daha yüksek deplasman kapasitesine ulaşılmıştır; bu da, bu kiriş özelinde, olumlu bir davranış biçimi olarak değerlendirilmiştir.

DeneySEL verilerden hareketle, tüm kiriş numunelerinin maksimum eğilme momenti-eğrilik grafikleri deney sonuna kadar kopma olmayan donatılar üzerindeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan veriler kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 3.14'de verilmiştir. Bambu donatılı numunelerin gerek çatlama sonrası rijitlik değerleri gerekse süneklik bakımından çelik donatılıya göre daha az etkin olduğu anlaşılmaktadır; buna karşın, her iki numune de donatısız olana göre çok etkindir.



Şekil 3.14. - Tüm kiriş numunelerinin moment-eğrilik grafiği

Kiriş numunelerinin süneklik oranları, numunenin göçme yükündeki yerdeğiştirme miktarının ( $\Delta_u$ ) akma yükündeki yerdeğiştirme miktarına ( $\Delta_y$ ) oranıyla bulunmuştur. Akma dayanımı ve yerdeğiştirme miktarı Genel Akma Yöntemi yardımıyla [20, 21] Şekil 3.15’den, her bir numunede yutulan toplam enerji miktarı ise diagram altındaki alan hesaplanarak Tablo 3.1’e eklenmiştir.



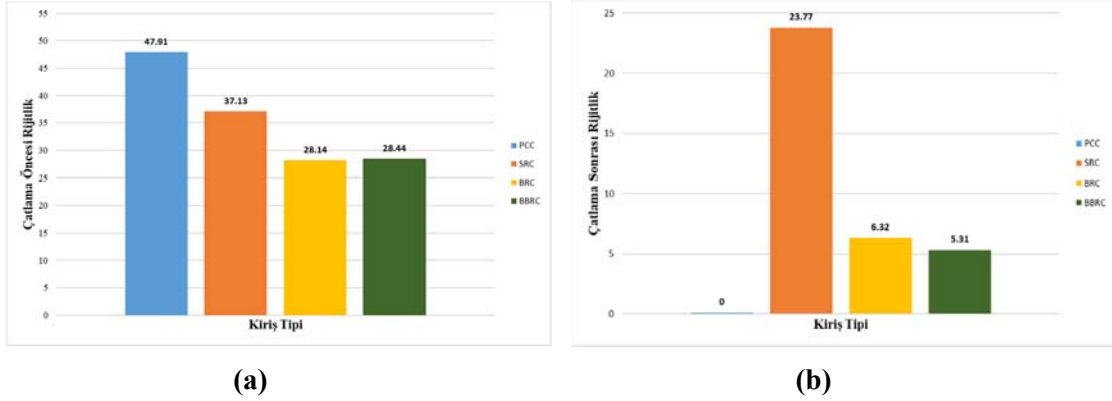
Şekil 3.15. - Genel akma yöntemi ile akma noktasının tanımı [20,21]



**Tablo 3.1.** - Kiriş numunelerinin süneklik ve enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Kiriş Tipi	Kiriş No.	Pmax (kN)	Py (kN)	$\Delta y$ (mm)	0.80Pmax (kN)	$\Delta u$ (mm)	Süneklik Oranı ( $\mu$ )	Yutulan Enerji (E) (kNm)
PCC	1	34.50	-	-	-	-	-	11.08
SRC	1	127.07	105.18	6.5	101.65	52.2	8.03	5926.58
BRC	1	101.60	74.90	9.6	81.28	15.1	1.60	909.06
BBRC	1	83.96	54.50	7.1	72.00	19.9	2.80	1204.19

Tüm kiriş numunelerinin çatlama öncesi ve sonrası rijitlik değerleri de hesaplanmış ve Şekil 3.16'da verilmiştir.



**Şekil 3.16.** - Kiriş numunelerinin çatlama öncesi (a) ve çatlama sonrası (b) rijitlik değerleri

Kiriş numunelerinde süneklik düzeyi değerlendirmesi için AS 1170.4'ten yararlanılmış olup [22] betonarme yapılar için alt sınır değerler olarak Sünek Olmayan  $\mu = 1.0$ , Sınırlı Sünek  $\mu = 2.0$ , Orta Derecede Sünek  $\mu = 3.0$  ve Sünek  $\mu = 4.0$  olmak üzere dört süneklik sınıfı tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucu çelik donatılı betonarme kiriş numunesi (SRC) sünek davranış sergilerken, bambu donatılı betonarme kirişlerden etriyesi çelik olan kiriş numunesi (BRC) sünek olmayan, etriyesi bambu olan kiriş numunesi (BBRC) ise sınırlı sünek davranış sergilemiştir.

**Tablo 3.2.** - Çatlama sonrası rijitliğin çatlama öncesi rijitliğe oranı

Numune Tipi	Çatlama Öncesi Rijitlik	Çatlama Sonrası Rijitlik	Oran
PCC	47.91	0	0
SRC	37.13	23.77	0.64
BRC	28.14	6.32	0.22
BBRC	28.44	5.31	0.18

Ayrıca, kirişlerin çatlama sonrası rijitlik değerlerinin çatlama öncesi rijitlik değerlerine oranları hesaplanmış ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Bilindiği üzere, bu oran özellikle betonarme yapıların modellenmesinde elastik ötesi doğrusal olmayan davranışın gerçekçi bir biçimde belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Kiriş numunelerinin deney sonucu ilk çatlama yükü, maksimum düşey yük kapasitesi, maksimum düşey yerdeğiştirme miktarı (açıklık ortasında), davranış biçimi ve göçme modu Tablo 3.3’te özetlenmiştir.

Tabloda sunulan veriler doğrultusunda tüm kiriş numunelerine ilk çatlak oluşana kadar aynı hızda yük uygulanmasına karşın en büyük ilk çatlak yüküne donatısız beton kiriş olan PCC kirişinin sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, en yüksek maksimum yük kapasitesine sahip kiriş ise çelik donatılı betonarme kiriş olmuştur. En yüksek maksimum yerdeğiştirme miktarına sahip olan kirişler ise SRC ve BBRC kiriş numuneleridir.

**Tablo 3.3.** - Kiriş numunelerinin dört nokta eğilme deneyi sonuçları

Kiriş Adı	Kiriş No.	Donatı Oranı (%)	Yükleme Protokolü	İlk Çatlama Yükü (kN)	En büyük ilk çatlama yüküne göre oranlar	Maksimum Yük (kN)	Maksimum yüke göre oranlar	Maksimum Yerdeğiştirme (mm)	Maksimum yerdeğiştirmeye göre oranlar	Davranış Biçimi	Göçme Modu
PCC	1	0	M	34.50	1.00	34.50	0.26	0.72	0.013	Gevrek	Beton kırılması
SRC	1	0.43	M	27.66	0.80	127.07	0.95	54.28	1.00	Sünek	Donatı kopması
BRC	1	1.7	M	13.50	0.39	101.60	0.77	17.00	0.313	S.O.	Donatı kopması
BBRC	1	1.7	M	23.20	0.67	83.96	0.63	50.00	0.921	S. Sünek	Göçme yok

M: Monotonik Yükleme S.O.: Sünek Olmayan S. Sünek: Sınırlı Sünek O.D.S.:Orta Derecede Sünek

Yük-yerdeğiştirme eğrilerinden, kiriş davranış biçimlerinden, göçme modlarından ve deney sırasındaki gözlemlerden yola çıkarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Üzerinde düğüm bulunduran ve bulundurmayan toplam 14 adet bambu numunesinin çekme testleri sonucu ortalama çekme dayanımı 139.29 MPa, ortalama akma dayanımı 109.43 MPa ve ortalama elastisite modülü 6.1 GPa olarak hesaplanmıştır.
- SRC tipi kiriş en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip kiriş olmuştur. Yük taşıma kapasitesi donatısız beton kirişin yük taşıma kapasitesinden yaklaşık 3.7 kat daha fazladır.
- PCC kiriş numunesi, beklendiği üzere, en düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak, bu kirişte en yüksek ilk çatlama dayanımı sonucuna ulaşılmıştır.
- En yüksek düşey yerdeğiştirme miktarına yaklaşık 50 mm (L/30) ile SRC ve BBRC kiriş numuneleri ulaşmıştır. En düşük düşey yerdeğiştirme kapasitesine ise 0.72 mm ile donatısız beton kiriş tipi olan PCC kiriş numunesi sahiptir.
- Monotonik yük uygulanan bambu donatılı betonarme kirişlerde, dayanım açısından 101.60 kN yük ile BRC kiriş numunesi BBRC kiriş numunesine göre daha yüksek bir kapasite göstermiş olmasına karşın bambu donatıların erken kopması ile yerdeğiştirme sünekliği düşük kalmıştır. BBRC kiriş numunesi 83.96 kN dayanıma sahiptir.

- Donatısız beton kiriş (PCC) dışındaki kiriş numuneleri sınırlı düzeyden yüksek düzeye kadar sünek bir davranış sergilemiştir. PCC kiriş numunesi ilk çatlak oluşur oluşmaz aniden kırılarak gevrek davranış biçimi sergilemiştir.
- Yükleme sırasında oluşan ilk çatlaklar, genellikle kiriş açıklığının orta bölgesine yakın ve nokta yükler arasındaki eğilme çatlaklarıdır. Bambu donatılı betonarme kirişlerin eğilme çatlakları çelik donatılı betonarme kirişe göre daha hızlı ilerlemiştir.
- Bambu donatısı, donatısız beton kirişlerin kapasitesini %269 oranında arttırmıştır. Bu değer, bambu donatılı kiriş numunelerinin ortalama yük kapasitelerinin donatısız beton kiriş numunesinin (PCC) yük kapasitesine oranıyla bulunmuştur.
- Çelik donatılı betonarme kiriş tipi (SRC) donatısız kiriş yük kapasitesini %376 oranında arttırmıştır. SRC kiriş tipinin yük kapasitesi bambu donatılı betonarme kirişlerin ortalama yük kapasitesine oranı yaklaşık %136'dır.
- Deney sonrasında bambu donatılı betonarme kirişlerin göçme noktalarının sağ ve sol kenarlarından yaklaşık 25 cm olmak üzere toplam 50 cm'lik donatı etrafındaki beton sıyrılarak temizlenmiştir. Gözle yapılan inceleme sonucunda, bambu donatıların betondaki suyu emerek şişmediği gözlemlenmiştir; epoksi ile alınan önlem yeterlidir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sınırlı sayıda üretilen kiriş numunelerine dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları, donatı olarak kullanılan doğal biçimli bambunun kirişin yük kapasitesini önemli düzeyde arttırdığını, yayılı çatlak oluşumlarına izin verdiğini, sınırlı da olsa süneklik sağladığını ve göçme öncesi çatlayarak haberli göçmeye neden olduğunu ortaya koymuştur. Bambunun betonarme elemanlarda çelik donatıya uygun bir alternatif malzeme olduğu, benzer yükleme ve çevre koşulları ile düşük maliyetli ve az katlı betonarme yapılarda "sınırlı süneklik düzeyi"nin yeterli olabileceği durumlarda bu tür kirişlerin yeterli performansı sağlayabileceği anlaşılmaktadır.

Bu çalışma, bambu malzemesinin betonarme kirişlerde enine ve boyuna donatı olarak kullanımının uygunluğunu araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmaları içermektedir; bu yönüyle çalışma, Türkiye'de yapılan ilk deneysel çalışmalardan biridir.

Ulaşılan ana sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- SRC tipi kiriş en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip kiriş olmuştur. Yük taşıma kapasitesi donatısız beton kirişin yük taşıma kapasitesinden yaklaşık 3.7 kat daha fazladır. PCC kiriş numunesi, beklendiği üzere, en düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak, bu kirişte en yüksek ilk çatlama dayanımı sonucuna ulaşılmıştır.
- En yüksek düşey yerdeğiştirme miktarına yaklaşık 50 mm (L/30) ile SRC ve BBRC kiriş numuneleri ulaşmıştır. En düşük düşey yerdeğiştirme kapasitesine ise 0.72 mm ile donatısız beton kiriş tipi olan PCC kiriş numunesi sahiptir.
- Donatılı numunelerin ilk yüklenme aşamalarında benzer çatlak oluşumları izlenirken, bambu donatılı betonarme kirişlerin eğilme çatlakları çelik donatılı betonarme kirişe göre daha hızlı ilerlemiştir.
- Bambu donatısı, donatısız beton kirişin kapasitesini %269 oranında, çelik donatı ise donatısız kirişin yük kapasitesini %376 oranında arttırmıştır. SRC kiriş tipinin yük kapasitesi bambu donatılı betonarme kirişlerin ortalama yük kapasitesine oranı ise yaklaşık %136'dır.

- Bambu donatılı kirişlerin çatlama öncesi ve sonrası rijitlikleri çelik donatılıya göre sırasıyla %25 ve %75 civarında daha düşüktür. Yutulan enerji ise  $0.80P_{max}$  'a karşı gelen yerdeğiştirme düzeyinde çelik donatılı kirişin %15~20'si civarındadır.
- Bu çalışma esas alınarak farklı bambu donatı oranlarına ve yüzeylerine sahip kiriş deneyleri gerçekleştirilebilir. Zamana karşı performansın incelenmesi uygun olabilir. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde son zamanlarda yetişen bambu türünün fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması için çalışmalar yapılması da önerilir.

### **Semboller**

$A_s$  : Basınç-Çekme Donatısı Kesit Alanı

$b_w$  : Kiriş Gövde Genişliği

$d$  : Eğilme Elemanlarında Faydalı Yükseklik

$E_s$  : Çelik Donatı Elastisite Modülü

$F$  : Kuvvet

$h$  : Kiriş Toplam Yüksekliği

$L$  : Açıklık

$s$  : Etriye Aralığı

$\varepsilon$  : Şekildeğiştirme

$\sigma$  : Gerilme

$\delta$  : Yerdeğiştirme

### **Teşekkür**

Bu çalışma finansal olarak kısmen İTÜ-BAP Birimi tarafından 42514 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup laboratuvar personelinin her türlü desteği için yazarlar teşekkürlerini sunarlar.

### **Kaynaklar**

1. Kundu, S. P., "Jute Fibre Reinforced Cement Concrete for Structural Applications" 2015.
2. Tan, H., Yan, L., Huang, L., Wang, Y., Li, H., Chen, J.Y., "Behavior of sisal fiber concrete cylinders externally wrapped with jute FRP," Polym. Composite, 2015.
3. Ardanuy, M., Claramunt, J., Toledo Filho, R.D., "Cellulosic fiber reinforced cement based composites: a review of recent research," Construction and Building Materials, 79, 2015, pp 115–128.
4. Ali, M., Liu, A., Sou, H., Chouw, N., "Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete," Construction and Building Materials, 30, 2012, pp 814–825.
5. Ghavami, K., "Bamboo as Reinforcement in Structural Concrete Elements," Cement & Concrete Composites, Vol 27, 2005, pp 637–649.

6. Çelik, O. C., Çılı, F., Özgen, K., “ 17 Ağustos 1999 Kocaeli (İzmit) Depremi’nden Gözlemler”, Yapı, 218, 2000, pp 65-76.
7. Çelik, O. C., Özgen, K., Çılı, F., “ Cantilevers in Reinforced Concrete Structures” 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, 1998.
8. Akbas, T. T., Celik, O. C., Yalcin, C., “Experimental Bond Behaviour of Deformed CFRP Rebars in High Strength Concrete,” Concrete–Innovation and Design, FIB Symposium, Copenhagen, 2015.
9. Correal, J. F., “Bamboo design and construction,” Nonconventional and Vernacular Construction Materials, 2016, pp 393-431, Elsevier.
10. Sika Türkiye, “Sikadur 32 Epoksi Yapıştırma Harcı ve Sika MonoTop Çimento Esaslı Tamir Harcıyla Beton Tamiri”, 2019.
11. GB/T 15780, Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo, 1995.
12. Agarwal, A., Nanda, B., & Maity, D., “Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns,” Construction and Building Materials, 2014, pp. 610-617, Elsevier.
13. TS EN 12350, “Beton-TazeBeton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi”, 2002.
14. TS 708, “Çelik- Betonarme İçin – Donatı Çeliği”, 2010.
15. Shastry, A., & Unnikrishnan, S., “Investigation on Elastic Properties of Bamboo and Behavior of Bamboo Reinforced Concrete Beams,” International Journal of Earth Sciences and Engineering, 10(02), 2017, pp 304-312.
16. Ikponmwoşa, E., Falade, F., Fapohunda, C., Okosun, J., “Flexural Performance of Bamboo Reinforced Foamed Aerated Concrete Beams with and without Compression Reinforcement,” International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 3, March-2014.
17. Aka, İ., Keskinel, F., Çılı, F., Çelik, O. C., “Betonarme-Betonarmeye Giriş, Betonarme Yapı Elemanları, Betonarme Taşıyıcı Sistemler,” Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2001.
18. Doğangün, A., “Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı,” Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2019.
19. Celep, Z., “Betonarme Yapılar”, İstanbul, Türkiye, 2018.
20. Cihan Yılmaz, B.C., “İçi Beton Dolu Çift Cidarlı Çelik Tüplerin (CFDSTS) Eksenel Basınç Altında Deneysel Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2022.
21. Le, D. D., Nguyen, X., Nguyen, Q., “Cyclic Testing of a Composite Joint between a Reinforced Concrete Column and a Steel Beam,” Applied Sciences, 2020, pp 2-17.
22. AS 1170.4, “Structural Design Actions, Part 4: Earthquake Actions in Australia”, 2007.



## Cam Lifi ile Güçlendirilmiş Alçı (CLGA) Panellerle Üretilen Döşeme Sisteminin İncelenmesi

Beyza KAPUCU GÜZELBULUT<sup>1</sup>, Oğuz Cem ÇELİK<sup>2</sup>

### ÖZET

Cam lifi ile güçlendirilmiş alçı paneller (CLGA) modüler olarak üretilen, ince cidarlar arasında hücreler/boşluklar bulunan yarı-prefabrike kompozit sistemlerdir. Hücreler gerektiğinde beton ya da donatılı beton (betonarme) ile doldurulmakta, yalıtım katmanları ve servis (donanım) sistemlerinin kullanılmasına da olanak tanımaktadır. Avusturalya, Çin, Hindistan gibi konut ihtiyacının çok fazla olduğu ülkelerde az katlı binalarda tercih edilen bir yapı/yapım sistemi haline gelen CLGA paneller taşıyıcı duvarlarda, bölme duvarlarında, döşemelerde ve çatıda kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada, döşemelerde yalnızca kalıp olarak kullanılan bu panellerin, kompozit/karma davranış nedeniyle, sistemin taşıma gücüne olan katkısı deneysel olarak incelenmiştir. Üretilen tam ölçekli kiriş artan düşey yükler altında göçmeye dek denenmiş ve sistemin elastik ötesi davranışı değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alçı panel, kompozit kiriş/döşeme, taşıma gücü, deneysel çalışma, süneklik.

### ABSTRACT

#### **Investigation of A Beam/Slab System Manufactured with Glass Fiber Reinforced Gypsum (GFRG) Panels**

Glass fiber reinforced gypsum (GFRG) panels are modular and semi-prefabricated composite systems that contain empty cells between the ribs. Depending on the application needs, empty cells can be filled with plain concrete, reinforced concrete (RC), insulation materials, or building service equipments. GFRG panels widely preferred in Australia, China, and India in which affordable housing need is huge, can be used as load-carrying walls, non-load carrying/architectural walls, beams/slabs, and roofs. In this experimental study, the effect of GFRG panels, which are generally used as formwork in construction, on the structural characteristics of the beam/slab system is investigated. A nearly full-scale beam/slab system has been tested to failure in a three-point bending test apparatus. Behavioral values (especially beyond the elastic limit) of the system are evaluated.

**Keywords:** Gypsum panel, composite beam/slab, load capacity, experimental study, ductility

---

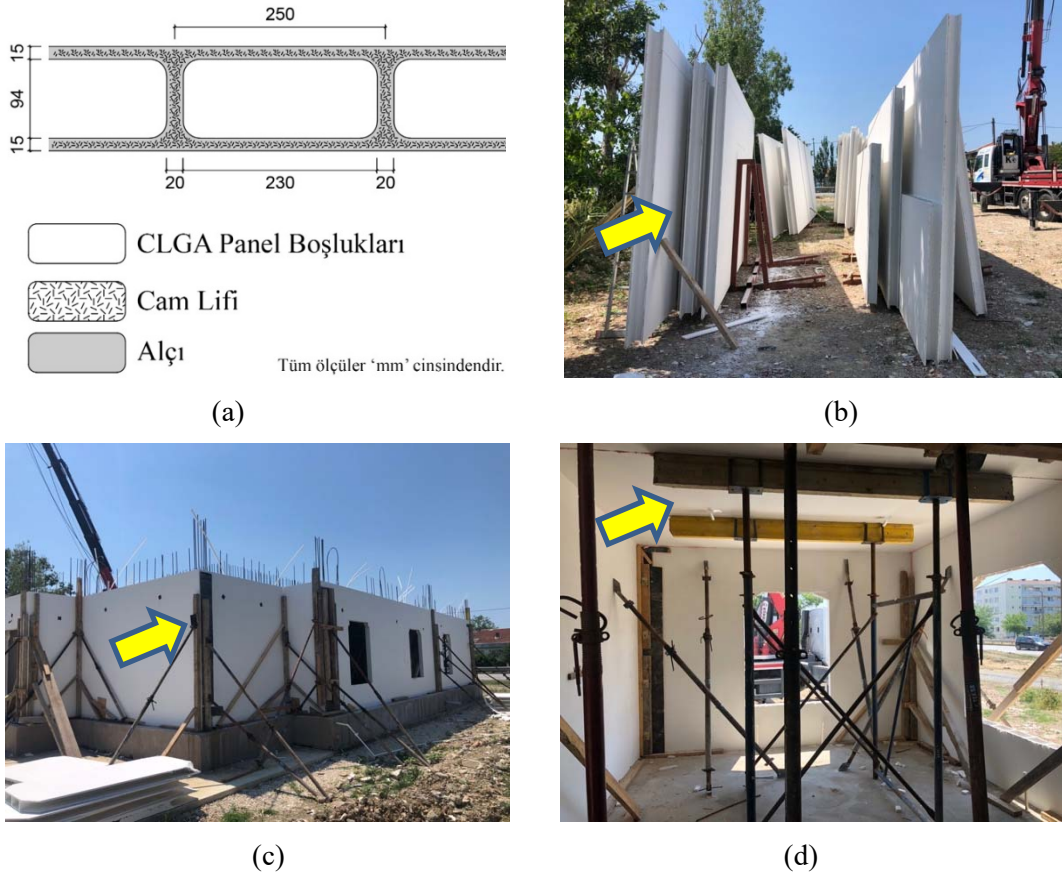
<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - kapucubeyza@gmail.com

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - celikoguz@itu.edu.tr

## GİRİŞ

Cam lifi ile güçlendirilmiş alçı (CLGA) paneller hızlı yapım tekniklerinden biri olup tüm dünyada özellikle az katlı yapıların üretiminde yaygınlaşmaktadır. Diğer bir adıyla hızlı duvar (RapidWall) olarak da bilinen bu paneller modüler olarak üretilmektedir. Standart olarak 12 m uzunluğunda, 3 m yüksekliğinde 124 mm kalınlığında olan içi boşluklu paneller, istenilen boyutlarda çok kolay bir şekilde kesilebilmekte [1] olup gerektiğinde üretim aşamasında tasarım koşullarına uygun farklı enkesitlerin de geliştirilmesi mümkündür. Yarı-prefabrike bu yapım sistemiyle üretilen panellerle yapılan tasarımlarda yapısal ve mimari açıdan bazı kısıtlamalar mevcuttur. Bu nedenle, eğer sistem bu tür elemanlarla oluşturulacaksa mimari tasarımın ilk aşamalarından itibaren sistemin tüm özellikleri dikkate alınmalıdır. Buna karşın, hızlı ve ekonomik olması, düşük maliyet ve yüksek performans göstermesinden dolayı konut ihtiyacının fazla olduğu Çin, Hindistan gibi ülkelerde özellikle tercih edilen yapım sistemlerinden biri olmuştur [2]. Genellikle konut ve ticari/endüstriyel yapılarda kullanılan bir yapım sistemidir [3].

CLGA panellerle oluşturulan sisteme ilişkin tipik geometrik özellikler ve Türkiye'deki ilk uygulaması Şekil 1'de verilmiştir.



**Şekil 1** - Sistemin genel geometrik özellikleri ve Türkiye'deki ilk uygulaması a) Tipik kesit b) CLGA paneller c) Örnek bina d) Döşeme sisteminin betonlama öncesi durumu (iç mekân görünüşü)

Bu panellerin, tuğla ya da beton blokların yerini alabilecek alternatif bir yapı malzemesi ve sistemi olmasındaki en önemli etkenler, az insan gücü gerektirmesi, hızlı inşa edilebilir olması, ekonomik olması, hafif olması, neme, sese, ısıya dayanıklı olması, panel boşluklarının etkili kullanımı sonucunda yapısal ve yalıtımsal olarak uygun olması, atık malzemeden üretilmesi, üretim



sırasında CO<sub>2</sub> salınımının ve enerji tüketiminin diğer geleneksel malzemelere (tuğla vs) göre daha az olmasıdır [4][5]. Geri dönüştürülebilir alçı ile üretildiğinden “sürdürülebilir” bir yapı sistemi alternatifidir. Aynı zamanda, kendiliğinden kalıp olarak da kullanılabilen bu yapım sistemi inşa edildikten sonra önemli düzeyde ince işçilik gerektirmemektedir.

Hızlı, depreme/rüzgâra dayanıklı ve ekonomik konut arayışı sonucu ortaya çıkan CLGA paneller, çok olmasa da, diğer araştırmacılar tarafından incelenmiştir. İlk çalışmalar malzemenin mekanik özelliklerini anlamak için basınç deneyleri üzerine yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre CLGA panellerin taşıyıcı ya da bölme duvarlarda kullanılabilceği ve beton, tuğla gibi malzemelere alternatif olabileceği görülmüştür [6]. CLGA panellerle tuğlalar aynı alan için değerlendirildiğinde paneller neredeyse tuğla duvarlara göre üçte bir ağırlığındadır [4]. Panellerin içerisindeki cam lifler malzeme dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu sayede hafif CLGA paneller elde edilirken, aynı zamanda yüksek basınç, kesme ve eğilme dayanımlarına ve yeterli süneklığe ulaşılmaktadır [2]. Alçı sıvanın içerisine %10 oranında e-tipi cam lifi eklenmesi ile kompozit malzemenin eğilme dayanımının 2.5~3 kat, çekme dayanımının ise 3~4 kat arttığı gözlenmektedir [7]. E-tipi cam lifler fiziksel, elektriksel ve kimyasal özelliklerin iyi birleşiminden dolayı güçlendirme uygulamaları için yaygın olarak üretilmektedir [8]. Panellerin içerisinde bulunan boşluklar/hücreler farklı amaçlara göre beton ya da yalıtım malzemesiyle de doldurulabilir. Böylece hem duvarların dayanımı artırılabilir hem de ısı ve ses yalıtımı iyileştirilebilir [3].

## AMAÇ

CLGA panellerle yapılan önceki çalışmalarda genellikle eksenel ve/ya da yanal yükler altında duvar davranışı incelenmiştir. Diyagonal kayma (baklava) deneyleri ile panellerin doluluk oranları, hangi bölgelerdeki dolguların davranışa ne şekilde etkideği, dolgu malzemesi olarak yalnızca beton ve betona ek olarak çelik donatı bulunması durumu, kullanılan çelik donatı sayısının başlangıç rijitliği ve kayma dayanımına etkisi incelenmiştir [9][10]. Aynı zamanda, yön değiştiren tekrarlı yatay yerdeğiştirmeler altında (benzetilmiş deprem etkileri) yapı sisteminin histeretik davranışı araştırılmıştır [10]. Bu çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak, CLGA panellerin kiriş/döşeme sisteminde kullanımı ve bu türden panellerin düşey yükler altında göçmeye dek davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

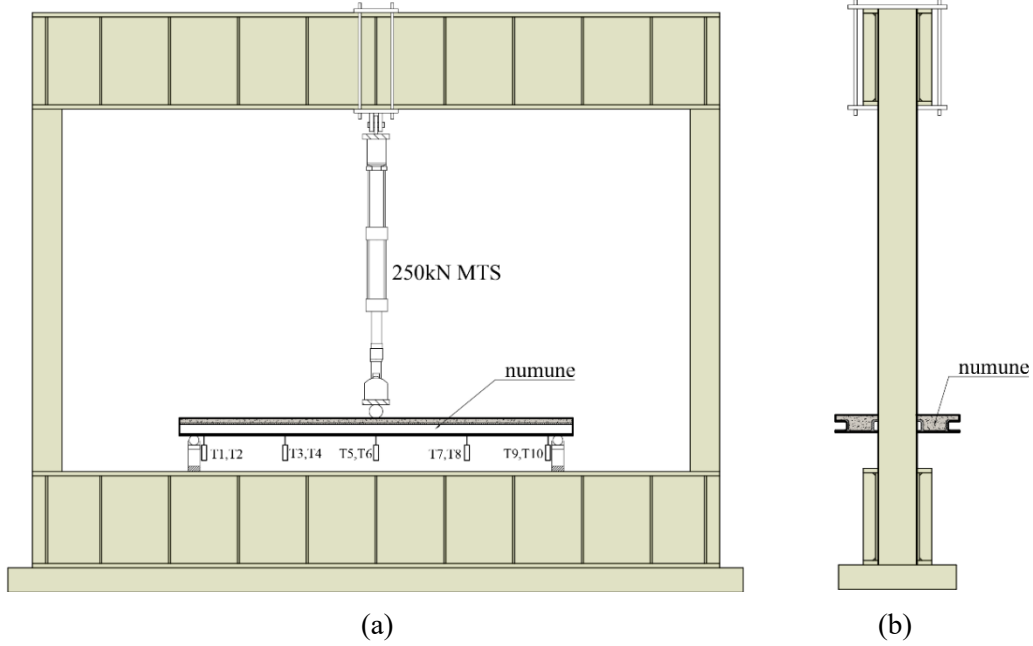
## DENEYSEL ÇALIŞMA

### Deney Düzeneği ve Numune Detayları

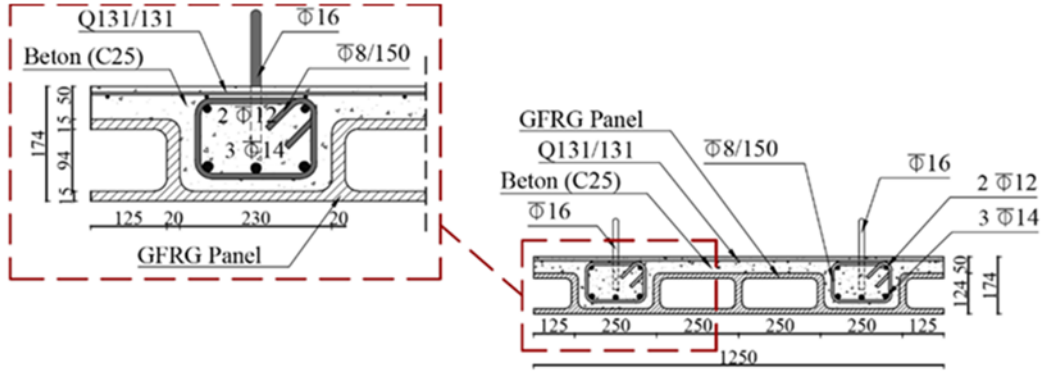
Üç noktalı eğilme deneyi (açıklık ortasında tekil yük durumu) yapılarak kiriş/döşeme sisteminin eğilme davranışı gözlemlenmiştir. Yük kontrollü olarak uygulanan düşey yükler bir adet MTS hidrolik veren ile yapılmıştır. Yük kapasitesi  $\pm 250$  kN ve yerdeğiştirme kapasitesi  $\pm 300$  mm olan hidrolik veren ile 3 kere tahmini akma dayanımının yaklaşık %10'u olan 4 kN'luk değerde yükleme ve boşaltma yapılmış, daha sonra 8 kN'luk yükleme adımlarıyla deneye devam edilmiştir. Deney İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup deney düzeneği Şekil 2'de verilmiştir.

Numune, 1250 mm genişliğinde, 174 mm yüksekliğinde ve toplam 4000 mm uzunluğundadır; mesnetler arası açıklık ise  $L=3700$ mm alınmıştır. Numune kesitleri Şekil 3'te verilmiştir. Öncelikle, kiriş/döşeme sistemine panel boyutları gözetilerek 2 adet mikro betonarme kiriş tasarlanmıştır. Döşeme yüksekliği TS500 [11] standartının verdiği minimum boyutlardadır (üst tabliye kalınlığı 50 mm'dir). Sistemde C25 sınıfı beton, S420 (B420C) sınıfı çelik donatı kullanılmıştır. Numune üretimi sırasında beton ve çelik donatılardan yeterli sayıda örnekler alınmıştır. İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda beton örneklere basınç dayanım testi,

donatılara ise standart çekme deneyi uygulanarak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı 29.6 MPa, S420 (B420C) sınıfı nervürlü  $\Phi 14$ ,  $\Phi 12$  ve  $\Phi 8$  olmak üzere 3 farklı çapta donatının ortalama akma gerilmeleri sırasıyla 472 MPa, 458 MPa ve 464 MPa'dır.  $\Phi 16$  donatısı ise şantiyede hazırlanan numunelerin şantiyeye taşınması ve laboratuvarında deney düzeneğine yerleştirilmesi için döşemenin 4 köşesinde bırakılan kancalardır. Yük aktarımı doğal sürtünme ile gerçekleşmektedir.

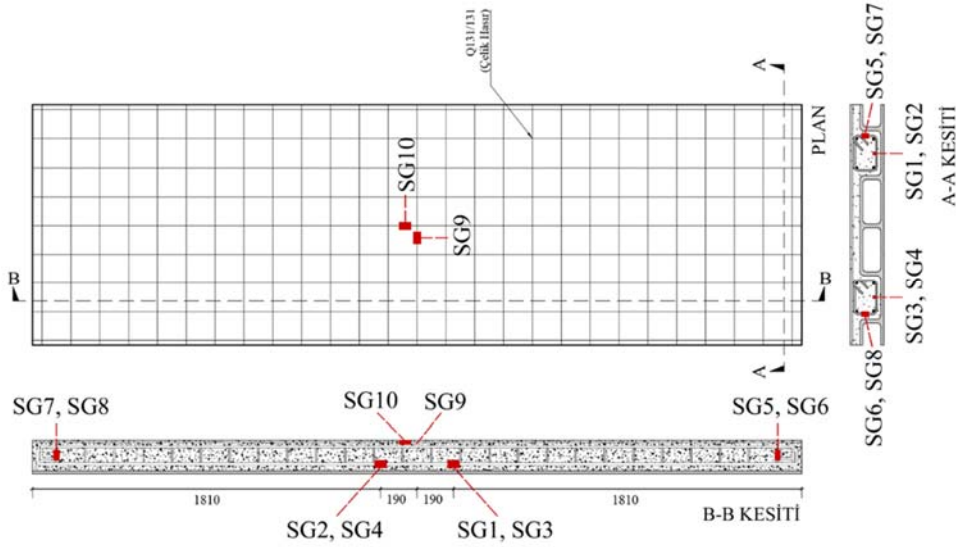


Şekil 2 - Üç noktalı eğilme deney düzeneği: (a) önden görünüş, (b) yandan görünüş.

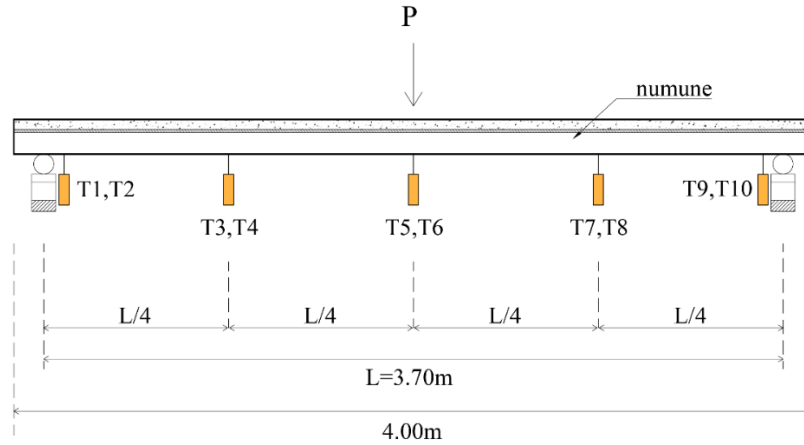


Şekil 3 - Numune kesiti, geometrik özellikler

Numunenin yapısal davranışını anlamak için 10 adet şekil değiştirme ölçer (strain gauge) ve 10 adet yer değiştirme ölçer (LVDT) kullanılmıştır. Kullanılan şekil değiştirme ölçerler kirişin uç bölgelerinde bulunan etriyelere, çekme bölgesinde yer alan boyuna donatılara ve hasır donatı üzerine yerleştirilmiştir. Yer değiştirme ölçerler ise eşit aralıklarla mikro kirişli döşeme sistemine yerleştirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerin ve yer değiştirme ölçerlerin numune üzerindeki konumları Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4 - Şekildeğiştirme ölçerlerin numune üzerindeki konumları



Şekil 5 - Yerdeğiştirme ölçerlerin numune üzerindeki konumları

### Deney Sonuçları

Yapılan deney sonucunda, numuneye uygulanan düşey yük ile numunenin orta noktasındaki (T5, T6) ortalama düşey yerdeğiştirme grafiği Şekil 6'daki gibi elde edilmiş, davranışa ilişkin parametreler hesaplanmıştır. Artan yüklerle beraber numune üzerinde ince denebilecek çatlaklar oluşmuş ve yük arttıkça bu çatlaklar genişlemiştir. Çatlakların oluşup genişlemesine karşın, cam lifler alt başlıkta oluşan çekme etkilerini taşımaya devam etmiştir. Genel olarak sünek bir davranış gösteren numunenin yerdeğiştirme süneklik katsayısı  $\mu=4.5$  olarak hesaplanmıştır. Süneklik katsayısı, sistemin taşıdığı maksimum yükün %80'ine karşılık gelen yerdeğiştirme miktarı ile akma yükündeki yerdeğiştirme miktarının oranı olarak belirlenmiştir.

Mikro kirişli döşeme sisteminde görülen deformasyonlar ve hasarlar deney boyunca adım adım izlenmiştir. Artan yüklerle birlikte ilk olarak kiriş döşeme sisteminin orta bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlamış ve çatlak yoğunluğu artmıştır. Daha sonra ilk olarak çekme bölgesindeki donatılarda akma deformasyonuna ulaşılmıştır. Sistemin davranışı  $P=69.4$  kN'a kadar lineer olarak devam etmiş, bu değerden sonra sistemde davranış doğrusallıktan uzaklaşmaya başlanmıştır. Devam eden yükleme sonrasında basınç bölgesindeki çelik hasarlarda da yüksek





**Şekil 7** - Numunenin (a) deney öncesi ( $P=0$  kN,  $\delta=0$  mm), (b) deney sonu ( $P=66.5$  kN,  $\delta=155.3$  mm) görünüşleri, (c) deney sonu panel sisteminin orta bölgesindeki çatlak, (d) panel ve içindeki beton çatlaklarının yakından görünüşü

## DEĞERLENDİRME

CLGA panelin sisteme olan katkısını araştırmak amacıyla, CLGA panel olmaksızın yalnızca betonarme mikro kirişlerin yük taşıma kapasiteleri taşıma gücü hesabının bilinen bağıntılarıyla tahmin edilmiştir [örneğin 12]. Buna göre, öncelikle çatlama kesit atalet momenti ( $I_{cr}$ ) ve kesitte çatlama oluşturan eğilme momenti ( $M_{cr}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra deneysel verilerden numunenin elastik bölgedeki maksimum eğilme momenti ( $M_{max}$ ) aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

Çelik ve betonun elastisite modülleri oranı  $\eta=E_s/E_c=7$  olup  $c=k_x d=57.6$  mm elde edilmiştir.

Çatlama kesit atalet momenti ise

$$I_{cr}=(1/3) b_w x^3 + (\eta-1) A'_s (x-d)^2 + \eta A_s (d-x)^2 = 6006 \text{ cm}^4 \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Eğilme momentinin çatlama yüküne ulaştığı ve elastik bölgenin bittiği sınırdaki değerleri sırası ile

$$M_{cr} = 2.5 f_{ctd} (I_c/y_{max}) = 1.9 \text{ kNm} \quad (2)$$

$$M_{max} = PL/4 = 62.5 \text{ kNm} \quad (3)$$

olarak hesaplanır. Buna göre sistemin ilk çatlama anındaki ve elastik bölgenin bittiği andaki maksimum yükleri  $P_{cr}=2.0$  kN ve  $P=67.5$  kN elde edilir.

Betonarme kirişin efektif (etkin) atalet momenti ( $I_{eff}$ ) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Aynı yük düzeyinde yalnızca betonarme kirişin özellikleri kullanılarak yerdeğiştirme miktarı tahmin edilmiştir. Yalnızca betonarme mikro kirişlerin olması durumunda yerdeğiştirme miktarı  $\delta=43.3$  mm olarak hesaplanmıştır. CLGA panelin kullanıldığı kiriş döşeme sistemi ise aynı yük düzeyinde  $\delta=33.0$  mm yerdeğiştirme yapmıştır. Bu durumda, CLGA panel ve betonarmenin toplam sistem eğilme rijitliğinin yalnızca betonarme kiriş/döşeme sistemine göre yaklaşık %31 daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır.

Efektif/etkin rijitlik ve bu rijitlik hesaba katılarak hesaplanan yerdeğiştirme (4) ve (5) bağıntılarında verilmiştir:

$$I_{eff}=(M_{cr}/M_{max})^3 I_c + (1 - M_{cr}/M_{max})^3 I_{cr} =5482 \text{ cm}^4 \quad (4)$$

$$\delta_{ba} = (P L^3)/(48 E I)=43.3 \text{ mm} \quad (5)$$

Yukarıda da belirtildiği üzere deneysel verilere göre elastik bölgedeki maksimum yerdeğiştirme miktarı  $\delta=33.0$  mm olarak bulunmuştur. Bu yerdeğiştirmeye karşı gelen yük seviyesinde betonarme kirişin taşıyacağı momentin 47.7 kNm olacağı (6) bağıntısıyla hesaplanmıştır. CLGA paneller ile oluşturulan kiriş döşeme sisteminin toplam eğilme momenti kapasitesi 62.5 kNm olduğundan dolayı toplam momentin %76'sı betonarme kiriş/döşeme sistemine, %24'ü CLGA panellere aktarılmaktadır; buna ilişkin hesap özeti (7),(8) ve (9) bağıntılarında verilmiştir:

$$M_{ba} = (12 \delta E I)/ L^2 =47.7 \text{ kNm} \quad (6)$$

$$M_{max}=M_{ba}+ M_{CLGA} \quad (7)$$

$$\epsilon_{ba}=M_{ba}/M_{max}=0.76 \quad (8)$$

$$\epsilon_{CLGA}=M_{CLGA}/M_{max}=0.24 \quad (9)$$

Böylece, CLGA panellerin varlığı ile ortaya çıkan kompozit davranışın döşeme sisteminin taşıma gücüne, rijitliğine ve sünekliğine olan katkısının önemli denebilecek düzeylere ulaştığı görülmektedir. Bu oranı belirlemek için gerçekte yalın panel ile bir deneyin yapılması ve aradaki farkın verilmesi daha uygun olabilirdi; yurt dışından temin edilen numunelerdeki eksiklikten dolayı bu yapılamamıştır. Buna karşın, bir fikir vermesi bakımından basitleştirici olan bu şekildeki bir yaklaşım sunulmuştur.

## SONUÇ

Birçok ülkede hızlı konut ihtiyacını karşılamak için kullanılan CLGA panellerle inşa edilen az katlı binalarda, bu panellerin kiriş/döşeme sistemi olarak kullanılması durumunda panelin eğilme davranışına katkısı deneysel olarak incelenmiştir. Gerçek ölçülere yakın bir kiriş/döşeme sistemi üzerinde yapılan deneyden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Döşeme sistemi bir çeşit sık kirişli, bir doğrultuda çalışan dişli betonarme döşeme sistemine benzer olmasına karşın standart panel boyutlarının getirdiği kısıtlamalarla kiriş boyutları yönetmeliklerde verilen minimum değerlerin altında kalmaktadır. Buna karşın, olağan açıklıklarda yeterli kapasite elde edilebilmekte olup davranış sünektir.
- CLGA panel ile üretilen kiriş döşeme sisteminin yerdeğiştirme sünekliği katsayısı  $\mu=4.5$  olarak bulunmuştur.
- Sistemin yalın betonarme sisteme göre başlangıç rijitliği %31 oranında daha fazladır; bu durum yerdeğiştirme koşulları bakımından olumlu bir durumdur.
- Toplam eğilme momentinin, basitleştirici bir yaklaşım sonucu, %76'sının betonarme mikro kirişlerce, %24'ünün ise CLGA panellerle taşındığı anlaşılmaktadır. Uygulamada CLGA panellerinin katkısı, yapısal hesaplarda bu oranda dikkate alınabilir ya da güvenlik tarafında kalınarak terkedilebilir.
- CLGA panel içinde bulunan cam lifler, sistem hasar alsa dahi, çatlakları sınırlayarak sünek davranışa yol açmıştır.

### Semboller

$b_w$	: Kesitin gövde genişliği
$c$	: Tarafsız eksen yüksekliği
$d$	: Faydalı yükseklik
$E$	: Elastisite modülü
$EI$	: Eğilme rijitliği
$E_c$	: Betonun elastisite modülü
$E_s$	: Donatının elastisite modülü
$f_{ctd}$	: Beton tasarım çekme dayanımı
$I_c$	: Brüt beton kesitin atalet momenti
$I_{cr}$	: Çatlama kesit atalet momenti
$I_{eff}$	: Efektif atalet momenti
$k_x$	: Beton basınç blok derinliğinin tarafsız eksen derinliğine oranı
$L$	: Numune uzunluğu
$M_{cr}$	: Kesitte çatlama oluşturan eğilme momenti
$M_{max}$	: Maksimum eğilme momenti
$P$	: Yük
$P_{max}$	: Maksimum yük
$\delta$	: Yerdeğiştirme
$\Phi$	: Donatı çapı
$\eta$	: Elastisite modüllerinin oranı
$\mu$	: Süneklik
$\epsilon_{CLGA}$	: CLGA bölümün eğilme momenti taşıma oranı
$\epsilon_{ba}$	: Betonarme bölümün eğilme momenti taşıma oranı

### Teşekkür

Bu çalışmadaki deney numunesinin üretimi Rapid Building Construction Co. Ltd (Hamann® GBS - Gypcrete Building System) desteğiyle yapılmıştır. Deney, İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup yazarlar her türlü yardım için laboratuvar personeline ve İnş.Yük.Müh. Ergun Binbir'e teşekkürlerini sunarlar.

### Kaynaklar

1. IITM (2011) GFRG/RAPIDWALL BUILDING STRUCTURAL DESIGN MANUAL. Structural Engineering Division, Department of Civil Engineering, IIT Madras.
2. Manjummekudiyil, E. M. et al. (2015) 'Study of GFRG Panel and Its Strengthening', International Journal of Civil and Structural Engineering Research, 2(2), pp. 161–165.

3. Wu (2004) ‘The effect of longitudinal reinforcement on the cyclic shear behavior of glass fiber reinforced gypsum wall panels: Tests’, *Engineering Structures*, 26(11). doi: 10.1016/j.engstruct.2004.06.009.
4. Omahen, R. (2002) *Ecologically Sustainable Development: Approaches in the Construction Industry*. (PhD Thesis). University of Regensburg, Faculty of Economics, Germany.
5. Bandgar, G. S. and Kumthekar, M. B. (2016) ‘A Study on Feasibility of Rapid Wall Panel for Building Construction’, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(6).
6. Alagusankareswari, K., Jenitha, G. and Pandi, S. S. A. (2018) ‘Experimental study on empty glass fibre reinforced gypsum panel’, *Indian Journal of Scientific Research*.
7. Ali, M. A. and Grimer, F. J. (1969) ‘Mechanical properties of glass fibre-reinforced gypsum’, *Journal of Materials Science*, 4(5), pp. 389–395. doi: 10.1007/BF00549703.
8. Cameron, N. M. and Rapp, C. F. (2001) ‘Fiberglass’, in Buschow, K. H. J. et al. (eds). Oxford: Elsevier, pp. 3142–3146. doi: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00558-1>.
9. Kapucu Guzelbulut, B., Binbir, E. and Celik, O. C. (2022) *Diagonal Shear Tests for Glass Fiber Reinforced Gypsum (GFRG) Panels with and without Concrete Filled Cells*, *Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-88166-5\_147.
10. Kapucu Güzelbulut, B. (2021). *Cam Lifi İle Güçlendirilmiş Alçı (CLGA) Panellerden Oluşan Yarı-Prefabrike Yapısal Bileşenlerin Deneysel İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul
11. Türk Standartları, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS 500)*, Türk Standartları Enstitüsü, Şubat, 2000.
12. Aka İ., Keskinel F., Çılı F., Çelik O.C. (2001). *Betonarme-Betonarmeye Giriş*, *Betonarme Yapı Elemanları*, *Betonarme Taşıyıcı Sistemler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye



# İtme Sürme Yöntemi ile Köprü ve Ayak Tasarımı

Alper NAYCI<sup>1</sup>, Kutlu DARILMAZ<sup>2</sup>

## ÖZET

*Dünya çapında birçok uygulamaları bulunan itme sürme yöntemi ülkemizde de kullanılmaya başlanmış bir köprü yapım metodudur. Bu çalışma kapsamında itme sürme yöntemi ile yapılan bir köprünün yapısal analizi, ayak tasarımı ve hesap adımları anlatılmaktadır. Örnek köprü modeli, 35m uzunluğunda iki adet kenar açıklık ve 55m uzunluğunda üç adet ana açıklıktan oluşmakta olup, köprünün toplam uzunluğu 235m'dir. Köprü plan ve boykesiti düz olmak ile birlikte 12m genişliğinde bir kutu kesit tabliyeden oluşmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** İtme sürme yöntemi, ardgermeli köprü, ayak tasarımı.

## ABSTRACT

### **Incrementally Launched Bridge and Pier Design**

*The incremental launching method (ILM), which has many applications around the world, is a bridge construction method that has also been used in Turkey. In this study, the basic steps of the analysis, design of an incrementally launched bridge, and design of piers are explained on a sample bridge. The sample bridge model consists of two 35m long side spans and three 55m long main spans, and the total length of the bridge is 235m. The bridge is straight in plan and elevation and also consists of a 12m wide prestressed concrete box girder section.*

**Keywords:** Incremental launching method, post-tensioned bridge, pier design.

## GİRİŞ

Dünya çapında birçok uygulamaları bulunan itme sürme yöntemi ülkemizde de kullanılmaya başlanmış bir köprü yapım metodudur. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte kullanımı yaygınlaşan bu yöntem ile kenar ayaklardan birinin arkasındaki prekast sahada köprü tabliyesi segmentler halinde oluşturulmaktadır. Prekast sahadaki segment kalıbı içerisine donatılar ve tendon kılıfları yerleştirilir. Kalıp tamamen beton ile doldurulur ve beton germe için yeterli dayanıma gelir. Ardgerme halatları önceden beton içerisinde bırakılan kılıflara yerleştirilir ve kılıflar harç (grout) ile doldurulur. Ardgermeli tendonların krikolar ile germe işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde önceki segmentler ile yeni yapılan segmentin bağlantısı

---

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - alper.nayci@itu.edu.tr

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - darilmazk@itu.edu.tr

gerçekleştirilmiş olur. Ardından tüm köprü özel ekipmanlar yardımıyla itilmektedir ve döngü benzer şekilde devam etmektedir.

İtme sürme yöntemi yapım ve inşaat aşamasında birçok avantaj sağlamaktadır. Tüm köprünün inşaatı sırasında aynı kalıp sisteminin kullanılması segmentlerin daha hızlı üretilebilmesini ve toplam inşaat süresinin kısılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte çalışanlar sürekli aynı bölgede çalıştıkları için hem daha pratik olmakta hem de olası iş kazaları minimize edilmektedir. Ayrıca inşaat sahasının tek bir bölgede konumlandırılması sebebiyle inşaat sahası içindeki ulaşım ve saha kurulumu maliyetleri azalmaktadır.

Statik sistemi sürekli kiriş olan itme sürme yöntemi ile yapılan köprüler prekast kirişli köprülere göre daha uzun açıklıklar geçebilmektedir. Bu yöntem ile yapılan köprülerde tabliye açıklıkları genelde 40m – 60m arasında değişmekte ve toplam köprü uzunlukları 700m – 800m'ye varan sürekli tabliyeler oluşturulabilmektedir.

Bu yöntemin sağladığı en büyük ekonomik avantajlar malzeme miktarındaki azalma, inşaat süresindeki azalma, mesnet miktarındaki azalma ve genişleme derzi miktarındaki azalma olarak gösterilebilir. Bunlara ek olarak kesişen güzergahlardaki diğer yolların kullanıma kapatılmadan köprü inşaatının üst kotta devam edebilmesi standart köprü yapım yöntemlerine göre önemli avantajları arasında sayılabilir.

Literatürde itme sürme yöntemi ile tasarımın farklı değişkenlerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Rosignoli (1997, 1999) ve Sétra (2007) itme sürme yöntemi ile yapılan köprülerin ön boyutlandırması alanında çalışmalar yapmışlardır. Rosignoli (1998a, 2014), Fontán ve diğ. (2011), Fontán ve diğ. (2014), Hirmand ve diğ. (2013), Wei ve diğ. (2021), Hernandez ve Fontan (2014) ve Wang ve diğ. (2010) itme sürme yöntemi ile yapılan öngerilmeli köprülerde gaga-tabliye etkileşimi ve optimizasyonu incelemişlerdir. Rosignoli (1998b, 2000, 2014), Zellner ve Svensson, (1983), Özel ve diğ. (2021), Scotto ve diğ. (2017) tarafından itme sürme yöntemi ile yapılan köprülerde kullanılan ekipmanlar, saha uygulamaları ve uygulama alanları ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Özkul ve diğ. (2015) tarafından itme sürme yöntemi ile inşa edilmiş sürekli ardgermeli köprülerin deprem tasarımı incelenmiştir. Scotto ve diğ. (2017), Combescure ve diğ. (2016) tarafından itme sürme yöntemi ile yapılan Kuzey Marmara Otoyolu köprüleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

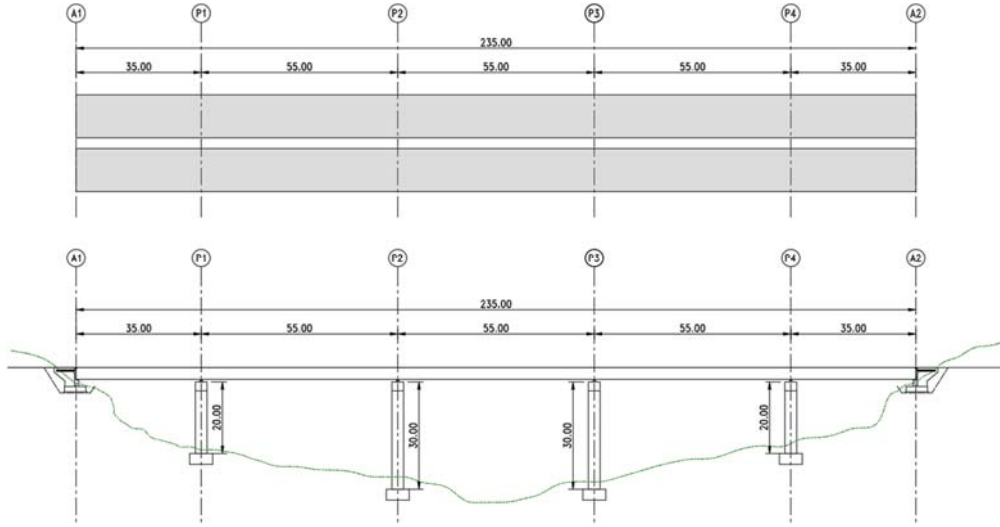
## **TABLİYE TASARIMI**

Bu bölüm kapsamında itme sürme yöntemi ile yapılan örnek bir köprü modeli üzerinden tabliye kesitinin ön boyutlandırması, tanımlanması gereken yükler ve yük kombinasyonları, itme sürme analizi, itme sürme tendonlarının tespiti ve gerilme kontrolleri gerçekleştirilmektedir.

### **Genel Yerleşim**

İtme sürme yöntemi ile yapılan örnek köprü modeli, 35m uzunluğunda iki adet kenar açıklık ve 55m uzunluğunda üç adet ana açıklıktan oluşmakta olup, köprünün toplam uzunluğu 235m'dir. Köprü plan ve boykesiti düz olarak tasarlanmıştır ve köprünün yerleşimi Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Segmentler kenar ayağın arkasında kurulan prekast sahada yerinde dökülür ve A2 aksından A1 aksına doğru itme işlemi gerçekleştirilmektedir. Köprü tabliyesi, her iki yön için düzenlenmiş iki tabliyeden oluşmaktadır. Tabliye genişliği 12m olup, her yön için üç şeritli anayol ve bakım yürüyüş yolunu barındırmaktadır. Her bir tabliye 1.5m genişliğinde iki yaya yolu, 3.0m genişliğinde üç araç şeridinden oluşmaktadır.

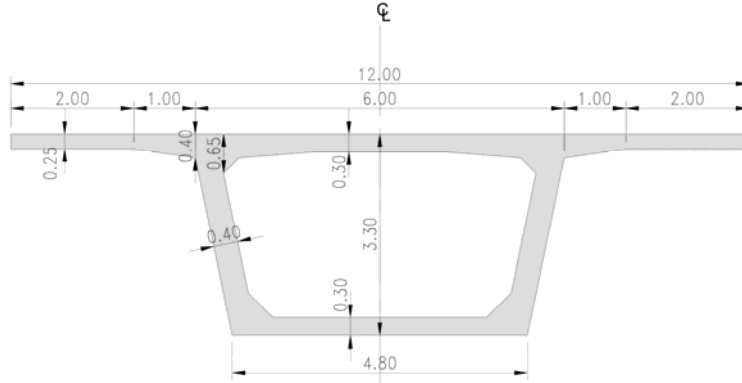
Bu çalışma kapsamında incelenen ve itme sürme yöntemi ile yapılan örnek köprü modelinin yapısal taşıyıcı sistemi sürekli kiriştir.



Şekil 1 - Köprü plan ve görünüşü.

### Ön Boyutlandırma ve Tabliye Geometrisi

Tabliye boyutları ön tasarım aşamasında Sétr (2007) Bölüm 2.4’de verilen basitleştirilmiş formülasyonlar kullanılarak oluşturulmuştur ve tasarımın ilerleyen aşamalarında seçilen kesit geometrisinin uygunluğu kontrol edilmiştir. Tipik tabliye kesiti Şekil 2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2 - Tipik tabliye kesiti.

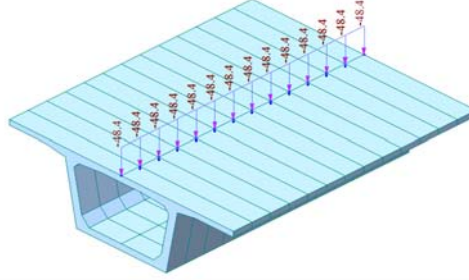
### Malzemeler

Örnek köprü modelinde tabliye betonu C50 ( $f'_c = 50MPa$ ), ayak ve başlık kirişleri için C35 ( $f'_c = 35MPa$ ), yumuşak donatı B500C ( $f_y = 500MPa$ ) ve ardgerme çeliği 7 telli düşük gevşemeli 15.7mm çapında ve  $150mm^2$  alana sahip halatlar ( $f_{pu} = 1860MPa$ ) kullanılarak hesaplara dahil edilmiştir.

### Yükler ve Yük Kombinasyonları

Yükler, AASHTO LRFD (2017) Bölüm 3’de belirtildiği şekilde tanımlanmıştır. Sürekli yükler, yapısal elemanların zati ağırlıklarına (DC) ek olarak yol kaplamasının zati ağırlığı (DW)  $48.4kN/m$  olarak matematiksel modele dahil edilmiştir (Şekil 3). Hareketli yükler ise tasarım

hareketli taşıt yükleri, dinamik yük etki katsayısı, fren kuvveti ve yaya yükü olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu yük durumlarına ek olarak sıcaklık, sünme ve büzülme, diferansiyel oturma, sürtünme yükleri, rüzgar gibi AASHTO LRFD (2017)'de tanımlanan yük durumları da matematiksel modelde tanımlanmış ve hesaplamalara dahil edilmiştir. Köprü'nün tabliye ön tasarımında inşaat sırasındaki deprem durumu bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiş olup rüzgar yükleri hesaplara köprü'nün boş olmasına karşı gelen durum için dahil edilmiştir.

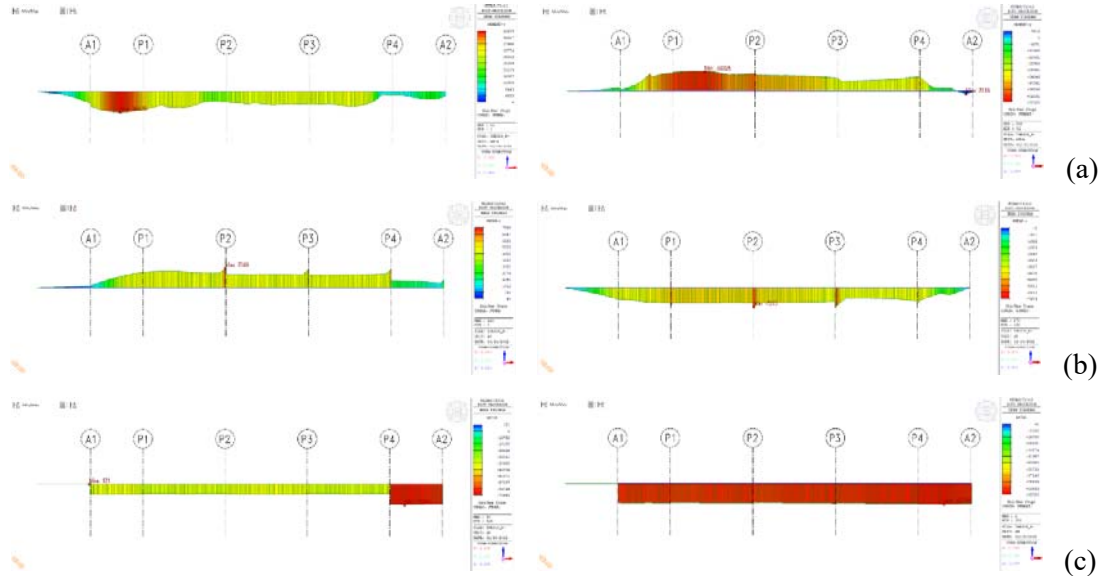


Şekil 3 - Yol kaplamasının ve hizmet hatlarının zati ağırlığının modelde tanımlanması.

Yük kombinasyonları AASHTO LRFD (2017) Tablo 3.4.1-1'de belirtildiği gibi servis sınır durumu (SLS), dayanım sınır durumu (ULS) ve ekstrem durum olarak üç farklı sınır durumu altında değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak itme sürme işlemi sırasındaki servis ve dayanım sınır durumları için uluslararası yönetmeliklerde belirtilen kombinasyonlardan faydalanılarak gerilme kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

### İtme Sürme Analizi

İtme sürme analizi için uluslararası geçerliliği bulunan köprü tasarım programı kullanılarak 1m aralıklar ile köprü'nün itme sırasındaki oluşan iç kuvvetler göz önüne alınmış ve inşaat sonrası durumlar için de üstyapı kontrolleri gerçekleştirilmiştir. İtme sürme analizi sonucunda elde edilen zarf kuvvetleri Şekil 4'de gösterilmiştir ve maksimum - minimum zarf kuvvetleri Tablo 1'de özetlenmiştir.



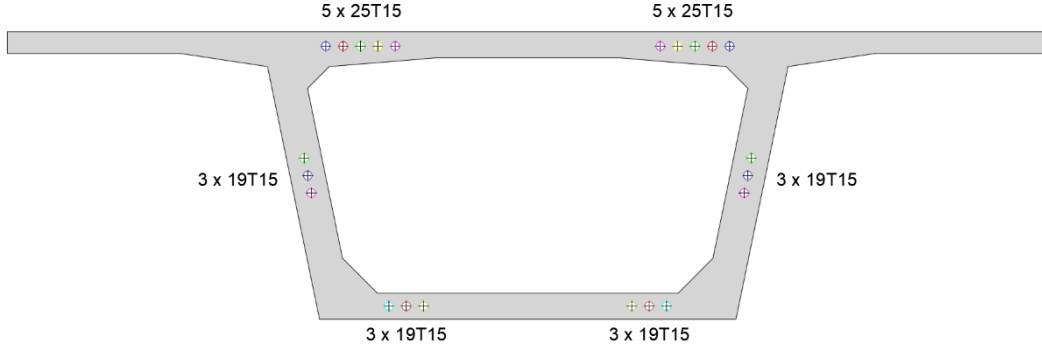
Şekil 4 - İtme sürme analizi maksimum ve minimum zarf kuvvetleri: (a) Eğilme momenti. (b) Kesme kuvveti. (c) Normal kuvvet.

**Tablo 1 - İtme sürme zarf kuvvetleri.**

İtme Sürme Analizi Zarf Kuvvetleri	Eğilme Momenti (M, kNm)	Kesme Kuvveti (V, kN)	Normal Kuvvet (N, kN)
Maksimum	46,439	7,549	-70,680
Minimum	-58,325	-7,273	-92,326

### İtme Sürme Tendonlarının Tespiti

İtme sürme analizi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum momentler doğrultusunda ardgerme tendonlarının miktarı ve konumları belirlenmiştir. İtme sürme tendonları yapının inşaatı sırasında oluşacak pozitif ve negatif momentleri dengelemek adına eksantrisite oluşturmadan kesitin ağırlık merkezinden geçecek şekilde konumlandırılmıştır. İtme sürme halatları üst döşemede 2 x 5 x 25T15 ve alt döşemede 2 x 3 x 19T15 olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5). Servis tendonları ise yapının servis ömrü boyunca oluşacak kuvvetleri dengelemek üzere gövde içerisinde 2 x 3 x 19T15 olacak şekilde konumlandırılmıştır. Servis tendonları oluşacak kuvvetleri dengelemek amacıyla açıklıkta gövdenin alt tarafından geçerken mesnetten gövdenin üst tarafından geçmektedir. İtme sürme tendonları ve servis tendonlarının konumlarının belirlenmesi sonucunda iç kuvvetler elde edilmiş ve kesit gerilme değerleri hesaplanmıştır. Tabliye boyunca hesaplanan kesit gerilme değerlerinin basınç ve çekme sınır durumları altında kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kontrollerde mesnet ve açıklık kesitleri için AASHTO LRFD (2017) Bölüm 4.6.2.6'da belirtilen hususlar doğrultusunda etkili tabla genişlikleri hesaplanıp, kesit mukavemet momenti olarak etkili kesit geometrileri esas alınmıştır.

**Şekil 5 - Tipik tabliye tendon yerleşimi.**

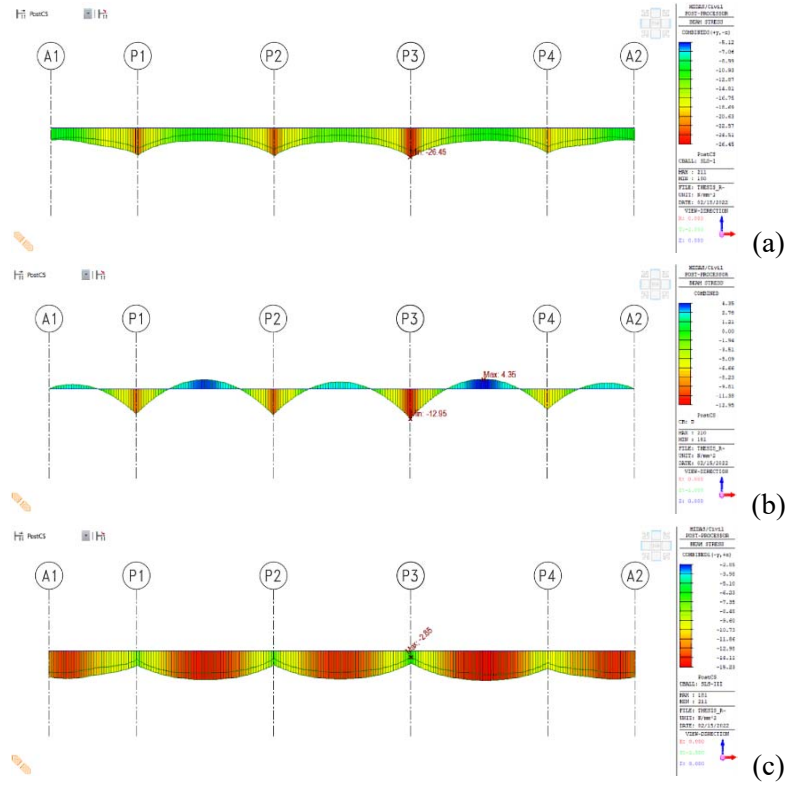
### Gerilme Kontrolleri

SLS-I kombinasyonu minimum basınç gerilmesi, sürekli yükler altında minimum basınç gerilmesi ve SLS-III kombinasyonu maksimum çekme gerilmesi değerleri Şekil 6'da gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Elde edilen ekstrem tabliye gerilme değerleri Tablo 2'de belirtilen kontroller sonucunda AASHTO LRFD (2017)'de tanımlanan sınırlar dahilinde kaldığı gözlemlenmiştir.

**Tablo 2 - Gerilme kontrolleri.**

SLS-I minimum basınç gerilmesi	$ -26.45MPa  <  -30.00MPa $	OK
Sürekli yükler altında minimum basınç gerilmesi	$ -12.95MPa  <  -22.50MPa $	OK
SLS-III maksimum çekme gerilmesi	$-2.85MPa < 3.54MPa$	OK



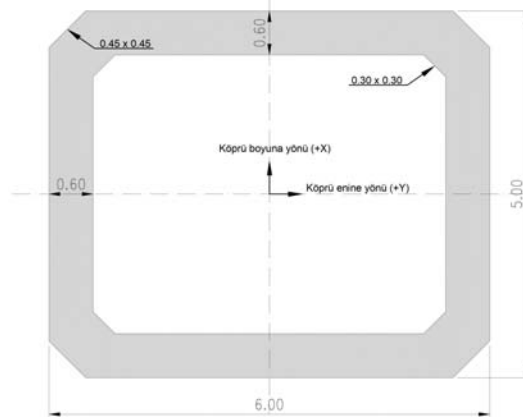
Şekil 6 - Gerilme zarf değerleri: (a) SLS-I minimum basınç gerilmesi. (b) Sürekli yükler altında minimum basınç gerilmesi. (c) SLS-III maksimum çekme gerilmesi.

## KÖPRÜ AYAK TASARIMI

Bu bölüm kapsamında köprü ayaklarındaki deprem etkileri, analiz yöntemleri, eğilme tasarımı, kesme tasarımı, narinlik kontrolü ve P- Δ gereklilikleri anlatılmaktadır.

### Köprü Ayak Geometrisi

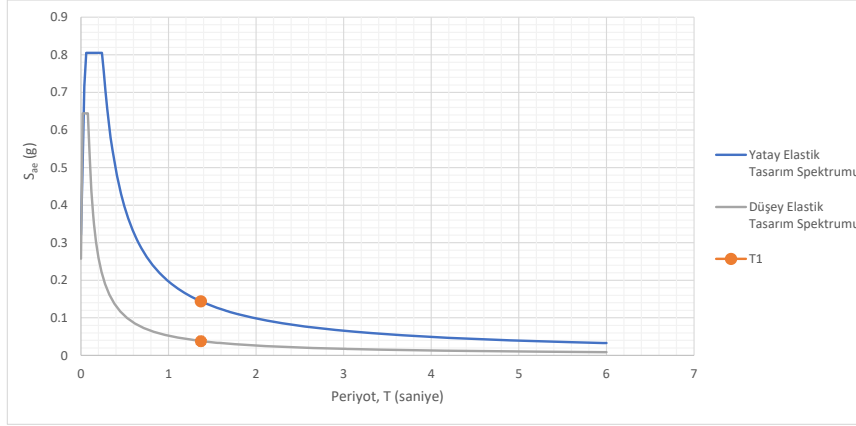
Köprü ayakları içi boş kutu kesit olarak tasarlanmıştır. Köprü orta ayakları köprü boyuna yönünde 5m ve enine yönünde 6m olarak Şekil 7’de gösterildiği gibidir. Köprü ayakları başlık kirişi uzunluğu ise 1.5m olarak matematiksel modele dahil edilmiştir.



Şekil 7 - Köprü ayak geometrisi.

## Deprem Etkileri

“<https://tdth.afad.gov.tr>” web sayfasından elde edilen, deprem yer hareketi düzeyi DD-1, yerel zemin sınıfı ZB olan yüzde beş sönümlenmiş yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları Şekil 8’de belirtildiği gibi matematiksel modele dahil edilmiştir. Köprü 1. modunda elde edilen  $T=1.371s$  değeri yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 8 - Yatay ve düşey elastik tasarım spektrumu.

Köprüler operasyonel olarak AASHTO LRFD (2017) Bölüm 3.10.5’e göre aşağıdaki şekilde üç gruba ayrılmaktadır: kritik köprüler, önemli köprüler, diğer köprüler.

Önemli köprüler, tasarım depreminden hemen sonra acil durum araçlarına ve güvenlik/savunma amaçlarıyla kullanılabilir olmalıdır ve bu köprüler tekrarlanma periyodu minimum 1000 yıl olan depreme göre tasarlanmalıdır. Kritik köprüler, tasarım depreminden hemen sonra acil durum araçları, güvenlik/savunma amaçlarıyla birlikte tüm araçlar için kullanılabilir durumda olmalıdır ve bu köprüler minimum tekrarlanma periyodu 2500 yıl olan depreme göre tasarlanmalıdır. Örnek köprü modeli önemli köprüler grubunda yer almaktadır ve 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi esas alınmıştır.

Köprüler, AASHTO LRFD (2017) Bölüm 3.10.6’ya göre  $S_{D1}$  değerleri doğrultusunda Tablo 3’de belirtilmiş olan dört farklı sismik bölge kategorisinden birinde yer alması gerekmektedir. Örnek köprü modeli için  $S_{D1} = 0.197$  olması sebebiyle köprü depremsel davranış kategorisi 2 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3 - Depremsel davranış kategorileri.

İvme Katsayısı, $S_{D1}$	Depremsel Davranış Kategorisi
$S_{D1} \leq 0.15$	1
$0.15 < S_{D1} \leq 0.30$	2
$0.30 < S_{D1} \leq 0.50$	3
$0.50 < S_{D1}$	4

Köprü altyapısı ve AASHTO LRFD (2017) Tablo 3.10.7.1-2’de belirtilen köprü elemanları arasındaki bağlantıların sismik tasarım iç kuvvetlerinin, elastik hesap sonucu bulunan iç

kuvvetlerin sırasıyla AASHTO LRFD (2017) Tablo 3.10.7.1-1 ve Tablo 3.10.7.1-2’de verilmiş olan uygun R karşı davranış katsayılarına bölünmesi ile bulunacaktır. Deprem yüklerinin herhangi bir yanal doğrultuda etkiyeceği kabul edilecektir ve uygun R katsayısı altyapının her iki ortogonal eksenini için kullanılacaktır. Örnek köprü modeli önemli köprüler grubunda olması ve ayak geometrisi olarak tek kolondan oluşması sebebiyle R=2 olarak hesaplara dahil edilecektir.

Deprem kategorisi 2’de yer alan köprüler, AASHTO LRFD (2017) Bölüm 4.7.4.1 ve Bölüm 4.7.4.3’deki minimum koşullara göre analiz edilecektir.

### Deprem Yükleri Analizi

Deprem etkisi için minimum analiz koşulları AASHTO LRFD (2017) Tablo 4.7.4.3.1-1’de tanımlandığı gibi gerçekleştirilecektir (Tablo 4).

**Tablo 4 - Sismik etkiler için minimum analiz gereklilikleri.**

Sismik Bölge	Tek Açıklıklı Köprüler	Çok Açıklıklı Köprüler					
		Diğer Köprüler		Önemli Köprüler		Kritik Köprüler	
		Düzenli	Düzensiz	Düzenli	Düzensiz	Düzenli	Düzensiz
1		*	*	*	*	*	*
2	Sismik analiz gerekli değildir	SM/UL	SM	SM/UL	MM	MM	MM
3		SM/UL	MM	MM	MM	MM	TH
4		SM/UL	MM	MM	MM	TH	TH

Burada, (\*) deprem analizine gerek yoktur, (UL) düzgün yayılı yük elastik yöntemi, (SM) tek modlu elastik yöntem, (MM) çok modlu elastik yöntem ve (TH) zaman tanım alanı yöntemi olarak tanımlanmaktadır.

Örnek köprü modelinin çok açıklıklı köprüler altında önemli köprüler ve düzensiz grubuna girmesi sebebiyle minimum analiz koşulu çok modlu elastik yöntem (MM) olarak tespit edilmiştir. Sismik analiz sonucunda matematiksel köprü modelinden elde edilen iç kuvvetler P2 / P3 ve P1 / P4 ayakları için Tablo 5’de özetlenmiştir.

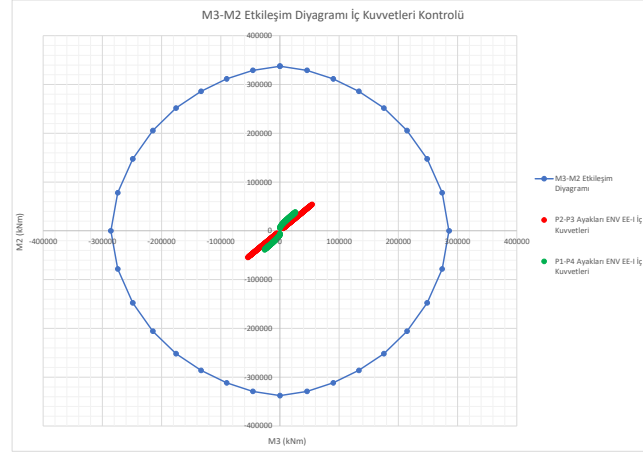
**Tablo 5 - En elverişsiz iç kuvvetler.**

		P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN)	M2 (kNm)	M3 (kNm)
P2 /	Max	-8,171	2,314	1,958	9,339	54,255	62,208
P3	Min	-24,162	-2,296	-1,961	-9,275	-54,345	-62,164
P1 /	Max	-6,664	1,728	1,863	0	38,809	25,865
P4	Min	-19,708	-1,728	-1,864	0	-38,817	-25,865

İtme sürme yönteminden elde edilen kuvvetler ise P2 / P3 aksındaki ayakların alt uç noktalarında  $P = -24,750kN$ ,  $M = 31,605kNm$  ve  $V = 704kN$ ’dur. İç kuvvetlerin zarfı alındığında depremleri kombinasyonlardan elde edilen kuvvetler daha elverişsiz olduğu için hesaplamalarda esas alınmışlardır.







(b)

Şekil 10 - Karşılıklı etkileşim diyagramı: (a) M-N. (b) M3-M2. (devam)

Köprü modelinden her iki köprü ayağı tipi için de “Ekstrem Durum I” kombinasyondaki normal kuvvet (P) ve moment (M3) değerleri karşılıklı etki diyagramının sınırları dahilinde kaldığı Şekil 10’da gösterilmiştir. Deprem etkisinde köprü ayaklarında boyuna doğrultudaki moment ile birlikte enine doğrultuda da moment kuvvetleri oluşmaktadır. Bu iki doğrultulu moment etkileşimini incelemek amacıyla  $N = -24,162kN$  olduğu durumda M3-M2 karşılıklı etkileşim diyagramı çizdirilmiştir. Köprü modelinden elde edilen iç kuvvetlerin etkileşim diyagramının içerisinde kaldığı Şekil 10’da gösterilmiştir.

### Kesme Tasarımı

Kolona gelen kesme kuvvetini, beton ve enine donatılar beraber karşılamaktadır. Bu yüzden, öncelikle kesitin nominal kesme kuvveti kapasitesi hesaplanacaktır ve ardından ihtiyaç olması halinde enine donatı hesabı yapılacaktır. Kolonun kesme kuvveti kapasitesi AASHTO LRFD (2017) Bölüm 5.7.3.3’e göre yapılacaktır. Şartnamede verilen bağıntılar aşağıdaki şekildedir.

$$V_c = 0.0316 \cdot \beta \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_v \cdot d_v$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d_v}{s}$$

$$V_{n1} = V_c + V_s$$

$$V_{n2} = 0.25 \cdot f'_c \cdot b_v \cdot d_v$$

$$V_n = \min(V_{n1}, V_{n2})$$

$$\phi V_n > V_u$$

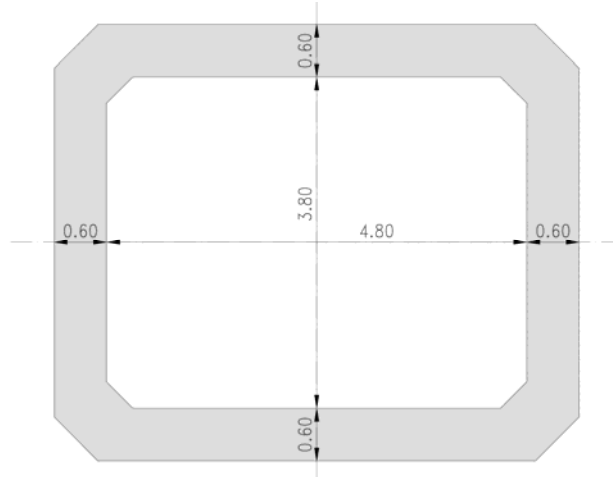
Her doğrultu için seçilen 4 kollu D20/150 donatı ile kesme kuvvetleri altında ayak kesitinin uygun olduğu gözlemlenmiştir.

### Narinlik Kontrolü

Kutu kesitli dikdörtgen elemanlarda her bir cidarın narinlik oranı AASHTO LRFD (2017) Bölüm 5.6.4.7.1’de belirtildiği gibi aşağıdaki şekilde alınmaktadır.

$$\lambda_w = \frac{X_u}{t}$$

Burada, ( $X_u$ ) her bir cidarın kendisine dik cidarlar veya guseler arasında kalan sabit et kalınlıkları bölümünün uzunluğu, ( $t$ ) cidar kalınlığı, ( $\lambda_w$ ) boşluklu kolonların cidar narinlik oranı olarak tanımlanmaktadır. Narinlik kontrol parametreleri Şekil 11’de gösterildiği şekildedir.



Şekil 11 - Narinlik kontrol parametreleri.

$$X_u = 4.8m \quad t = 0.6m \quad \lambda_w = 8.0 < 35.0$$

### P- Δ Gereklilikleri

AASHTO LRFD (2017) Bölüm 4.7.4.5’e göre herhangi bir ayağın enine veya boyuna deplasmanı aşağıdaki şartı sağlamalıdır.

$$\Delta P_u < 0.25\phi M_n \quad \text{Burada, } \Delta = R_d \cdot \Delta_e$$

$$\text{Eğer } T < 1.25T_s \text{ ise } R_d = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \cdot \frac{1.25T_s}{T} + \frac{1}{R}$$

$$\text{Eğer } T \geq 1.25T_s \text{ ise } R_d = 1$$

Burada, ( $\Delta$ ) ayak rölatif deplasmanı, ( $\Delta_e$ ) elastik sismik analizden hesaplanan deplasman, ( $T$ ) esas mod periyodu, ( $T_s$ ) köşe periyodu, ( $R$ ) karşı davranış değiştirme katsayısı, ( $P_u$ ) ayaktaki normal kuvvet, ( $\phi$ ) eğilme dayanım faktörü, ( $M_n$ ) ayak eğilme moment kapasitesi olarak tanımlanmaktadır.

$$\Delta P_u < 0.25\phi M_n \rightarrow OK$$

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında itme sürme yöntemi ile yapılan bir köprünün yapısal analizi, hesap adımları ve ayak tasarımı anlatılmaktadır. Örnek bir köprü modeli üzerinden üstyapı hesapları kapsamında tabliye kesitinin ön boyutlandırması, tanımlanması gereken yükler ve kombinasyonlar, itme sürme analizi, itme sürme tendonlarının tespiti ve gerilme kontrolleri gerçekleştirilmiştir. İtme sürme analizi için uluslararası geçerliliği bulunan köprü tasarım programı kullanılarak 1m aralıklar ile köprünün itme sırasındaki oluşan iç kuvvetler göz önüne alınmış ve inşaat sonrası durumlar için de üstyapı kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Köprü ayak tasarımı AASHTO LRFD (2017) yönetmeliğine göre gerçekleştirilmiştir ve itme sürme işleminden dolayı ayaklara gelen kuvvetler ve sismik etkilerden dolayı oluşan kuvvetler incelenip en elverişsiz iç kuvvetler elde edilmiştir. Ayak tasarımı kapsamında eğilme tasarımı, kesme tasarımı, narinlik kontrolü ve P- Δ gereklilikleri gerçekleştirilmiştir.

## Kaynaklar

1. AASHTO LRFD. (2017). *Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
2. Combescure, E., Karayiğit, H., Özkul, Ö., Erdoğan, J. E., Güzel, Ö., & Scotto, G. M. (2016). Incrementally Launched Viaducts of the Northern Marmara Highway: Design and Construction in High Seismic Areas. *Istanbul Bridge Conference*.
3. Fontán, A. N., Diaz, J. M., Baldomir, A., & Hernandez, S. (2011). Improved Optimization Formulations for Launching Nose of Incrementally Launched Prestressed Concrete Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 16(3), 461–470. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.19435592.0000169](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.19435592.0000169)
4. Fontán, A. N., Santiago, H., & Baldomir, A. (2014). Simultaneous Cross Section and Launching Nose Optimization of Incrementally Launched Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 19(3), 04013002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.19435592.0000523](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.19435592.0000523)
5. Hernandez, S., & Fontan, A. N. (2014). Cost optimization in bridge construction. Application to launched bridges. *Structures Congress 2014*, 28012812. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784413357.245>
6. Hirmand, M. R., Rahimi, E., Moghadam, A., & Riahi, H. T. (2013). A Mathematical Investigation on the Optimum Design of the Nose-Deck System in Incrementally Launched Bridges. *European Journal of Scientific Research*, 108, 38–52.
7. Özel, C. N., Özkul, Ö., & Karayiğit, H. (2021). Incremental Launching by Lag-Casting: İhsaniye Viaduct. In P. Gülkan, A. Caner, & Memisoglu Apaydin, Nurdan (Eds.), *Developments in International Bridge Engineering: Selected Papers from Istanbul Bridge Conference 2018* (pp. 183–191). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/9783030591694\\_15](https://doi.org/10.1007/9783030591694_15)
8. Özkul, Ö., Karayiğit, H., & Erdoğan, J. E. (2015). İtme Sürme Yöntemi ile İnşa Edilmiş Sürekli Ardgermeli Köprülerin Deprem Tasarımı. *3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu*, 488–499. [https://www.imo.org.tr/Eklenti/4634,175825429pdf.pdf?0&\\_tag1=F9BB3E029ACFC05912DE355E9AEF9C20926A920C](https://www.imo.org.tr/Eklenti/4634,175825429pdf.pdf?0&_tag1=F9BB3E029ACFC05912DE355E9AEF9C20926A920C)
9. Rosignoli, M. (1997). Influences of the Incremental Launching Construction Method on the Sizing of Prestressed Concrete Bridge Decks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 122(3), 316–325. <https://doi.org/10.1680/istbu.1997.29802>

10. Rosignoli, M. (1998a). Nose-Deck Interaction in Launched Prestressed Concrete Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 3(1), 21–27. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10840702\(1998\)3:1\(21\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10840702(1998)3:1(21))
11. Rosignoli, M. (1998b). Site Restrictions Challenge Bridge Design. *Concrete International*, 20(8).
12. Rosignoli, M. (1999). Presizing of Prestressed Concrete Launched Bridges. *ACI Structural Journal*, 96(5). <https://doi.org/10.14359/723>
13. Rosignoli, M. (2000). Thrust and Guide Devices for Launched Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 5(1), 75–83. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10840702\(2000\)5:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10840702(2000)5:1(75))
14. Rosignoli, M. (2014). *Bridge Launching* (Second edition). ICE Publishing. <https://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727759979>
15. Scotto, G. M., Grandi, A., Erdoğan, J.-E., Alpman, A., Yayım, Ç., & Özkul, Ö. (2017). Incremental launching method for bridges of Northern Marmara Motorway, Turkey. *IABSE*, 3206–3213. <https://doi.org/10.2749/222137817822208816>
16. Sétra. (2007). Prestressed concrete bridges built using the cantilever method. In *Cerema*. Cerema. <https://www.cerema.fr/en/centre-ressources/boutique/prestressed-concrete-bridges-bruilt-using-cantilever-method>
17. Wang, W., Zheng, H., & Zeng, X. (2010). Optimum Design of Launching Nose During Incremental Launching Construction of Same-Span Continuous Bridge. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 4, 419–425. <https://publications.waset.org/pdf/10469>
18. Wei, J., Shao, T., & Haifeng, Y. (2021). Optimizing Double Launching Noses for Incrementally Launched Equal-Span Continuous Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 26(7), 06021006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.19435592.0001746](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.19435592.0001746)
19. Zellner, W., & Svensson, H. (1983). Incremental Launching of Structures. *Journal of Structural Engineering*, 109(2), 520–537. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1983\)109:2\(520\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1983)109:2(520))



# Yanal Kuşatma Basıncı Etkisindeki Yüksek Dayanımlı Betonarme Elemanlar İçin Yeni Bir Modelleme Yaklaşımı

Atacan ERDOĞAN<sup>1</sup>, H. Orhun KÖKSAL<sup>2</sup>

## ÖZET

TBDY 2018'de başkaca geçerli bir modelin seçilmediği durumlarda gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi için Mander modelinin kullanımı önerilmektedir. Ancak, 35 MPa'ın üzerinde basınç dayanımına sahip betonda bünyesel davranış değişikliği gerçekleşmekte ve giderek artan gevrek davranışın bu modellere yansıtılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Köksal ve Erdoğan tarafından önceki bir çalışmada geliştirilmiş olan yeni bir kuşatma yaklaşımının kullanılması sonucunda, yüksek dayanımlı beton için etkili ve basit bir kuşatılmış beton dayanımı bağıntısı öne sürülmüştür. Bu bildirinin başlıca amacı bu modelde önerilen kuşatma yaklaşımını irdelemek ve iki iyi bilinen deneysel çalışma sonuçları temelinde Mander ve önerilen modeli karşılaştırmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek Dayanımlı Beton, Yanal Kuşatma Basıncı, Kuşatılmış Beton Dayanımı

## ABSTRACT

### **A New Modeling Approach for High Strength Reinforced Concrete Elements Subjected to Lateral Confinement Pressure**

TBDY 2018 recommends to use the Mander model for the stress-strain relationship when no other valid model is selected. However, a change in structural behavior of concrete is expected due to the increasing compressive strength above 35 MPa, and increasingly brittle behavior needs to be reflected into the analytical models. Employing a previously developed new confinement approach in a previous work of Köksal and Erdoğan, an effective and simple confined concrete strength equation for high strength concrete has been proposed. The primary aim of this paper is to evaluate the confinement approach in the new model and to compare the Mander and the proposed model on the basis of the results of two well-known experimental studies.

**Keywords:** High Strength Concrete, Lateral Confinement Pressure, Confined Concrete Strength

---

1 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale - 20414957001@ogr.comu.edu.tr

2 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale - hokksal@comu.edu.tr

## **GİRİŞ**

### **1. Önceki Çalışmalar**

Betonun basınç altındaki doğrusal olmayan davranışını betonarme kolonların tasarım aşamasına yansıtmak amacıyla Richart vd. [1] tarafından 1928 yılında gerçekleştirilmiş olan öncü çalışmadan günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli analitik yaklaşımlar ve sayısal modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin kuşatılmamış beton için en bilineni, Hognestad tarafından 1951 yılında önerilmiş olanıdır [2]. TBDY 2018'de [3] kullanılan bu modelde silindirik basınç mukavemetine karşılık gelen birim kısalma değeri 0.002 olarak alınmış ve en büyük birim kısalma değeri ise 0.005 ile sınırlandırılmıştır. Bu modelin geliştirildiği yıllarda 30 MPa ile 50 MPa arası basınç mukavemetine sahip olan betonlar yüksek dayanımlı beton (YDB) olarak düşünülmekteydi. Buna paralel olarak ileri sürülen modeller yaygın kullanımda olan normal dayanımlı betonları temel almaktaydı. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise 50 MPa basınç mukavemetine sahip beton yüksek dayanımlı olarak nitelendirilmekteydi. 1990'lı yıllara kadar olan süre içerisinde bazı kaynaklarda normal dayanımlı beton için 40 MPa bir sınır değer olarak alınırken bazıları 35 MPa değerini önermekteydi [4-6]. Günümüzde teknolojik açıdan ileri ülkelerde 50 MPa ile 70 MPa arası dayanımına sahip betonların ticari kullanımlarındaki artışlarıyla birlikte beton sınıflandırılması da değişmiştir. 35 MPa ve üzerinde beton basınç dayanımına sahip betonarme elemanlarda artan çimento pastası dayanımı betonda bünyesel davranış değişikliğine neden olmaktadır. Beton dayanımının yükselmesiyle birlikte giderek artan gevrek davranışı dikkate alan yeni yaklaşım ve modellere ihtiyaç vardır. Ancak bu çalışmada irdelenmek istenilen nokta, özellikle 35 MPa ve üzerinde basınç dayanımına sahip betonların gerilme-birim şekildeğiştirme eğrilerinde oluşan ve giderek artan gevrek davranışın analitik modellere gerçekçi bir şekilde yansıtılmasıdır.

Etriyelerle kuşatılmış betonarme kolonlar için analitik çalışma ve sayısal modeller 1970'li yıllardan itibaren literatürde yerini almaya başlamıştır. Bu çalışmalardan en bilinenleri; Kent ve Park modeli [7], Geliştirilmiş Kent ve Park modeli [8], Sheikh ve Uzumeri [9] modelleridir. Richart vd. tarafından yapılan deneylerde [1] üç eksenli basınç gerilmesi altındaki beton numuneler, iki yöndeki basınç gerilmeleri ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) eşit tutularak ve eksenel basınç gerilmesi ( $\sigma_1$ ) arttırılarak kırılma durumuna getirilmiştir. Diğer bir ifadeyle yanal kuşatma gerilmeleri, düzgün ve eşit yayılı sıvı basıncı olarak beton silindirlere uygulanmıştır. Betonarme kolonlardaki etriyelerin işletme yükleri altında hemen hemen hiç gerilme almadığı ve bu nedenle kuşatılan çekirdek betonun davranışını etkilemediği hem deneysel olarak hem de teorik açıdan rahatlıkla görülebilir. Yüklemelerin artmasıyla ve eksenel gerilmelerin betonun tek eksenli basınç mukavemetine yaklaşması sonucunda gelişen içsel çatlaklar betonda bir hacim artışına neden olmaktadır. Bu durum kolon kesitlerinde etriyelere doğru yanal bir genleşme ve itme oluşturacaktır. Bu türden pasif kuşatma mekanizmalarında büyüyen yanal deformasyonlar sonucu yanal donatı bu deformasyonları önlemeye yönelik ters yönde bir etki yaparken, çekirdek beton giderek artan basınç gerilmelerine maruz kalacaktır. Tam olarak ölçülmesi mümkün olmayan ve etriyeler tarafından uygulanan bu basıncın sayısal modellere yansıtılma biçimi, önerilen modelin hassasiyetini belirleyen en önemli etkenlerdendir. Richart vd. [1] yaptıkları deneyler sonucunda betonun eksenel basınç dayanımı üzerinde, yanal kuşatma basıncının yaklaşık dört katı kadar bir artışın olduğunu gözlemlemişlerdir. Yine bu deneylerde dayanım artışından çok daha fazlasının betonun basınç altındaki şekil değiştirme kapasitesi üzerinde olduğunu da saptamışlardır. Kent ve Park modelinde [7] kuşatılmış beton için sadece şekildeğiştirme kapasitesindeki artış dikkate alınmıştır. Geliştirilmiş Kent ve Park modelinde [8] ise sargılı beton dayanımının da donatı miktarına ve şekil değiştirmedeki bu artışa bağlı olarak belirli bir katsayı ile arttırıldığı görülmektedir. İlk olarak, Sheikh ve Uzumeri [9] tarafından etriyelerin çekirdek beton üzerinde oluşturdukları kuşatma basıncı için bir analitik yaklaşım geliştirilmiştir. Bu analitik modelde dayanım yine belirli bir katsayı ile arttırılırken, çekirdek beton için etriyeler tarafından etkin olarak kuşatılmış bir alan ve hacim varsayımı yapılmış ve etriyelerin doğrudan beton kesite



uyguladığı gerilmeler bir katsayı ile azaltılarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmadan sonra, Mander vd. [10] benzeri bir efektif yanal kuşatma yaklaşımı ile William-Warnke [11] tarafından beton için önerilmiş beş parametrelilik kırılma kriterini kullanarak kuşatılmış betonun eksenel basınç dayanımı için yeni bir bağıntı önermişlerdir. Modelde kuşatılmamış betonun gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi için Hognestad modeli [2] kullanılırken, kuşatılmış betonda Popovics tarafından öne sürülen bağıntı [12] temel alınmıştır. Mander modeli, TBDY 2018 [3] yönetmeliğinde tasarım amaçlı olarak kullanılması önerilen modeldir. 1992 yılında normal dayanımlı betonlar için kuşatma etkisini irdeledikleri bir çalışma yayımlayan Saatçioğlu ve Razvi [13] ise 1990'lı yıllardan itibaren kullanımı yaygınlaşan YDB davranışı için modellerini 1999 yılında yeniden düzenlemişlerdir [14]. Modellerinde beton çekirdek üzerinde düzgün yayılı ortalama bir kuşatma basıncı tanımlamışlardır. Bu basınç değerini, kesit boyutları ve donatı aralıklarına bağlı bir katsayı ile azaltarak eşdeğer düzgün yayılı kuşatma basıncına dönüştürmüşlerdir. YDB için ise bu azaltma katsayısını değiştirerek yeni bir bağıntı önermişlerdir [14]. YDB için yapılan başlıca yayınlardan biri de Cusson ve Paultre'nin 1995 yılında yapmış oldukları çalışmadır [15]. Bu çalışmada Cusson ve Paultre etriyeler tarafından uygulanacak kuşatma etkisi için 30 adet betonarme kolon üzerinde yapılan deneyler sonucunda bir indeks değer tanımlamaktadırlar. İndekse bağlı olarak düşük, orta ve yüksek kuşatma seviyeleri önerilmekte ve kuşatılmış beton dayanımının bu seviyelere göre değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

## AMAC

Çok eksenli basınç altındaki beton davranışını modellemek için etriyeler tarafından uygulanan yanal kuşatma mekanizması birçok araştırmacı tarafından 1970'li yıllardan beri araştırılmaktadır [4-9]. Bu çalışmalarda önerilen bağıntılardan bazıları yönetmeliklerde kendilerine yer bulmuştur. Ancak zaman içinde giderek artan sıklıkta kullanılan YDB için mevcut model ve bağıntılarda Razvi ve Saatçioğlu modeli [13-14] dışında düzenlemeye gidilmemiştir. Yüksek dayanımlı betonun yanal genleşmesinin önlenmesi ve buna bağlı olarak eksenel dayanımında ve şekildeğiştirme kapasitesindeki artış, normal dayanımlı betonlara göre daha büyük yanal kuşatma gerilmelerinin elde edilebilmesini gerektirmektedir. Sürekli olmayan, düşeyde belirli aralıklarla lokal olarak uygulanan kuşatma mekanizması ile YDB için beklenen büyüklükte kuşatma gerilmelerinin oluşumu sorgulanması gereken bir durumdur. Bu durum Razvi ve Saatçioğlu [14] tarafından dikkate alınmış, kuşatılmış beton dayanımına karşılık gelen yanal kuşatma gerilmesi için doğrudan çeliğin akma dayanımını kullanmak yerine donatıdaki gerilme için ayrı bir bağıntı önerilmiştir:

$$f_s = E_s \left( 0.0025 + 0.04 \sqrt[3]{\frac{k_2 \rho_s}{f'_{co}}} \right) \leq f_{yw} \quad (1)$$

Bağıntı (1)'de yer alan  $E_s$  donatı çeliğinin elastisite modülünü,  $\rho_s$  hacimsel oranı,  $f'_{co}$  beton karakteristik basınç dayanımını,  $f_{yw}$  ise yanal donatının akma dayanımını ifade etmektedir.  $k_2$  değişkeni ise kolon kesit boyutu  $b_c$  ile düşey ve yatay donatı aralıkları  $s_1$  ve  $s_2$ 'e bağlı olarak tanımlanmıştır:

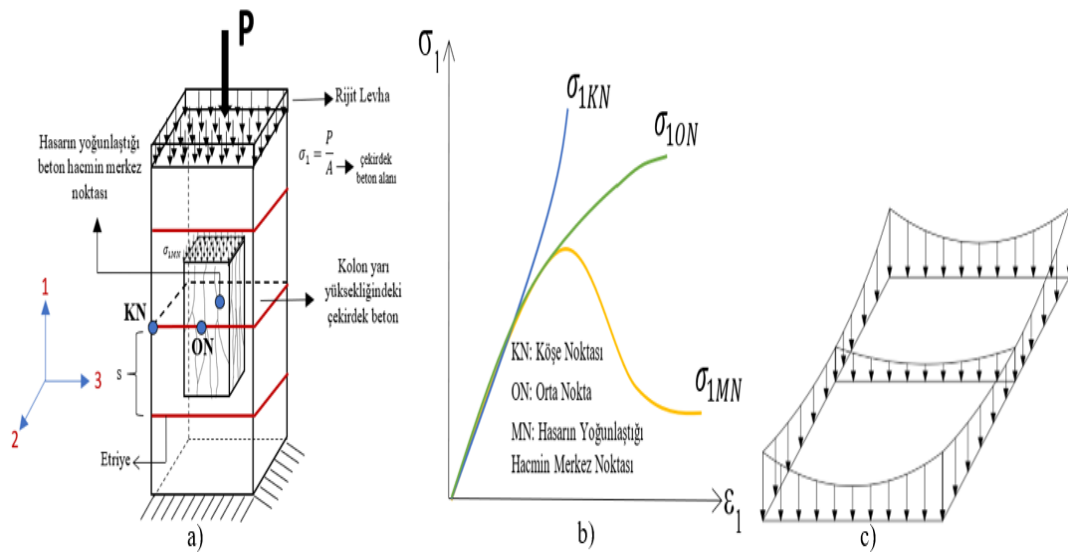
$$k_2 = 0,15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s_1}\right) \left(\frac{b_c}{s_2}\right)} \leq 1.0 \quad (2)$$

Mevcut modellerdeki yanal kuşatma basıncı değerlerinin YDB için değiştirilmeden kullanılması durumunda kuşatılmış beton dayanımlarının güvensiz tarafta kalacak şekilde hesaplanması olasıdır. Nitekim TBDY 2018 yönetmeliğinde [3] kullanılması önerilen Mander bağıntısının

kuşatılmış betonun basınç dayanımı için yüksek değerler verdiği ve deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı bazı araştırmalarda gösterilmiştir [15-18].

Köksal ve Erdoğan tarafından 2021 yılında yayımlanan çalışmada etriyeler tarafından uygulanan kuşatma basıncının hesaplanması için gerçekçi bir analitik yaklaşım geliştirilerek mühendislik açısından kolay ve uygulanabilir bir model ortaya konulmuştur [18]. Bu modeldeki kuşatma basıncı yaklaşımının irdelenmesi ve modelden elde edilen kuşatma basıncı ve kuşatılmış beton dayanımı değerlerinin literatürde yer alan yüksek dayanımlı betonarme kolon deneyleri kapsamında [14, 19] Mander modeli [10] ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi bu çalışmanın başlıca amacıdır.

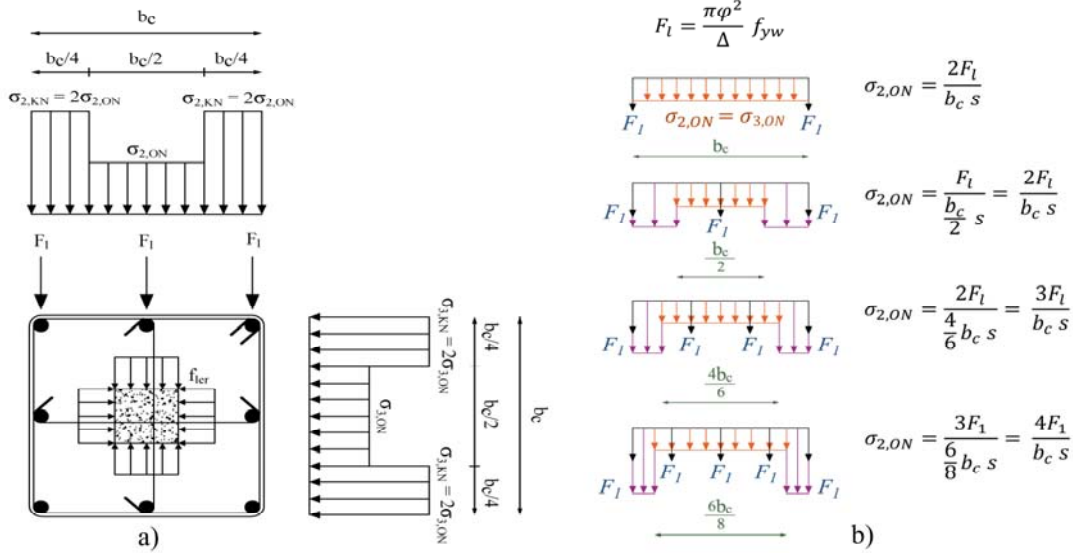
## 2. Analitik Çalışma



Şekil 2.1 - a) Hasarın yoğunlaştığı beton hacim konsepti, b) Kolon orta bölgesindeki beton kesit üzerinde varsayılan kuşatma gerilmeleri dağılımı, c) Kuşatma etkisi altında çekirdek betonda oluşan aksenal gerilmeler

Köksal ve Erdoğan tarafından önerilen modelin [18] en önemli özelliği kuşatma basıncına getirdiği farklı yaklaşımdır. Kuşatma basıncının çekirdek betonun karakteristik noktalarındaki değişen değerleri için çeşitli varsayımlar yapılması bu yaklaşımın en önemli farkıdır. Kuşatma basıncı, diğer bilinen modellerde [9-10,14] çekirdek betonu çevreleyen yüzey ve kenarlar üzerinde ortalama bir değer olarak hesaplanmaktadır. Gerçekte ise, bu gerilmeler sadece çekirdek beton çevresinde değil bütün beton hacmi içerisinde değişkenlik göstermektedir. Çekirdek beton hacmi içerisinde oluşabilecek en küçük yanal kuşatma değerinin kuşatılmış beton dayanımını belirleyeceğini beklemek en doğru yaklaşım olacaktır. Kolon deneylerinde ise aksenal davranışa temel olan kısalmalar genellikle kolon yarı yüksekliğinde karşılıklı iki kenar orta noktalarına yerleştirilen LVDT'ler ile okunmaktadır. Ancak Şekil 2.1a'da gösterildiği üzere, kolon köşe noktasında (KN) ve kısalmaların kaydedildiği kolon kenar orta noktasındaki (ON) kuşatma basıncının kolon merkezinde yer alan herhangi bir MN noktasına göre etriyelerle olan doğrudan etkileşim nedeniyle daha büyük değerlere ulaşacağı açıktır. Bu durumda kolon kenar orta noktasına karşılık gelen kuşatma basıncının kullanıldığı, özellikle Mander modeli [10] gibi beton için bir kırılma kriterini temel alan yaklaşımlarda kuşatılmış beton dayanımı için güvensiz tarafta kalan yüksek sonuçlar elde edilmesi olasılığı yüksektir. YDB söz konusu olduğunda bu durum daha da belirgin hale gelebilmektedir.

Kolonun köşe noktalarında oluşan kuşatma gerilmelerinin en büyük değerlere ulaştığı ve beton çekirdeğin orta bölgesine doğru bu değerlerin giderek azalacağını düşünmek gerçekçi bir varsayım olacaktır [18,20]. Şekil 2.1c'de, kolon yarı yüksekliğinde beton kesit üzerindeki kuşatma gerilmelerinin varsayılan dağılımı ve bu gerilmelerden en az etkilendiği düşünülen çekirdek kısmının ortasına karşılık gelen bölgenin temsili bir çizimi görülebilir. Yanal kuşatma gerilmelerindeki dağılımın betonun aksel gerilme-birim kısalma davranışına olan etkisi Şekil 2.1b'de KN, ON ve MN noktaları için gerilme-birim kısalma eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Azalan kuşatma gerilmeleri ile birlikte en fazla hasar görmesi beklenen ve en düşük aksel gerilme değerlerini alacak olan çekirdek orta bölge davranışının güvenli tarafta kalacak şekilde bütün kolon için kullanımı tasarım güvenliği açısından en uygun seçim olacaktır. Şekil 2.2a'da modelde önerilen kuşatma gerilmeleri çekirdek betonun farklı bölgeleri için gösterilmiştir. Etriyeler tarafından uygulanan kuşatma kuvvetlerinin boyuna donatılar arasındaki açıklığın ortasına kadar ve düzgün yayılı olarak etki ettiği varsayılmıştır [9,18]. Bu varsayım kapsamında, KN noktasında bulunan etriyedeki kuvvetin dağıldığı alanın, orta bölgede yer alan etriyeler için öngörülen alanın yarısına eşit ve bu nedenle KN noktasındaki gerilmelerin ON noktasında oluşan yanal kuşatma basıncı değerlerinin iki katı olduğu Şekil 2.2b'de görülebilir.



Şekil 2.2 - a) Köksal ve Erdoğan modelinde [18] önerilen kuşatma gerilmeleri dağılımı, b) Çekirdek beton üzerindeki yaklaşık kuşatma kuvvet ve gerilmeleri

Çekirdek beton üzerindeki kuşatma etkisi Şekil 2.2b'de görüldüğü üzere etriye kolu sayısı ve konumuna göre farklılaşacaktır. Köşe bölgelerdeki kuşatma basıncı daha büyük olacağı için hesaplamalarda orta bölge üzerine yayılan gerilmelerin temel alınması mühendislik açısından daha güvenli olarak kabul edilmektedir [10]. Çekirdek betonun iç bölgelerine doğru azalan kuşatma etkisi sonucunda Şekil 2.1c'de gösterilen MN noktasına karşılık gelen beton davranışının daha sünek ve zayıf olacağı bu yeni yaklaşımda kabul edilmektedir [18]. Bu modelde kuşatma etkisinin azaldığı çekirdek beton orta bölgesindeki betonun aksel gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi temel alınmıştır. Beton çekirdek çevresi üzerindeki ON noktasında oluşacak yanal kuşatma basıncı değerleri Şekil 2.2a ve 2.2b'den görüleceği üzere kare kolonlar için aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$\sigma_{2,ON} = \sigma_{3,ON} = \frac{N\pi\phi^2 f_{yw}}{4b_c s};$$

$$N = 2, n = 2; N = (n - 1), n > 2 \quad (3)$$

Bu bağıntılarda yer alan  $n$  bir doğrultudaki etriye kolu sayısını,  $N$  bir doğrultudaki etriye kolu sayısına bağlı bir katsayıyı,  $\varphi$  etriye çapını,  $s$  yanal donatı ağırlık merkezlerindeki arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bağıntı (3) ile bulunan kuşatma gerilmeleri, Sheikh ve Uzumeri [9] tarafından geliştirilen etkin kuşatılmış alan kavramından yola çıkılarak hesaplanan ve TBDY 2018'de [3] yer verilen  $k_e$  değişkeni kullanılarak azaltılacaktır:

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6 b_c h_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2 h_c}\right) \left(1 - \frac{A_{st}}{b_c h_c}\right)^{-1} \quad (4)$$

Bağıntı (4) 'de yer alan  $w_i$  düşey donatılar arası net mesafeyi,  $s'$  yanal donatılar arasındaki net mesafeyi,  $A_{st}$  toplam boyuna donatı alanını,  $b_c$  ve  $h_c$  ise kolon kesit boyutlarını ifade etmektedir. Bağıntı (3) 'de hesaplanan kuşatma gerilmeleri kesit ortasındaki MN noktasına doğru aktarılrken belirli bir miktarda azalacaktır. Bu azaltma  $k_r$  katsayısı ile dikkate alınmaktadır. Etriye kolu sayısı arttıkça beton kesit üzerindeki yanal kuşatma etkisinin düzgün yayılı gerilme davranışına yaklaşacağı beklenen bir durumdur. Bu durumda  $k_r$  katsayısı etriye kolu sayısı ile ters orantılı olacak şekilde giderek daha küçük değerler alacaktır.  $k_r$  katsayısı için etriye kolu sayısını dikkate alan farklı bağıntılar ileri sürülebilir. Köksal ve Erdoğan [18] tarafından yayınlanan çalışmada ise aşağıda verilen değerler kullanılmaktadır:

$$k_r = 4; n = 2, k_r = 3; n = 3 \quad \text{ve} \quad k_r = 2; n = 4 \quad (5)$$

Sonuç olarak kuşatılmış beton dayanımının gerçekçi bir şekilde elde edilmesi için kullanılacak olan azaltılmış yanal kuşatma basıncı

$$f_{1er} = \frac{k_e (\sigma_{2,ON} = \sigma_{3,ON})}{k_r} \quad (6)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Tüm beton sınıfları için kuşatılmış beton maksimum basınç dayanımı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$f'_{cc} = 7.84 f_{1er} + f'_{co} \quad (7)$$

Köksal ve Erdoğan [18] tarafından yapılan çalışmada  $f'_{co}$  'nun hesaplanmasında, betonun eksenel yük kapasitesinde donatının çok yüksek mukavemetli ve beton basınç dayanımının 60 MPa'nın üzerinde olduğu durumlar için %15'lik bir azalma öngörülmüştür:

$$f'_{co} = 0.85 f'_c \quad \text{eğer} \quad f'_{co} > 60 \text{ MPa}$$
$$f'_{co} = f'_c \quad \text{eğer} \quad 35 \text{ MPa} \leq f'_{co} \leq 60 \text{ MPa} \text{ ve } f_{yw} \leq 1000 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$f'_{co} = 0.85 f'_c \quad \text{eğer} \quad 35 \text{ MPa} \leq f'_{co} \leq 60 \text{ MPa} \text{ ve } f_{yw} > 1000 \text{ MPa}$$

Bağıntı (8)'de yer alan  $f'_c$  betonun karakteristik silindir dayanımıdır. TBDY 2018'de [3] kullanılması önerilen Mander modelinde [10] kuşatılmış beton basınç dayanımının hesaplanması için yer alan bağıntılar aşağıda belirtilmiştir:

$$f_{cc} = \lambda_c f'_{co}; \quad \lambda_c = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1.254 \quad (9)$$

$$f_{lx} = k_e \rho_x f_{yw} \quad ; \quad f_{ly} = k_e \rho_y f_{yw} \quad (10)$$

Bağıntı (9) 'da yer alan  $f_l$  kuşatma basıncını, Bağıntı (10) 'da yer alan  $\rho_{x,y}$  enine donatının hacimsel oranını,  $f_{yw}$  ise enine donatının akma dayanımını ifade etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta modelin tüm koşullarda enine donatının aktığı varsayımına dayanmasıdır.

### 3. Sayısal Çalışma

Kuşatılmış beton basınç dayanımı için önerilen Mander modeli [10] ile öncelikli olarak yüksek dayanımlı betonları dikkate alan Köksal-Erdoğan modeli [18], literatürde yer alan Nagashima vd.

**Tablo 3.1** - Modellerin 46 kare YDB kolonun maksimum basınç dayanımı tahminlerine ilişkin istatistikler

Kolon Numunesi/ Donatı Dizilimi/ Kolon Boyutları	$f'_{co}$ (MPa)	$f_{yw}$ (MPa)	$f'_{cc}$ DeneySEL (MPa)	Analitik/Deneysel	
				$f'_{cc}$ Köksal ve Erdoğan [18]	Mander vd. [10]
HH08LA/III/225	98.8	1387	120.8	0.97	1.14
HH10LA/III/225	98.8	1387	121.6	1.02	1.23
HH13LA/III/225	98.8	1387	129.1	1.03	1.26
HH15LA/III/225	98.8	1367	123.4	1.11	1.37
HH20LA/III/225	100.4	1367	122.5	1.06	1.32
HL06LA/III/225	100.4	807	115.7	0.98	1.11
HL08LA/III/225	100.4	807	115.0	0.91	1.06
LL05LA/III/225	51.3	807	117.8	1.04	1.08
LL08LA/III/225	51.3	807	134.2	1.03	1.12
LH08LA/III/225	51.3	1387	93.9	1.01	1.25
LH13LA/III/225	51.3	1387	82.1	1.02	1.26
HH13MA/III/225	100.4	1387	85.9	1.04	1.27
HH13HA/III/225	100.4	1387	94.3	1.06	1.30
LL08MA/III/225	51.3	807	95.5	1.01	1.11
LL08HA/III/225	51.3	807	95.2	1.03	1.13
LH15LA/III/225	52.4	1367	75.2	1.05	1.31
HH13MSA/III/225	100.4	1387	76.4	1.05	1.29
HH13HSA/III/225	100.4	1387	104.2	1.01	1.24
LL08MSA/III/225	52.4	807	106.3	1.04	1.13
LL08HSA/III/225	52.4	807	68.0	1.02	1.11

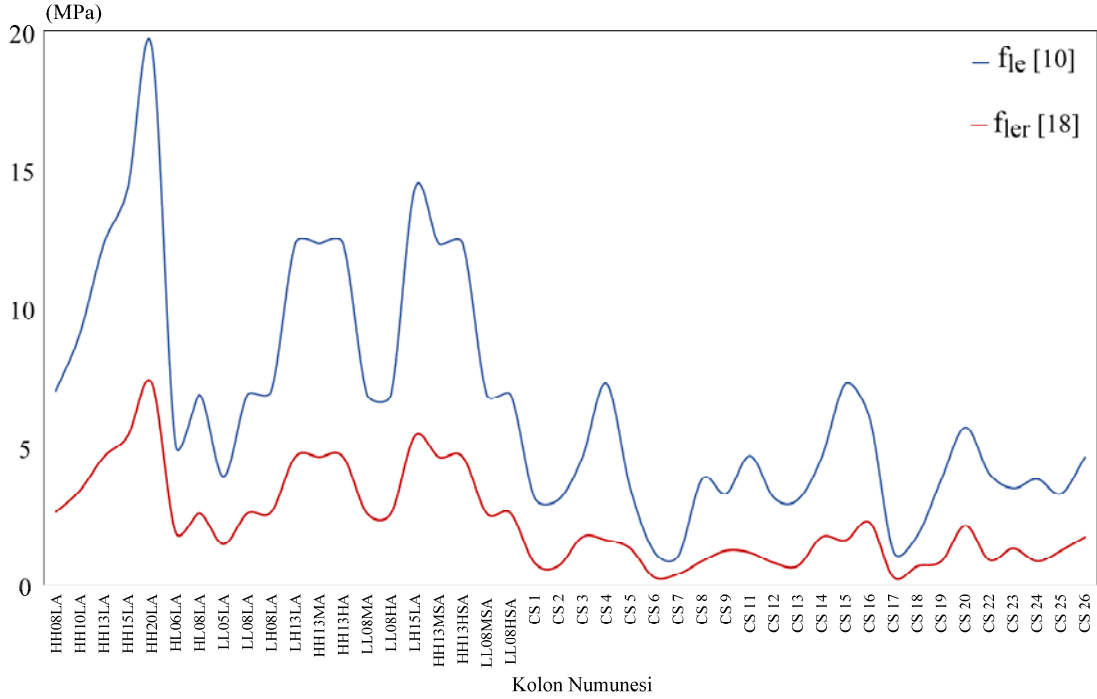
Nagashima et al. [19]

**Tablo 3.1** - Modellerin 46 kare YDB kolonun maksimum basınç dayanımı tahminlerine ilişkin istatistikler (devam)

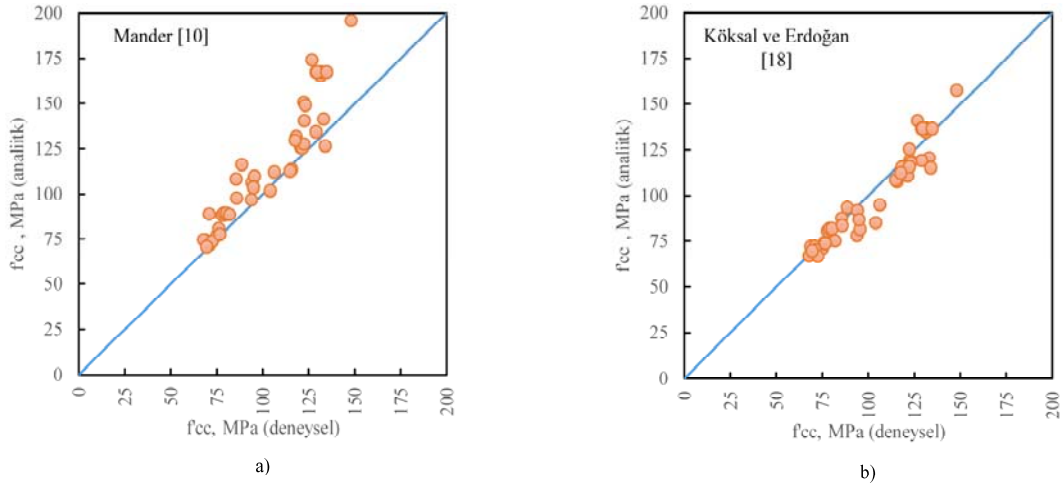
Kolun Numunesi/ Donatı Dizilimi/ Kolun Boyutları	$f'_{co}$ (MPa)	$f_{yw}$ (MPa)	$f'_{cc}$ DeneySEL (MPa)	Analitik/Deneysel	
				$f'_{cc}$ Köksal ve Erdoğan [18]	Mander vd. [10]
CS1/I/250	105.4	400	71.3	0.92	1.04
CS2/II/250	105.4	570	72.6	0.91	1.03
CS3/III/250	105.4	570	69.7	0.92	1.04
CS4/II/250	105.4	1000	76.7	0.96	1.21
CS5/III/250	105.4	1000	122.8	0.94	1.04
CS6/II/250	105.4	400	122.5	0.93	0.98
CS7/III/250	105.4	400	131.5	0.94	0.98
CS8/II/250	105.4	400	127.0	0.95	1.10
CS9/III/250	105.4	400	148.2	0.86	0.94
CS11/I/250	68.9	400	118.2	0.83	1.03
CS12/I/250	68.9	400	133.2	0.91	1.08
CS13/II/250	78.2	570	68.8	0.97	1.14
CS14/III/250	78.2	570	79.3	0.97	1.13
CS15/II/250	68.9	1000	70.9	0.85	1.15
CS16/III/250	68.9	1000	85.6	0.91	1.09
CS17/II/250	68.9	400	131.8	0.94	1.02
CS18/III/250	68.9	400	129.2	0.97	1.05
CS19/II/250	78.2	400	79.6	0.81	0.98
CS20/III/250	78.2	400	77.9	0.89	1.05
CS22/II/250	51.0	1000	88.7	0.99	1.10
CS23/III/250	51.0	1000	129.7	0.99	1.01
CS24/II/250	51.0	400	134.8	0.92	1.01
CS25/III/250	51.0	400	78.9	1.00	1.02
CS26/III/250	51.0	570	80.5	0.96	1.01
		Ortalama		0.97	1.15
		Standart Sapma		0.066	0.075

tarafından 1999 yılında [19] ve Saatçioğlu ve Razvi [14] tarafından yapılan deneysel çalışmalar aracılığıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelemede kuşatılmamış beton basınç dayanımları 51 MPa ile 105.4 MPa arasında değişen, boyutları 225x225 mm ile 250x250 mm olan, çeşitli donatı konfigürasyonuna sahip kare kolon numunelerin, deneylerden ve modellerden elde edilen kuşatılmış beton maksimum basınç dayanımları ayrıntılı olarak Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Ayrıca modellerin önerdiği kuşatma basıncı bağıntılarından elde edilen değerler

Şekil 3.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Beklendiği üzere Mander modelinin [10] özellikle etriyelerin her durumda aktığı varsayımını kullanması ve etriyelerle doğrudan komşu olan beton çekirdek üzerindeki basıncı temel almasından dolayı tüm kolonlar için daha yüksek değerler verdiği görülmektedir.



Şekil 3.1 - 46 kolon için iki model kullanılarak hesaplanan kuşatma basıncı değerleri



Şekil 3.2 - a) Mander modelinden [10] elde edilen maksimum basınç dayanımı tahminleri, b) Köksal ve Erdoğan modelinden [18] elde edilen maksimum basınç dayanımı tahminleri

Şekil 3.2a’da görüldüğü üzere beton mukavemeti arttıkça kuşatılmış beton dayanımı için Mander modelinin [10] verdiği daha yüksek ve güvensiz sonuçların Şekil 3.1’de gösterilen yüksek kuşatma basıncı değerlerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.2b’de ise Köksal-Edoğan modelinin [18] beton mukavemetine bağlı olmadan, kuşatılmış beton dayanımı için güvenli

sonuçlar verdiği, bunun nedeninin kuşatılmış beton basıncının hesaplanmasına getirdiği yaklaşım olduğu görülmektedir.

## **SONUÇ**

Kuşatılmamış beton basınç dayanımları 51 MPa ile 105.4 MPa arasında değişen iki farklı deney seti yapılan karşılaştırmalı çalışma neticesinde Köksal-Erdoğan modelinin [18] Mander modelinden [10] daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Köksal-Erdoğan modelinde [18], kuşatma basıncına getirilen yeni yaklaşımın yüksek dayanımlı betonların kuşatılmış basınç dayanımlarının hesaplanmasında etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, modelin etriyelerin hemen bitişiğinde yer alan beton çekirdek üzerindeki kuşatma basıncı yerine üç eksenli basınç durumunun daha güvensiz dayanım değerleri oluşturduğu çekirdek merkezindeki yanal kuşatma gerilmelerini kullanmasıdır. Bir diğer farklılık ise modelin etriyelerdeki basınç kuvvetini çekirdek beton üzerine düzgün yayılı alanlar halinde dağıtırken, köşe bölgelerde oluşan yüksek yanal kuşatma değerlerini dikkate almamasıdır. Mander modelinde [10], etriyelerin her durumda aktığı varsayımının kullanılması ve etriyelerle doğrudan komşu olan beton çekirdek üzerindeki basıncın temel alınmasından dolayı modelin daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. Mander modeli [10] kuşatılmış beton basınç dayanımlarının hesaplanmasında kullanılmaya devam edilecek ise özellikle yüksek dayanımlı betonlar için yeniden gözden geçirilmelidir.

## **Kaynaklar**

1. Richart, FE., Brandtzaeg, A., Brown, R.L., “A study of the failure of concrete under combined compressive stresses,” Vol. XXVI Bull. No. 185. University of Illinois. Engineering Experimental Station. Urbana. III. 1928;104. No. 121928
2. Hognestad, E., “A study on combined bending and axial load in reinforced concrete members,” Univ of Illinois Engineering Experiment Station. Univ of Illinois at Urbana Champaign. II. 1951;43-46.
3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018, 395 sayfa.
4. Ghosh, S.K., “Limits on Strength of Normal Weight Concrete,” PCI Journal, Vol. 46, 2001, pp 112-117
5. Antonius, A., Imran, I., “Experimental Study of Confined Low-, Medium- and High-Strength Concrete Subjected to Concentric Compression,” ITB Journal of Engineering Science, Vol. 44, November 2012, pp 252-269
6. Yu-Chen OU “Reinforced Concrete Columns with High-Strength Concrete and Steel Reinforcement, Part 2,” ACI Fall 2012 Convention
7. Kent, D.C, Park, R., “Flexural Members with Confined Concrete”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, ST7, January 1971, pp 1969-1990.
8. Park, R., Priestley, M.J.N., Gill, W.D., “Ductility of square-confined concrete columns,” Journal of the Structural Division, Vol. 108, 1982, pp 929-950
9. Sheikh, S.A., Uzumeri S.M., “Strength and ductility of tied concrete columns,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 106, ST5, 1980, pp 1079–1102.
10. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. “Theoretical stress–strain model for confined concrete,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, September 1988, pp 1804–1826.



11. William, K.J., Warnke E.P., “Constitutive model for the triaxial behavior of concrete,” Proceedings of IABSE, Structural Engineering Report 19, 1975; pp 1–30.
12. Popovics S., “A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete,” Cement and Concrete Research, Vol. 3, September 1973, pp 583-599.
13. Saatcioglu M., Razvi S.R., “Strength and ductility of confined concrete,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, June 1992, pp 1590–1607.
14. Razvi S., Saatcioglu M., “Confinement model for high-strength concrete,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 125, March 1999, pp 281–289.
15. Cusson D., Paultre P., “High-strength concrete columns confined by rectangular ties,” Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, March 1994, pp 783–804.
16. Somma G., Pieretto A., “Confinement effects on high-strength concrete under axial load: evaluation of International Standards prescriptions,” Materials and Structures, Vol. 49, January 2016, pp 57–69
17. Suzuki M., Akiyama M., Hong K.N., Cameron I.D., Wang W.L., “Stress-strain model of high-strength concrete confined by rectangular ties,” 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver. B.C. Canada, August 2004, pp 3330.
18. Köksal H.O., Erdoğan A., “Stress–strain model for high-strength concrete tied columns under concentric compression,” Structures, Vol. 32, August 2021, pp 216-227
19. Nagashima. T., Sugano. S., Kimura H., Ichikawa. A., “Monotonic axial compression test on ultra-high-strength concrete tied columns,” Proc. 10th World Conf. on Earthquake Engineering., Vol. 5, 1992, pp 2983–2988
20. Köksal H.O., Doran B., Turgay T.A., “A practical approach for modeling FRP wrapped concrete columns,” Construction and Building Materials, Vol. 23, 2009, pp 1429-1437



# Türkiye'de Kaydedilen Depremlerin Davranış Spektrumlarının Tasarım Spektrumları ile Karşılaştırması

H. Polat GÜLKAN<sup>1</sup>, Vesile Hatun AKANSEL<sup>2</sup>, Erol KALKAN<sup>3</sup>

## ÖZET

Halen, deprem tasarımına yönelik birçok standart ve yönetmelikte tasarım spektrumu şekli,  $T_{s,(-0.2s)}$  ve  $T_{1,(-1s)}$  periyotlar için hesaplanmış spektral ivmelerle tanımlanmaktadır. Bu tehlike kaynaklı değerlerin her ikisi de ilgili yerdeki kaya için belirlenir ve daha sonra yer hareketi seviyesine ve üst 30 m katmanın jeolojik özelliklerine bağlı faktörlerle tasarım hesaplarında kullanılmak üzere değiştirilir. Bu bildiri, ulusal sismik tehlike haritası yardımıyla çıkartılmış tasarım spektrumları ile AFAD tarafından işletilen Türkiye ulusal kuvvetli yer hareketi ölçüm ağının bazı istasyonlarındaki gerçek kayıtlardan elde edilen davranış spektrumları arasındaki uyumsuzluklara dikkat çekmektedir. Bu amaçla, ulusal kuvvetli yer hareketi ağının istasyonlarında kaydedilen gerçek yer hareketleri kullanılmış ve aynı konum ve zemin özellikleri için oraya ait tasarım spektrumları ile karşılaştırılmıştır. Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki tasarım spektrumunun, geçmiş depremlerin temsil ettiği sabit hız kırılmasındaki uzun periyot talebini tutarlı bir şekilde tanımadığı ve yumuşak zemin profilleri için artan periyot değerlerine taşımadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem, Köşe Periyotları, Sahaya Özel Tasarım Spektrumu, Kuvvetli Yer Hareketi Verisi, Sismik Tasarım.

## ABSTRACT

### **Response Spectrum Shapes Implied by Earthquakes in Turkey: Comparisons with Design Spectra**

Design spectrum shape in many recent standards and codes is defined by spectral accelerations for two periods ( $T_{s,(-0.2s)}$  and  $T_{1,(-1s)}$ ), modified by multiplicative factors that account for the site class and intensity of the ground shaking. This article draws attention to apparent discord between response spectra of actual recordings at a number of seismic stations of the national strong motion network of Turkey with the design spectra for the same location and site

---

1 Başkent Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - hpgulkan@baskent.edu.tr

2 Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla - vesileakansel@mu.edu.tr

3 QuakeLogic Inc. - Roseville, CA, Amerika Birleşmiş Devletleri - erol@quakelogic.net

*characteristics as given by the national seismic hazard map. While the nature of the two sets of spectra are not the same, we found that, for deep basins with Site Class-D or E profiles the design spectrum seems not to recognize consistently the constant velocity, longer period demand. This may lead to erroneous building designs in practice, and establish misleading record sets in spectrum-matching applications for nonlinear response history analyses.*

**Keywords:** *Earthquake, Response Spectrum, Corner Periods, Site Specific Design Spectrum, Strong Motion Database, Seismic Design.*

## GİRİŞ

Deprem mühendisliğinin temel aracı, 1930'larda geliştirilmesinden itibaren davranış spektrumu olmuştur (Trifunac, 2003; Chopra, 2007). Tasarım spektrumu, davranış spektruma dayalı, fakat onun sert iniş ve çıkış noktalarının bulunmadığı, lineer sistemlerin azami tepkilerinin tahmini için hazırlanmış bir grafikdir. Tasarımcılara lineer bir taşıyıcı sistemdeki gerilmeleri ve şekil değiştirmeleri tahmin etmede rehberlik eder. İlerideki bir deprem sırasında performansı kabul edilebilir doğrulukta ve resmi yol gösterici belgelerin aradığı şartların yerine gelip gelmediğini denetlemek üzere kullanılan bir araçtır. Son 50 yıl boyunca mühendislik sismolojisinin ana odak noktası, tasarım spektrumunu şekillendirecek, bir sahada beklenen güçlü zemin hareketinin özelliklerini tanımlamak için bir araya gelen çeşitli parametrelerin makul bir şekilde doğru tahminini elde etmek olmuştur. Gerçekten de, Housner (1959) veya Newmark ve ortak araştırmacıları (her ikisi de Housner ve Jennings, 1982 ve Newmark ve Hall, 1973, 1982'de özetlenmiştir) tarafından, yapısal sistemlerin tasarımında kullanılmak üzere henüz oluşmamış depremlerin etkilerine direnen o parametreye odaklanan ve tasarım spektrumu tanımlamak için yapılan ilk çalışmalardır. Davranış spektrumunun sağladığı kolaylık lineer sınırlar içinde kalan sistemler için azami tepkinin zaman tanım alanındaki uzun ve zahmetli hesaplara girmeksizin mühendisçe bir çırpıda hesaplanmasıdır. Üstelik mod birleştirmelerine dayalı usullerde hesapta kullanılacak parametrik eleman etkileri tahmin edilebilir. Spektrumun dezavantajı zaman boyutuna sahip olmaması, dolayısıyla 5 s uzunluğundaki bir depremle 50 s süreli bir depremin etkilerini ayırt edememesidir.

İlk uygulamalar, tasarım mühendislerinin çalışmalarında kullanabileceği ortalama sonuçlara varmak için çok yetersiz kalan bir kuvvetli hareket kayıtları kütüphanesine dayanmaktaydı. Bunlar sayıca az olmalarının yanısıra şu anda neredeyse tüm yer hareketi tahmin modellerinde (GMM'ler) yeralan ek değişkenler kümesini göz ardı etmekteydi. Bu ilave parametreler kümesinde uzun periyotlu yakın saha etkileri, yırtılmanın ortaya çıkardığı yönlendirme ve yer hareketinin ihtiva ettiği frekans dağılımı ile havza rezonansı hususlarını içerir. Çok geniş bir aralıktaki büyüklükler, mesafeler, faylanma tarzları ve kayıt alanı zemin şartlarındaki yer hareketi kayıtlarının hızla çoğalmasıyla, bu modelleri ayrıntılı olarak incelemek mümkün hale gelmiştir. Ancak, yer hareketi veri tabanındaki sayıca büyük artış, bu veri tabanını kullanan kişilere daha hassas öngörme yeteneği kazandırmış değildir. Her yeni deprem, mevcut modellerden farklı olan yer hareketleri üretir, çünkü bu hareket kaynak, yol ve saha özelliklerinin karmaşık bir kombinasyonundan etkilenir (Douglas, 2019; Kaklamanos ve diğerleri, 2021). Birinci nesil yer hareketi tahmin denklemlerinin (GMME) performansı, gözleme dayalı gerçeklik ile denkleme tahmin edilen yer sarsıntısı arasındaki boşluğu daraltmaya yönelik ilerleme uzun çalışmalar ile elde edilmiştir (Boore v.d., 2014). Ölçümler ve tahminler arasındaki uyumsuzluğun azaltılması, kuvvetli yer hareketi sismolojisi için aşılması gereken bir engel olmaya devam etmektedir.

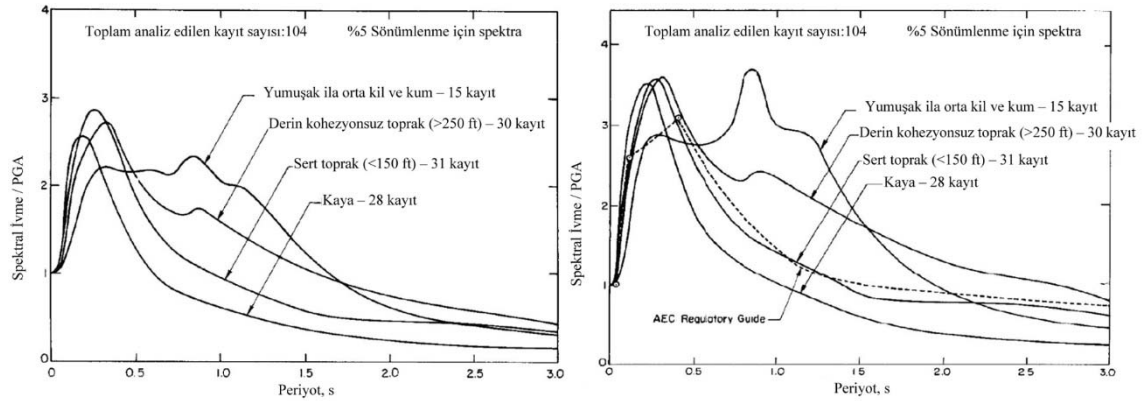
Sahaya özel tasarım spektrumları ve bunlarla eşleşen yer hareketi kayıtları üretme motivasyonu, hem statik hem de dinamik karakterli doğrusal olmayan yapısal analiz prosedürlerinin çoğalan uygulamalarından kaynaklanmaktadır (Kalkan ve Chopra, 2010). Buradaki çalışmamızın esas motivasyonu, ABD'deki araştırma bulgularının ve şartname tadilatlarının aralarında Türkiye'nin de bulunduğu ülkelerdeki deprem tasarım uygulamalarına ilave tamamlayıcı parametreler

(malzeme standartları, izin verilen yer değiştirme sınırları, statik yükler v.b.) ve tecrübe dikkate alınmadan doğrudan ithal edilen hükümlerle sonuçları bilinmeyen etkiler yaratmasıdır. ASCE7-10'u andıran özelliklere sahip zorunlu bir bina tasarımı yönetmeliğinin 2019'da yürürlüğe girdiği ülkemizdeki durumun böyle olduğu görüşündeyiz. Yönetmelikle aynı zamanda yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritası, hesapta kullanılacak spektrumun temelini temsil etmektedir. ASCE7'de USGS tarafından hazırlanan ve 2475 senelik tasarım spektrumunu şekillendirmeye yardımcı olan yer hareketi etkilerini kullanan hükümlerin aksine, ülkemizdeki yönetmelik tasarım ölçüsü olarak 475 yıllık tekerrür periyodu esas almaktadır. Muhakkak olan husus davranış spektrumunun hesap spektrumu ile aynı şey olmadığı gerçeğidir. Bu yazıda dile getirdiğimiz nokta herhangi bir coğrafi nokta için o nokta için tarif edilmiş tasarım spektrumu ile aynı koordinatta kaydı alınmış yer hareketlerinin davranış spektrumları arasındaki benzerliklerin veya aykırılıkların irdelenmesidir.

Aşağıdaki yorumlar, yalnızca tasarım yelpazesine atıfta bulunan yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin tasarım özellikleri ile ilgilidir. Bu spektrumun şekilsel görünümü, 2022'den önceki tüm ASCE7 belgelerindeki benzerleriyle aynıdır. Biri 0.2 s ( $S_S$ ) "kısa" periyot aralığında ve diğeri  $T = 1$  s ( $S_1$ ) 'de olmak üzere iki periyottaki spektral ivmelerle tanımlanır. Zemin etkisi faktörleri tarafından değiştirilmeden önce bu iki değişken, herhangi bir yer için tasarım spektrumunun temelini tanımlayan temel bileşenlerdir.

## DAVRANIŞTAN TASARIM SPEKTRUMUNA GEÇİŞ

Sismik güvenlik için tatmin edici bir tasarım temeline ulaşmak, yalnızca anakayadaki hareketi tahmin etmek için güvenilir bir araç değil, aynı zamanda derindeki bu hareketin, alttaki daha yumuşak zemin katmanlarının çeşitli dilimleri boyunca ilerlerken nasıl değişeceğini tahmin etmek için ek bir araç gerektirir. Saha davranışı hesabı, derinlikteki dalgaların zemin üstündeki yapıya doğru ilerlerken nasıl değiştiklerini hesaplama sürecidir. Bu sırada zemin malzemelerinde doğrusallıktan sapma mevcuttur ve asıl ilgilenilen nokta, temel seviyesine girdi olan nihai yer hareketi üzerinde ne kadar bir değişime uğrayacağını belirlemektir (Guéguen v.d., 2018).



**Şekil 1 - (a) Ortalama ivme spektrumları, (b) Farklı saha koşulları için yüzde 84'lük ivme spektrumları (Seed v.d. (1976'den alınmıştır) (Spectral Acceleration: Spektral ivme, Maximum Ground Accelerations:En büyük yer ivmesi),**

Yer hareketlerinin sahaya bağımlılığının incelenmesinde çığır açan değerlendirme Seed v.d., (1976) tarafından ifade edilmiştir. Çoğunlukla batı ABD'deki depremlerden toparlanan 100'ü aşkın kuvvetli yer hareketi zaman serisinden oluşan bir koleksiyonu kullanan bu çalışma Şekil 1'de görüldüğü gibi "farklı zemin ve jeolojik şartlar için" spektral eğrilerdeki farklılıkları bariz olarak resmetmiş ve bu etkilerin depreme dayanıklı yapı tasarım kriterleri seçiminde dikkate

alınması gerektiğini göstermiştir. Bu tür farklılıklar elbette daha önce de gözlemlenmiş bulunuyordu (Kaklamanos v.d, 2021). En üstteki 30 m'lik örtünün ortalama kayma dalgası hızıyla belirlenen jeolojik tabakaların sınıflandırılmış özellikleri, rijitlik azaldıkça spektrumun sabit hızla geçiş periyodunun uzadığını, sabit ivmedeki yer hareket büyütmesinin genellikle daha kısa periyotlarda azaldığını göstermektedir. Şekil 1'deki yer rijitliği için tanımlayıcı sınıflar bu gözlemin genelleşmesidir.

Şartname hazırlayıcısı makamlar, bu yeni gözlemi güncellenmiş sürümlerinde hüküm haline getirmekte gecikmediler, UBC-1994. ICBO 1994 notasyonunda  $V$ , Denklem (1)'de verilen taban kesme kuvvetini ve  $S$  ( $1.0 \leq S \leq 2.0$ ) zemin etkisi faktörünü ifade etmektedir.

$$V = \frac{ZIC}{R_w} W \quad \text{burada} \quad C = \frac{1.25S}{T^{2/3}} \leq 2.75 \quad (1)$$

$S$ 'nin alt değeri, tipik olarak  $V_{s30} > 750$  m/s olan kaya benzeri veya çok sert zeminler içindi ve üst değer,  $V_{s30}$ 'u  $< 150$  m/s olan zemin profilleri için geçerliydi (International Building Code (IBC) gibi şartname veya yönetmelikler arasındaki zemin türü tariflerinde küçük farklılıklar bulunmaktadır). Denklem (1)'de,  $S$  değişkeni S1 türü zemin için 0.31 s köşe periyoduna ve S4 için 0.87 s değerine sahiptir.

Hesap uygulamalarında kabaca tarif edilen bu dört zemin profili, dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Bu zemin türleri ve özellikleri için tabiatı icabı ancak kabaca tariflenmiştir. Kullanılmalarını gerektiren hesap şartlarına göre sıralandığında birinden diğerine nasıl geçiş yapacaklarına karar vermek kolay değildir.  $V_{s30}$  profillerinin saha ölçümlerinden belirlendiği sırada gözetilen kesinlik, bu profillerin daha sonra nasıl gruplandırıldığı ve tasarım uygulamaları için ortalamasının nasıl alındığı ile bağdaşmaz. Bu bağlamda sık dile getirilen şikayet, bir profilin şartname maddelerinde bu bilginin nasıl kullanılacağını kontrol eden zemin tipi gruplarından birine kopyalandığı sıradaki takribiyet ile tezat teşkil eden kayma dalgası hızlarının elde edilmesindeki hassasiyet ile ilgilidir. Mecazi olarak, takdire şayan süslü bir şekilde tasarlanmış bir kutsal heykel, nihayetinde kör bir keski ile yontulmaktadır.

Bu çalışmanın amaçları doğrultusunda,  $V_{s30} > 750$  m/s “kaya zemin”,  $375 < V_{s30} < 750$  m/s “çok sert zemin”,  $180 < V_{s30} < 375$  m/s “sert zemin” ve  $V_{s30} < 180$  “yumuşak zemin veya kil” olarak adlandıracağız. Bu dört bölmeli sınıflandırma, farklı belgeler (B – E veya S1 – S4) arasında farklı adlandırmalar alır, ancak bunların tam nitelikleri ve adları bu makale için önemsizdir. Bu zemin sınıfı belirleme tarzı, UBC, IBC ve ASCE7 yeni versiyonlarının hazırlanmasında da devam etmiştir. Türk yönetmeliğinin üslubu da en azından kendi kayıtlarımızla uyuşup uyuşmadığı teferruatlı biçimde ele alınmamış, aceleyle ve harfiyen ithal edilmiş rakamlardan ibarettir.

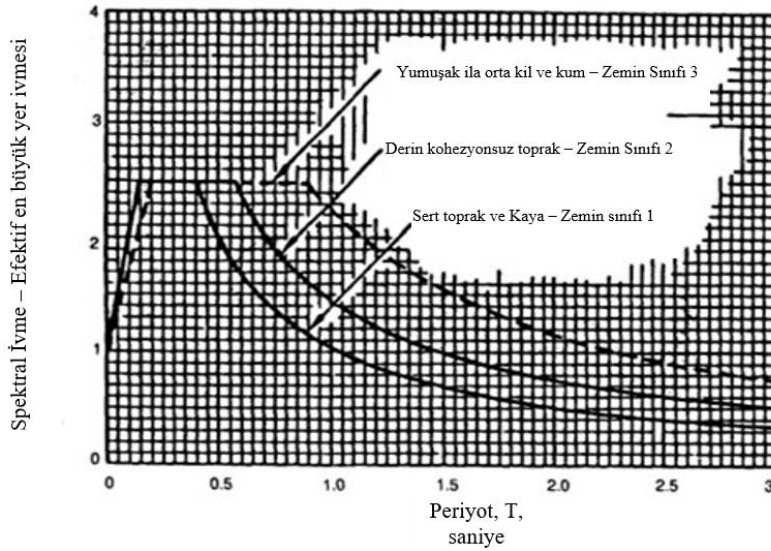
## **TASARIM SPEKTRUMUNA GEÇİŞ**

Şekil 2'de artık kullanılmayan UBC'deki (1994) normleştirilmiş spektral şekiller, tasarım mühendislerine yol gösteren metinlerin hazırlanmasında yetkilendirilmiş grupların, Seed ve ekibinin (1976) bulgularını nasıl dikkate aldığını temsil etmekteydi. Bunu eşdeğer statik prosedüre uygulanan ihtiyaçlar açısından tartışacağız çünkü bu ölçü, rutin tasarımda kullanılacak etkinin rakamlara çevrilmesi sırasında benimsenen düşüncüyü en iyi şekilde tarif eder. Eşdeğer deprem kuvveti usulünü takip ederken dikkate alınan spektral şekillerin iki özelliği Şekil 2'de gösterilmektedir. Sabit ivme bölgesinin (mevcut ASCE7 ifadesiyle  $T_1$  ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) tarafından  $T_B$  olarak adlandırılan) geçiş noktasına işaret eden periyot, azalan ortalama rijitlik ile 0.4-0.9 s arasında değişmektedir, ancak maksimum yer ivmesinin büyütmesi tüm zemin profilleri için periyot bu aralığında sabit 2.5 değerine sahiptir. Daha küçük spektral ivmelere maruz kalan profillerde meydana gelen daha fazla büyütme, Şekil 2'de

bulunmayan bir nüanstır. Bu nüans, UBC'nin (1997) bir sonraki sayısında geldi, ancak artma oranları o sırada var olan Bölge Faktörleriyle ilişkilendirilmiş Z değerlerine sabitlendi. Şartname için, ivmenin kısa (0.2 s) ve uzun (1.0 s) periyotlu kısımları için  $C_a$  ve  $C_v$  tanımlayan büyütme faktörleriyle  $C_a/(2.5C_v)$  oranınca verilen  $T_o$ 'nun spektrum değerleri için spektral ivmenin değişimini veren düzeltme yapılmıştır. Artan yer ivmesi genlikleri için (hesaplanan tehlike koordinatlarından ziyade sismik bölge faktörleri tarafından ima edilen), hem  $C_a$  hem de  $C_v$ , artan T için bir azalma yapar. Spektrumun sabit hıza geçiş periyoduna denk gelen değerini geçtikten sonra, spektral ivme doğru ifadeyle  $1/T$  ile değişir hale gelir.

Halihazırda birçok deprem hesabı standardında görünen saha büyütme faktörlerinin gelişimi ve iyileştirilmesi Borchardt (1994, 2012) ve Seyhan ve Stewart'a (2014) çalışmalarına kadar izlenebilir. IBC için kaynak belge olarak hizmet veren ASCE7-16, tasarım spektrumuna ulaşmak için basit bir prosedür geliştirmiştir. Belirli bir saha için kısa ve uzun periyotlar için iki spektral koordinat, tipik olarak 50 yıllık uzun bir zaman penceresi boyunca yüzde 2 ihtimale sahip olan bir yer hareketi için (genellikle haritalanmış) bir sismik tehlike çalışmasından tanımlanır. Bunlar sırasıyla  $S_s$  ve  $S_1$  olarak adlandırılır. Ardından,  $S_s$  ve  $S_1$ 'yi aşağıdaki gibi değiştirerek zemin etkileri tanımlır:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad \text{and} \quad S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$



Şekil 2 - Normalize edilmiş Spektral Şekiller, UBC94

$F_a$  ve  $F_v$  faktörleri, Tablo 1 ve Tablo 2'de verilen saha özelliklerine ve tehlike seviyelerine bağlıdır.  $F_a$  için daha önceki tablolarda Zemin Sınıfı B genelindeki değer baştan sona 1.0 olarak listelenirken,  $V_{s30}$  tanımındaki değişiklikler nedeniyle 0.9'a düşürülmüştür. Yatay doğrultuda ara değer hesabına (enterpolasyona) izin verilir. Her iki tabloda da yıldız işareti, ASCE7'nin sahaya özel zemin çalışmalarının yapılmasını gerektirdiği halleri belirtir. 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY (2018), ASCE7-16 girdileri ile her nasılsa aynı  $F_a$  değerlerini listelemektedir. Zemin Sınıfı E satırının son üç sütununun altı çizili rakamlar ile değiştirilmesinin dayanağı meçhuldür. Bunların Loviknes'te (2021) olduğu gibi hesap veya ölçümle kontrol edilmiş ve yayımlanmış olmaları mümkün görünmemektedir. Benzer keyfi bir tadilat, Tablo 2'de TBDY'de Zemin Sınıfı E için verilen son beş sütun  $F_v$  değerleri için yapılmıştır. Bu keyfi tadilatın spektrumlarda kalıcı değişikliklere yol açıp açmadığı yazımızın irdeleyeceği başlıklar arasındadır.

**Tablo 1 - Kısa Periyot Zemin Katsayısı  $F_a$ , ASCE 7-16 / TBDY (2018)**

Zemin Sınıfı	Haritalanmış Risk Hedefli Maksimum Deprem (MCER) Kısa Periyot Spektral Davranış İvme Parametresi					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s = 1.25$	$S_s = 1.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
E	2.4	1.7	1.3	* (1.1)	* (0.9)	* (0.8)
F	*	*	*	*	*	*

**Tablo 2 - Uzun Periyot Zemin Katsayısı  $F_v$ , ASCE 7-16 / TBDY (2018)**

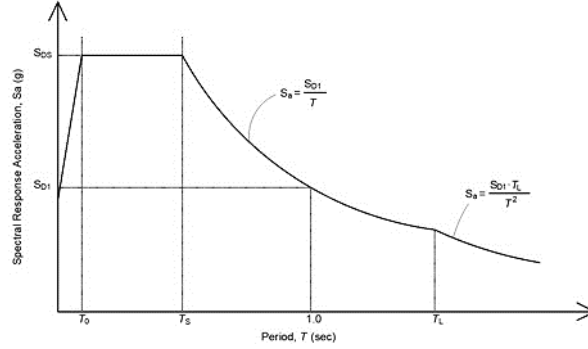
Zemin Sınıfı	Haritalanmış Risk Hedefli Maksimum Dikkate Alınan Deprem (MCER) Uzun Periyot Spektral Davranış İvme Parametresi					
	$S_l \leq 0.1$	$S_l = 0.2$	$S_l = 0.3$	$S_l = 0.4$	$S_l = 0.5$	$S_l = 0.6$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
C	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
D	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
E	4.2	* (3.3)	* (2.8)	* (2.4)	* (2.2)	* (2.0)
F	*	*	*	*	*	*

ASCE 7'de, değiştirilmiş  $S_{MS}$  ve  $S_{MI}$  değerleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi,  $S_{DS} = 0.67 S_{MS}$  ve  $S_{DI} = 0.67 S_{MI}$ ,  $T_s = S_{DI} / S_{DS}$  ve  $T_o = 0.2T_s$  olan tasarım tepki spektrumu haline gelir. Hesapta kullanılacak katsayılar 2475 senelik depremin ordinatlarının 2/3 oranında azaltılmış halidir. Bu husus ABD'ye mahsus bir tadilatır. TBDY (2018)'deki tehlike seviyesi 475 yıllık bir tekerrür periyodu için tanımlandığından,  $S_{DS}$  ve  $S_{DI}$  için 2/3 azalmaya yer vermez. Ülke şartlarında 475 ile 2475 senelik deprem etkilerinin 2/3 oranında bulunduğu gösterilmemiştir.

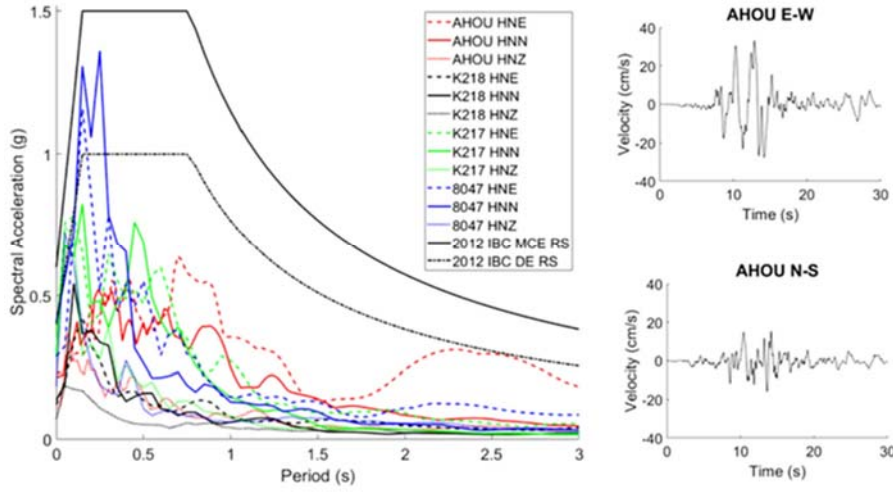
Şekil 3'te, daha yumuşak zemin profilleri için  $F_v$  değerlerinin Tablo 2'de gösterildiği gibi artacağı ve bu yüzden  $T_B$ 'nin daha büyük değerlere kayacağı varsayılır. Ancak  $T_s$  artık fiziki saha özelliklerinden bir kademe koparılmakta ve ihtimalen hesaplanmış değerlerden gelmektedir. Tasarım ve davranış spektrumları arasındaki kavramsal farklılıklara rağmen, şu haklı soru akla gelebilir: Ampirik veriler, yönetmelik tarafından dikte edilen tasarım spektrumunun ima ettiği beklentiyle tutarlı mıdır, yoksa hangi karakterde olursa olsun, ihtimallerle hesaplanmış spektral değerler, işimize uygun düşen bilgeliğimize ters midir? Bu soru haklıdır çünkü sahaya özel tasarım spektrumları, aynı sahada kaydedilen yer hareketi spektrumlarına beklenti olarak en azından itibari bir benzerlik göstermelidir. Örnek olarak 2018'deki Alaska depreminin Anchorage şehrinde yol açtığı yer hareketlerinin aynı yer için verilen hesap spektrumlarıyla mukayeseli görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir (Rodgers v.d., 2021). Spesifik olarak, aynı saha için yönetmelikle belirlenmiş şekil ile gerçek yer hareketi şekli arasındaki bariz farklılıklar bir uyarı işareti oluşturmaktadır çünkü farklılıklar doğrusal olmayan hesaplarda kullanılan tasarım yer hareketleri sırasında başka tezahürle ortaya çıkacaktır. Hedef spektrumu bir şekilde yanlış şekillendirilmişse, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan yer hareketi kayıtları yanlış sonuçlara yol açacaktır.



Kaldı ki spektruma uygun yer hareketi tayin etme işleminin istatistik dayanağı zayıftır (Baltzopoulos v.d., 2020).



Şekil 3 - Tasarım Davranış Spektrumu (ASCE7-16'dan alınmıştır.)



Şekil 4 - M7.1 Alaska Depremi Sırasında Hasar Gören Okul Binalarına 5-10 km Mesafedeki Kayıt İstasyonlarınca Kayıt Edilen Yer Hareketlerinin Hesap Spektrumuyla Mukayesesi (Rodgers v.d., 2021)

Bu metnin geri kalanında, Türkiye Ulusal Kuvvetli Hareket Ağı'ndan alınan verileri kullanarak bu şartın geçerliliği test edilmiştir (Gülkan, v.d., 2007, Gülkan, 2011). İzlediğimiz prosedür, Ulusal Ağ istasyonlarından alınan kuvvetli hareket kayıtlarının iki yatay bileşeninin geometrik ortalamasını kullanmak ve herhangi bir ölçeklendirme olmaksızın bu olayların ivme davranış spektrumunu hesaplamaktır. Hedefimiz bu yer hareketlerinin maksimum oryantasyonlarını belirlemek olmadığı için yatay bileşenler için başka bir ayar yapılmamıştır. Ulusal sistemdeki her istasyonun zemin özellikleri, 2003-2008 dönemi boyunca bir jeofizik araştırma programı aracılığıyla tayin edilmiştir, dolayısıyla zemin türü tanımları kabul gören prosedürlere uygun olarak güvenilir bir şekilde önceden tayin edilmiştir. Ulusal deprem tehlike haritası, TBDY (2018) 'in farklı maddeleri için 43, 72, 475 ve 2475 yıllık tekerrür periyotlarına dayalı tasarıma izin verir. Yetkili makam tarafından düzenlenen etkileşimli bir web sayfası, mühendislerin tasarımda kullanmaları için hem yatay hem de dikey yönler için bu spektrumlardan herhangi birini sağlamaktadır.

Belirli bir yıllık meydana gelme ihtimali (tekerrür periyodu) için tasarım spektrumu, hesaplanan kısa ve uzun periyotlu spektral ivme koordinatları göz önüne alındığında, TBDY izlenerek elde

edilebilir, ancak halihazırda meydana gelmiş bir depremin spektral ivme koordinatları, buna karşı gelen yer hareketinin aynı tekerrür periyoduna denk gelmeyecektir (Gülkan, 2013).

## **MUKABİL ARGÜMANLAR**

Yeryuvarının herhangi bir yerindeki tek bir kayıttan gelen tepki spektrumunun, aynı lokasyon için geçerli olan belirli bir tehlike seviyesi için tasarım spektrumu ile aynı olmadığını kabul etmek zorundayız çünkü ihtimaller hesabına dayalı sismik risk hesabı (PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Analysis) farklı sismik kaynaklardan birçok büyüklük-mesafe kombinasyonunun zarfıdır. Bunun sonucu olarak, her periyottaki spektral değerlerin tek bir yer hareketinde meydana gelmesi muhtemel değildir. Aynı istasyonda kaydedilen farklı sismik olaylara ait birkaç yer hareketi kaydı mevcut olsaydı, bunların ergodikliği hakkında fikir edinme mümkün olurdu. Davranış spektrumu eğrilerimiz, iki yatay bileşenin geometrik ortalamasıdır (yayınlarında “RotDD50” olarak kısaltılır). Ancak bunlar risk hedefli bir çalışmanın rakamları değildir. Farklı koordinatlardaki depremlerin aynı istasyonda doğurduğu eğriler, aynı depremin farklı istasyonlardaki kayıtlarıyla aynı değildir. Yazımızın dayanağı büyük ölçüde 30 Ekim 2020 tarihli M6.9 depremi sırasında İzmir'deki derin yumuşak zeminlerde yerleştirilen istasyonlar tarafından kaydedilen hareketleridir. Bu elbette veri tabanındaki ergodiklik iddiasının yerini tutmaz ancak İzmir'deki yumuşak zemin yataklarındaki tüm istasyonlar daha uzun periyotlar için daha yüksek talepler gösterir ve TBDY haritasından aynı noktalar için elde edilen spektrumlar hep farklı çıkarsa ters giden bir şeyin olduğu iddiasını ortaya sürmek mümkün hale gelir.

## **VERİ TABANI**

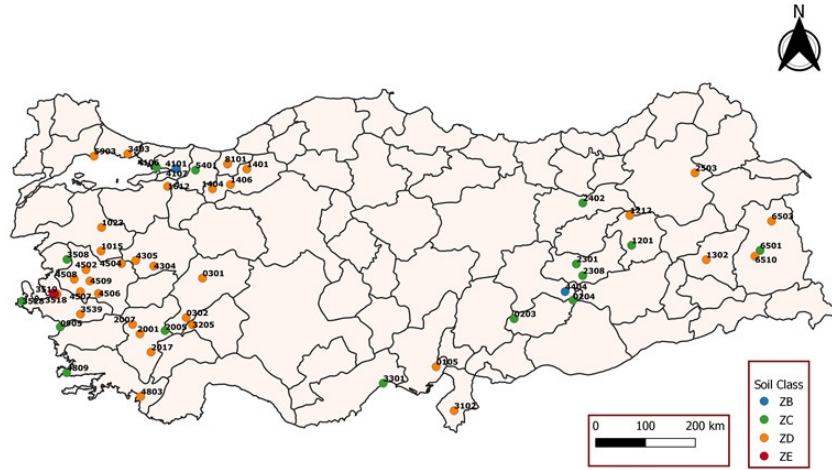
Yazımızda Türkiye'deki Ulusal Sistem veri tabanından seçilen ivme zaman dizilerini kullanarak bunların davranış spektrumlarını çizmek suretiyle Şekil 3'teki şeklin uygunluğunu irdeleyeceğiz. Burada kullanılan istasyonların listesi ve deprem yer hareketleri Ek A'da verilmiştir. Bu eğrilerdeki  $S_{DS}$  değerlerini, ulusal tehlike haritasından çıkarılan aynı koordinatlar ve aynı zemin sınıfları için kaydedilen hareketin parametresini alt ve üstten zarflayan iki tekerrür periyodu için tasarım spektrumuyla karşılaştırıyoruz. Davranış ve tasarım spektrumları aynı amaca hizmet etmese de şekilleri arasında bir benzerlik olması gerektiğini düşünmekteyiz. Belirli bir yer hareketi için çizilen belirli bir tepki spektrumunun tekerrür periyodu bilinemez. Aynı zaman serisinin kaydedildiği yerin tasarım spektrumu için eldeki spektrumun en yakın benzeri olduğu iddiasını destekleyecek bir kıstas da bulunmamaktadır. Diğer bir ifadeyle deprem tekerrür süreleri ve bunların temsil ettiği yer hareketleri itibari değerlerdir. Burada kullandığımız yer hareketi kayıtlarının çoğu 72 - 475 yıl aralığında çıkmaktadır. Bu tekerrür periyotlarının 50 yıl süreli zaman penceresinde sırasıyla 0.5 ve 0.1 gerçekleşme ihtimaline denk geldiği kabul edilmektedir fakat bu kabulün ampirik doğrulaması mevcut değildir.

Kavramın ispatı olarak, verilen büyüklük, mesafe ve saha jeolojisini ele alıp, bize gelecekteki bir deprem sırasında ne tür yer sarsıntısı beklememiz gerektiğini söyleyen bir model var mıdır? Eldeki kayıtlarla tutarlı mıdır? Nihai yer hareketini şekillendiren parametrelerin karmaşık etkileşimini doğrulamanın yanı sıra rasyonel tasarımın hedefine varmasında çok önemlidir. Yerkabuğunda meydana gelen ve gözlemleyip ölçemediğimiz süreçler nicel olarak kalır ve kendilerini bilimin temel doğal yasalarına dayanan formülasyonlarına kolayca teslim etmezler. İstatistik yöntemleri elimizdekileri mevcut bilgi havuzundan çıkarmak ve belirli kalıplara sokmak için uygun bir araç haline gelir.

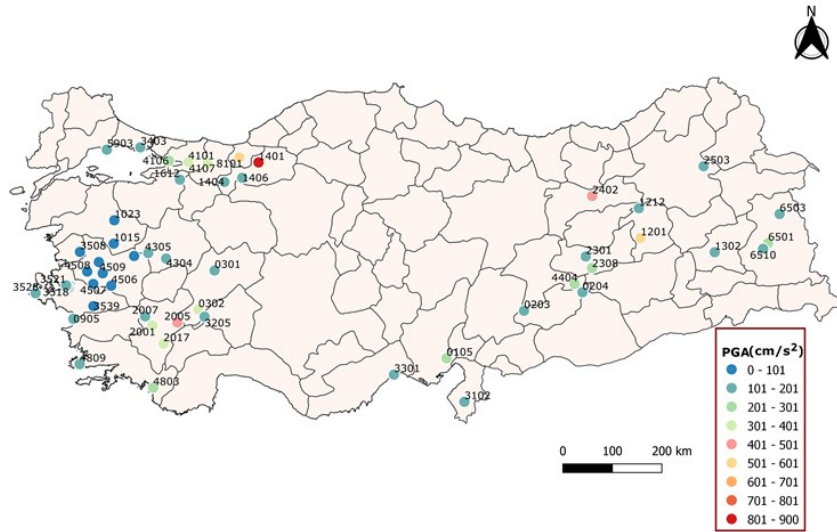
Tablo A.1'de özetlenen bilgiler bu bildirinin temel gözlemlerini oluşturmaktadır. Adları, istasyon atamaları, koordinatları, yer sınıfları, merkez üssü uzaklığı ve depremler dahil olmak üzere Ulusal Ağ istasyonu bilgilerini ve o istasyondaki kayıt cihazın tetiklendiği tarihleri listelemiş bulunuyoruz. Odak noktamız tipik olarak 0.1 g'den büyük azami ivmeli yer hareketi kayıtlarıdır.

Bahse konu istasyonların gelen zemin tipleri renk kodlu biçimde Şekil 5'te ve istasyonların kaydedilen maksimum PGA değerleri Şekil 6'da verilmiştir. 1999 Düzce, 2011 Simav ve 1999 Kocaeli depremlerinde Bolu, Demirci ve İzmir'de yer alan 1402, 4504 ve 4107 istasyonlarında kaydedilen en yüksek PGA değerleri sırasıyla  $807 \text{ cm/s}^2$ ,  $700 \text{ cm/s}^2$  ve  $612 \text{ cm/s}^2$ 'dir.

Mühendisler ve yerbilimciler, gelecekteki depremler nedensel olarak önceki olaylar tarafından belirlendiği için istatistiklere başvururlar. İstatistiksel olarak konuşurlar, ancak her deprem, yakındaki bir depremde verilen bir noktada hangi yer hareketinin gerçekleşeceğini önceden tahmin etmek için tahmin araçları koleksiyonumuzdan hala farklılık barındırır. Douglas (2019) tarafından derlenen bir özet, yer hareketi modelleme denklemlerinde (GMME'ler) gerçekleştirilen küresel çalışmanın kapsamını göstermede öğreticidir.



Şekil 5 - Ek A, Tablo A.1'de verilen istasyonların Zemin Sınıfları (Soil Classes).



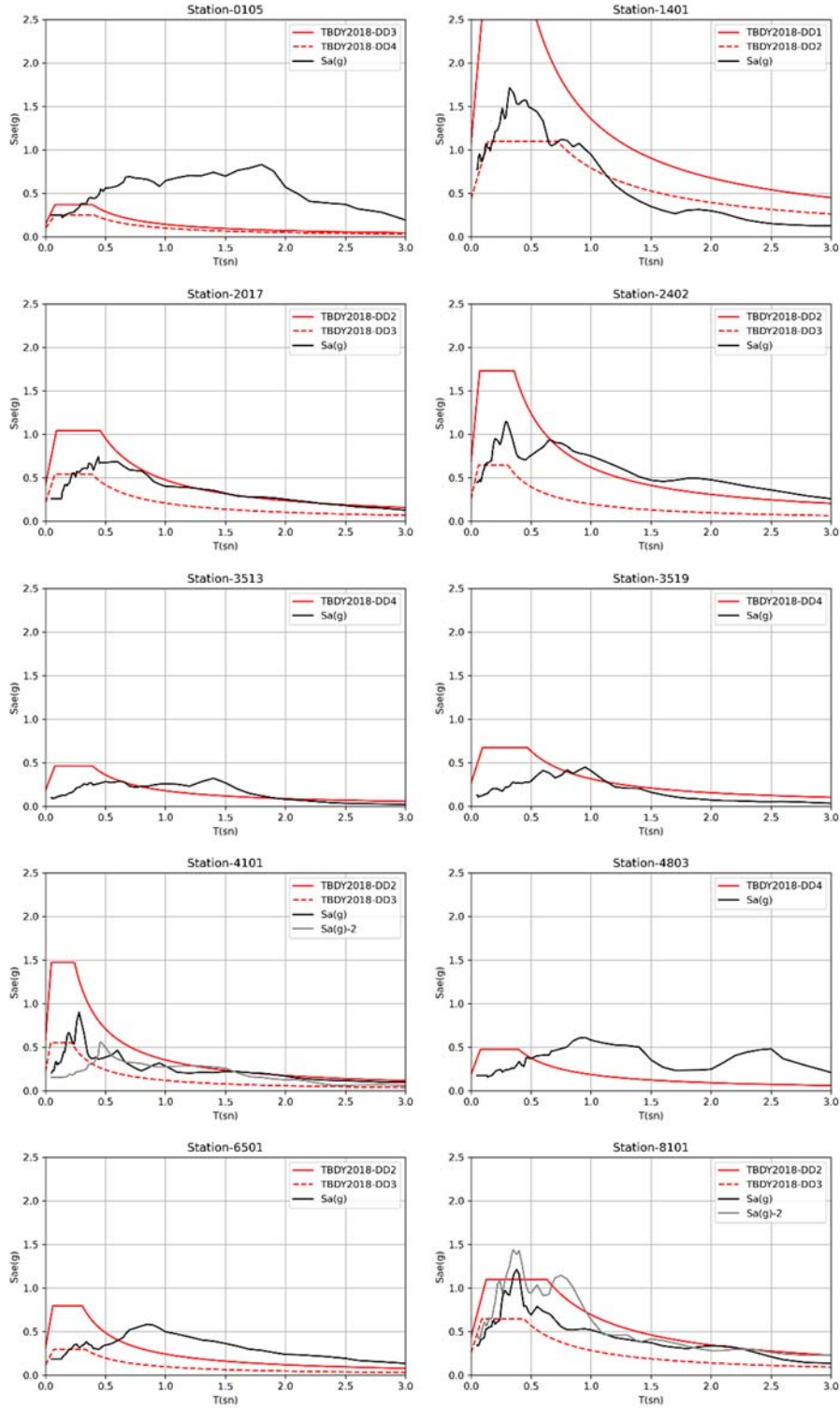
Şekil 6 - Tablo A.1'de verilen istasyonlarda kaydedilen maksimum ivme değerleri (PGA)

## ÖLÇÜLEN SPEKTRUMLAR İLE KARŞILAŞTIRMA

Şöyle bir soru soralım: Bu çalışmanın Ek A'da dizilen her bir istasyonda kaydedilen yer hareketlerinden elde edilen davranış spektrumları, aynı coğrafi konum için aynı dört seviye için tasarım spektrumları ile karşılaştırılacak olursa TBDY'in (2018) o istasyonun hemen yanında hesabı yapılacak bir yapıya uygulanmak üzere aynı zemin sınıfı için verdiği eğri hesap

spektrumunu ne ölçüde andırmaktadır? Bu sorunun cevabının tek bir deprem kaydına bakarak verilemeyeceğini daha önce ifade etmiştik. Hesap spektrumu birçok deprem kaynağı, farklı magnitüd değerleri, odak mesafesi göz önüne alınarak belirlenir. Kaydı yapılan deprem ise bu geniş yelpazenin sadece tek bir üyesidir. Öte yandan komik ve aldatıcı bir hassasiyet ile ifade edilen 2475 senelik tekrarlanma süresinin sonunu bekleyecek halimiz de yoktur. Derin alüvyon zemin katmanları taşıdıkları yapıların daha uzun periyotlara kadar yükseltilmiş spektral ivmelere maruz kalmalarına yol açar. Şekil 1 bu gerçeğe dairdir. Örnekler çoktur ve Mexico City gibi aşırı bir uca gitmemize gerek yoktur: 30 Ekim 2020'de Sisam adası açıklarındaki bir noktadan kaynaklanan M6.9 depremin İzmir Bayraklı'da yol açtığı yer hareketlerine bakıldığında ihtimali hesapların verdiği kısa ve uzun periyotlardaki spektral ivmelerin tariflediği hesap spektrumunun Bayraklı havalisinde kaydı yapılmış kayıtlardan türetilen davranış spektrumlarından bariz farklılıkların yer aldığı görülecektir. Şekil 7'deki karşılaştırmada Ek A'daki kayıtlardan seçilmiş 10 istasyona yer verilmektedir. Ulusal tehlike haritasından türetilen spektrumların iki üst ve alt sınırlayıcı eğrisini dahil etmenin dışında, ölçülen yer hareketi zaman serilerini, spektrumların bir periyotta eşleşmesine yönelik ölçeklendirmekten kaçınıyoruz. Yönetmelikte belirtilen tasarım spektrumlarının üst ve alt sınırlarını  $T = 0.2$  s'de, gerçek kayıtların spektral ivmesini araya alacak tarzda tanımlıyoruz. Şekil 7'deki eğriler, bu eylemin görselleştirilmiş cevabıdır. Her iki eğri takımı da aynı ölçekleri paylaşmaktadır, ancak odak noktamız tasarım spektral şeklinin periyot eksenini boyunca ölçülen spektrumlara ne kadar benzediğidir. İzmit (İstasyon #4101) ve Düzce (İstasyon #8101) ölçümlerinde iki farklı depreme ait iki farklı kayıt bulunmaktadır. İki farklı deprem, kendi aralarında benzer spektral şekiller ve  $T_B$ 'yi geçen daha yüksek  $S_a$  değerlerine yer veriyor gibi durmaktadır.  $T_B$ 'de efektif sağa kayma da gözlemlenebilir, ancak aynı konumlar için tasarım spektrumları ile benzerlik göstermez. Yer darlığı nedeniyle Şekil 7'de sadece sınırlı sayıda eğri verilmektedir. Geri kalan eğriler Ek A'da belirtilen linkten görülebilir.

Ek A'daki istasyonlardaki kayıtlar incelendiğinde çok sayıda eğri, mevcut Türk Yönetmeliğine göre tariflenmiş spektral talepler ile ölçülen deprem yer hareketleri arasında  $T_B$  periyodunda uyumsuzluk olduğunu göstermektedir.  $0.9 \text{ s} - 1.6 \text{ s}$  aralığında bu uyumsuzluk en güçlü olanıdır. Bu aralık, bugün inşa edilmekte olan bina stokundaki 8 – 15 katlı binaların birçoğunun en büyük periyoduna karşılık gelmektedir. Bu gözlemin ekstrapolasyonu, cevap bekleyen önemli bir soruya yol açar: Önümüzdeki otuz yıl boyunca tüm binalar, 2019 Türk Yönetmeliğindeki (TBDY, 2018) spektral şekil kullanılarak tasarlanırsa, bazı bölgelerde, özellikle uzun periyot aralığında, gelecekteki bina stokunun bir kısmını düşük kapasiteye maruz bırakma riskiyle karşı karşıya mıyız? Yer hareketi frekansına bağlı olmayan büyütme faktörleri  $F_s$  ve  $F_l$ , bu anomaliden kısmen sorumludur. Farklılık,  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ 'nin lognormal dağılımı temsil eden yer hareketi modellerinden (GMM'ler) çıkarılmış yer hareketi verilerinin tahminleri olduğu hatırlanarak açıklanabilir. Bu spektral ordinatlar, vektörün elemanları arasındaki rastgele değişkenliğinin farklı olduğu dağılımın PSHA medyan değerlerinden elde edilir. Üstelik dağılım periyot eksenini boyunca değişken varyanslıdır.  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ 'deki varyansın aynı olmasını beklemek doğru değildir, bu yüzden kısa ve uzun periyotlu spektral ivme koordinatlarının üst ve alt bir sigma aralıklarını dikkate almak birkaç farklı  $T_B$  tahminine yol açacaktır. Spektrumun sabit ivmeden sabit hız kısmına geçiş, daha önce düzgün bir şekilde tanımlanmış profile bağlı dönemlerin aksine dağınık hale gelmektedir. Farklılıkları doğuran bir başka kaynak, kısmen tartışmalı olan  $S_s$  ve  $S_l$ 'nin artmasıyla azalan  $F_a$  (veya  $F_s$ ) ve  $F_v$  (veya  $F_l$ ) takdirle tayin edilmiş değerleri olabilir (Borcherdt, 2012). Bildiğimiz kadarıyla ASCE7'den direkt ithal edilen değerlerin ülkemizdeki kayıtlarla doğrulandığı güvenilir çalışmalarca gösterilmemiştir. Tablo 1 ve 2'deki kimi büyütme faktörlerinin göz kararıyla tayin edilmiş olduğunu yukarıda ifade etmiştik.



Şekil 7 - Seçilen 10 istasyonda ölçülen hareketlerin spektral ivmeleri ve TBODY (2018)'a göre aynı noktaların hesap spektrumları: (Adana Ceyhan (0105); Bolu (1401); Acıpayam (2017); Erzincan (2402); İzmir Bayraklı (3513); İzmir Karşıyaka (3519); Kocaeli (4101); Fethiye (4803); İpekyolu (6501); Düzce (8101)) (Station: İstasyon)

Uzun tekerrür periyotlu depremler için elde edilen tasarım spektrumları, kısa zaman aralıklarında tekrarlanan depremler için çıkarılanlara benziyor mu, ya da daha uzun köşe periyotları ile mi karakterize ediliyor? Diyelim ki 72 yıllık bir depremin frekans içeriğinin, 2475 yıllık bir dönüş periyodundakinden farklı olduğuna dair yeterli gözlem vardır. Yine de, TBDY'deki (2018) mevcut prosedürler, temelde aynı şekle sahip farklı tehlike seviyeleri için tasarım spektrumlarını birbirinin üzerine yığmaktadır. Daha yüksek gerinim seviyelerinde zemin katmanlarının efektif kayma modülünün azalmasının, dolayısıyla artmış geçiş periyoduna yol açmasının tehlike eğrilerine tam olarak yansımadağı görülmektedir.

Spektrumların bir periyotta eşleşmesi için ölçülen yer hareketi zaman serileri ölçeklendirilmemiştir. Şekil 7'de bazı örnek istasyonlar için verilen eğriler aynı ölçeklere sahiptir, ancak buradaki odak noktası tasarım spektral şeklinin ölçülen spektrumları ne kadar iyi taklit ettiğidir. Eğrilerin önemli bir kısmı, mevcut Türk Yönetmeliğine göre ima edilen spektral talepler ile ölçülen deprem yer hareketleri arasında periyot farklılığı olduğunu göstermektedir. 0.9 s – 1.6 s aralığında, farklılık en güçlü olanıdır. Ek-A'da verilen tablo diğer istasyon verileri için de aynı çıkarımlar geçerlidir.

### **ÖYLEYSE FARKLILIKLAR NEDEN?**

ASCE7 ve TBDY'nin tasarım spektrumunu tanımlamaya yönelik uygulamaları arasında önemli farklılıklar vardır. ASCE7'de, sismik tehlike haritasını tanımlayan sayılar risk hedefli bir hesaplamadan gelmektedir. Kaydedilen verilerin tek tek yatay bileşenlerini, geometrik ortalama dikkate alınarak birleştirilmiş olarak hesaplanan TBDY'nde içinde gizli UHRS (Uniform Hazard Response Spectrum) ile karşılaştırmak bir tutarsızlıktır. Daha önce belirtildiği gibi, ihtimali sismik tehlike analizine dayalı UHRS ve kaydedilen yer hareketlerinin davranış spektrumlarının hesaplanmasının arkasındaki mantık, her spektral ordinatın eşit bir aşılma oranına sahip olmasıdır. UHRS kavramı, bu spektrumun, her biri farklı bir deprem olayından (yani, basitçe büyüklük – uzaklık çiftleri olarak kaynak katkıları) çıkmış olabilecek farklı periyotlarda ayrı spektral koordinatlardan oluşan bir zarf olduğuna dayanmaktadır. Ferdi kayıtlar bu tür çiftleri temsil etmez çünkü bunlar vuku bulabilecek depremlerden yalnızca birini temsil eder. ASCE7'de GMM'lerden tahmin edilen yer hareketi verilerinin tahminleri, PSHA'dan elde edilen spektral koordinatlardan çizilen lognormal dağılımı temsil eder. Tek bir münferit kayıt, bu prosedürün burada uygulanmasına izin vermez. Kısacası UHRS verilerini risk tabanlı bir uygulamaya dahil etmek tutarlı değildir.

$T_B > 1$  s hali  $S_{D1} > S_{DS}$  olduğunda gerçekleşir, ancak incelemelerimiz bunun Türkiye'nin hiçbir yerinde olmadığını göstermiştir. Böylece spektrumun problemlili yumuşak zemin büyütme aralığı için tasarımda kullanılması imkanını dışlamaktadır. Mexico City'ye benzer hiçbir kentsel alanın (Murcia-Delso vd., 2020) bulunmadığını iddia eden bu çıkarımın altında yatan veri tabanını sorgulamak lazımdır.

### **TARTIŞMA VE SONUÇLAR**

Herhangi bir yerdeki her deprem, öncekilerin hepsinden farklılıklar içerir, dolayısıyla kendisini takip edeceklerden de ayrılır. Daha akla yakın bir tasarım temeli elde edebilmek için bunları yorumlamak ve müşterek noktalarını sabitlemek lazımdır. Bu yazıda, Türkiye'deki ulusal ağdan elde edilen yer ivmesi kayıtlarının ülkedeki bina hesabı üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Türkiye'de 2019'un başında yeni bir deprem yönetmeliği yürürlüğe girmiştir, şimdi bu yönetmeliğin bazı hususiyetlerinin değerlendirilmesi için fırsat doğmuştur. Elbette, deprem tasarımda kullanılan parametrelerin çoğu, gelecekte meydana gelecek yer hareketlerinin spektral özellikleriyle ilgili değildir, ancak nihayetinde bir şekilde parametreler üzerinde şekillendirici rol oynarlar. Eğer hesapta kullanılan parametreler o koordinatlar için gözlenen yer

hareketlerinden ısrarlı biçimde farklıysa, gözlemlerin son kullanıcıları olarak gözlerimizin üzerine görmemezi engelleyen bir bez örtüp tasarım spektrumun gelecekteki bir depremin davranış spektrumuna ölçüyü kaçırmaksızın denk gelmesine dua edemeyiz. Onun yerine, eldeki verilerimizin bize söylediklerini düzenleyici teknik belgelerdeki hükümlerin yansıttığı beklentiyle karşılaştırmalıyız. Yeni TBDY (2018)'deki (büyük ölçüde ASCE7-16'ya benzeyen) tasarım spektrumunun, özellikle daha yumuşak zeminlerle dolu derin havzalarda, gelecekteki depremlerin daha uzun dönemli taleplerini kaçırma eğilimini yansıttığına dair emareler mevcuttur. Yakın mesafede vuku bulan kısa tekerrür periyoduna sahip depremler için geçerli tasarım spektrumu, daha uzak mesafelerde vuku bulan uzun tekerrür periyotlu depremler için geçerli olanla aynı değildir. Bir standart şekil, bu fiziken farklı depremlerin ikisini temsil edemez. Ayrıca, tasarım spektrumu için fay hatlarının yakın çevresinde matematikçe çıkarılmış düzensiz ve mantıksız tepe noktalı spektral eğrilere sahip yer hareketlerini “traşlamak” amacıyla başka matematik algoritmalarla makyajlanmış yuvarlatıcı prosedürlerin kullanılması fiziken dayanağı bulunmayan bir yaklaşımdır.

Şurasını not etmeliyiz ki,  $T_B = 1$  s için  $S_{DS} = S_{DL}$  olması gerekir, ancak Türkiye'deki hiçbir istasyon için bu şartı sağlayan bir tasarım spektrumu bulunmamaktadır. Ancak yakın zamanda imara açılan genç derin alüvyon çökeltilerine sahip kentsel alanlarımız bulunmaktadır. Etkileyen deprem kaynakları hariç birçok bakımdan Mexico City'ye benzeyen Adapazarı Merkez için ZE zeminde dahi  $T_B$  0.8 s mertebesindedir. Bunun bir sonucu olarak, 30 Ekim 2020 Sisam Adası depreminde İzmir'de teyit edildiği gibi bu tür sahalar beklenmedik hareketlere maruz kalabilir. Bu gerçek ilerideki bina hesapları için farkında olmadığımız bir kapan olabilir mi? İkna edici cevap için çok daha fazla veriye ihtiyacımız vardır. O zamana kadar emniyetli tarafta kalmak lazım gelmektedir.

Farklılığın başka makul açıklamaları olabilir, ancak  $S_s$ ,  $S_1$  ile temsil edilen bir tehlike haritasının bileşenlerini bir araya getirmekte ve  $F_s$  ve  $F_1$ 'yi işe katmadaki ardışık belirsizlik ile bir hesap spektrumu ortaya koymak, yersiz bir basitleştirme, çünkü çok farklı etkiler bir arada harmanlanmaktadır. Çözüm, yakın bir gelecekte elde edilmesi mümkün olmayan ampirik verinin senteziyle mümkün olacaktır. Spektrumun şekline yönelik revizyon, bunlara göre yapılan tasarımlarda farklı şekillerde tezahür eder, çünkü tasarım akışının diğer yönleri için ihtiyaçlarlar tadil olur.

Bir tehlike haritası ne kadar “yeni” olursa olsun, oradan kaynaklanan tasarım spektrumları gözlemsel kanıtlarla eşleşmezse, güvenilir bir tasarım aracı olarak hizmet edemez. Bu bağlamda ülkemizde on yılda bir zuhur eden (Yönetmelik'in 1998, 2007 ve 2019 sürümleri kastedilmektedir) kutsal ruh arayışı, Türkiye için yeni geliştirilen tehlike haritası tarafından cevaplanmış görünmemektedir. Daha eski olmasına rağmen,  $T_B$ 'yi peşinen daha büyük değerlere sabitlemek için 2007 Yönetmeliğinin hükümlerinin daha iyi bir tasarım esasını temsil ettiğini düşünüyoruz (Kalkan ve Gülkan, 2004). Bu sonuç elbette sadece Türkiye kayıtları ve yürürlükte olan sismik tasarım yönetmeliği ile yaptığımız çalışmalara dayanmaktadır.

## **Teşekkür**

Türkiye Ulusal Kuvvetli Hareket Ağı'ndan indirilen yer ivme kayıtları, Türkiye Doğal Afet ve Acil Durum Yönetimi Kurumu (AFAD)'ın izniyle bu rapora dahil edilmiştir. Yazarlar, yer hareketi verilerinin ve spektrum grafiklerinin düzenlenmesindeki yardımlarından dolayı Ozan Ögünç ve Mehmet Artun Baki'ye minnettardır.

## **Kaynaklar**

1. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı AFAD, <https://tadas.afad.gov.tr/> 2020.

2. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, 2018.
3. ASCE/SEI, (ASCE7-10), Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, Reston, VA, 2010.
4. ASCE/SEI, (ASCE7-16), Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute, Reston, VA, 2016.
5. Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Giorgio, M. and Iervolino, I. “Why Determining the Number of Code Spectrum-Matched Records Based on Usual Statistics Is an Ill-Posed Problem,” Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE Sendai, Japan, 2020 (paper 2a-0015).
6. Boore, D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson, “NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5% Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes”, Earthquake Spectra, 2014, 30(3), pp. 1057-1085.
7. Borchardt, R.D., “Estimates of Site-Dependent Spectra for Design (Methodology and Justification)”, Earthquake Spectra, 1994, 10(4), pp. 617-653.
8. Borchardt, R.D., “ $V_{S30}$  – A Site-Characterization Parameter for Use in Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPEs, and ShakeMaps”, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisbon, Portugal.
9. Chopra, A.K., “Elastic Response Spectrum: A Historical Note”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36:3–12.
10. Douglas, J., “Ground motion prediction equations 1964-2018”, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2019, (available online at <https://www.strath.ac.uk/staff/douglasjohndr/>).
11. Guéguen P., Bonilla F., Douglas J., “Comparison of Soil Non-Linearity (In-Situ Stress-Strain Relation and G/Gmax Reduction) Observed in Strong-Motion Databases and Modelled in Ground Motion Prediction Equations”, Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, doi:10.1785/0120180169.
12. Gülkan, P., “The Turkish National Accelerometric Network: 1973-2010, in Accelerometric Data Exchange and Archiving”, Ed. S. Akkar, P. Gülkan and T. Van Eck, Elsevier, 2011.
13. Gülkan, P., “A Dispassionate View of Seismic Hazard Assessment”, Seismological Research Letters, 2013, (84)3: 413-416.
14. Gülkan, P., U. Çeken, Z. Çolakoğlu, T. Uğraş, T. Kuru, A. Apak, J.G. Anderson, H. Sucuoğlu, M. Çelebi, D.S. Akkar, U. Yazgan, A.Z. Denizlioğlu, “Enhancement of the National Strong Motion Network in Turkey”, Seismological Research Letters, 2007, (78)4: 429-438.
15. Housner, G. W., “Behavior of Structures during Earthquakes”, Proc. ASCE, 85, 1959, October.
16. Housner, G. W. and Jennings, P. C., Earthquake Design Criteria, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.
17. International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, Whittier, CA 90601 USA, 1994.
18. International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code, Whittier, CA 90601 USA, 1997.



19. Kalkan, E., and Gülkan, P. “Site-Dependent Spectra Derived from Ground Motion Records in Turkey,” *Earthquake Spectra*, 20(4), pp. 1111–1138, November 2004
20. Kaklamanos, J., A. Cabas, S. Parolai, and P. Guéguen, “Introduction to the Special Section on Advances in Site Response Estimation”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2021, 111, 1665–1676, doi: 10.1785/0120210152
21. Kalkan E. and Chopra A.K., *Practical Guidelines to Select and Scale Earthquake Records for Nonlinear Response History Analysis of Structures*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010, 113 p.
22. Loviknes, K., S. R. Kotha, F. Cotton, and D. Schorlemmer, “Testing Nonlinear Amplification Factors of Ground-Motion Models”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2021, 111, 2121–2137, doi:10.1785/0120200386/
23. Murcia-Delso, M., Alcocer, S.M., Arnau, O., Martinez, Y. and Muria-Vila, D, “Seismic Rehabilitation of Concrete Buildings after the 1985 and 2017 Earthquakes in Mexico City”, *Earthquake Spectra*, 2020, Vol. 36, No. 2, pp. 175-198.
24. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.
25. Rodgers, J., Wael H., Motter, C. and Thornley, J. “Impacts of the 2018 M7.1 Anchorage Earthquake on Schools,” *Earthquake Spectra* 2021, Vol. 37(3): 1849–1874.
26. Seed, H.B., C. Ugas and J. Lysmer, “Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design”, *Bulletin of the Seismological Society of America.*, 1976, Vol. 66, No. 1, pp. 221-243.
27. Seyhan, E. and Stewart, J.P., “Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification Factors from NGS West2 Data and Simulations”, *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3), pp. 1241-1256.
28. Trifunac, M.D., “70-th Anniversary of Biot Spectrum,,” *ISET Journal of Earthquake Technology*, Paper No. 431, Vol. 40, No. 1, March 2003, pp. 19-50.

**EK A. Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ölçüm Şebekesinden Alınan Kayıtlar (en büyük yer ivmesi, PGA > 0.1g)**

İstasyon	İstasyon Adı	Boy.	Enl.	ZS	S <sub>s</sub> DD1	S <sub>s</sub> DD2	S <sub>s</sub> DD3	S <sub>s</sub> DD4	S <sub>1</sub> DD1	S <sub>1</sub> DD2	S <sub>1</sub> DD3	S <sub>1</sub> DD4	Deprem No	Deprem Tarihi	M	PGA (cm/s <sup>2</sup> ) NS	PGA (cm/s <sup>2</sup> ) EW	R <sub>ip</sub> (km)	R <sub>up</sub> (km)	R <sub>ep</sub> (km)	R <sub>ey</sub> (km)
0105	Adana Ceyhan	35.82	37.03	ZD	1.3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0		27-06-1998 13:55	6.2	223.3	273.6	40.0	58.2	48.2	67.0
0203	Adiyaman Akçakaya	37.66	37.79	ZC	2.4	1.2	0.4	0.3	0.7	0.3	0.1	0.1		05-05-1986 03:35	6	114.7	76.0	23.9	24.0	29.2	29.6
0204	Gerger	39.03	38.03	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	94.3	110.1	30.9	30.9	36.8	37.7
0301	Afyonkarahisar Merkez	30.53	38.78	ZD	1.6	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	241600	03-02-2002 07:11	6.5	112.8	93.9	51.7	57.7	64.7	68.4
0302	Dinar	30.15	38.06	ZD	1.7	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	240861	01-10-1995 15:57	6.4	272.3	320.8	0.0	2.9	0.5	5.0
0905	Kuşadası	27.27	37.86	ZC	2.0	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	179.3	144.0	35.6	41.1	42.9	46.0
1201	Bingöl Merkez	40.50	38.90	ZC	2.8	1.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.2	0.1	236848	01-05-2003 00:27	6.3	501.4	297.5	2.2	5.8	11.8	15.5
1212*	Yedisu	40.54	39.44	ZD	2.9	1.7	0.7	0.4	0.9	0.5	0.2	0.1	475667	14-06-2020 14:24	5.7	177.6	93.1			16.7	
1302*	Bitlis Merkez	42.16	38.47	ZD	1.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	141933	23-10-2011 10:41	7	89.7	102.2	107.0	110.0	116.0	117.6
1401	Bolu Merkez	31.61	40.75	ZD	2.7	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	724.0	807.0	8.0	8.6	36.1	37.6
1404	Bolu Göynük	30.78	40.40	ZD	1.5	0.8	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	138.0	119.2	44.2	45.7	80.7	82.5
1406	Bolu Mudurnu	31.21	40.47	ZD	1.8	1.0	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	58.3	121.0	32.1	32.3	37.5	39.0
1612	İznik Merkez	29.72	40.44	ZD	1.7	0.9	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	91.9	123.3	33.2	34.8	40.3	43.8
2001	Denizli Çamlık	29.09	37.76	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1		19-08-1976 01:12	6.1	348.5	290.4	6.4	17.9	9.9	22.1
2005	Çardak	29.67	37.82	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	444581	08-08-2019 11:25	6	423.2	273.9			8.0	
2007	Denizli Sarayköy	28.92	37.93	ZD	2.3	1.2	0.5	0.3	0.6	0.3	0.1	0.1	253439	26-07-2003 08:36	5.6	107.5	121.1	11.2	22.0	13.8	25.4
2017	Acapayam	29.35	37.43	ZD	1.8	0.9	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	433515	20-03-2019 06:34	5.5	361.2	184.4			7.4	
2301	Elazığ Merkez	39.19	38.67	ZC	1.7	0.9	0.3	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	118.1	137.8	30.4	30.5	36.4	37.3
2308	Sivrice	39.31	38.45	ZC	2.8	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	235.8	292.8	17.9	17.9	23.8	25.1
2402	Erzincan Merkez	39.49	39.75	ZC	2.7	1.4	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	236369	13-03-1992 17:18	6.6	405.0	479.5	3.3	16.8	12.8	26.0
2503	Erzurum Horasan	42.17	40.04	ZD	1.3	0.7	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1		30-10-1983 04:12	6.6	149.3	168.7	22.6	24.7	34.5	38.1
3102*	Antakya Merkez	36.16	36.21	ZD	2.1	1.1	0.3	0.2	0.6	0.3	0.1	0.1		22-01-1997 17:57	5.7	136.0	150.5	19.2	46.8	19.8	49.5
3205*	Keçiözü	30.30	37.93	ZD	1.6	0.8	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	444581	08-08-2019 11:25	6	161.2	109.3			63.1	
3301	Yenişehir	34.60	36.78	ZC	0.7	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0		27-06-1998 13:55	6.2	132.1	119.3	57.5	71.2	64.9	79.9
3403	İstanbul Küçükçekmece	28.76	41.03	ZD	1.8	1.0	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	118.0	89.6	55.9	56.0	105.2	106.6
3513	Bayraklı	27.17	38.46	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	106.3	94.7	64.6	67.8	72.0	73.9

Tablo A.1 (Devam) Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Ölçüm Şebekesinden Alınan Kayıtlar (en büyük yer ivmesi, PGA &gt; 0.1g)

İstasyon	İstasyon Adı	Boy.	Enl.	ZS	S <sub>s</sub> DD1	S <sub>s</sub> DD2	S <sub>s</sub> DD3	S <sub>s</sub> DD4	S <sub>1</sub> DD1	S <sub>1</sub> DD2	S <sub>1</sub> DD3	S <sub>1</sub> DD4	Deprem No	Deprem Tarihi	M	PGA (cm/s <sup>2</sup> ) NS	PGA (cm/s <sup>2</sup> ) EW	R <sub>ip</sub> (km)	R <sub>ep</sub> (km)	R <sub>ip</sub> (km)	R <sub>ep</sub> (km)	R <sub>ip</sub> (km)	R <sub>ep</sub> (km)	
3518	Konak	27.14	38.43	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	106.1	91.4	64.3	61.0	68.4	68.4	70.3	70.3	
3519	Karşıyaka	27.11	38.45	ZE	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	150.1	110.0	65.2	61.8	69.2	69.2	71.2	71.2	
3521	Karşıyaka	27.08	38.47	ZE	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	110.8	94.0	65.5	62.2	69.6	69.6	71.5	71.5	
3528	Çeşme	26.37	38.30	ZC	1.9	1.0	0.4	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1	483762	30-10-2020 11:51	6.6	117.6	149.3	54.8	50.8	58.2	58.2	60.5	60.5	
4101	İzmit Kocaeli	29.92	40.77	ZB	2.9	1.6	0.6	0.3	0.8	0.4	0.2	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	163.7	228.3	3.9	0.6	3.4	3.4	17.3	17.3	
4101	İzmit Kocaeli	29.92	40.77	ZB	2.9	1.6	0.6	0.3	0.8	0.4	0.2	0.1	248095	13-09-1999 11:55	5.8	73.7	318.3	12.4	8.7	13.8	13.8	17.3	17.3	
4106	Gebze	29.45	40.79	ZC	2.4	1.3	0.5	0.3	0.7	0.4	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	264.8	141.5	6.2	4.9	42.8	42.8	46.0	46.0	
4107	İzmit	29.93	40.76	ZD	2.9	1.7	0.6	0.3	0.8	0.5	0.2	0.1	248095	13-09-1999 11:55	5.8	341.1	611.5	7.6	1.5	3.3	3.3	10.9	10.9	
4304	Gediz	29.40	38.99	ZD	2.3	1.2	0.4	0.3	0.6	0.3	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	92.3	103.9			31.5	31.5			
4305*	Kütahya Simav	28.98	39.09	ZD	2.1	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	71.2	115.6			10.0	10.0			
4404	Pütürge	38.87	38.20	ZB	2.8	1.5	0.5	0.3	0.8	0.4	0.1	0.1	457758	24-01-2020 17:55	6.8	193.6	228.4	18.6	18.6	24.6	24.6	25.8	25.8	25.8
4504	Demirci	28.65	39.04	ZD	1.7	0.9	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	128573	19-05-2011 20:15	5.7	625.8	699.8	40.9	35.4	39.0	39.0	46.0	46.0	
4803	Fethiye	29.12	36.63	ZD	1.9	1.0	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	167145	10-06-2012 12:44	6	136.2	230.1			32.6	32.6			
4809	Bodrum	27.44	37.03	ZC	1.8	1.0	0.4	0.3	0.5	0.2	0.1	0.1	381491	20-07-2017 22:31	6.5	158.8	102.0			12.6	12.6			
5401	Ada pazarı	30.38	40.74	ZC	2.9	1.7	0.7	0.3	0.8	0.5	0.2	0.1	246561	11-11-1999 14:41	5.6	197.1	322.5	11.3	10.4	11.2	11.2	13.5	13.5	
5903*	Çorlu M.Ereğlisi	27.95	40.97	ZD	1.9	1.1	0.4	0.3	0.5	0.3	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	90.4	101.4	116.9	116.9	170.8	170.8	171.6	171.6	
6501	İpekyolu	43.40	38.50	ZC	1.3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	146290	09-11-2011 19:23	5.6	148.1	245.9			13.5	13.5			
6503*	Van Muradiye	43.76	38.99	ZD	1.4	0.7	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	141933	23-10-2011 10:41	7	178.3	168.8	11.6	33.1	42.2	42.2	46.3	46.3	
6510*	Van Edremit	43.27	38.41	ZD	1.2	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	146290	09-11-2011 19:23	5.6	65.7	102.6			3.7	3.7			
8101	Düzce Merkez	31.15	40.84	ZD	2.3	1.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.1	0.1	247730	17-08-1999 00:01	7.6	314.3	365.9	46.2	46.0	101.2	101.2	102.7	102.7	
8101	Düzce Merkez	31.15	40.84	ZD	2.3	1.3	0.4	0.3	0.6	0.4	0.1	0.1	246572	12-11-1999 16:57	7.1	400.1	512.9	9.7	0.0	5.3	5.3	11.7	11.7	

\*Zemin Sınıfları 1212, 1302, 3102, 3205, 4305, 5903, 6503 ve 6510'da ZD kabul edilmiştir.



# Çayırhan Köprüsü Yapım Danışmanlığı ve Ters Sehim Hesapları

Tolga CANTÜRK<sup>1</sup>

## ÖZET

Çayırhan köprüsü Ankara-Nallıhan'da bulunan ardgermeli kutu kesit tipinde bir köprüdür, toplam uzunluğu 270,00 m'dir. 62,50 m'lik kenar açıklıklar iskele-kalıp sistemi ile imal edilecekken, 145,00 m'lik orta açıklık dilimsel konsol tabliye yöntemi ile imal edilecektir. 16 adet ano, açıklığın iki tarafından dilimsel konsol yöntemi ile imal edilecektir, A17 anosu ile açıklık ortasında birleşim sağlanarak köprü tamamlanacaktır. Bu sebeple, yapım aşaması analiz modeli oluşturulmuştur. Konsol yöntemi ile imal edilen köprülerde en önemli konu yapım esnasında kalıba verilecek olan ters sehimlerin doğru belirlenmesidir. Çayırhan köprüsünün verilen ters sehimler ile kırmızı kotuna ulaşması için belirlenen zaman 10,000 gündür. Bu konular çalışmada detaylı olarak açıklanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Ardgermeli Kutu Kesit, Dilimsel Konsol Tabliye Yöntemi, Ters Sehim.

## ABSTRACT

### *Construction Consultancy and Camber Calculations of Çayırhan Bridge*

Çayırhan bridge is post-tensioned box girder bridge in Ankara-Nallıhan with 270,00 m. While side spans with 62,50 m will be constructed with scatfolding-formwork system, middle span with 145,00 m will be constructed with cantilever segment deck method. 16 segments will be constructed with cantilever method, and bridge will be completed with A17 segment. Therefore, construction stage analysis model was created. The most important issue is to determine camber correctly for these bridges. The time determined for Çayırhan bridge to reach its grade elevation with the given cambers is 10,000 days. These issues will be explained in detail in this study.

**Keywords:** Post-tensioned Box Girder, Cantilever Segment Deck Method, Camber

## GİRİŞ

Çayırhan Köprüsü Beypazarı-Nallıhan Yolu Km:112+365.000'da yapılması planlanan eğik ayaklı konsol köprü tipinde bir köprüdür. Köprü yapım yöntemi olarak karma bir sistem

---

<sup>1</sup> Yüksel Proje, Ankara - tcanturk@yukselproje.com.tr

uygulanacaktır. Şekil 1’de gösterildiği üzere köprü altından geçen bir nehir bulunmaktadır, bu sebep ile bu kısımda iskele-kalıp sistemi kurulamayacağı için orta açıklık dilimsel konsol tabliye yöntemi ile imal edilecektir. Kenar açıklıklar ise nehir kısmına denk gelmediği için, bu kısımlar yerinde hazırlanmış iskele-kalıp mekanizmaları üzerinde yerinde dökme beton kullanımıyla yürütülen bir yöntem ile imal edilecektir.



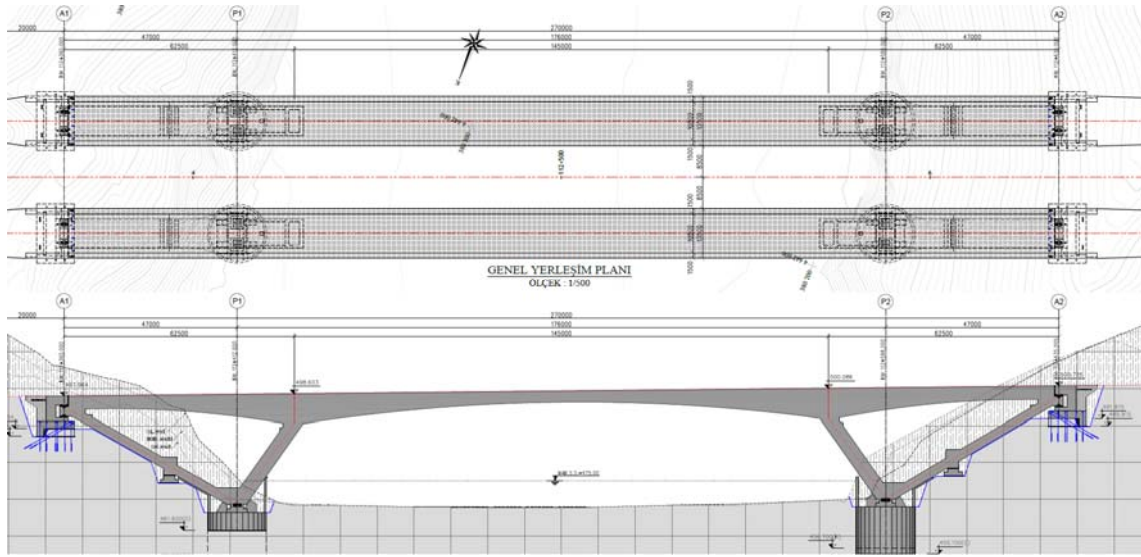
Şekil 1 - Çayırhan köprüsü arazisi

### Köprü Bilgileri

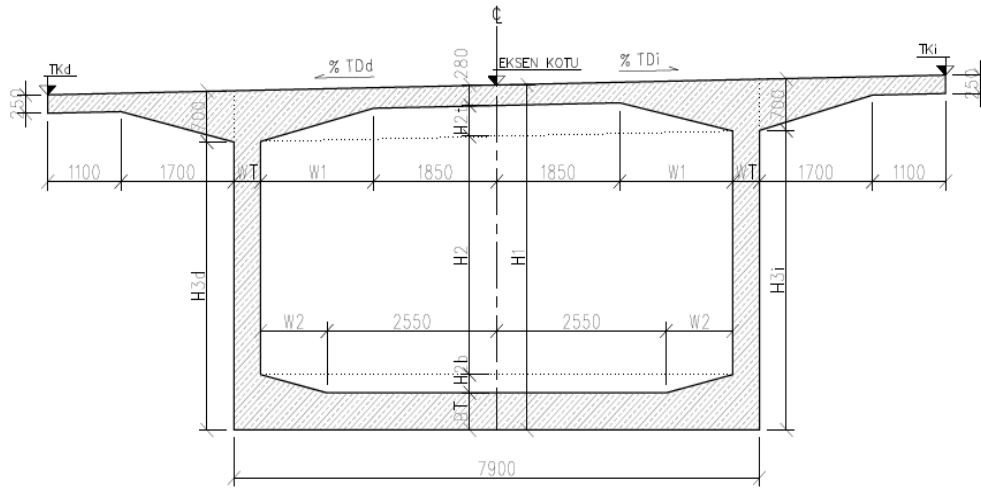
Arazi ve geometrik koşullar dikkate alındığında ardgermeli kutu kesit beton tabliye sistemine sahip eğik ayaklı konsol köprü tipi seçilmiştir. Eğik ayaklı konsol köprüde, her iki tarafta bir temel üstüne inşa edilen iki taraflı eğik ayaklarla bunları birleştiren üstyapı tabliye elemanı ile oluşturulan çerçeve sistemi, bu tipin esasını teşkil eder. Eğik ön ayaklar 4,00 x 7,90 m boyutlarında ve 80 cm kalınlığa sahip kutu kesit şeklinde belirlenmiş olup, boyları eğik olarak temel üst kotundan üstyapı alt kotuna kadar yaklaşık 27,00 m’dir. Eğik arka ayaklar ise, 2,50 x 7,90 m boyutlarında dolu gövdeli kesite sahiptir. Boyları ise eğik olarak yaklaşık 50 m’dir. İskele-kalıp sistemi yöntemiyle, üçgen formundaki kenar çerçevelerin inşası tamamlandıktan sonra, burada oluşturulan ağırlık ve geometri sayesinde stabilite sağlanacak ve böylelikle üstyapı orta açıklık tabliyesi dilimsel konsol şeklinde ilerlenerek tamamlanabilecektir.

Şekil 2’de plan ve profil görünüşü gösterilen söz konusu köprü tipi ile geçilebilecek orta açıklık 145,00 m olarak belirlenmiştir. Seçilen bu veya buna yakın bir açıklıkta, mevcut arazi koşulları nedeniyle klasik dengeli konsol köprünün uygun olmadığı görülmüş, bu sebepten ötürü ayakların eğik olması tercih edilmiştir. Bu şekilde belirlenen ayakların oturduğu temel eksenleri arası mesafe ise 176,00 m’dir. İskele kalıp sistemi ile inşa edilecek 62,50 m’lik kenar açıklıklarla birlikte toplam köprü boyu 270,00 m’dir.

Üstyapı taşıyıcı sistemi uluslararası literatürde “box girder” şeklinde ifade edilen, Şekil 3’te gösterilen kutu kesit tabliye olarak belirlenmiştir. Söz konusu bu kesitin yüksekliği, orta ayak akslarında 8,00 m ve uç diyafram bölgesinde 3,50 m ve orta açıklık ortasında (kilit ano) 3,00 m olmak üzere, değişken şekilde belirlenmiştir. Bu değişken yükseklik gerek yapım sırasında gerekse yapım bittikten sonra, statik sistemin maruz kaldığı ya da kalacağı tüm zorlanmalara karşı en uygun form olduğu için tercih edilmiştir.



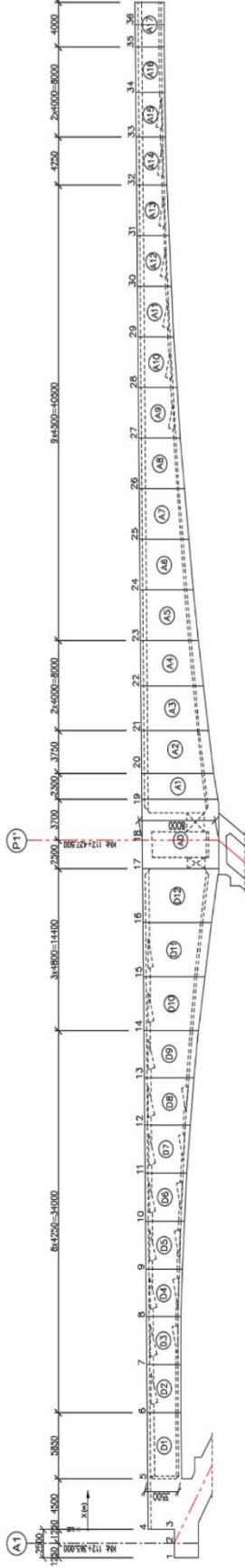
Şekil 2 - Çayırhan köprüsü plan ve profil görünümü



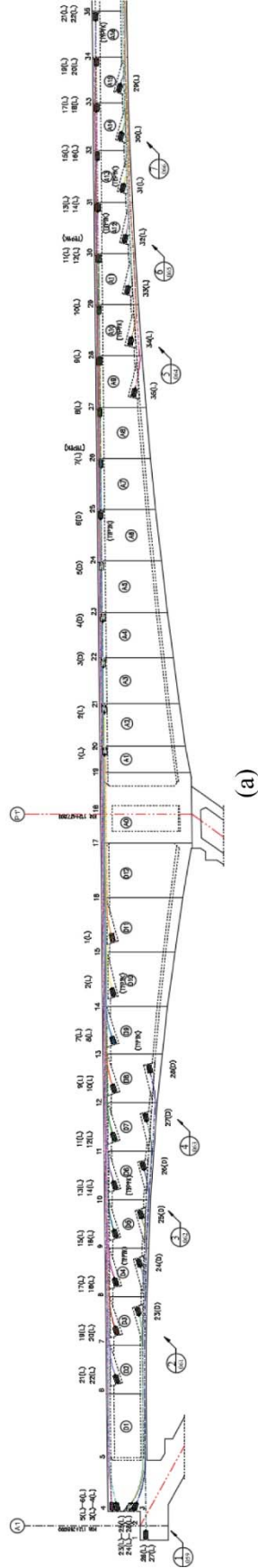
Şekil 3 - Çayırhan köprüsü üstyapı kesiti

Üstyapı kenar açıklıkları, uç diyaframı ile orta ayak anoları arasında 1 adet 5,85 m, 8 adet 4,25 m ve 3 adet 4,80 m olmak üzere toplam 12 adet ano olarak düşünülmüştür. Üstyapı orta açıklıkta ise, orta ayakla monolitik bağlantıya sahip orta ayak diyaframı dışında, her iki tarafta 1 adet 2,30 m, 1 adet 3,75 m, 2 adet 4,00 m, 9 adet 4,50 m, 1 adet 4,25 m ve 2 adet 4,00 m boyunda olmak üzere toplamda 16 adet ano yer almaktadır. Bu 16 adet ano maksimum konsol uzunluğuna karşılık gelip, açıklık ortasında 4,00 m boyunda olan A17 anosu ile birleşerek üstyapı imalatı tamamlanmış olacaktır. Bu anoların numaralandırılmış hali ile Şekil 4'te verilmiştir.

Üstyapı kesitinde üstte ve altta olmak üzere ardgerme halatlar bulunmaktadır. Kesit üstünde A1 aksından A16 anosuna kadar solda ve sağda 22'şer adet halat bulunmaktadır. Bu halatlar profil ve plan olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Kesit altında ise üçgen forma denk gelen kısımda solda ve sağda 6'şar adet halat bulunmaktadır, bu halatlar plan görünümü olarak Şekil 6'da gösterilmiştir. Köprü orta açıklığının ortasında ise kesit altında solda ve sağda olmak üzere 7'şer adet halat bulunmaktadır, bu halatlar profil ve plan olarak Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 4 - Üstyapı ano numaralandırılması

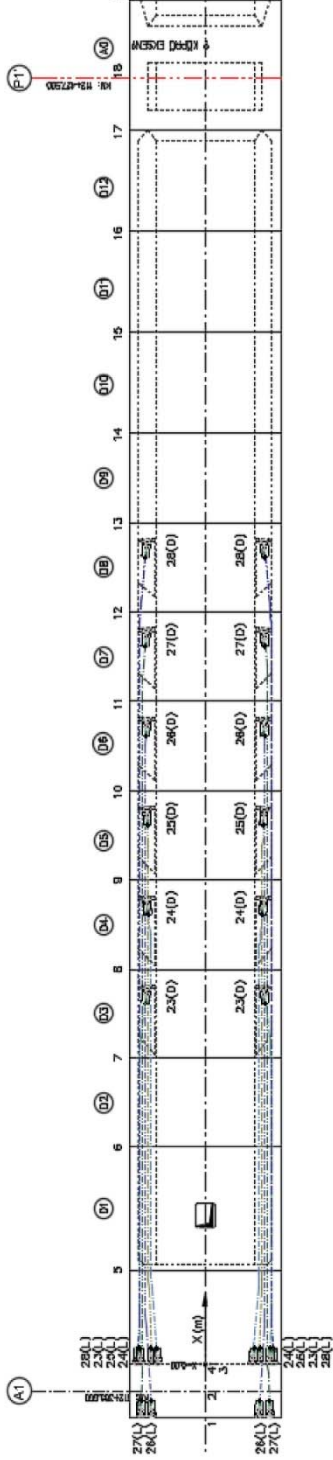


(a)

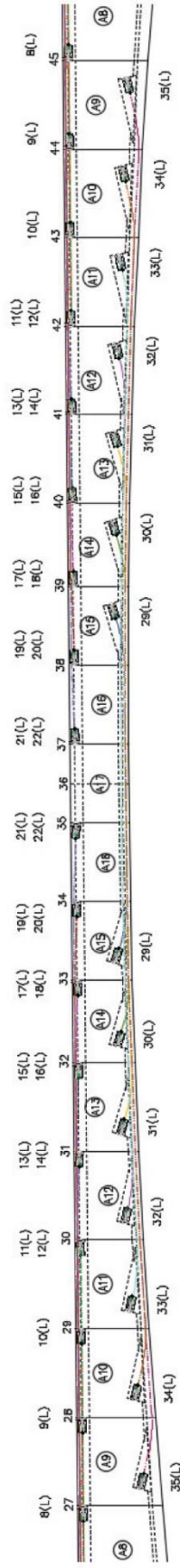
(b)

Şekil 5 - A1 aksından A16 anosuna kadar arderme hatalarının (a) Profil ve (b) Plan görünümü

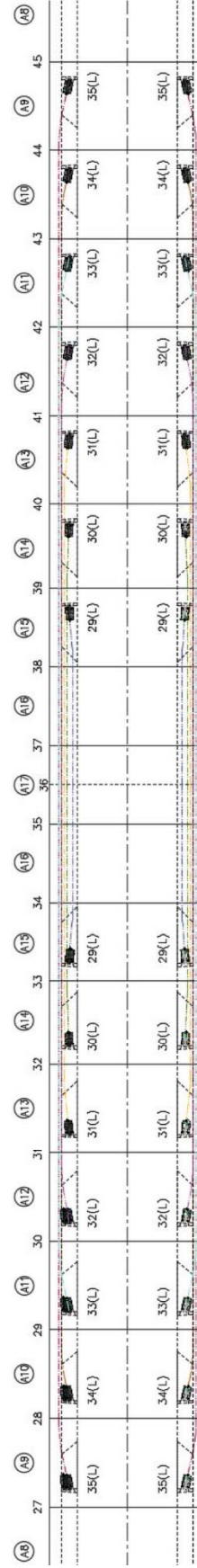




Şekil 6 - Üçgen kısımdaki üstyapı altında bulunan ardgerme halatlarının plan görünümü



(a)



(b)

Şekil 7 - Orta açıklığın ortasında yer alan ardgerme halatlarının (a) Profil ve (b) Plan görünümü

Güzergâh üzerinde kuzey ve güney diye isimlendirilmiş 2 ayrı köprü yer almakta olup, her bir köprüde, 3,50 m genişliğinde 2 adet trafik şeridi, 2,50 m emniyet şeridi, 1,00 m banket ve 1,50 m genişliğinde 2 adet kaldırım olmak üzere, köprü genişlikleri toplam 13,50 m olarak belirlenmiştir. Köprü alıymanda yer almakta olup, köprü boyunca %2,00 değerinde dever vardır. Köprü boyuna yönünde %1,023 değerinde eğim vardır. Köprü verevlik açısı diktir.

Köprüde, özellikle ısı etkilerinden ve depremden kaynaklanacak boyuna yöndeki yatay yükleri azaltmak maksadıyla kenar ayaklarda kayıcı mesnetler, eğik (orta) ayak temellerinde ise sürtünme esaslı mesnetler kullanılmıştır.

Köprü elemanları için malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1 - Malzeme özellikleri**

Eleman	Malzeme
Üstyapı Tabliye Betonu	C40
Ön-Arka Ayak Betonu	C40
Ardgerme Çeliği	0.6” TYPE 270K
Donatı Çeliği	S420

## **DİLİMSSEL KONSOL TABLİYE YÖNTEMİ**

Günümüzde artık çok daha yaygın biçimde kullanılan dilimsel konsol tabliye yöntemi, yerinde beton dökümü yoluyla sürekli ilerleyen tabliye parçalarının yapılması yoludur. Bu dilimsel tabliye anoları yapılırken, Şekil 8’te gösterildiği üzere hareket ettirilebilir kalıp arabaları kullanılmaktadır. Bu kalıp arabası herhangi bir iskele sistemine ihtiyaç duymadan ano kalıbını taşımaktadır, ayrıca kalıp geometrisi ilgili anonun boyutlarına göre ve verilecek olan ters sehim değerlerine göre kolayca değiştirilebilmektedir. Yapılacak olan ano için bir önceki anoya kalıp arabası asılır ve ilgili anonun kalıbı, donatısı ve bırakılacak olan ardgerme halat yörüngeleri hazırlanır. Ardgerme halatları tabliye üst yüzeyine yakın olacak şekilde, diğer bir deyişle oluşacak konsol momentlerini alacak şekilde, ayarlanır. Daha sonra beton döküm işlemi tamamlanır ve beton yeterli mukavemete ulaştıktan sonra ilgili halatların germe işlemi tamamlanır. Germe işlemi de tamamlandıktan sonra, kalıp arabası sökümü gerçekleştirilip bir sonraki ano için hazırlanabilir. Konsol olarak imal edilen anolar birleştiğinde ise köprü artık sürekli bir tabliye sistemi gibi davranmaya başlayacağı için orta açıklıkta oluşacak pozitif moment tesirlerini ve dolayısıyla kesit alt yüzeyindeki çekme gerilmelerini karşılamak amacı ile tabliye alt yüzeyine yakın bölgelere süreklilik halatları diye de adlandırabileceğimiz ardgerme halatları yerleştirilir ve halatların iki taraftan da germe işlemleri tamamlanır.

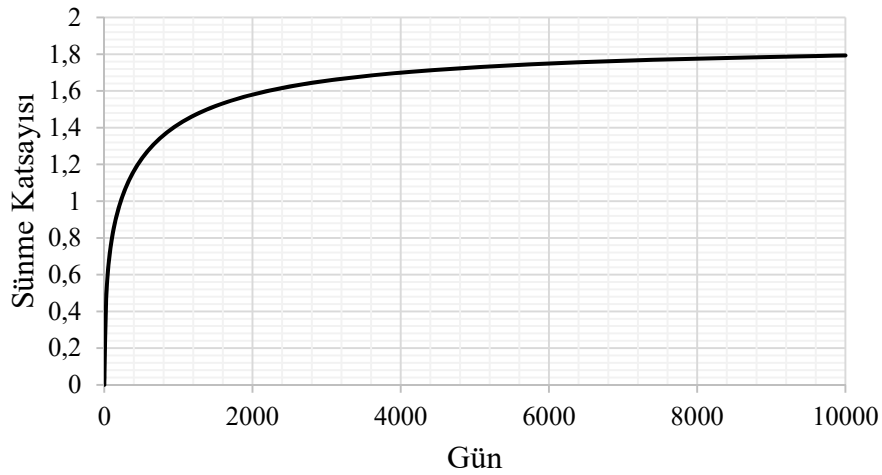
İmalat esnasında uzun konsollar meydana geldiğinden, köprü tabliyesi eğilme rijitliğinin yanında burulma rijitliğine de ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, bu gibi yöntemlerde tabliye kesiti olarak kutu kesit tercih edilmektedir. Genellikle tabliye genişliğinin 20 metreyi aşmadığı durumlarda, tek boşluklu kutu kesit sistemi en ekonomik çözümdür (1). Ayrıca tabliye kesit yüksekliği açıklık ortasına doğru azaltılarak ekonomik ve estetik açıdan bir çözüm oluştururken, tabliye ano ağırlığını da açıklık ortasına doğru azaltarak oluşacak tesirleri ve düşey deplasmanların daha fazla artması engellenmiş olur.



Şekil 8 - Çayırhan Köprüsünde kullanılan hareket ettirilebilir kalıp arabası

### YAPIM AŞAMASI ANALİZ MODELİ

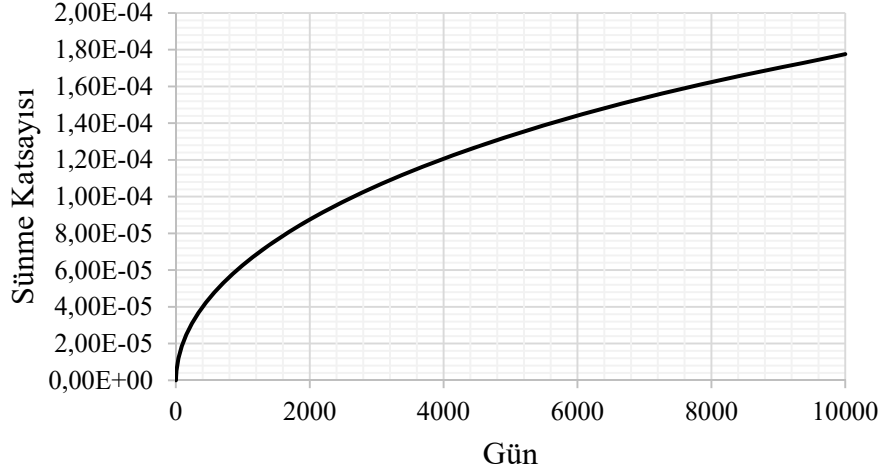
Yapım aşaması analizi, köprü üstyapısında her bir anonun beton dökümü ve ilgili ardgerme halatlarının germe işlemleri tamamlandıktan sonra, üst ve alt fiberlerde oluşan gerilmelerin, oluşacak tesirlerin ve deplasmanların kontrol edilmesine olanak sağlayan ve sünme, büzülme gibi zamana bağlı değişimleri de dikkate alabilen “Midas Civil” programı ile yapılmıştır.



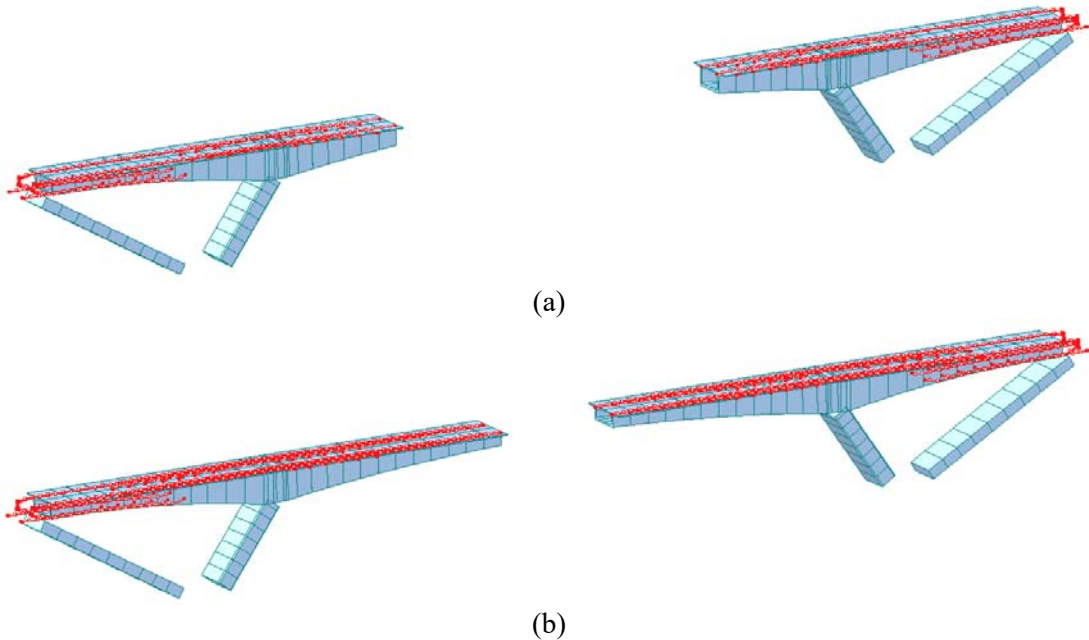
Şekil 9 - Beton için günlere göre sünme katsayısı grafiği

Yapım esnasında anoların her biri farklı zamanda dökülmektedir ve her bir ano farklı kesit özelliklerine sahiptir. Ayrıca, kesit içinden geçen ardgerme halatlara da farklı zamanda germe işlemi uygulanmaktadır. Dolayısıyla, üstyapı elemanlarının hepsi yapım sırasında sünme, büzülme gibi zamana bağlı etkilere farklı zamanlarda maruz kalacaktır. Bu sebeple yapım aşaması modelinin imalata uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu etkileri tanımlamak amacı ile zamana bağlı olarak değişen sünme katsayısı ve büzülme birim şekil değiştirme modelleri CEB-

FIB (1990) kodu kullanılarak analiz modeline yansıtılmıştır. Oluşturulan bu modeller sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Bunlardan başka, yapım aşamasında oluşacak olan ilave yükler dikkate alınmalıdır, bu yüklerden en önemlisi kalıp arabası ağırlığıdır. Her bir ano için, kalıbın hazırlanması, donatıların ve ardgerme halatların düzenlenmesi, beton dökümü ve germe işlemi dikkate alınarak yapım döngüsü olarak 10 gün gibi bir süre belirlenmiştir. Örneğin, orta açıklıkta 7 numaralı ve 13 numaralı ano imalatları bittiğinde ardgerme halatlarının da aktive edilmiş kırmızı renk ile gösterildiği yapım aşaması analiz modeli görünümü Şekil 11'de gösterilmektedir.



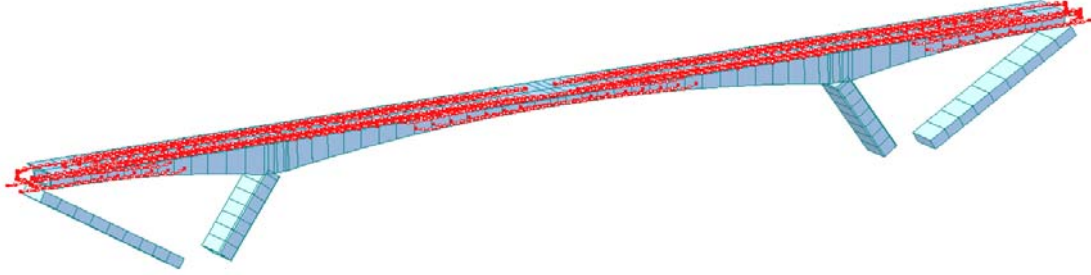
Şekil 10 - Beton için günlere göre büzül birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 11 - Yapım aşaması analiz modeli (a) 7 numaralı ano imalatı bittiğinde (b) 13 numaralı ano imalatı bittiğinde

İki uçtan gelen anolar orta açıklıkta kilit anonun dökülmesi ile birleştikten sonra, Şekil 12'de gösterildiği şekilde, 10,000 gün süre ile bekletilecektir. Bu tip köprüler için 10,000 gün

dolaylarında bir süre ideal olarak kabul görmektedir (1). Bu süre anolar için verilecek olan ters sehîm değerlerini etkileyen en önemli parametredir (2).

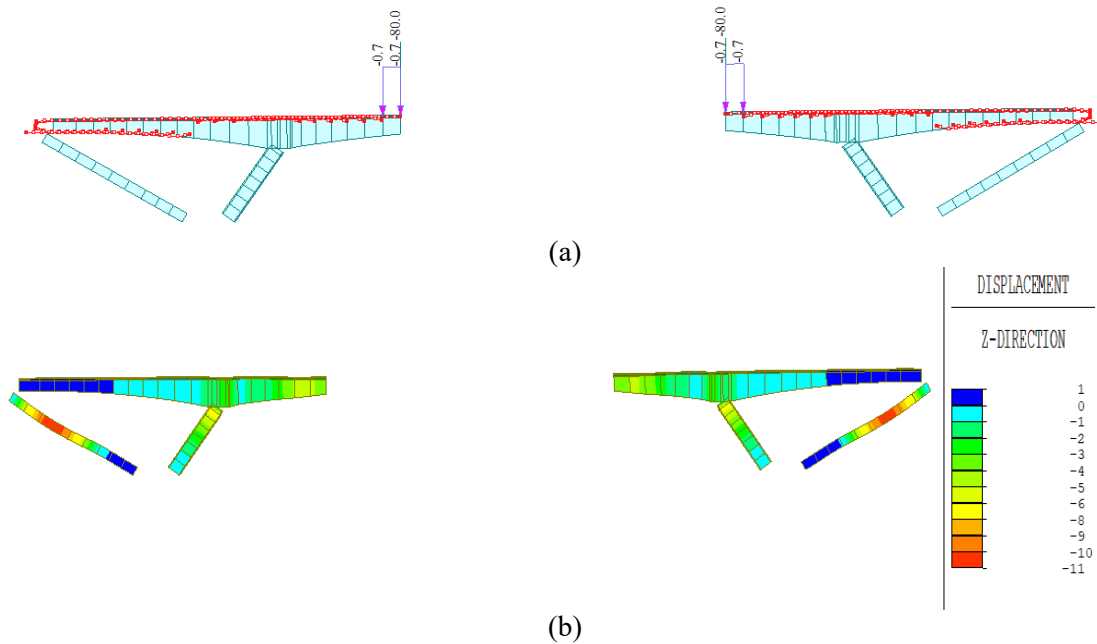


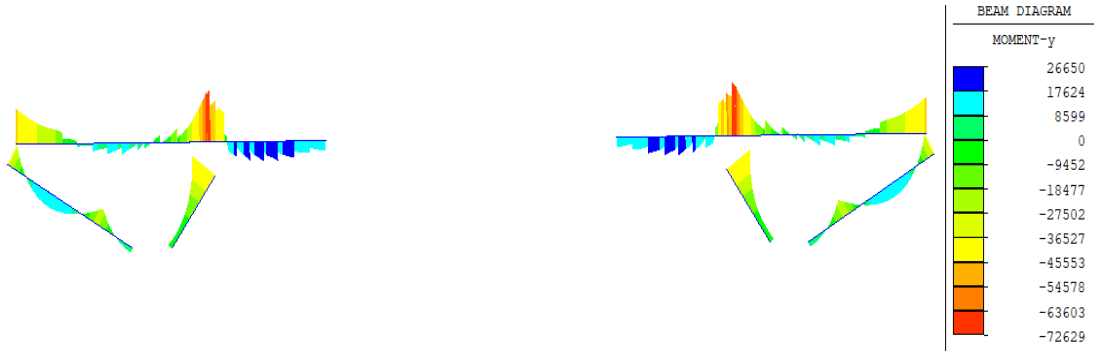
Şekil 12 - Yapım aşaması köprü analiz modeli bitmiş hali

### TERS SEHİM ANALİZİ

Dilimsel konsol tabliye yöntemi ile imal edilecek olan orta açıklıkta imalat esnasında yapılan beton dökümü, arđerme halatların gerilmesi, kalıp arabasında oluşacak çökmeler ve geçen zaman üstyapı kotunda değişiklere sebep olacaktır. Bu sebep ile her bir yeni ano imal edilirken köprü üstyapısına bir miktar sehîm verilir, verilen bu sehîm değerlerine ters sehîm denir.

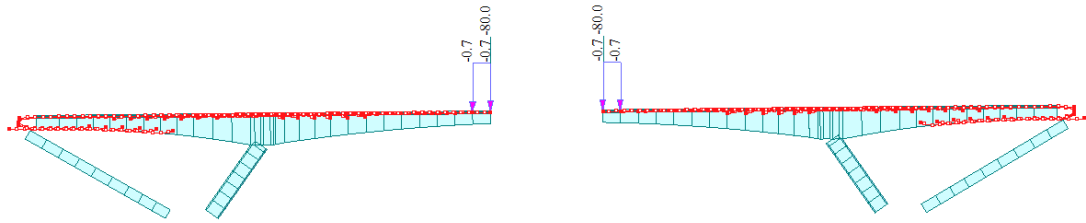
Ters sehîm değerleri belirlenirken, öncelikle inşaat aşamalarında ve sonrasında köprü üstyapısında zamanla oluşacak düşey deplasmanlar belirlenir. Buradaki temel amaç, önceden belirlenen süre olan 10,000 gün sonunda meydana gelecek olan düşey deplasmanları dikkate alarak, ano beton dökümünde yapılacak olan kalıba ters sehîm verilmesidir, verilecek olan bu ters sehîmler ile köprü üstyapısının 10,000 gün sonunda kendi kotuna gelmesi sağlanacaktır. Bundan dolayı, bu tarz köprülerde en önemli konu ters sehîm değerlerinin dikkatli ve doğru şekilde hesaplanması ve daha sonrasında her bir ano dökümü sonunda gün gün sahadan gelecek olan düşey deplasman değerleri ile kıyaslayıp, eğer bir tutarsızlık var ise gerekli kontrollerin yapılmasıdır. Oluşabilecek bu tutarsızlıkların nedenleri arasında, germe işlemi esnasında bazı halat demetlerinde kopmalar meydana gelmesi, imalat esnasında köprüye ilave bir yük çıkartılması veya kullanılan malzeme farklılığı olabilir. Bu gibi sebeplerin irdelenip tutarsızlığın sebebi bulunmalıdır.



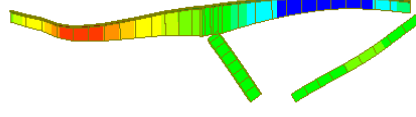
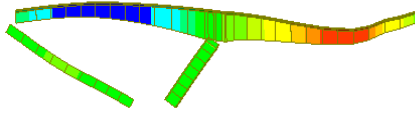


(c)

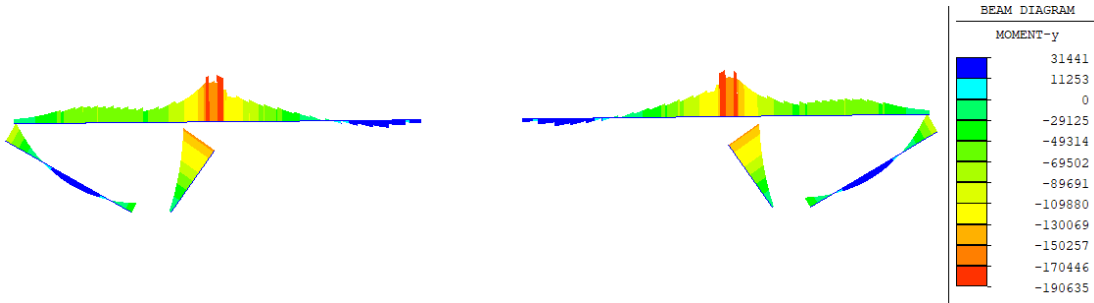
Şekil 13 - 7 numaralı anonun yapım aşamasındaki (a) Yüklemeler (ton & ton/m)  
(b) Oluşan düşey deplasmanlar (mm) (c) Meydana gelen momentler (kN·m)



(a)



(b)

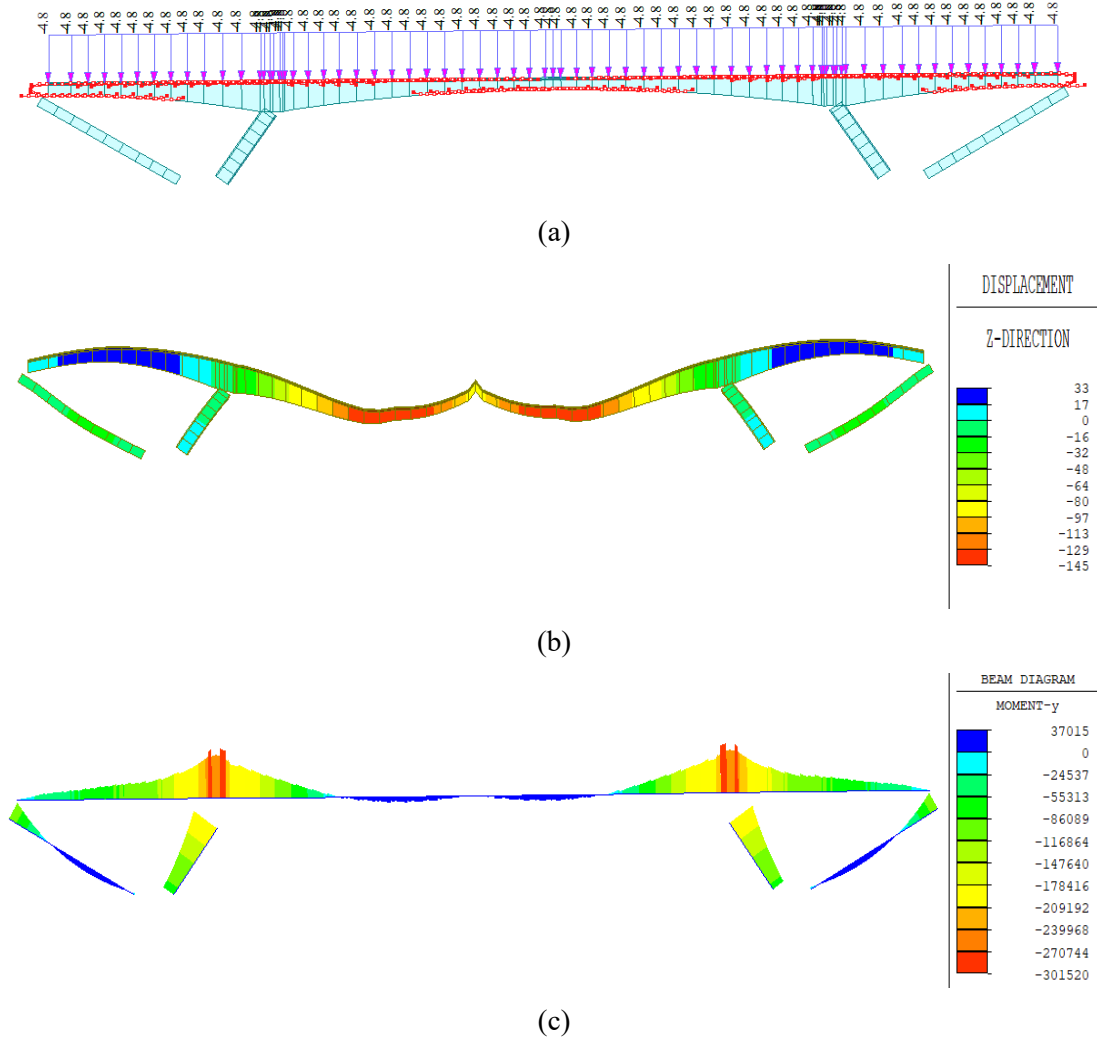


(c)

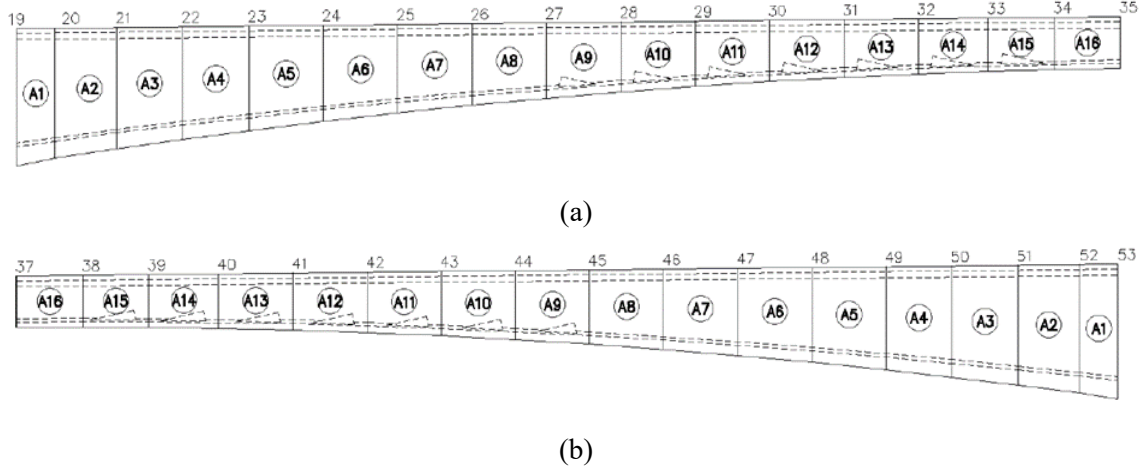
Şekil 14 - 13 numaralı anonun yapım aşamasındaki (a) Yüklemeler (ton & ton/m)  
(b) Oluşan düşey deplasmanlar (mm) (c) Meydana gelen momentler (kN·m)

Çayırhan köprüsünün orta açıklık kısmındaki her bir ano imalatında, anonun kendi ağırlığı, ardgerme halatı, kalıp arabası ağırlığı, ekipman ağırlığı, betonda sünme ve büzülme gibi etkiler belirlenen ano imalat süresince dikkate alınarak oluşan düşey deplasmanlar belirlenmiştir. Örneğin, Şekil 13'te 7 numaralı ve Şekil 14'te 13 numaralı ano imatları için yapılan yüklemeler ve kırmızı ile gösterilen aktif olan ardgerme halatları, düşey yönde oluşan deplasmanlar ve meydana gelen momentler sırasıyla gösterilmiştir.

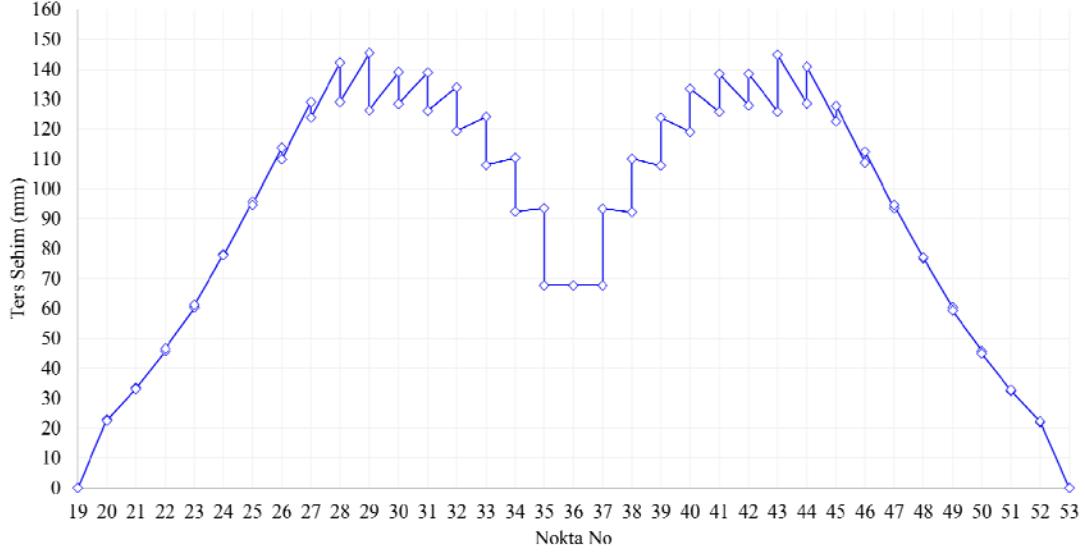
Yapım aşamaları bittikten sonra 10,000 gün süre ile sistem bekletilir. Bu bekleme süresinde Şekil 15'te gösterildiği gibi üstü yapı ilave ölü yüklerin ve ardgerme halatların etkisi altında düşey deplasman değerleri ve meydana gelen moment değerleri bulunur, bu düşey deplasmanların tersi işaretteki değerler, ano imatlarında kalıba verilecek olan ters sehim değerlerine eşittir. Bu değerler, Şekil 16'da gösterildiği üzere proje çizimlerinde her bir ano başı ve ucunu temsil eden noktalar dikkate alınarak ters sehim eğrisi olarak Şekil 17'de grafik halinde hazırlanmıştır. Bu grafikte her bir noktaya denk gelen değer ilgili ano ucu için kırmızı kottan ne kadar fazla ters sehim verileceğini ifade etmektedir.



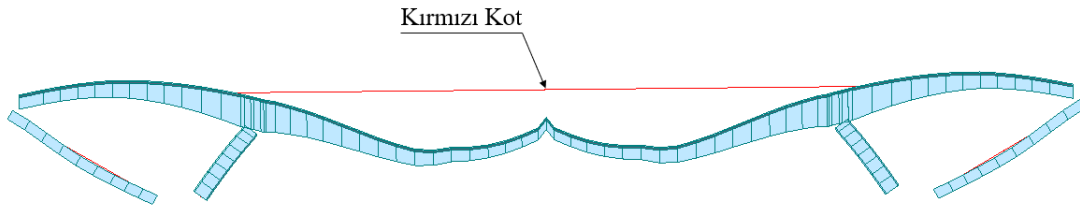
**Şekil 15** - 10,000 gün bekleme süresi için (a) Yüklemeler (ton & ton/m)  
(b) Oluşan düşey deplasmanlar (mm) (c) Meydana gelen momentler (kN·m)



Şekil 16 - Konsol nokta numarası ve ano adları (a) Köprü sol konsol tarafı (b) Köprü sağ konsol tarafı



Şekil 17 - Ters sehim eğrisi (Birim mm)



Şekil 18 - Ters sehim verilmemesi durumunda 10,000 gün sonunda köprü ve kırmızı kot uyumsuzluğu

Yapım aşaması esnasında kalıba verilmesi gerekli olan ters sehim verilmez ise, diğer bir deyişle köprü tamamlandığında geçecek olan yolun profili dikkate alınarak belirlenen kırmızı kotunda



yani taşıtlar için belirlenen kullanım seviyesi hizasında olursa, köprü üstyapısı 10,000 günün sonunda Şekil 18’de şematik olarak gösterildiği gibi ciddi deformasyonlara maruz kalacak ve yol konforu ciddi anlamda zarar görecektir. Bu gibi olumsuzlukları gidermek amacı ile de tekrar asfalt dökmek gerekecektir. Fakat bu durum tabliyenin ağırlaşmasına sebep olarak köprüye ilave bir yük getirecek, tesirlerde ve düşey deplasmanlarda artışa neden olacaktır (2).

## SONUÇ

Bu çalışmada yapım danışmanlığı yürütülen Çayırhan Köprüsü için yapım aşaması modelinin oluşturulması ve ters sehim analizi hakkında genel bilgiler verilmektedir. Dilimsel konsol tabliye yöntemi ile yapılmakta olan orta açıklık kısmı için, yapım aşamasında ve köprünün kullanım ömründe büyük bir öneme sahip olan ters sehim değerlerinin nasıl bulunduğu ve imalat esnasında sahadan gelen kot okumaları ile hesapların karşılaştırılmasının yapılması gerekliliği anlatılmıştır. Bu tarz yapım yöntemlerinin en büyük gerekliliği saha personeli ile projenin bir uyum içinde çalışmasıdır. Halen yapımı devam etmekte olan Çayırhan Köprüsü için sahadan gelen gün gün yapılan okumalar dikkate alınarak gerekli kontroller yapılmalı ve görülecek olan değişiklikler yapım aşaması analiz modeline yansıtılarak gerekli güncellemeler yapılmalıdır. Aksi takdirde, belirlenen hedef süre olan 10,000 günün sonunda köprü kırmızı kotuna ulaşamaz ve bu durum üstyapıda deformasyonlara ve yol konforunun bozulmasına sebep olur.

## Kaynaklar

1. SETRA (2007) “Design Guide Prestressed Concrete Bridges Built Using the Cantilever Method”, Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Fransa
2. Özkul, Ö., Özel, C.N. & Erdoğan, J.E., (2015). “Yerinde Dökme Dengeli Konsol Köprülerin Döküm Eğrisi Takibi”, 3. Köprüler Viyadükler Sempozyumu, İnşaat Mühendisleri Odası Bursa Şubesi.



# Mevcut Betonarme Bir Binanın Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi ile Sismik Risk Değerlendirmesi

Çağrı ÇETİK<sup>1</sup>, Sadık Can GİRGİN<sup>2</sup>, Esra Bengü KENAR<sup>3</sup>

## ÖZET

Mevcut betonarme binaların sismik performansının belirlenmesinde Yeni Zelanda'da önerilmiş Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) (Simplified Lateral Mechanism Analysis-SLAMA) yönteminde, kesit, eleman dayanım ve deformasyon kapasiteleri ile çerçevelerin kolon ve kiriş mekanizma durumları için kapasite eğrileri elde edilmektedir. Yöntemde mevcut betonarme binaların sismik puanlaması yürürlükteki deprem yönetmeliklerine göre inşa edilen binaların sismik performansının yüzdesi ile (% NBS) ifade edilerek can güvenliği riski belirlenmektedir. Bu çalışmada, İzmir'de 5 katlı mevcut betonarme bir binanın Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi (BYMA) ile sismik puanı belirlenerek Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE) yönetmeliği ile elde edilen değerlendirme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sismik değerlendirme, kapasite eğrisi, sismik puan.

## ABSTRACT

### **Seismic Risk Assessment of an Existing Reinforced Concrete Building with Simplified Lateral Mechanism Analysis Method**

In order to determine the seismic performance of existing reinforced concrete buildings, with the Simplified Lateral Mechanism Analysis (SLAMA) method proposed in New Zealand, the capacity curves are obtained according to the section, member strength and deformation capacities, for the column and beam mechanisms of the frames. In this method, life safety risk is obtained by expressing the seismic scoring of existing reinforced concrete buildings in terms of the percentage of the seismic performance (% NBS) of the buildings constructed according to the current earthquake codes. In this study, the seismic score of an existing 5-storey reinforced concrete building in Izmir was determined by the Simplified Lateral Mechanism Analysis (SLAMA) Method

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - cagri.cetik@ogr.deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - sadik.girgin@deu.edu.tr

3 İnşaat Mühendisi - kenaresrabengu@gmail.com

and compared with the evaluation results obtained by the Principles Code for Determination of Risk of Structures.

**Keywords:** Seismic evaluation, capacity curve, seismic score.

## 1. GİRİŞ

Mevcut betonarme binaların sismik performans değerlendirilmesi, belirgin hasar modlarını temsil eden uygun analitik modelleme yaklaşımlarının kullanımını gerektirir. Yapı stokları içindeki betonarme binaların değerlendirilmesinde detaylı veri toplayarak her bina için performans değerlendirilmesini gerçekleştirebilmek birçok zorluk içermektedir. Bu kapsamda, ülkemizdeki binaların hızlı değerlendirilmesine yönelik kademeli değerlendirme yöntemleri öncelikli (riskli) olarak belirlenecek binalara ayrıntılı değerlendirme yöntemlerinin uygulanabilmesine olanak sağlar [1]. Sucuoğlu ve Yazgan (2003) [2] tarafından önerilen ve *Birinci Kademe Değerlendirme Yöntemleri* içerisindeki Sekiz Parametrelilik Sokak Taraması Yöntemi, serbest kat adedi, yumuşak kat, ağır kapalı çıkma, görünür bina kalitesi, kısa kolon, çarpışma etkisi ve topografik etki gibi parametreler içermektedir. *İkinci Kademe Değerlendirme Yöntemleri* ise binaların mevcut projelerinden elde edilen verileri kullanmaktadır. Hassan- Sözen (1997) [3] yönteminde binalar için öncelik indeksi kolon, perde ve dolgu duvar alanları dikkate alınarak belirlenmektedir. Gelişmiş Diskriminant Analizi Yöntemi (Yakut vd., 2006) [4] olasılık esaslı olup hasar ile ilişkili kat adedi, yatay rijitlik, yatay dayanım, fazla bağıllık, yumuşak kat ve çıkma olmak üzere altı farklı indis tanımlanmıştır. Üçüncü kademe olarak adlandırılacak yöntemlerde ise detaylı son değerlendirme ile öncelikli (riskli) olarak belirlenen binaların sismik performans analizinin gerçekleştirilmesidir.

Yeni Zelanda'da da Christchurch (2011) Depremi sonrasında mevcut binaların deprem davranışlarının belirlenmesine yönelik bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan *Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) Yöntemi*, temel yapısal elemanların kapasitesinden başlayarak yapısal bir sistemin doğrusal olmayan kapasitesini (kuvvet ve deformasyon) ve plastik mekanizmasını değerlendirmeye izin veren analitik bir prosedürdür. Bu kapsamda Yeni Zelanda Deprem Mühendisliği Derneği (NZSEE) (2016) [5] tarafından yapıların sismik analizi için *Basitleştirilmiş Pratik Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) (Simplified Lateral Mechanism Analysis-SLAMA)* yöntemi önerilmiştir. Yöntemin basitleştirilmiş kapsamda olması, mevcut yığma ve betonarme binalarda eleman seviyesinden başlanarak yapı sisteminin bütünü için yatay yük taşıma kapasitesinin elde edilmesi aşamalarındaki işlem adımlarının farklı elektronik tablo yazılımları ile pratik olarak elde edilebilmesidir. Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) Yöntemi, mevcut binaların sismik performans değerlendirmeleri için Yeni Zelanda'da NZSEE/MBIE (2016) [5-7] ve Hollanda'da NPR9998 (2018) [8] yakın zamanda kabul gören yer değiştirme esaslı bir yöntemdir [9]. Mevcut bina stoku içerisinde yer alan ve kademeli değerlendirme yöntemleri ile öncelikli olarak sınıflandırılan betonarme binaların (Baran v.d., 2018) [10] BYMA yöntemi ile sismik değerlendirilmesi gerçekleştirilerek bina sismik puanlarına göre olası güçlendirme seçenekleri de belirlenebilecektir.

Günümüzde kullanıcı dostu ticari yazılımlar sayesinde tasarım uygulamalarında doğrusal olmayan analizlerin uygulanması oldukça yaygındır. Mevcut betonarme binaların yanal kapasitesini belirleyebilmek birtakım belirsizlikleri de içermekte olup potansiyel yapısal zayıflıkları ve bunların genel bina kapasitesi üzerindeki etkilerini belirlemek için güvenilir ancak basit değerlendirme prosedürlerine ihtiyaç vardır [11]. Del Vecchio v. d. [12] çalışmasında, mevcut betonarme bir binanın sismik değerlendirilmesini *Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA)* yöntemi ile incelenmiştir. İncelenen bina örneği, 2011 Christchurch depreminde ağır hasar gören betonarme binalardan biri olup, yanal kapasitesini belirlemek ve değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi yazılımı Ruaumoko [13] içinde geliştirilen iki boyutlu doğrusal olmayan bir sayısal model kullanılmıştır. Kapasite eğrisi ile BYMA eğrileri karşılaştırılarak oldukça yakın

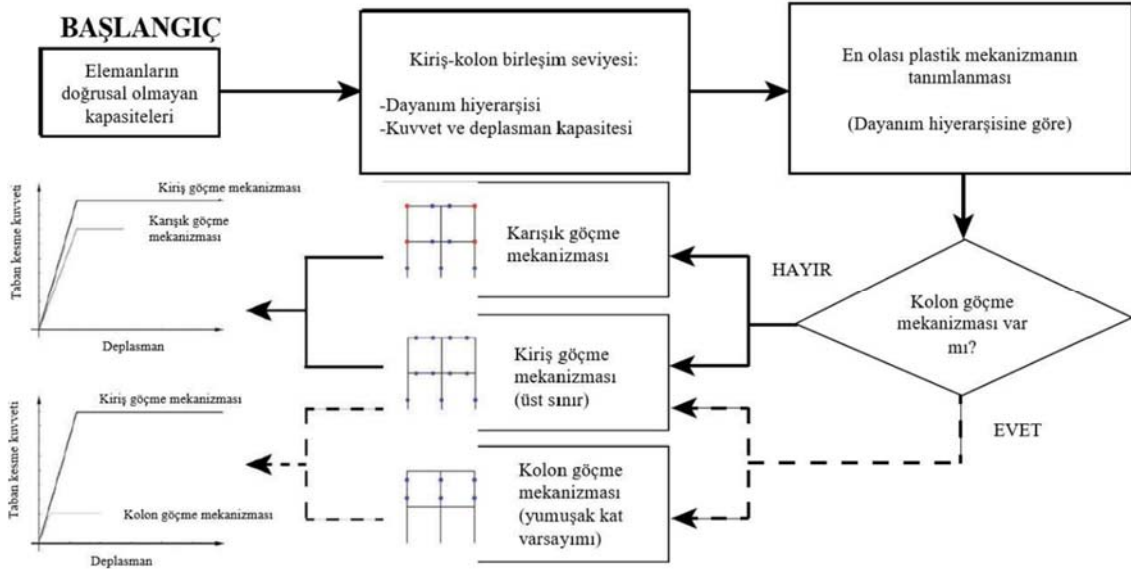
sonuçlar elde edilmiştir. Gentile v.d. [9] çalışmalarında farklı geometri ve malzeme özelliklerine sahip 40 adet çerçeve tipi üzerinde kapsamlı bir parametrik analiz sunmuştur. Sismik değerlendirme için analitik kapasite eğrileri, plastik mekanizmalar ve ilgili parametreler hesaplanmış ve bilgisayar programlarından elde edilen itme analizlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, en fazla 10 katlı çerçevelerin sismik değerlendirmesi için BYMA yönteminin güvenilir bir yöntem olduğu kabul edilmiştir. Bu kabulde ayrıca kolon göçme mekanizması kullanıldığında 6 kat ile sınırlandırıldığı da belirtilmiştir.

## 2. AMAÇ

Çalışmanın amacı, Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) yöntemi ile mevcut betonarme bir binanın doğrusal olmayan davranışının pratik olarak belirlenmesi ve mevcut yapı stoku içerisinde yer alan diğer binalar için de örnek bir uygulamanın gerçekleştirilmesidir. Çalışma kapsamında, İzmir’de 5 katlı mevcut betonarme bir binanın *Yanal Mekanizma Analizi Yöntemi* ile sismik puanının belirlenerek *Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE)* [14] yönetmeliği ile elde edilen değerlendirme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 3. YANAL MEKANİZMA ANALİZİ YÖNTEMİ VE AŞAMALARI

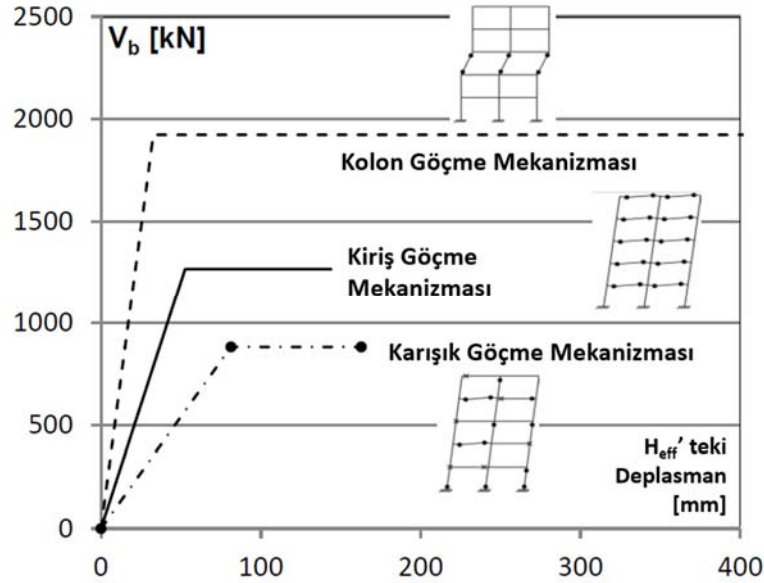
Betonarme çerçeve tipi yapılarda BYMA yöntemi için önerilen bir akış şeması Şekil 1’de verilmiştir. Buna göre kolon-kiriş birleşim bölgesi hasar modları da dikkate alınarak elemanlardaki plastik mekanizmalar dayanım hiyerarşisine göre tanımlanmaktadır. Çalışma kapsamında kolon-kiriş birleşimleri rijit olarak dikkate alınmıştır. Yöntemde yer alan aşamalar ve bu aşamalardaki parametrelerin elde edilebilmesi için gerekli denklemler Tablo 1’de sunulmuştur. Denklemlerde yer alan semboller, Ek-1 Semboller bölümünde açıklamaları ile yer almaktadır.



Şekil 1 - BYMA yöntemi için göçme mekanizması için akış şeması [11]

Del Vecchio v. d. [12] çalışmasında, 8 katlı iki yönde de üç açıklığa sahip perde ve çerçeveli betonarme bir bina için BYMA yöntemini uygulamıştır. Çalışmada zemin kat zayıf kat olarak

seçilmiş olup, kolon ve kiriş göçme mekanizması taban kesme kuvvetleri bakımından karşılaştırıldığında kolon göçme mekanizmasında daha büyük değerler elde edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2 - Del Vecchio v. d. çalışmalarında elde ettikleri taban kesme kuvvetleri [12]

BYMA yönteminin ilk adımı, çerçeveyi oluşturan yapısal elemanların (kirişler, kolonlar, kiriş-kolon birleşim bölgeleri) eleman ve alt sistem kapasitelerinin belirlenmesidir. Buna göre öncelikle kolon ve kiriş moment kapasitelerinin belirlendiği 1. aşamada Moment-Eğrilik ilişkileri elde edilmektedir. Eleman kapasitelerinin belirlendiği 2. Aşamada ise kolon ve kirişlerin yer değiştirmiş eksen dönmeleri elde edilmektedir. 3. Aşamada ise belirlenen kesme kapasiteleri ile 2. Aşamada elde edilen moment-dönme ilişkileri karşılaştırılmaktadır. Kolon ve kirişlerin eğilme, kesme ya da donatı burkulması durumlarındaki dönme kapasitelerinden en büyük yer değiştirmiş eksen dönmeleri belirlenir. Yöntemin 4. aşamasında farklı göçme mekanizmaları dikkate alınarak her iki durum için binanın kapasite eğrisi elde edilmektedir. Belirli bir katın tüm kolonlarının üstünde ve altında plastik mafsallar bulunan bir "Kolon Göçme Mekanizması", tüm kirişlerin sonunda plastik mafsallar ile karakterize edilen bir "Kiriş Göçme Mekanizması" ve kiriş, kolon ve/veya birleşim bölgelerindeki hasarların kombinasyonunun neden olduğu bir " Karışık Göçme Mekanizması " olmak üzere üç farklı durum söz konusudur [9]. Çalışma kapsamında kolon ve kiriş göçme mekanizmaları dikkate alınmıştır.

Yöntemin son aşamasında ise mevcut binaların can güvenliği performans seviyesine göre risk tanımları belirlenmektedir. Bu amaçla yürürlükteki deprem yönetmeliklerine göre inşa edilen yeni binaların sismik performansına bağlı ifade edilen % NBS (New Building Standard) karşılaştırma puanı ile (Tablo 2) mevcut binanın performansı yeni inşa edilecek binaya göre değerlendirilir. Bu amaçla mevcut veya tasarım aşamasındaki binanın yürürlükteki deprem yönetmeliklerine göre inşa edilen yeni binaların sismik performansına bağlı ifade edilen % NBS (New Building Standard) karşılaştırma puanı ile (Tablo 2) değerlendirilir. %NBS değerlendirmesinde gerekli olan sismik talebin elde edilmesinde NZSEE (2016) yönergelerin 500 yılda bir tekrarlanma oranına sahip depreme ait tepki spektrumları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, TBDY (2018) [15]' e göre DD-2, tekrarlanma periyodu 475 yılda bir olan yer hareketine ait tepki spektrum verileri kullanılmıştır. TDTH [16] dikkate alınarak apının bulunduğu koordinatlar girilerek elde edilen ve DD-2 deprem yer hareketine ait tepki spektrumuna ait spektral ivme ( $S_a$ ) değerleri Denklem.19 kullanılarak spektral deplasman ( $S_d$ ) değerlerine dönüştürülmüştür.

**Tablo 1 - BYMA aşamaları ve aşamalara ait denklemler**

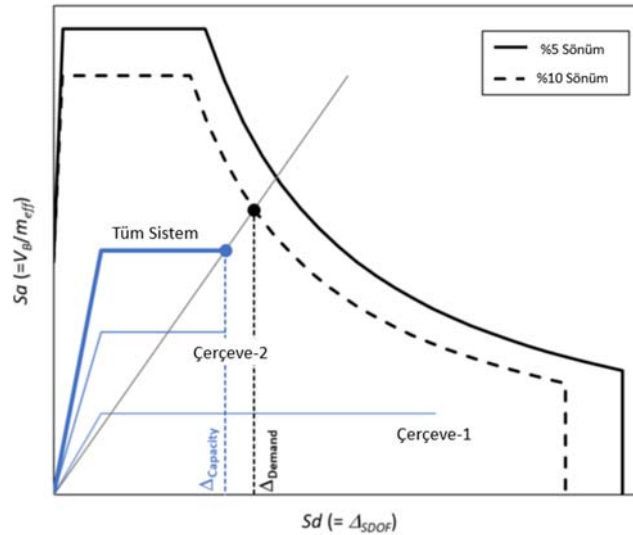
BYMA Aşaması	Denklemler
<b>1. Kolon ve Kiriş Kesit Kapasitelerinin Belirlenmesi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_s}{f_{cc}}</math> (1);</li> <li>• <math>\phi_u, \phi_y, M_u, M_y</math> elde edilir; <math>c = \frac{\varepsilon_{cu}}{\phi_u}</math> (2)</li> </ul>
<b>2. Eleman Eğilme Kapasitelerinin Belirlenmesi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta_y = \frac{\phi_y L_c^2}{3}</math> (3); <math>L_p = kL_c + L_{sp}</math> (4)</li> <li>• <math>\Delta_p = (\phi_u - \phi_y) L_p L_c</math> (5); <math>\Delta_u = \Delta_p + \Delta_y</math> (6)</li> <li>• <math>\theta_y = \frac{\Delta_y}{l'_b}</math> (7); <math>\theta_u = \frac{\Delta_u}{l'_b}</math> (8); <math>\theta_{bb}</math> (Berry and Eberhard, 2005)</li> </ul>
<b>3. Eleman Kesme Kapasitelerinin Belirlenmesi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_p = 0.85(V_C + V_S)</math> (9) (Kirişler için)</li> <li>• <math>V_p = 0.85(V_C + V_S + V_N)</math> (10) (Kolonlar için)</li> </ul>
<b>4.1 Kiriş Göçme Mekanizması (KGM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>DM_1 = \sum_i M_{kol,i} + \left( \sum_n V_{ki.uc,n} \right) L</math> (11)</li> <li>• <math>V_{KGM} = \frac{DM_1}{H_{eff}}</math> (12);</li> <li>• <math>H_{eff} = (0.64 - 0.0125(n - 4)) H</math> (13)</li> <li>• <math>\Delta_{y,KGM} = \min(\theta_{y,kiriş}) H_{eff}</math> (14)</li> <li>• <math>\Delta_{u,1} = \min(\theta_s) H_{eff}</math> ; <math>\Delta_{u,2} = \min(\theta_{bb}) H_{eff}</math></li> <li>• <math>\Delta_u = \min(\Delta_{u,1}; \Delta_{u,2})</math> (15)</li> </ul>
<b>4.2 Kolon Göçme Mekanizması (CM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{CM} = \frac{\sum_i M_{kol,i}}{0.5h}</math> (16)</li> <li>• <math>\Delta_{y,CM} = \min(\theta_{y,kol}) H_{eff}</math> (17)</li> <li>• <math>\Delta_{u,1} = \min(\theta_u) H_{eff}</math> ; <math>\Delta_{u,2} = \min(\theta_{bb}) H_{eff}</math></li> <li>• <math>\Delta_u = \min(\Delta_{u,1}; \Delta_{u,2})</math> (18)</li> </ul>

$$S_d = S_a K_\delta(T) = S_a \cdot 9810 \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (19)$$

%NBS puanı için ivme-tepki spektrumu hesabı için binaya ait yanal kapasiteler ile ivme-tepki spektrumu elde edilerek aynı grafik içinde yer alır. Orjinden başlayarak yanal kapasitenin nihai deplasman değerinden geçen bir doğru parçası Şekil.3'te görüldüğü gibi çizilir. Spektral ivme ( $S_a$ ) değerlerinin elde edilmesindeki etkin kütle ( $m_{eff}$ ) toplam bina kütlelerinin % 80'i olarak alınmıştır [12]. %NBS puanı nihai deplasman değerinin doğru parçası ile tepki spektrumun kesiştiği noktaya bölümü ile elde edilir.

**Tablo 2 - %NBS skoruna göre bina sınıflandırılması [17]**

Yeni Binaya Göre Karşılaştırma Puanı(%NBS)	Bina Sınıfı	Yaklaşık. Yeni Binaya Göre Risk	Can Güvenliği Risk Tanımı
>100	A+	<1 kere	Düşük Riskli
80-100	A	1-2	Düşük Riskli
67-80	B	2-5	Düşük-Orta Riskli
34-66	C	5-10	Orta Riskli
20-33	D	10-25	Yüksek Riskli
<20	E	25 kereden daha fazla	Çok Yüksek Riskli



**Şekil 3 - %NBS puanının hesaplanması [18]**

#### 4. BASİTLEŞTİRİLMİŞ YANAL MEKANİZMA ANALİZİNİN (BYMA) MEVCUT BİNAYA UYGULANMASI

Mevcut 5 katlı betonarme bina 1992 yılında İzmir'de inşa edilmiş olup, kat yüksekliği 2.65 m'dir (Şekil 4a). Betonarme binaya ait malzeme özellikleri belirlenmesinde projede yer alan malzeme ve kesit özellikleri dikkate alınmıştır. Beton basınç dayanımı 14 MPa olup, donatı sınıfı S220





( $f_{yk}=220$  MPa,  $f_{su}=264$  MPa) ve beton elastisite modülü ( $E_c$ )18708 MPa'dır. Şekil.4 (b-c)'de binada bulunan F aksında bulunan kolonların zemin kat donatı detayları ile aynı aksa ait kiriş donatı detayları yer almaktadır. Yapıya ait kiriş ve kolonlara ait moment-eğrilik grafikleri CUMBIA programı [19] yardımıyla elde edilmiştir. Kolonlara ait eksenel yüklerin elde edilmesinde etki alanları yöntemi kullanılmıştır. Hesaplarda dış duvar ağırlığı  $300 \text{ kg/m}^2$ , iç duvar ağırlığı  $200 \text{ kg/m}^2$  olarak alınmıştır. BYMA analizine 1-1 aksından başlanarak tüm akslarda yer alan kolon ve kirişlerin Moment-Dönme grafikleri 1. ve 2. Aşamada verilen Denklemler (1-8) ile elde edilmiştir. Buna göre, kirişin akma noktası ( $\theta_y, M_y$ ), beton ezilme kısalması ve donatı kopma birim uzamasına göre hesaplanan en büyük nokta ( $\theta_u, M_u$ ) ve donatı burkulmasına karşılık gelen dönme ( $\theta_{bb}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Örnek olarak, K10 kirişine ait kesme dayanımı Denklem (9) ile hesaplanmıştır ve kesme açıklığı ile çarpılarak Moment değerleri elde edilmiştir (Şekil 5a). Eleman eğilme kapasitesi ile kesme kapasiteleri ile hesaplanan grafikler karşılaştırılarak keşiştiği noktaya karşılık gelen göçme modu kesme ( $\theta_s$ ); eğer bulunmuyorsa göçme modu eğilme ( $\theta_u$ ) olarak belirlenmiştir. 1-1 Aksında bulunan diğer kirişlere ait moment-dönme özellikleri ile göçme modları Tablo.3' te verilmiştir.

Kolon kapasiteleri kiriş kapasitelerine benzer şekilde edilmiştir, fakat kesme kapasiteleri hesabında eksenel yükün katkısı da hesaplara dahil edilmiştir ve Denklem (10) ile kolon kesme kapasite hesapları yapılmıştır. Şekil.5b'de S11 kolonunun zemin katına ait elde edilen moment-dönme grafiği yer almaktadır. Buna göre S11 kolonu için göçme modu kesme olarak belirlenmiştir. Tablo.4'te S11 kolonunun tüm katlardaki plastik mafsallık özellikleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde 1-4. katlarda kolonun nihai dönmeye donatının burkulacağı ile ulaşacağı görülmektedir.

**Tablo 3 - 1-1 Aksına ait kirişlerin plastik mafsallık özellikleri ve göçme modları**

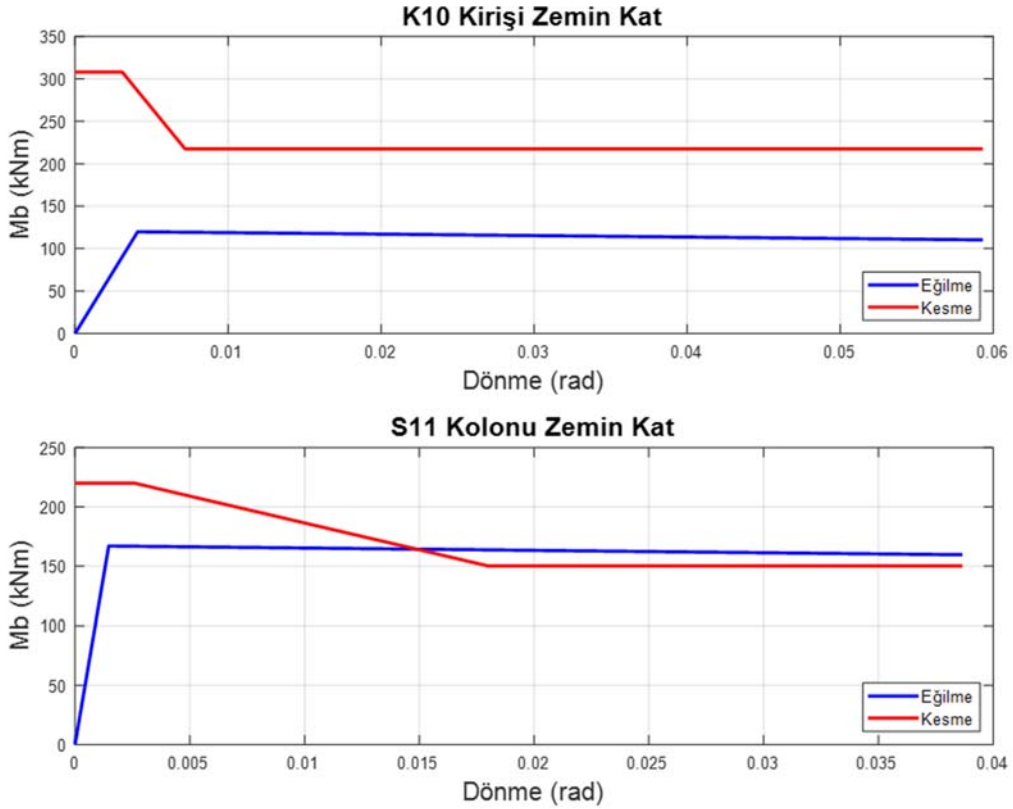
Kiriş (Eğilme Yönü)	$M_y$ [kNm]	$\theta_y$ [rad]	$M_u$ [kNm]	$\theta_u$ [rad]	$\theta_{bb}$ [rad]	$M_{min}$ [kNm]	Göçme modu	$\theta_s$ [rad]	
K10	+	102.99	0.0037	109.71	0.0593	0.0488	90.20	Eğilme	-
	-	119.87	0.0050	110.28	0.0593	0.0488	88.74	Eğilme	-
K11	+	96.35	0.0048	90.38	0.0738	0.0437	89.15	Eğilme	-
	-	108.16	0.0044	104.36	0.0738	0.0437	89.15	Eğilme	-
K12	+	92.73	0.0046	89.42	0.0792	0.0420	89.22	Eğilme	-
	-	98.64	0.0044	95.03	0.0792	0.0420	89.15	Eğilme	-
K13	+	93.20	0.0046	89.94	0.0805	0.0474	80.51	Eğilme	-
	-	98.64	0.0044	95.03	0.0805	0.0474	89.15	Eğilme	-
K14	+	39.77	0.0007	41.32	0.0645	0.0381	88.73	Eğilme	-
	-	39.77	0.0007	41.32	0.0645	0.0381	77.91	Eğilme	-

Çalışma kapsamında, kiriş ve kolonların plastik mafsallık özellikleri hesaplandıktan sonra çerçevelere ait göçme mekanizmalarına ait itme eğrileri elde edilmiştir. Kolon göçme mekanizmasının zemin katta olduğu kabul edilmiştir. Kiriş ve kolon göçme mekanizmalarına ait taban kesme kuvvetleri ( $V_{KGM}$  ve  $K_{CM}$ ) Tablo.1'de 3. ve 4. aşamalara ait denklemler ile hesaplanmıştır. Şekil.6' da her iki mekanizma durumuna göre 1-1 aksı için elde edilen itme eğrileri gösterilmektedir. Diğer tüm akslara ait kiriş ve kolon göçme mekanizmaları x ve y yönleri için ayrı ayrı 1-1 aksına benzer şekilde hesaplanmıştır. Bir doğrultunun yanal kapasitesi o

doğrultuda yer alan aksların kolon ve kiriş göçme mekanizmalarında hesaplanan taban kesme kuvvetlerinin toplamı ile elde edilmektedir. Toplamları alınan akslardaki en düşük deplasman değeri hesap yapılan doğrultunun nihai deplasman değeri olarak kabul edilmiştir (Şekil 7).

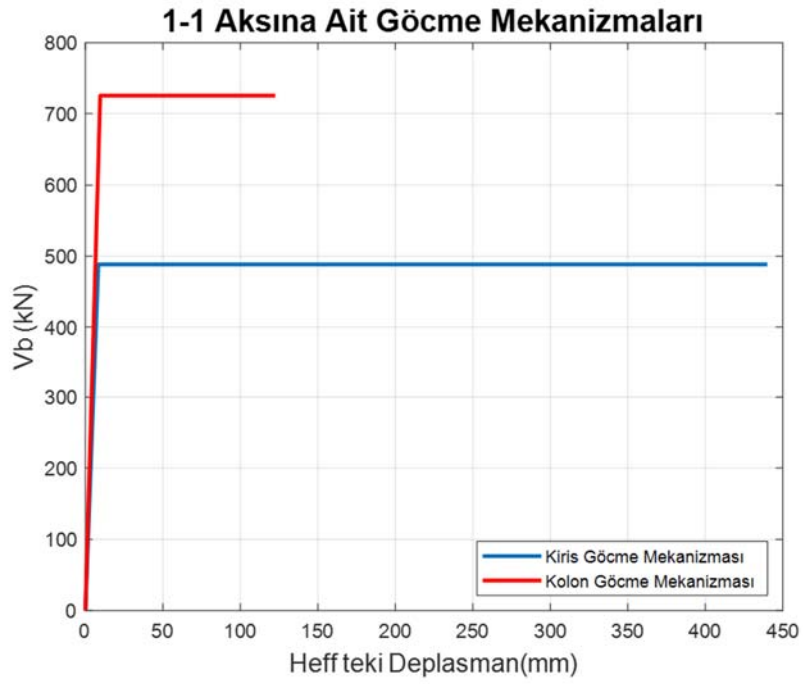
**Tablo 4 - S11 kolonuna ait plastik mafsal özellikleri ve göçme modları**

Kat	$M_y$ [kNm]	$\theta_y$ [rad]	$M_u$ [kNm]	$\theta_u$ [rad]	$\theta_{bb}$ [rad]	$M_{min}$ [kNm]	Göçme şekli	$\theta_s$ [rad]
Zemin	159.64	0.0015	167.02	0.0387	0.0344	179.27	Kesme	0.015
1	129.98	0.0015	137.48	0.0448	0.0339	168.14	Eğilme	-
2	84.83	0.0017	84.83	0.0588	0.0357	127.12	Eğilme	-
3	77.22	0.0016	82.63	0.0703	0.0370	128.85	Eğilme	-
4	67.28	0.0016	70.00	0.0725	0.0382	120.62	Eğilme	-

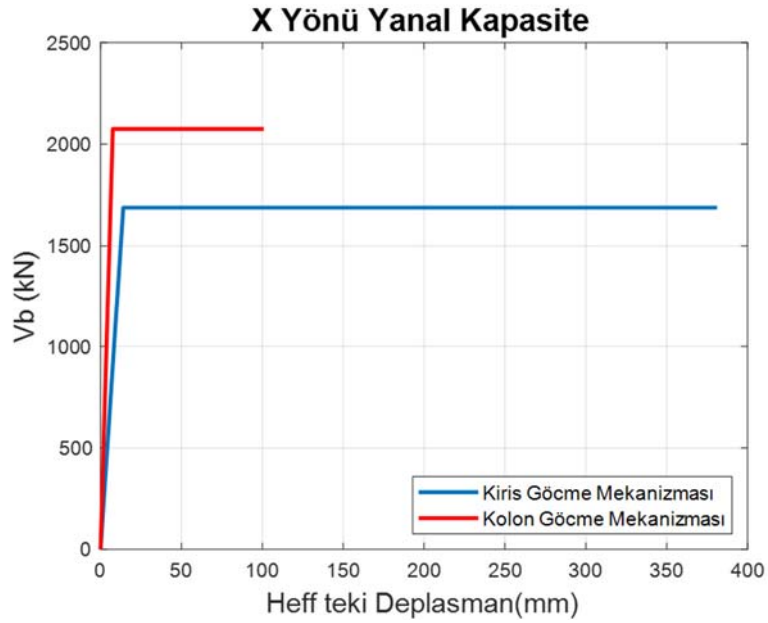


**Şekil 5 - (a)K10 kirişi ve (b) S11 kolonuna ait moment-dönme grafikleri**

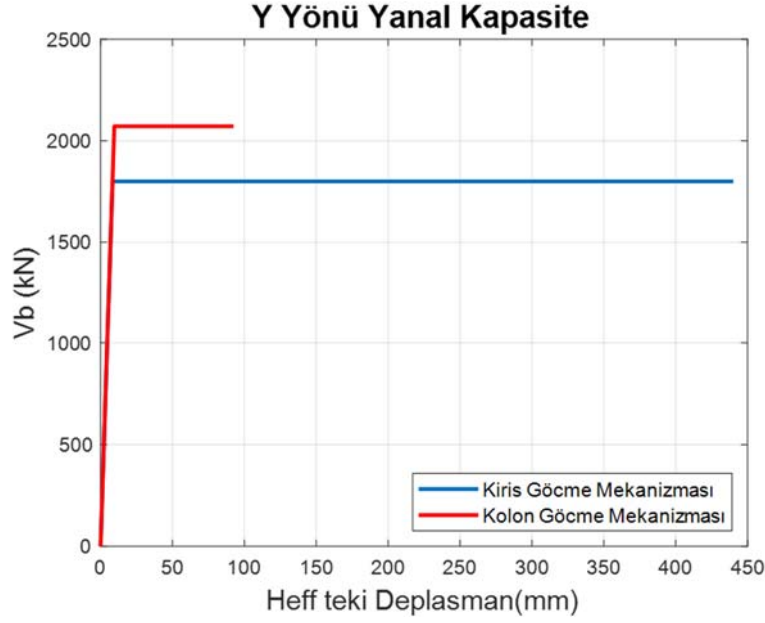
Elde edilen X ve Y yönüne ait yanal kapasiteler Şekil.6'da gösterilmektedir. Her iki yön için zemin katta kolon göçme mekanizması kabulü ile elde edilen taban kesme kuvveti değerleri kiriş göçme mekanizmasına göre daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6 - 1-1 aksına ait itme eğrileri



Şekil 7 - (a) X yönüne ve (b) Y yönüne ait yanıl kapasiteler

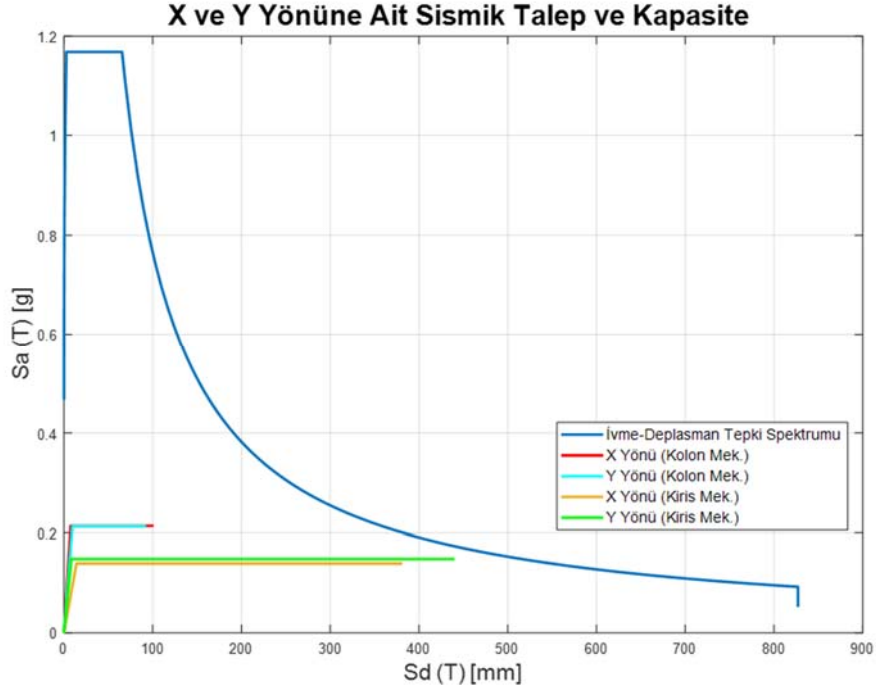


Şekil 7 - (a) X yönüne ve (b)Y yönüne ait yanal kapasiteler (devam)

## 5. MEVCUT BİNANIN SİSMİK RİSK DEĞERLENDİRMESİ

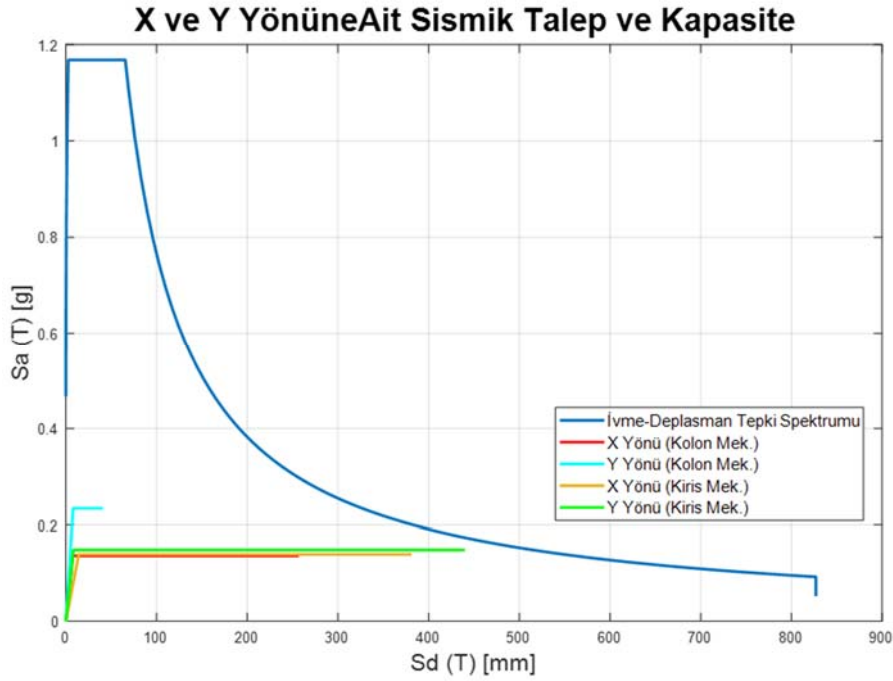
### 5.1. BYMA ile Sismik Talebin ve %NBS Puanının Belirlenmesi

%NBS puanının elde edilmesi için binanın bulunduğu konum bilgileri ile DD-2, tekrarlanma periyodu 475 yılda bir olan yer hareketine ait tepki spektrum verileri alınmıştır [14]. Denklem (19) ile spektral ivme ( $S_a$ ) verileri spektral deplasman ( $S_d$ ) değerlerine dönüştürülmüştür. BYMA



Şekil 8 - Binaya ait zayıf katın zemin kat varsayımı ile elde edilen talep-kapasite grafikleri

yöntemi ile hesaplanan yanal kapasite verilerinde taban kesme kuvvetleri binanın etkin kütesine bölünerek yapı kapasitelerinin ivme-deplasman tepki spektrumu formatına getirilmiştir [12]. Şekil. 8 ve 9'da zayıf katın farklı katlar olarak seçilmesine bağlı olarak elde edilen yapıya ait talep-kapasite grafikleri yer almaktadır. Sismik talebin ve yapının yatay kapasiteleri belirlendikten sonra %NBS puanı X ve Y yönü hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo.5'te yer almaktadır ve zayıf katın birinci kat olarak kabul edildiğinde yapının %NBS puanı 31% olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre yapı yüksek riskli olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 9 - Binaya ait zayıf katın 1. kat kat varsayımı ile elde edilen talep-kapasite grafikleri

Tablo 5 - Binaya ait %NBS puanları

Kiriş Göçme Mekanizması		Kolon Göçme Mekanizması			
		Zemin Kat Varsayımı		1. Kat Varsayımı	
X-Yönü	Y-Yönü	X-Yönü	Y-Yönü	X-Yönü	Y-Yönü
84.70%	90.73%	51.73%	49.98%	69,37%	31.40%

## 5.2.Yapının RYTEİE yönetmeliği ile değerlendirilmesi

Mevcut Binanın Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE) [14] Yönetmeliğine göre değerlendirilmesi Protastructure [20] yapısal analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. RYTEİE Yönetmeliğinde kolonlar,  $V_e/V_r$  oranına ve sarılma bölgesi donatı detayına bağlı olarak 3 gruba ayrılmıştır.  $V_e$  düşey yükler ve deprem etkileri altında hesaplanan kesme kuvveti,  $V_r$  Kolon, kiriş veya perde kesitinin kesme dayanımıdır. Tablo 6'da verilen sınıflandırmaya göre; A grubu kolonların eğilme göçmesine, B grubu kolonların eğilme-kesme göçmesine, C grubu kolonların ise kesme göçmesine maruz kaldığı kabul edilir. Söz konusu yapının kolonlarının sınıflandırma dağılımı Tablo 9'da verilmiştir.

**Tablo 6 - Kolon Sınıflandırma Tablosu**

$\frac{V_e}{V_r}$	Aralığı $s \leq 100$ mm olan, her iki ucunda 135° kancalı etriyesi bulunan ve toplam enine donatı alanı $A_{sh} \geq 0.06sb_k(f_{cm}/f_{ywm})$ denklemini sağlayan kolonlar	Diğer durumlar
$V_e/V_r \leq 0.7$	A	B
$0.7 < V_e/V_r \leq 1.1$	B	B
$1.1 < V_e/V_r$	B	C

Kolonların kat ötelenme oranları ( $\delta/h$ ) ve Etki/Kapasite ( $m$ ) değerleri, kolon sınıfına bağlı olarak Tablo 7’de verilen risk sınır değerleri ile kıyaslanır. Etki/Kapasite Oranı ( $m$ ); kolonun deprem etkisi altında kesit moment değerinin, kesit kapasite moment değerine bölünmesi ile hesaplanır. Hesaplanan değerlerin sınır değerlerini aşması durumunda eleman riskli kabul edilir. Söz konusu yapının kolonlarının risk dağılımı Tablo.9’ da verilmiştir.

**Tablo 7 - Kolonlar için  $m_{sınır}$  ve  $(\delta/h)_{sınır}$  değerleri**

<b>A grubu kolonlar</b>			
$N_K/(f_{cm}A_c)$	$m_{sınır}$	$(\delta/h)_{sınır}$	
$\leq 0.1$	5.0	0.035	
$\geq 0.6$	2.5	0.0125	
<b>B grubu kolonlar</b>			
$N_K/(f_{cm}A_c)$	$A_{sh}/(sb_k)$	$m_{sınır}$	$(\delta/h)_{sınır}$
$\leq 0.1$	$\leq 0.0005$	2.0	0.01
	$\geq 0.006$	5.0	0.03
$\geq 0.6$	$\leq 0.0005$	1.0	0.005
	$\geq 0.006$	2.5	0.0075
<b>C grubu kolonlar</b>			
$m_{sınır}$		$(\delta/h)_{sınır}$	
1.0		0.005	

Risk değerlendirmesi yapının tüm katları için yapılır ve herhangi bir katının riskli çıkması durumunda bina Riskli Bina olarak kabul edilir. Risk değerlendirmesi; İncelenen kat kolonlarında düşey yükler altında oluşan eksenel basınç gerilmeleri hesaplanmıştır. Kolon eksenel basınç gerilmelerinin toplamı, toplam kolon sayısına bölünerek kattaki eksenel basınç gerilmesi ortalaması hesaplanır. İlgili katta risk sınırını aşan perde ve kolonların kesme kuvvetlerinin toplamını kat kesme kuvvetine bölünerek kat kesme kuvveti oranı hesaplanır. Tablo 8’de verilen kat kesme kuvveti oranı sınır değerini aşan bina, Riskli Bina olarak kabul edilir. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar’ da verilmiş ve yukarıda özetlenmiş olan metotlar kullanılarak yapılan analiz sonucunda söz konusu yapının dört yönden de yapılan yükleme sonucunda (0°, 90°, 180°, 270°) Riskli Bina olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 8 - Perde ve Kolon Eksenel Basınç Gerilme Ortalamasına Bağlı Kat Kesme Kuvveti Oranı Sınır Değerleri**

Perde ve kolon eksenel basınç gerilme ortalaması (=Perde ve kolon gerilmelerinin toplamı / Perde ve kolon sayısı)	Kat kesme kuvveti oranı sınır değerleri
$\geq 0.65f_{cm}$	0
$0.1f_{cm} \geq$	0.35

**Tablo 9 - Kolonların Yönere Göre Mafsallaşma ve Risk Durumlarının Dağılımı**

		0°		90°		180°		270°	
1. kat	B Tipi Mafsallaşma	16		12		15		13	
	C Tipi Mafsallaşma	4		8		5		7	
	KiM (kiriş mafsallaşması)	18		17		18		17	
	KoM (kolon mafsallaşması)	2		3		2		3	
	Riskli Eleman Adedi	11		14		11		14	
	Risksiz Eleman Adedi	9		6		9		6	
2. kat	B Tipi Mafsallaşma	11		11		10		11	
	C Tipi Mafsallaşma	9		9		10		9	
	Alt/Üst Düğüm Noktası	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt
	KiM	19	19	14	15	19	19	15	16
	KoM	1	1	6	5	1	1	5	4
	Riskli Eleman Adedi	13		12		15		15	
	Risksiz Eleman Adedi	7		8		5		5	
3. kat	B Tipi Mafsallaşma	10		7		10		11	
	C Tipi Mafsallaşma	10		13		10		9	
	Alt/Üst Düğüm Noktası	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt
	KiM	18	18	15	14	18	18	16	11
	KoM	2	2	5	6	2	2	4	9
	Riskli Eleman Adedi	12		16		12		16	
	Risksiz Eleman Adedi	8		4		8		4	



**Tablo 9 - Kolonların Yönlere Göre Mafsallaşma ve Risk Durumlarının Dağılımı (devam)**

		0°		90°		180°		270°	
4. kat	<b>B Tipi Mafsallaşma</b>	13		14		13		12	
	<b>C Tipi Mafsallaşma</b>	7		6		7		8	
	<b>Alt/Üst Düğüm Noktası</b>	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt
	<b>KiM</b>	17	17	10	10	16	17	10	10
	<b>KoM</b>	3	3	10	10	4	3	10	10
	<b>Riskli Eleman Adedi</b>	10		11		11		17	
	<b>Risksiz Eleman Adedi</b>	10		9		9		3	

## 6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, İzmir/Karşıyaka’da 5 katlı betonarme bir bina Yeni Zelanda’da mevcut bina değerlendirilmesinde kullanılan *Basitleştirilmiş Yanal Mekanizma Analizi (BYMA) Yöntemi* ve *Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE)* Yönetmeliği kullanılarak değerlendirilmiştir. BYMA yöntemi ile eleman seviyesinden başlayarak sistemin yanal kapasitesi elde edilmiştir. BYMA yöntemi ile eleman seviyesi, alt sistem seviyesi, kat seviyesinde ve global sistemde oluşan göçme türleri tespit edilebilmektedir. Zemin ve 1.kata ait taban kesme kuvvet değerleri kolon mekanizmasında kiriş mekanizmasına göre yüksek çıkmaktadır fakat bu katlardaki kolon elemanlarında burulma veya kesme göçmeleri gözlemlenmiştir. Yapıdaki zayıflıkların incelenmesi ve ortaya çıkarılması için zayıf kat seçimi zemin ve 1. kat olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Mevcut binanın yürürlükteki yönetmeliklere göre inşa edilecek yeni binaya göre karşılaştırma puanı (% NBS) hem kolon hem kiriş göçme mekanizmaları için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kiriş mekanizma durumuna göre değerlendirildiğinde mevcut *Düşük-Orta Risk* sınıfında; kolon mekanizması için ise zayıf katın zemin kat varsayımı ile *Orta Risk* sınıfında belirlenmiştir. Zayıf katın birinci kat olarak varsayılması durumunda ise bina *Yüksek Riskli* olarak belirlenmiş; RYTEİE göre değerlendirilmesi sonucunda da dört yön için de *Riskli Bina* olduğu belirlenmiştir. BYMA Yöntemi ile elde edilen sonuçların RYTEİE Yönetmeliği ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. BYMA Yönteminin pratik bir yöntem olması açısından dolgu duvar etkilerini içeren yapısal modellere uygulanması ile sismik değerlendirme yöntemleri için gelecekteki çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

### Semboller

$\epsilon_{cu}$  = sargılı betonun nihai şekil değiştirmesi

$\rho_s$  = Enine donatının hacimsel oranı

$\epsilon_s$  = NZSEE(2016) yönergesine göre 0.06 olarak alındı

$f'_{cc}$  = Sargılı betonun basınç dayanımı

$\Phi_y$  = Akma eğriliği

$\Phi_u$  = Nihai eğrilik

$c$  = Tarafsız eksen derinliği

$\Delta_y$  = Akmadaki deplasman

$\Delta_p$  = Plastik deplasman kapasitesi

$L_p$  = Plastik mafsal boyu

$L_c = l'_b$  = Kesme açıklığı

$L_{sp}$  = Birim şekildeğişimi etki uzunluğu

$\Delta_u$  = Elemanın nihai deplasmanı

$\theta_y$  = Akma dönmesi

$\theta_u$  = Nihai dönme

$\theta_{bb}$  = Donatı burkulması

$V_p$  = Elemanın kesme kapasitesi

$V_c$  = Betonun kesme kapasitesine katkısı

$V_s$  = Donatının kesme kapasitesine katkısı

$V_N$  = Eksenel yükün kesme kapasitesine katkısı

$DM_1$  = Kiriş göçme mekanizmasına ait devrilme momenti

$M_{kol,i}$  = Zemin kattaki i. kolonun taban momenti

$V_{ki,uc,n}$  = n. kattaki kirisin kesme kuvveti

$L$  = Aks açıklığı

$H_{eff}$  = Efektif kat yüksekliği

$n$  = kat sayısı

$H$  = Bina yüksekliği

$\Delta_{y,KGM} - \Delta_{y,CM}$  = Kiriş göçme-kolon mekanizmasına ait akmadaki deplasman

$\theta_s$  = Kesme gömesinin yaşandığı akma değeri

$\Delta_{u,1}$  = Kesme göçmesine göre nihai deplasman

$\Delta_{u,2}$  = Donatı burkulmasına göre nihai deplasman

$\Delta_u$  = Nihai deplasman

### **Kaynaklar**

1. Özçelik, Ö., Baran, T., Kahraman, S., Saatçi, A, Mısır, İ.S., Girgin, S.C. (2015). Mevcut yapı stoklarının deprem riski tayininde çoklu karar ağacı yaklaşımı, 8. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, serbest bildiri, Bildiriler Kitabı, 585-594.
2. Sucuoğlu, H. Yazgan, U. (2003). Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment in Urban Building Stocks, Seismic Assesment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV/29, pp.97-118.
3. Hassan, A. F., Sozen, M. A. (1997). Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes, ACI Structural Journal, 94:(1), 31-39.
4. Yakut, A. Özcebe, G., Yüçemen, M.S. (2006). Seismic Vulnerability Assessment Using Regional Empirical Data, Earthquake Engng Struct. Dyn., 35:1187-1202.

5. NZSEE/MBIE. 2016a. The Seismic Assessment of Existing Buildings Technical Guidelines for Engineering Assessments. Part A : Assessment Objectives and Principles. semi-final draft 10 October 2016. New Zealand.
6. NZSEE/MBIE. 2016b. The Seismic Assessment of Existing Buildings Technical Guidelines for Engineering Assessments. Part B – Initial Seismic Assessment. semi-final draft 10 October 2016. New Zealand.
7. NZSEE/MBIE. 2016c. The Seismic Assessment of Existing Buildings Technical Guidelines for Engineering Assessments. Part C: Detailed Seismic Assessment. semi-final draft 10 October 2016. New Zealand.
8. Nederlands Normalisatie Instituut (NEN), NPR 9998:2018. Assessment of structural safety of buildings in case of erection, reconstruction and disapproval – Induced earthquakes - Basis of design, actions and resistances (2018) (in Dutch).
9. Gentile, R., del Vecchio, C., Pampanin, S., Raffaele, D., & Uva, G. (2021). Refinement and validation of the simple lateral mechanism analysis (SLaMA) procedure for RC frames. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(7), 1227-1255.
10. Baran, T., Özçelik, Ö., Mısır, İ.S., Girgin, S.C., Kahraman, S. (2018). Seismic Resilience Challenge for Izmir: Pilot Project for Seismic Risks of Existing Buildings. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Selanik.
11. Del Vecchio, C., Gentile, R., Di Ludovico, M., Uva, G., & Pampanin, S. (2020). Implementation and validation of the simple lateral mechanism analysis (SLaMA) for the seismic performance assessment of a damaged case study building. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(11), 1771-1802.
12. Del Vecchio, C., Gentile, R., & Pampanin, S. (2017). The Simple Lateral Mechanism Analysis (SLaMA) for the seismic performance assessment of a case study building damaged in the 2011 Christchurch earthquake.
13. Carr, A. (2009). Ruaukoko 2D, nonlinear FEM computer program. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
14. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE), (2019). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
15. Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, (2018), Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Ankara.
16. AFAD, (2018), Türkiye Deprem Tehlike Haritası, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> [Erişim 06 Ocak 2020].
17. MBIE (2), 2017, The Seismic Assessment of Existing Buildings, Technical Guidelines for Engineering Assessments Assessment Objectives and Principles Part A, Ministry of Business Innovation and Employment, The New Zealand Government, pages A3-A8.
18. Fox, M. J., Westeneng, B. A., Muir, C. A., Baird, A. C., Kam, W. Y., Beazley, P. L., ... & Sharpe, R. D. Simple Lateral Mechanism Analysis (SLAMA) for the Seismic Assessment of Unreinforced Masonry Structures.
19. Montejo, L. A., & Kowalsky, M. J. (2007). CUMBIA: set of codes for the analysis of reinforced concrete members—theory and user's guide. CFL Technical Rep. No. IS-07. Raleigh, NC: North Carolina State Univ.
20. Prota, Prota Structure. [Online]. (2020). Available: [https://www.protasoftware.com/documents/protastructure\\_2019\\_brochure.pdf](https://www.protasoftware.com/documents/protastructure_2019_brochure.pdf)



## Küresel Depolama Tanklarının Yakın Fay Yer Hareketlerinde Sismik Davranışları

Sezer ÖZTÜRK<sup>1</sup>, Ali SARI<sup>2</sup>

### ÖZET

*Bu çalışmada, farklı endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılan küresel basınçlı tankların sismik performansları yakın-fay deprem yer hareketleri etkisinde sayısal olarak incelenmiştir. Yakın-fay yer hareketleri bir fay kırığı yüzeyi civarındaki bölgede kaydedilen yer hareketleri olarak nitelendirilmektedir. Fay kırığına yakın olan bu yer hareketleri, sismik kaynaktan uzakta olan yer hareketlerinden önemli ölçüde farklılıklar gösterebilmektedir. Çalışmada ileri yönelim ve sıçrama adımı etkilerinin gözlemlendiği yer hareketleri seçilmiş ve küresel depolama tanklarının sismik davranışları üzerindeki etkileri kurulan sonlu eleman modelinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri aracılığıyla incelenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Küresel tank, yakın fay etkileri, ileri yönelim, sıçrama adımı, sonlu eleman analizi.

### ABSTRACT

#### *Seismic Behavior of Spherical Storage Tanks in Near-Fault Ground Motions*

*In this study, the seismic performances of spherical pressure tanks, which are widely used in different industrial sectors, were numerically investigated under the near-fault earthquake ground motions effects. Near-fault ground motions are characterized as ground motions recorded in the region around a fault rupture surface. These ground motions close to the fault rupture may differ significantly from ground motions away from the seismic source. In the study, ground motions, in which forward directivity and fling step effects are observed, were selected and the effects on the seismic behavior of spherical storage tanks were investigated through nonlinear time history analysis of the established finite element model.*

**Keywords:** Spherical tank, near-fault effects, forward directivity, fling-step, finite element analysis.

---

1 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul - sezer.ozturk@fsm.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - asari@itu.edu.tr

## GİRİŞ

Depolama tankları kullanım amaçlarına göre atmosferik veya basınçlı tank olarak tasarlanıp imal edilirler. Basınçlı kaplar, dış ortamdan farklı bir basınçta gaz veya sıvı depolamak üzere tasarlanmış kapalı yapılardır. Basınç altında büyük hacimlerde sıvı veya gaz depolama ihtiyacı, küresel tankların kullanılmasına yol açar. Bu tanklar özellikle petrokimya, gübre üretimi, sıvı gaz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Depremler her yapıda olduğu gibi bu tür yapılarda da önemli bir tehlike teşkil etmektedir. Aşırı basınç ve sıcaklık farkı, tehlikeli ve birçok ölümcül kazaya neden olacak patlamalara neden olabilir. Geçmiş depremlerde depolama tanklarında meydana gelen yangın ve patlama olayları çevresel, ekonomik, sosyal açıdan büyük hasarlara sebep olmuştur. Küresel tanklarda sismik etkilerin tetiklediği yangın ve patlamalar ile domino etkisi adı verilen olayların meydana gelmesi çok büyük tehlike arz etmektedir. Bu nedenle, bu kaplar domino etkilerine karşı yeterli güvenliğe sahip olarak tasarlanmalıdır. 1952 Kern County depreminde Paloma tesisinde iki küresel tankta kolonlar arası çapraz çubuk elemanlarda göçme ve boru sisteminde kırılmalar meydana gelmiştir [1]. 1991 Costa Rica [2] depreminde bir küresel tank tamamıyla göçmüştür. 2001 Bhuj, Hindistan depreminde [3] birkaç tankta kolonlar arası çapraz çubuklarda göçme meydana gelmiştir. Japonya'da 2007 yılında meydana gelen Kashiwazaki [4] depreminde küresel tank ankraj bloklarında kesme etkisi sebebiyle kopma meydana gelmiş ve tankın mesnetlendiği kolonlardan kaydığı gözlenmiştir. Verilen örneklerden anlaşılacağı gibi çeşitli depremler etkisinde küresel tanklarda farklı hasar tipleri gözlenmiştir. Bunların arasında çapraz çubukların kopması, boru sisteminde hasarlar, ankraj elemanlarının hasar görmesi ve göçmesi, tank duvarının oturduğu kolonların alt ve üst uçlarında meydana gelen plastik şekil değiştirmeler, kaynak dikişlerinin kopması gibi farklı hasar türleri bulunmaktadır. Ayrıca 2011 Tohoku depreminde Chiba eyaletinde LPG tanklarında meydana gelen hasarların ardından yangın ve patlamalar meydana gelmiş (Şekil 1) ve bu durumun çevreye ve ekonomiye büyük zararları olmuştur [5].



**Şekil 1** - Chiba rafinerisinde deprem sebebiyle meydana gelen yangın ve patlamalarda etkilenen tanklar [6]

Tüm bu sebeplerle bu tür yapıların depremler sırasında ve depremler sonrasında ortaya çıkabilecek domino etkilerine karşı yeterli güvenliğe tasarlanıp imal edilmeleri gerekmektedir. Bunun sağlanması da detaylı bir risk analizi aracılığıyla gerçekleşir. Risk analizi deterministik veya olasılıksal yollarla gerçekleştirilebilir. Deterministik yaklaşımda tek bir senaryo, tek bir deprem büyüklüğü ve kaynak-saha mesafesi seçilip diğer parametreler bunlara göre belirlenir. Olasılıksal yaklaşımda ise birçok deprem senaryosu, deprem büyüklüğü ve mesafe söz konusudur. Bu sebeple literatürde hasar tespitinde daha güvenilir sonuçlar elde etmek için deprem risk analizlerinin olasılıksal yaklaşımla gerçekleştirilmesi önerilmektedir [7]. Bu doğrultuda

yapıların olasılıksal deprem davranışını ifade eden kırılma eğrileri oluşturulmaya çalışılır. Kırılma eğrileri yoluyla da hasar analizlerinde daha güvenilir sonuçların elde edildiği bilinmektedir. Kırılma eğrileri, deprem etkisinde, yapıda belirli bir hasar seviyesine ulaşılması veya bu seviyenin aşılması olasılığının temsil edildiği eğrilerdir. Bu bilgilerin ışığında, bu çalışmada birçok küresel depolama tankı için ABAQUS [8] programı ile sonlu eleman modelleri kurulmuş, farklı yer hareketleri etkisinde doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem ivme kayıtlarının seçiminde ise yakın-fay etkilerini içeren (ileri yönelim, sıçrama adımı) ve bu etkilerin bulunmadığı uzak-fay kayıtları göz önüne alınarak geniş bir ivme kaydı veri tabanı oluşturulmuştur.

## AMAÇ

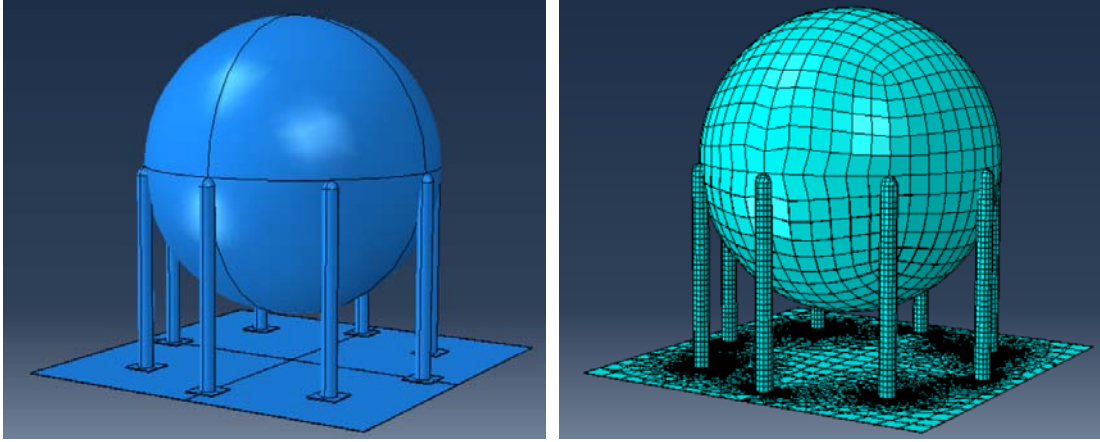
Yapıların deprem risk analizlerinde olasılıksal yaklaşım sonucu kırılma eğrileri oluşturulmaktadır. Kırılma eğrileri belirli bir yer hareketi şiddet ölçütü ile yapıda oluşan hasarın belirli bir düzeye ulaşma veya bu seviyeyi aşma olasılığını ifade eder. Kırılma eğrileri analizleri bu yapıların muhtemel depremler karşısında taşıdığı genel riskin hesaplanması ve sonraki zamanlardaki depremlerin ekonomik etkilerinin tahmin edilmesi bakımından son derece önemlidir. Söz konusu kırılma eğrileri veya kırılma fonksiyonları, depremler karşısında yapılacak acil durum müdahaleleri ve felaket planları açısından önemlidir. Ayrıca bir deprem senaryosu etkisinde yapıdaki genel hasar ve zararın tahmini olarak hesaplanması amacı ile sigorta şirketleri için de faydalı olmaktadır. Ek olarak güçlendirme planlamalarının yapılabilmesi ve yeni yapıların tasarımı için deprem yönetmeliklerinin güncellenmesi ile riskin azaltılması amacıyla da kullanılabilirler. Bu sebeplerle bu çalışmada, birçok sektörde aktif olarak kullanılan sıvı veya gaz küresel depolama tanklarının sismik performansları gerçekleştirilen sayısal analizlerle gerçekleştirilmiştir. Ardından bu tür tanklar için belirlenen hasar sınıfları aracılığıyla risk analizi sonucu kırılma eğrileri elde edilmiştir. Yukarıda geçmiş deprem olaylarından bahsedildiği gibi tank yapılarının da hasarlar gördüğü ve içlerindeki yanıcı ve patlayıcı maddenin dışarı sızmasıyla oluşabilecek yangın ve patlamaların önlenmesinin büyük önem taşıdığı vurgulanmalıdır. Bu sebeple bu çalışmada küresel tank yapılarının farklı özelliklere sahip depremler etkisinde sismik davranışlarının tahmin edilmesi ve hasar analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

## VERİLER

Yapıların deprem davranışlarının değerlendirilmesinde genelde üç farklı yaklaşımdan bahsedilir. Bunlar depremlerden sonra saha incelemeleri, laboratuvar deneyleri ve analitik çalışmalar olarak belirtilebilir. En gerçekçi inceleme yöntemi depremlerden sonra yapılan saha incelemeleridir. Ancak elde edilen sonuçlar, meydana gelen deprem, mevcut yapı ve zemin koşullarına özgüdür. Laboratuvar deneyleri de yapıların deprem davranışı ve kapasitesini belirlemede etkilidir. Ancak tam veya küçük ölçekli deney düzeneklerinin kurulması ve gerçek zamanlı veya düşük hızlı deneylerin gerçekleştirilmesi ekonomik açıdan çok sıklıkla mümkün olmayabilir. Bu sebeplerle yapıların deprem davranışlarının incelenmesinde matematiksel modellerin kurulup sayısal analizlerinin gerçekleştirilmesi de yaygınca kullanılan yöntemlerdendir. Bu çalışmada küresel depolama tanklarının geçmiş depremlerden elde edilen hasar verileri toplanmıştır. Gözlemlere dayalı veriler çok sayıda ve detaylı olmadığı için sonlu eleman analizleriyle veriler genişletilmiş ve bu tür tankların yakın-fay ve uzak-fay yer hareketlerinde deprem performansları incelenmiştir. Kurulan model ve oluşturulan sonlu eleman ağı Şekil 2’de gösterilmiştir.

Kurulan modelde küresel tank duvarı 8 adet, 8 m yüksekliğinde, 64 cm çapında dairesel kesitli çelik kolonlar üzerine oturtulmuştur. Tank küresinin çapı ise 12 m olarak göz önüne alınmıştır. Bu boyutlar ve kolon sayıları uygulamadaki tank yapılarının boyutlarına benzer şekilde göz önüne alınmıştır. Her bir kolon, altındaki kare kesitli plakalara oturtulmuş ve bu plakaların her biri de

dört adet ankraj bulonu aracılığıyla en alttaki büyük rijit plakaya bağlanmıştır. Kolon ve bulonlar için ayrı ayrı doğrusal olmayan malzeme özellikleri programa tanımlanmıştır. Çelik malzemesinin elastisite modülü  $200000 \text{ MPa}$ , poisson oranı ise  $0.3$  olarak göz önüne alınmıştır. Kolonlarda akma gerilmesi  $260 \text{ MPa}$ , kopma gerilmesi  $500 \text{ MPa}$ , kopma birim şekil değiştirmesi ise  $0.1$  olarak göz önüne alınmıştır. Bulonlar için ise akma gerilmesi  $640 \text{ MPa}$ , kopma gerilmesi  $800 \text{ MPa}$ , kopma şekil değiştirmesi ise  $0.2$  olarak göz önüne alınmıştır. Modelde sıvı seviyesi %90 olarak göz önüne alınmıştır. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde sıvı-yapı etkileşimi de göz önüne alınmıştır. Sıvı seviyesinin uygulamadaki yaklaşım gibi yüksek olmasından dolayı bu tür tanklarda çalkalanma etkisi silindirik tanklara göre nispeten daha etkisizdir. Bu sebeple sıvı kütlesi bu yaklaşımda Lagrangian olarak modellenmiştir. Lagrangian olarak modellenen elemanlarda analizlerde sonlu eleman ağında yüksek deformasyon sebebiyle bozulmalar meydana gelebildiği için modelde uyarlamalı ağ (adaptive mesh) komutu kullanılmıştır.



**Şekil 2 - Kurulan tank modeli ve sonlu eleman ağı**

Küresel tank modelinin sorunsuz çalıştırılmasından sonra detaylı ve kapsamlı biçimde yapılması planlanan sonlu elemanlar yöntemine dayalı sıvı-yapı etkileşiminin de göz önüne alındığı zaman tanım alanında analizlerin yapılabilmesi için deprem ivme kayıtlarının uygun ve gerçekçi biçimde seçilebilmesi gerekmektedir. Bunun için literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Kayıt seçimi ile ilgili yapılan araştırmalarda incelenen ana çalışma Katsanos ve diğ. (2010) yayınıdır [9]. Bu çalışmada yapıların dinamik analizinde kullanılacak kayıtların seçimi ile ilgili etkili olan parametreler incelenmiş, mevcut deprem yönetmeliklerinin gözlemlenen durumlara karşı basit kaldığı, kayıt seçimlerinde belirsizlikler ve zorlukların olduğu ifade edilmiştir. Çalışmadaki amaç deprem kaydı seçimi ve ölçeklemedeki teorik arka planı incelemek, bu işlemlerin analiz ve tasarımdaki etkisini düşünmek, bu konudaki yöntemleri sunmak ve yönetmeliklerin konuyu ele alış şeklini irdelemektir. Kayıtların dinamik analizde kullanılmasında beklenen deprem senaryoları karşılanmalıdır. Deprem tehlike değerlendirilmesi yoluyla da (deterministik veya olasılıksal) deprem senaryoları üretilir. Deterministik tehlike değerlendirmesi sonucunda belirli bir alandaki en büyük yer hareketi genliğini veren büyüklük (M)-mesafe (R) kombinasyonu elde edilmiş olur. Olasılıksal sismik değerlendirme yoluyla ise seçilmiş olan bir kayıt ailesi ile spektral uyumunun sağlanması için sahaya özgü üniform bir tehlike tepki spektrumu elde edilebilir. Olasılıksal sismik tehlike değerlendirmesi sonuçlarıyla uyumlu bir deprem bulmak için hesaplanmış değerlendirmenin ayrıştırılması (deaggregation) ile M-R-ε setleri belirlenebilir (ε; yer hareketi sapması). Sonuç olarak kayıt seçimi ve ölçeklenmesi için sismik tehlike analizi sonuçlarına ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Daha sonra çalışmada deprem ivme kayıtlarının seçiminde dikkat edilmesi gereken parametrelerle ilgili literatür çalışmaları sunulmuş ve çıkarımlar yapılmıştır. Bu doğrultuda M-R, zemin durumu, depremin süresi (duration), jeofiziksel/sismolojik yapı, PGA/PGV oranı gibi parametrelerin kayıt seçimindeki rolleri ve



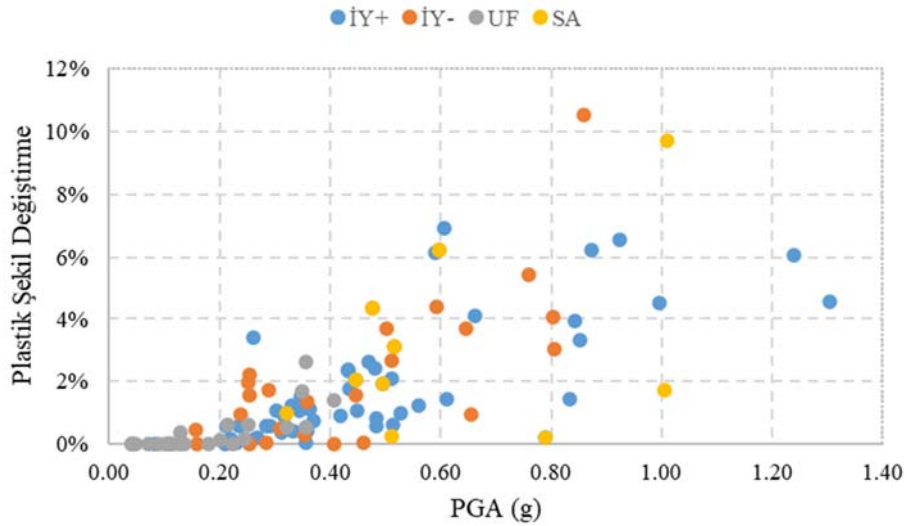
etkileri detaylı olarak anlatılmıştır. Sözü edilen yayında kayıt seçiminde M-R etkisinin etkisine bakılan diğer yayınlardan da bahsedilmiştir. Örneğin, Bommer ve Acevedo (2004), Stewart ve diğ. (2001) [10, 11] ve diğer farklı yazarların yayınlarında deprem büyüklüğünün kayıt seçiminde en azından başlangıç için önemli bir parametre olduğu ifade edilmiş, ancak kaynak ile saha arasındaki en yakın mesafenin etkisine bakılmamıştır. Eğer büyüklük ile ilgili göz önüne alınacak değerler dar bir aralıkta tutulursa,  $\pm 0.20$  veya  $\pm 0.25$  Mw gibi, mesafe değerlerinin daha geniş bir aralıkta alınmasıyla etkisinin incelenebileceği vurgulanmıştır. Bu konuyla ilgili diğer bir detaylı çalışmanın Iervolino ve Cornell (2005) [12] tarafından gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Çalışmada deprem ivme kayıtları iki grupta farklı kriterler göz önüne alınarak seçilmiştir. İlki belirli bir büyüklük-mesafe senaryosunu temsil eden dikkatli biçimde seçilmiş “hedef set” olarak, ikinci grup ise geniş bir kayıt kataloğundan bir sınırlama olmadan seçilen “keyfi set” olarak ifade edilmiştir. Hedef setteki kayıtlar yüksek büyüklük ve düşük mesafe değerleri göz önüne alınarak seçilmiştir. Potansiyel yönelim etkilerinden (directivity) kaçınmak için R mesafesi 15 km’ den yüksek değerlere sahip kayıtlar seçilmiştir. İki gruptaki kayıtların her biri göz önüne alınan yapıların ilk mod periyoduna tekabül eden spektral ivmelerinin medyan değerine ölçeklenmiş ve bu işlemin sonuçlardaki farklılığı azalttığı ve güçlü bir istatistiksel test sağladığı ifade edilmiştir. Çalışmada iki set ile de doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve iki grupta ayrılan kayıt setlerinden elde edilen sonuç tepkilerin medyan değerleri kıyaslanmış ve önemli derecede farkın olmadığı belirtilmiştir. Sonuç olarak kayıt seçiminde M ve R parametrelerinin dikkate alınmasına dayalı kriterin yapısal tepkilerin değişiminde üstün bir kriter olmadığı belirtilmiştir. Katsanos ve diğ. (2010) [9] yayınında kaynak olarak gösterilen bir diğer çalışma olan Shome ve diğ. (1998) makalesinde [13] de M-R çiftine göre kayıt seçiminin şekil değiştirmeye dayalı hasar endekslerinin hesabında etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak enerji bazlı hasar endeksleri için bunun doğru olmadığı belirtilmiştir.

Sayısal çalışmalar için gereken deprem kayıtlarının seçimini etkileyen parametreler ile ilgili örnekleri literatürden çoğaltmak mümkündür [9, 14, 15]. Ancak bu çalışmada belirli bir sahaya özgü tank yapısının deprem davranışı incelenmeyip genel bir inceleme yapılması amaçlandığı için kayıt seçiminde belirli bir büyüklükten yüksek büyüklüğe sahip, farklı fay kırılması türlerinde, farklı zemin koşulları barındıran kayıtlar dikkate alınmıştır. Burada göz önüne alınan farklılık ise kayıtların kaynaktan sahaya olan R mesafesidir. Yakın-fay etkileri içeren kayıtlarda bu mesafe genelde 20-25 km’nin altında kabul edilmektedir [16, 17]. Yakın-fay yer hareketleri bir fay kırığı yüzeyi etrafındaki bölgede kaydedilmiş olan yer hareketleri olarak tanımlanmaktadır [18, 19]. Fay kırığına yakın olan bu hareketler, sismik kaynaktan uzakta olan yer hareketlerinden göz ardı edilemeyecek farklılıklar gösterebilmektedir [11]. Yakın-fay bölgesindeki yer hareketleri; fay kırığı mekanizması, fay kırığı geometrisi, sismik dalgaların ilerleme yönü, fay kaymasından oluşan muhtemel kalıcı zemin yer değiştirmeleri gibi parametrelerden etkilenir ve yönelim ve sıçrama adımı etkileri ortaya çıkar. Yönelim etkileri olarak da genelde mühendislik yapıları açısından daha fazla önem arz etmesi sebebiyle ileri yönelim etkileri göz önüne alınır. İleri yönelim etkisi, fay kırığının bir bölgeye doğru ilerlemesi ve fay üzerindeki kaymanın da aynı bölgeye doğru gerçekleşmesi durumunda oluşur [20] ve faya dik doğrultuda, uzun periyotlu ve büyük genlikli yatay yer hareketleri olan yönelim pulsarı meydana gelir. Diğer yakın fay etkisi ise sıçrama adımıdır. Fay kırığı mekanizması ile ilgili tektonik deformasyonlardan kaynaklanan kalıcı zemin yer değiştirmelerinin bir sonucudur ve genelde tek yönlü olup büyük genlikli bir hız pulsı ve yer değiştirme – zaman ilişkisinde belirgin bir yer değiştirme adımı ile karakterize edilirler [11, 21]. Sıçrama adımı etkileri de puls içeren hareketlere sebep olurlar; ancak bu etkilerin sebep olduğu pulsar, ileri-yönelim etkilerinin sebep olduğu yönelim pulslarından farklıdır. İleri-yönelim etkileri, kalıcı deformasyon oluşturmayan iki yönlü hız pulsarı oluştururken; kalıcı, zemin deplasmanlarının sonucu olan sıçrama adımı etkisinde ise, kalıcı deformasyonlara neden olan tek yönlü hız pulsarı oluşur [16]. Çalışmada yakın-fay, uzak-fay kayıtları incelenerek geniş bir veri tabanı oluşturulmuş ve analizler bu kayıtlara göre gerçekleştirilmiştir [16, 17, 22]. Söz konusu deprem kaydı verilerinden ileri yönelim etkisi içeren

kayıtlar 49 adet, ileri yönelim etkisi içermeyen kayıtlar 26 adet, uzak-fay etkileri içeren kayıtlar 25 adet, sıçrama adımı etkisi içerenler ise 10 adet olarak göz önüne alınmıştır.

## ANALİZLER

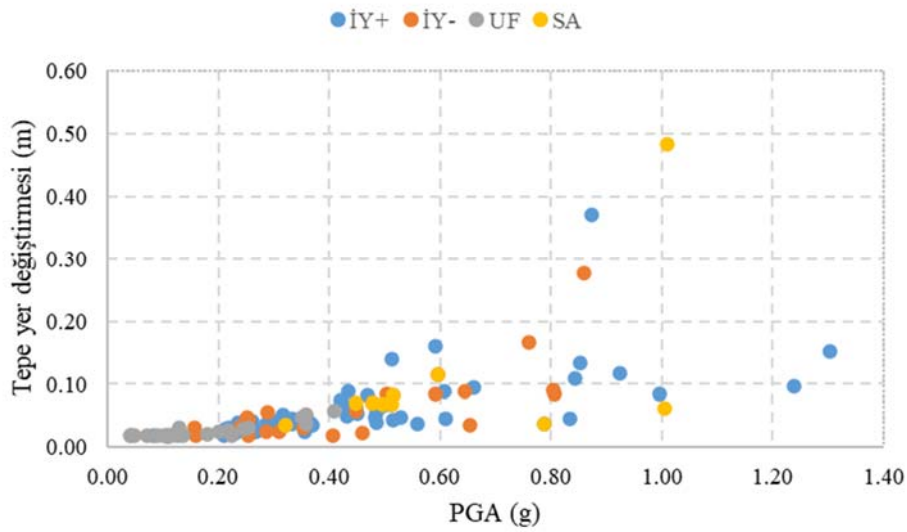
Çalışmada göz önüne alınan küresel depolama tankı modeli için yukarıda verilen çeşitli kaynaklardan derlenen ivme kayıtları ile zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Tablolardan da görüldüğü gibi yakın fay bölgesinde kaydedilen ileri yönelim etkisi bulunan kayıtlar, ileri yönelim etkisi bulunmayan kayıtlar, uzak fay bölgesinde kaydedilen kayıtlar ve yine yakın fay bölgesinde sıçrama adımı etkisi bulunan kayıtlar olmak üzere toplamda 110 deprem ivme kaydı ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir. Analizler sonucunda tank modelinden elde edilen **Von Mises eşdeğer** plastik şekil değiştirme (**equivalent plastic strain, PEEQ**) miktarlarının göz önüne alınan depremin en büyük yer ivmesi değeri ile olan ilişkisi Şekil 3'te verilmiştir. Grafikte “İY+” ile ifade edilen veriler, ileri yönelim etkisinin bulunduğu yakın fay kayıtlarından, “İY-” ile ifade edilen veriler, ileri yönelim etkisinin bulunmadığı yakın fay kayıtlarından, “UF” ile gösterilen veriler, uzak fay kayıtlarından ve “SA” ile belirtilen veriler, sıçrama adımı etkisinin bulunduğu kayıtlardan gelen sonuçları göstermektedir. Aynı şekilde en büyük yer ivmesi ile tank tepe noktasının tabana göre göreceli yer değiştirmesi arasındaki ilişki de Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu grafiklerden de görülebileceği gibi küresel depolama tankı modelinde meydana gelen kalıcı şekil değiştirme ve tepe yer değiştirme değerlerinin şiddeti genel olarak depremlerin PGA değerleri arttıkça yükselmektedir. İlk etapta yakın fay yer hareketleri ile yapılan analizlerde oluşan değerlerin uzak fay bölgesindeki kayıtlarla yapılan analiz sonucu oluşan değerlere göre çok daha yüksek oldukları anlaşılmıştır. Küresel tank yapılarında kritik hasar modları arasında kolonların alt ve üst uçlarının plastikleşmesi, kaynak dikişlerinin yırtılması, bulonlarda kesme hasarları örnek olarak gösterilebilir. Kaynaklı birleşimlerde plastik şekil değiştirme oranının doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde %5'i aşmaması gerektiği önerilmiştir [23]. Bu çalışmada da bu değer üst sınır olarak kabul edilmiştir. Hasar seviyesi derecelendirilirken bu değer en üst seviye olarak göz önüne alınmıştır.



Şekil 3 - Plastik şekil değiştirme-PGA ilişkisi

Ayrıca sonlu eleman analizlerinden bu sonuçlar elde edildikten sonra olasılıksal deprem risk analizlerinin bir çıktısı olarak kırılgenlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te örnek olarak

DS2 (DS: damage state) hasar sınıfı için bu eğri elde edilmiştir. Kırılma analizinin gerçekleştirilmesinde lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır [24]. Kırılma hesabına geçilmeden önce tank yapısı ile ilgili hasar sınıfları tanımlanmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi plastik şekil değiştirme miktarının %5'i aşması ile kaynak dikişlerinin kopması, kolon-küre bağlantısının ortadan kalkması, ankraj bölgesinde hasarın artması durumlarının gerçekleşebileceği düşünülmektedir [23]. Bu düşünce ile hasar sınıflandırmasında %1'in altında kalan plastik şekil değiştirmelerin DS1 sınıfına, %1 ile %2 arasında kalan plastik şekil değiştirmelerin DS2 sınıfına atanması gerektiği düşünülmüştür. Ardından plastik şekil değiştirme değeri arttığında kademeli olarak daha yüksek hasar sınıflarına atama yapılır. Çalışmada 110 analiz gerçekleştirilmiş ve her analiz sonucundaki tank hasar durumu plastik şekil değiştirme değerine göre belirlenmiştir. Deprem risk değerlendirilmesinde yer hareketi şiddet ölçütü olarak PGA değeri yaygınca kullanılmaktadır ve bu çalışmada da göz önüne alınmıştır. Kırılma eğrisinin türetilmesinde kullanılan lojistik regresyon modeli Denklem 1'de sunulmuştur.



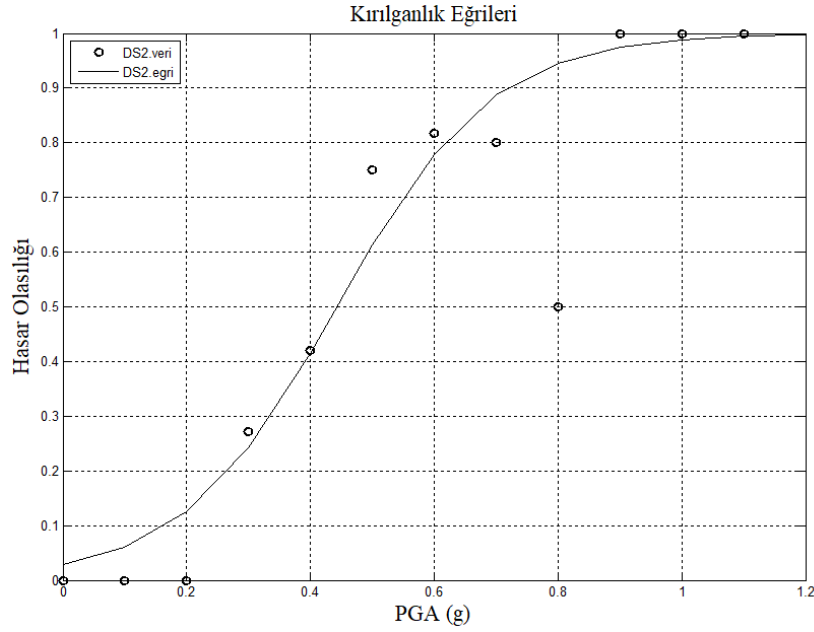
Şekil 4 - Tepe yer değiştirmesi-PGA ilişkisi

$$\pi(x) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}} \quad (1)$$

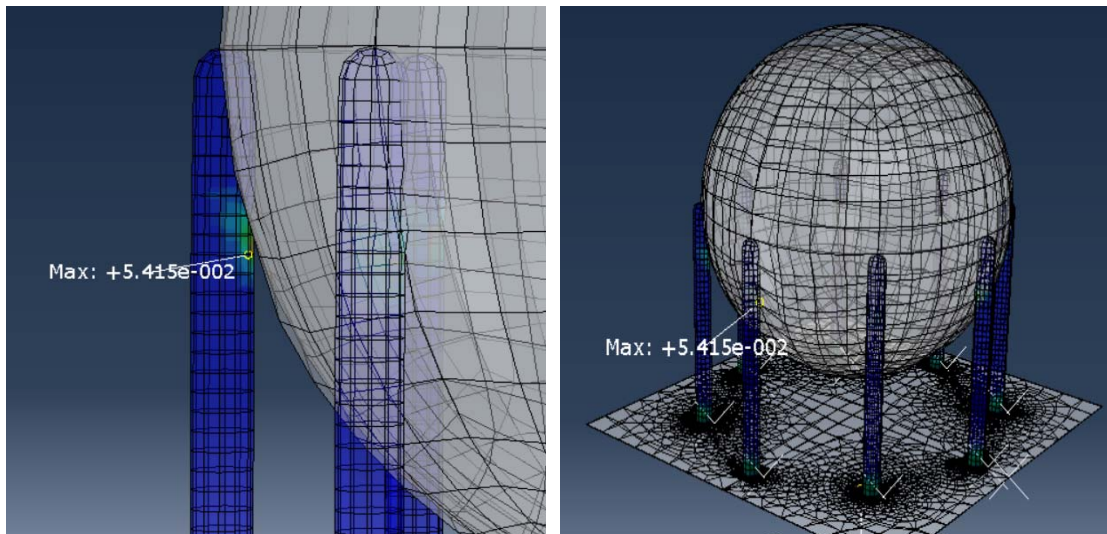
Lojistik regresyon modelinin belirli bir veri kümesine uygun hale getirilmesi için  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  katsayılarının tahmin edilmesi gerekir. Maksimum olabilirlik yöntemi bu yaklaşımda yaygınca kullanılan bir yöntemdir [25]. Bu yöntem gözlemlenen veri kümesini elde etme olasılığını en yüksek seviyeye çıkaran bilinmeyen parametrelerin elde edilmesi için kullanılır. Bunun için bir olasılık fonksiyonu oluşturulur. Bu fonksiyon bilinmeyen parametrelere bağlı olarak gözlenmiş veri olasılığını ifade eder. " $\pi(x)$ "; belirli bir " $x$ " değeri için " $Y=1$ " durumunu sağlayan koşullu olasılıktır ve " $P(Y=1|x)$ " ile ifade edilir. " $1 - \pi(x)$ " ise belirli bir " $x$ " değeri için " $Y=0$ " durumunu gerçekleyen koşullu olasılıktır ve " $P(Y=0|x)$ " ile gösterilir. Bu şekilde  $(x_i, y_i)$  ikililerinin olasılık fonksiyonuna katkısı Denklem 2'de verilmiştir.

$$l(\beta_0, \beta_1) = \prod_{i=1}^n \pi(x_i)^{y_i} [1 - \pi(x_i)]^{1-y_i} \quad (2)$$

Yapılan çalışmada da 110 analiz sonucunda ortaya çıkan hasar verileri, herhangi bir hasar sınıfı için bu sınıfa ulaşıldığında  $Y=1$ , ulaşılmadığında ise  $Y=0$  durumu sağlanacak şekilde gruplara ayrılmıştır. Ayrıca PGA değerleri de 0.1g aralıklarla gruplandırılmıştır. Her bir aralık için ilgili hasar sınıfına ulaşılan tank sayısı, o aralıktaki toplam tank sayısına bölüldüğünde Şekil 5'te de görülen noktasal gözlenme olasılığı değerleri elde edilmiştir. Kırılma eğrisi de bu gözlenme olasılığı değerlerine uyum sağlayacak şekilde türetilmiştir. Maksimum olabilirlik yöntemi ile Denklem 2'deki eşitliği en büyük değerine çıkaran  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  değerlerinin bulunması amaçlanır. Bu ifadenin doğal logaritmasının  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  parametrelerine göre ayrı ayrı türevleri alınıp sıfıra eşitlendiğinde ortaya çıkan denklemler çözüldüğünde bu parametreler hesaplanmış olmaktadır. Denklem 1'de her bir  $x$  (PGA) değeri için bu parametreler de kullanılarak  $\pi(x)$  olasılık değerleri hesaplanmış ve kırılma eğrisi çizilmiştir olur [26].



Şekil 5 - Küresel tanklar için kırılma (hasar olasılık) eğrileri



Şekil 6 - Örnek bir sonlu eleman analizinden plastik şekil değiştirme görüntüsü

DS2 eğrisine bakıldığında PGA değerinin artmasıyla tankların hasar görme olasılıkları arttığı görülmektedir. Tank modelinin farklı deprem ivme kayıtları ile yapılan zaman tanım alanında analizlerinde hangi hasar seviyesinde olduğunun belirlenmesinde modelin davranışı incelenmiş olup meydana gelen plastik şekil değiştirme miktarı göz önüne alınmıştır. Gerçekleştirilen çok sayıda analizden plastik şekil değiştirmelerin tank duvarının oturduğu kolonların alt ve üst uçlarında veya kolonları alt plakaya mesnetleyen bulonlarda meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durumla ilgili bir örnek görüntü Şekil 6'da verilmiştir.

## SONUÇ

Bu çalışmada birçok farklı endüstriyel tesiste sıvı veya gaz maddelerin depolanması üzerine yaygın biçimde kullanılan küresel depolama tanklarının deprem performansları ve kırılganlıkları, kurulan sonlu eleman modeline farklı özelliklerde deprem ivme kayıtlarının etkilmesiyle gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Küresel depolama tanklarının geçmiş depremlerden derlenen gözlemlere dayalı hasar verilerinin yetersiz olmasından kaynaklanan veri eksikliği durumu, gerçekleştirilen sayısal analizler yardımıyla giderilebilmektedir.
- Gerçekleştirilen analitik çalışmalarda tank yapısında meydana gelen plastik şekil değiştirme değerleri, oluşabilecek hasarlarla ilgili fikirler vermektedir. Plastik şekil değiştirme değerlerinin sıfırdan başlanarak %5 oranına doğru küçük artımlarla yükseltilmesiyle hasar seviyeleri oluşturulmuş ve analizlerden elde edilen sonuçlarda bu sınıflandırma göz önüne alınarak hasarın şiddeti belirlenmiştir.
- Ayrıca çalışmada nümerik analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının seçimi üzerine de yoğun bir araştırma yapılmış ve literatürdeki genel kanının kayıtların kaynaktan ne kadar uzaklıktaki bir mesafede kaydedildiği üzerine bir sınıflandırmanın yapılmasının uygun olacağı üzerine olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple yer ivme kayıtları seçilirken R mesafesi göz önüne alınarak yakın-fay ve uzak-fay ivme kayıtları seçimi yapılmıştır. Yakın-fay yer hareketleri için ise ileri yönelim etkisinin bulunduğu, bu etkinin bulunmadığı ve sıçrama adımı etkisinin bulunduğu kayıtlar ayrı ayrı gruplandırılmıştır.
- Yapılan analizler sonucunda tank yapısının yakın fay etkisindeki depremlerde elde edilen sonuçların, uzak fay kayıtları ile elde edilen sonuçlara göre oldukça şiddetli olduğu gözlenmiştir. Bu durum tank yapısında meydana gelen plastik şekil değiştirme ve tepe yer değiştirme değerleri incelendiğinde çok net olarak görülebilmektedir. Bu sebeplerle olası yakın fay depremlerinde tank yapısının daha fazla etkileceği ve buna göre güçlendirme veya tasarım önlemlerinin alınabileceği görülmektedir.
- Gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin sonucunda elde edilen her bir hasar çıktısı, önceden belirlenmiş hasar sınıfına atanmıştır. Buna göre her bir sonuç DS1'den DS5'e kadar bir hasar sınıfına atanıp her bir seviye için ayrı ayrı istatistiksel inceleme ile kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur. Eğrilerin fit edilmesinde lojistik regresyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen eğriden de görüleceği gibi tank yapısında meydana gelen hasarın depremin en büyük ivmesi (PGA) ile uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek PGA değerlerine sahip depremlerde düşük olanlara göre hasar şiddetinin artma olasılığı da artmaktadır.
- Tank yapısının geometrisinin değiştirilmesi, sıvı miktarının farklılaştırılması, yer hareketi şiddet ölçütü için farklı parametrelerin (spektral ivme, spektral hız, en büyük yer hızı değeri vb.) göz önüne alınması ile yapılacak analizler, gelecek çalışmalar olarak hedeflenmektedir.

### **Kaynaklar**

- [1] Cooper, T. W. 1997. A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1933–1995, USA. Gaithersburg, MD/USA: US National Institute of Standards and Technology.
- [2] Mitchell, D., and Tinawi, R. (1992). “Structural damage due to the April 22, 1991, Costa Rican earthquake. Canadian Journal of Civil Engineering”, 19(4), 586–605. <https://doi.org/10.1139/192-069>
- [3] EERI. 2001. Preliminary Observations on the Origin and Effects of the January 26, 2001, Bhuj (Gujarat, India) Earthquake. 16pp. EERI Special Earthquake Report.
- [4] Tang, A. K, P. E., and Schiff, A. J. 2007. Kashiwazaki, Japan Earthquake of July 16, 2007, Lifeline Performance, The American Society of Civil Engineers, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia, 31 October 2007, 308 p.
- [5] Nishi, H. 2012. “Damage on Hazardous Materials Facilities.” Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp. 903-912, Tokyo, Japan, March 1-4, 2012.
- [6] Krausmann, E., and Cruz, A. M. 2013. “Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry” Nat Hazards, Vol. 67: 811-828, DOI 10.1007/s11069-013-0607-0.
- [7] Öztürk, S., Bezir, F., ve Sarı, A. 2019. “Atmosferik Depolama Tankların Deprem Riski ve Kırılabilirlik Eğrileri” 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), 8-11 October 2019, METU Ankara, Turkey.
- [8] Dassault Systemes (2017). Abaqus. Retrieve from <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [9] Katsanos, E. I., Sextos, A. G., and Manolis, G. D. 2010. “Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 157-169, doi: 10.1016/j.soildyn.2009.10.005
- [10] Bommer, J. J., and Acevedo, A. 2004. “The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis.” Journal of Earthquake Engineering, 8(1):43–91, <https://doi.org/10.1080/13632460409350521>.
- [11] Stewart, J. P., Chiou, S. J., Bray, R. W., Graves, P., Somerville, G., and Abrahamson, N. A. 2001. “Ground motion evaluation procedures for performance-based design.” PEER report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [12] Iervolino, I., and Cornell, C. A. 2005. “Record selection for nonlinear seismic analysis of structures.” Earthquake Spectra, 21(3):685–713, DOI: 10.1193/1.1990199.
- [13] Shome, N., and Cornell, C. A. 1998. “Normalized and scaling accelerograms for nonlinear structural analysis.” In: Proceedings of 6th National Conference on Earthquake Engineering. Seattle, WA, 1998.
- [14] Lee, L. H., Lee, H. H., and Han, S. W. 2000. “Method of selecting design earthquake ground motions for tall buildings.” Structural Design of Tall Buildings, 9(3):201–13, DOI: 10.1002/1099-1794(200006)9:3<201: AID-TAL136>3.0.CO;2-Z.
- [15] Bommer, J. J., and Scott, S. G. 2000. “The feasibility of using real accelerograms for seismic design.” In: Elnashai AS, Antoniou S, editors. Implications of recent earthquakes on seismic risk. Imperial College; 2000 [Chapter 9].

- [16] Bray, J., and Rodriguez-Marek, A. 2004. "Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 815-828, DOI: 10.1016/J.SOILDYN.2004.05.001.
- [17] Gazi, H. 2015. "Sismik İzolasyonlu Binaların Deprem Yükleri Altındaki Olasılıksal Davranışı" Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [18] Gibson, N., Filiatrault, A., and Ashford, S.A. 2002. "Performance of beam to column bridge joints subjected to a large velocity pulse" PEER Report 2002/24, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [19] He, W. L., and Agrawal, A. K. 2008. "Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of smart protective systems" *ASCE Journal of Structural Engineering*, 134 (7), 1177-1188, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:7\(1177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1177)).
- [20] Somerville, P. 2003. "Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse" *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137: 1-4, 201-212, [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00015-3).
- [21] Kalkan, E., and Kunnath, S. K. 2006. "Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings" *Earthquake Spectra*, 22(2), 367-390, <https://doi.org/10.1193/1.2192560>.
- [22] Sehhati, R., Rodriguez-Marek, A. ElGawady, M., and Cofer, W. F. 2011. "Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on multi-story structures" *Engineering Structures*, 33 (3), 767-779, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.032>.
- [23] American Petroleum Institute, 2019. "ISO 19901-3:2010 (Modified), Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 3: Topside structure"
- [24] O'Rourke, M. J., and So, P. 2000. "Seismic fragility curves for on-grade steel tanks." *Earthquake Spectra*, 16 (4), 801-815. <https://doi.org/10.1193/1.1586140>.
- [25] Baker, J. W. 2015. "Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis." *Earthquake Spectra*, 31(1), 579-599. DOI: 10.1193/021113EQS025M.
- [26] Bezir, F., Öztürk, S., Sarı, A., and Akgül, K. 2022. "Fragility Analysis of Atmospheric Storage Tanks by Observational and Analytical Data." *International Journal of Steel Structures*, 22, 192-205. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00567-x>.





# Makina Kütle Temellerinin Tasarımı Üzerine Bir Uygulama Çalışması

Mehmet Salih ÖLMEZ<sup>1</sup>, H. Hülya KOSTAK<sup>2</sup>

## ÖZET

Dünya nüfusunun artması ve sanayinin gelişmesi süreci, üretimde kullanılan makineleri her geçen gün daha büyük dinamik yüklere maruz bırakmaktadır. Özellikle geoteknik mühendisliği ve yapısal analiz alanlarındaki gelişmeler sonucunda, artık daha hassas çevresel sınırlandırmaları ve ekonomik yapım maliyetlerini gözeterek daha etkin mühendislik çözümleri yapılabilmektedir. Yapılan bu çalışmanın amacı da bahsedilen kriterlerin sağlanmasını azami ölçüde gözeterek tasarım yapmak ve bir nebze de olsa bu alandaki gelişmelere katkı sunmaktır.

Yapılan bu çalışmada şehire içme suyu temin eden uluslararası bir proje üzerinden örnekleme yapılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Blok Tipi Makina Temeli, Serbest Titresim Analizi, Elastik Yaruzay Yaklaşımı ve Toprak İçine Kısmi Gömülü Temel.

## ABSTRACT

### A Case Study About Designing of Block Foundations

Every passing day, machines used in production are exposed to much bigger dynamic loads because of increase in world population and advancement period of industrialisation. Especially as a result of advancements in geotechnical engineering and structural engineering, more trusted engineering analysis can be done with taking care of much fragile environmental limits and cheaper manufacturing costs. Main purpose of this study is designing the machine foundation systems with taking care of meeting of the criteria and contribute to advancements in this area.

In this study; a case study which is about an international project supplying of water to a city is presented.

**Keywords:** Block Foundations, Free Vibration Analysis, Elastic Halfspace Approach and Foundation Partially Embedded in Soil

---

1 Temelsu A.Ş., Ankara - salih.olmez@temelsu.com.tr

2 Temelsu A.Ş., Ankara - hkostak@temelsu.com.tr

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Problemin Tanımı

Proje Suudi Arabistandaki SWCC (Saline Water Conversation Corporation) kurumu tarafından yaptırılmıştır. Amacı Taif’ deki su pompa istasyonundan Arafat’ a içmesuyu temin etmektir. Proje kapsamında iki farklı bölgede (PS-2E ve PS-3E bölgelerinde) pompa istasyonu tasarlanmıştır. Her pompa istasyonunda bir adet pompa binası yapılmıştır. Her bir pompa binasında toplam sekiz adet 5900 kw gücünde üç fazlı endüksiyon motor bulunmaktadır.



Şekil 1 - Pompa İstasyonu Model Görünüşü

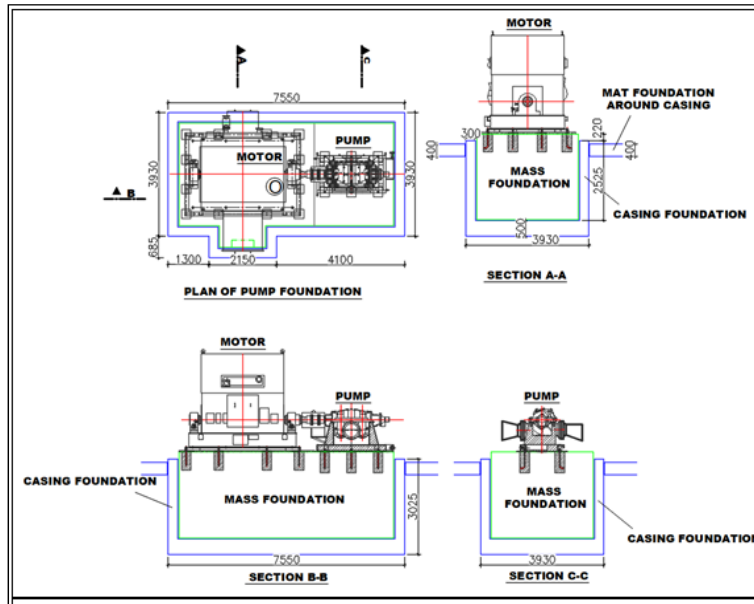
Motorların proje ömrü boyunca güvenle çalışabilmesi için her bir motor birbirinden bağımsız çalışan aynı tip betonarme kütle temellere oturtulmuştur. Bu yapılan çalışmada bahsi geçen tip kütle temelin farklı koşullar altındaki dinamik analizleri yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Makina temel (pump foundation) sistemi, muhafaza temeli (casing foundation) içine kütle temel (mass foundation) uygulaması şeklindedir.



Şekil 2 - İnşaat Yapım Aşamaları-1



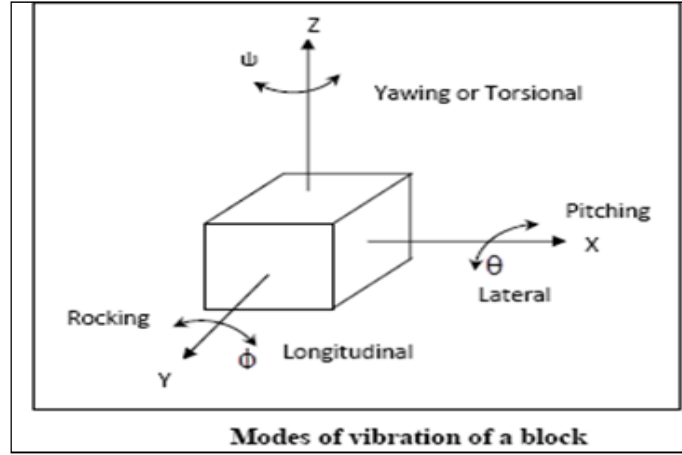
Şekil 3 - İnşaat Yapım Aşamaları-2



Şekil 4 - Temel Sisteminin Boyutları

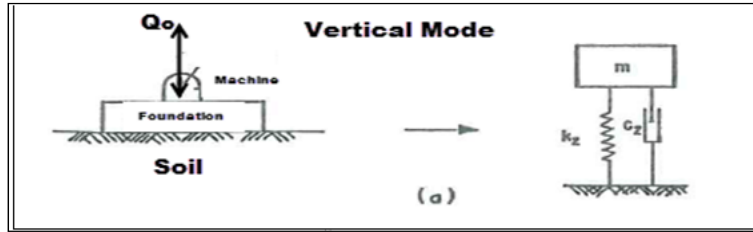
## 1.2. Hesap Metodu

“Elastik Yarıuzay Hesap Yaklaşımı” kullanılarak “Serbest Titreşim Analizi” yapılmıştır. Bu hesap metodu; kütle (blok) temel sisteminin titreşimini, altı farklı mod altındaki davranışa göre analiz etmektedir.



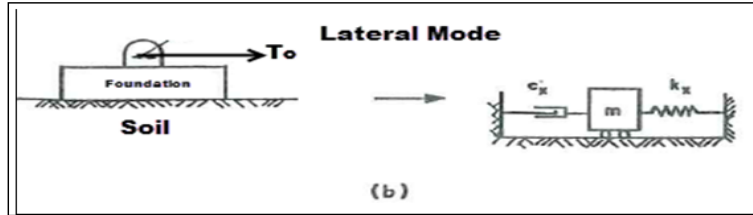
Şekil 5 - Titreşim Modları

- Düşey (Vertical-Z) Mod → (Z-ekseni doğrultusunda),



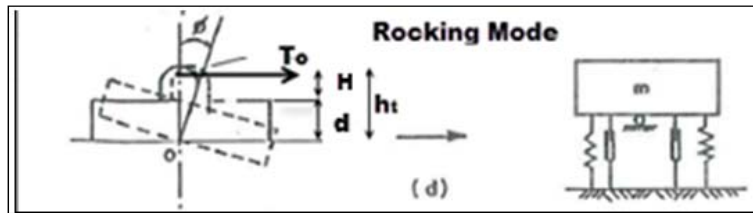
Şekil 6 - Düşey Eksen Hareketi (Özkan, 1994)

- Yatay (Lateral-X & Y) Modları → (X ve Y eksenleri doğrultusunda),



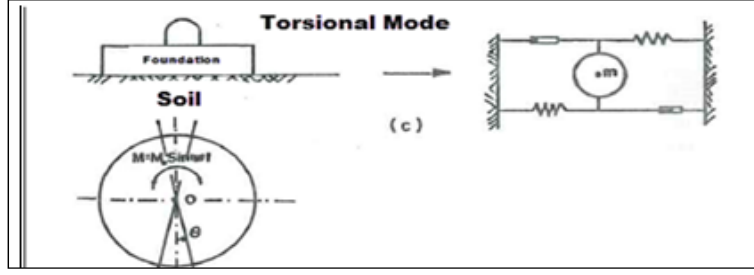
Şekil 7 - Yatay Eksen Hareketi (Özkan, 1994)

- Sallanma (Rocking & Pitching) Modları → (X ve Y eksenleri etrafında)



Şekil 8 - Sallanma Hareketi (Özkan, 1994)

- Burulmalı (Torsional or Yawing) Mod → (Z-ekseni etrafında)



Şekil 9 - Burulmalı Hareketi (Özkan, 1994)

Her bir titreşim modu için ayrı ayrı yapılan analizler sonucunda titreşim genlikleri bulunur. Bu genlik değerleri ve makina işletme hızı birlikte kullanılarak aşağıdaki grafiğe göre deplasman limitlerinin aşılp aşılmadığı kontrol edilir. Eğer limitler aşılyorsa ilave tedbirler (yeniden tasarım, zemin iyileştirme, titreşim sönümleyiciler, v.b..) alınarak limitler sağlanmaya çalışılır. Deplasman limitleri makina üreticisi ve işveren tarafından belirlenir. Bu limitler aynı zamanda projedeki hedeflenen konfor seviyesidir.

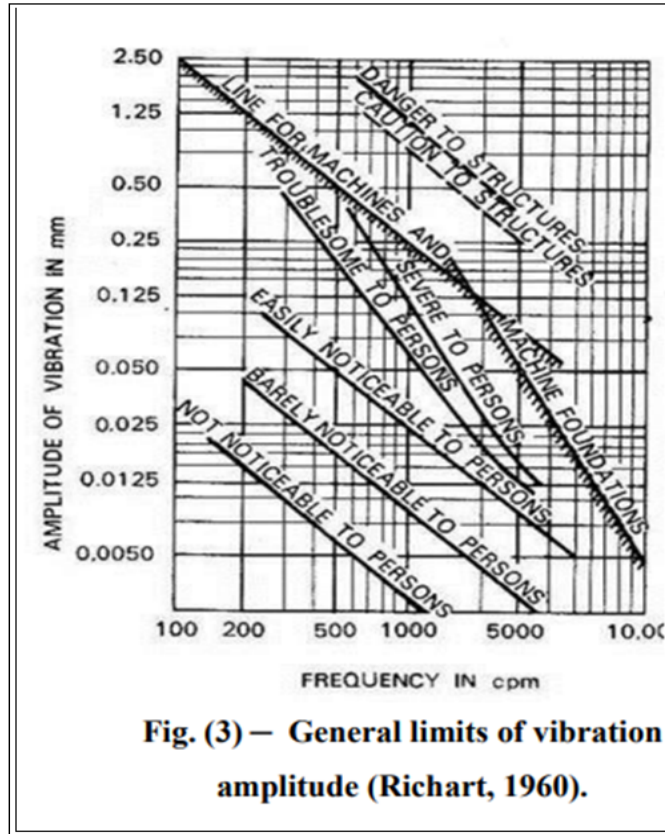


Fig. (3) – General limits of vibration amplitude (Richart, 1960).

Şekil 10 - Titreşim Genlik Limitleri Grafiği

Hesap programı olarak excelde kendi hazırladığımız program kullanılmıştır. Temel sistemi, zemin içine “*gömülü olan*” ve “*gömülü olmayan*” durumlarına göre iki farklı koşul altında analiz edilmiştir. Makina işletme hızı olarak; “*yüksek hız = 3577 cpm*” gözönüne alınmıştır. Tüm bu hesaplamalar, birbirinden farklı zemin özelliklerine sahip olan “*PS-2E ve PS-3E istasyonları*”

için ayrı ayrı yapılmıştır. Her iki duruma göre temel sisteminin titreşim modları ve titreşim genlikleri hesaplanmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

### 1.3. Kullanılan Hesap Programı ve Tanımlar

Programımız, makina temeli tabanında oluşan zemin gerilmeleri kontrolünün yanında, bağlaşıklık modları da gözönüne alarak altı farklı mod için (düşey, yatay, burulma ve sallanma titreşim modları) ayrı ayrı titreşim hesabı yapabilmektedir. Hesaplar sonucunda her bir moda göre temel sisteminin frekans ve deplasman genliklerinin kontrolü yapılabilmektedir.

### 1.4. Analizde Kullanılan Veriler

Bu bölümde; temel sistemine ait veriler, makina bilgileri ve zemin bilgileri sunulmuştur.

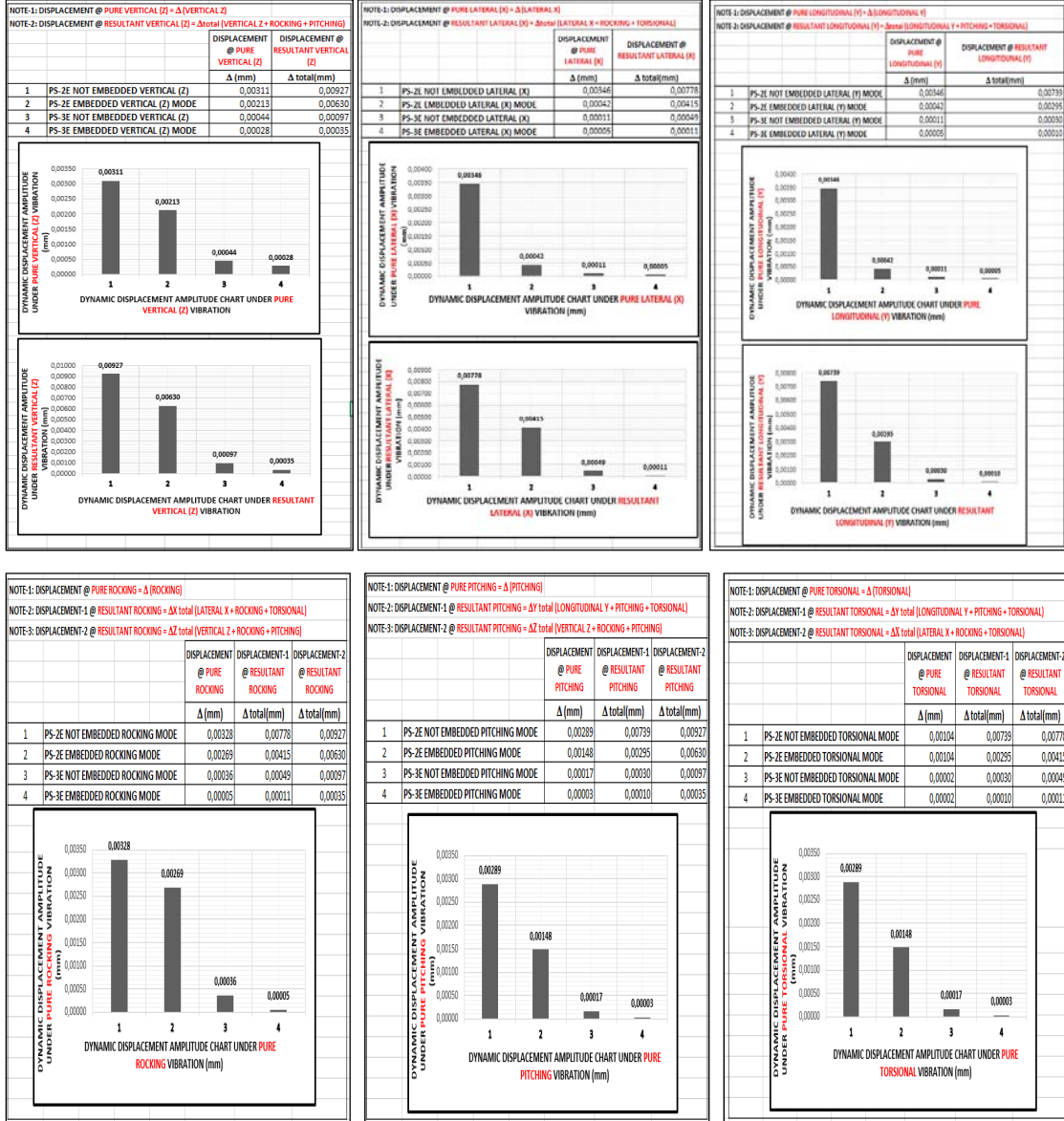
1-) DATA INPUT-1			
B (short side) (m)	3,397	dimension of block mass foundation in parallel to x-axis	
L (long side) (m)	6,870	dimension of block mass foundation in parallel to y-axis	
A <sub>f</sub> (m <sup>2</sup> )	23,34	block mass foundation plan area = B * L = base area	
W <sub>m</sub> (kN)	349,36	total weight of machine (pump + rotor + etc...)	
W <sub>f</sub> (kN)	1.556,59	mass foundation weight ≥ W <sub>machine</sub> * (3) (API-686-6.2/CH.4)	
W <sub>f</sub> above GL (kN)	128,37	weight of block foundation above Ground Level (GL) (kN)	
q <sub>all</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	350,00	allowable net bearing stress of soil	
q <sub>s</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	87,27	soil pressure at statical load case	q <sub>s</sub> / q <sub>all</sub> = 0,249
Existing of Casing Foundation	YES	Need to Control of Embedment Depth Criteria ==> d ≥ (%20 ~ %50)*T	
H = (z <sub>mo</sub> +z <sub>bf</sub> ) - (d+d')	1,910	distance btw CG of machine & top level of GL	
d (m)	2,520	embed. leng. of mass found. into soil (dist. from base of mass found. to GL)	
Q <sub>o</sub> (kN)	75,00	max. occured vertical force during harmonic motion	
T <sub>o1</sub> (kN)	15,00	max. occured lateral force during harmonic motion	
T <sub>o2</sub> (kN)	15,00	max. occured longitudinal force during harmonic motion	
M <sub>ψ</sub> (kN.m)	-7,91	max. occured torsional moment during harmonic motion	-Z direction
I <sub>Φm</sub> (t.m <sup>2</sup> )	0,22	mass moment of inertia of the machine around longitudinal axis	
I <sub>Θm</sub> (t.m <sup>2</sup> )	0,22	mass moment of inertia of the machine around lateral axis	
I <sub>Ψm</sub> (t.m <sup>2</sup> )	0,22	mass moment of inertia of the machine around vertical axis	
X (short side) (m)	4,13	dimension of casing foundation in parallel to x-axis	
Y (long side) (m)	7,55	dimension of casing foundation in parallel to y-axis	
Ab <sub>f</sub> (m <sup>2</sup> )	31,140	casing foundation area	
d' (m)	0,500	slab thickness of casing foundation	
W (motor+base plate+oil unit) (kg)	29.400,00	weight of (motor+base plate+oil unit)	
W (pump+base plate+coupling) (kg)	6.212,50	weight of (pump+base plate+coupling)	
Machine Total Weight (kg)	35.612,50	total weight of machine	
fs (cpm=rpm)	3.577,00	service frequency of machine (cycles per minute = revolutions per minute)	
T (m)	2,720	thick. of found. block (ACI351.3R-04 / 4-42 => T > 0.6 + L/30 => rigid block)	
h1 (m)	1,686	vertical distance btw machine CG Line and top level of mass foundation	
Increasing in all. net bearing stress	NO	Increasing in allow. net bearing stress of soil at earthquake loading case	
		Embedded Foundation	Unembedded Foundation
d (m)	embedment depth	2,520	0,000
fs (cpm=rpm)	service frequency of machine	3,577	3,577

Şekil 11 - Temel Sistemi ve Makina Bilgileri

2-) DATA INPUT-2			2-) DATA INPUT-2		
According to Soil Investigation Report (PS-2E); In the Appendix-F, Crosshole Test Results Around + 319.000 m level			According to Soil Investigation Report (PS-3E); In the Appendix-G, Crosshole Test Results Around +937.000 m level		
G (kN/m <sup>2</sup> )	525,000	dynamic shear modulus of soil	G (kN/m <sup>2</sup> )	11.500,000	dynamic shear modulus of soil
p (t/m <sup>3</sup> )	1,83	unit mass of soil	p (t/m <sup>3</sup> )	2,04	unit mass of soil
v	0,312	poisson ratio	v	0,31	poisson ratio
		PS-2E	PS-3E		
Allowable Soil Pressure (Net)		350 kPa	250 kPa		

Şekil 12 - Zemin Bilgileri (PS-2E ve PS-3E İstasyonlarında)

## 1.5. Analiz Sonuçları



Şekil 13 - Deplasman Genlikleri Özet Tablosu (Basit ve Bileşke Deplasmanlar)

## 1.6. Yorumlar

- Gömülü temel sistemlerinde gömülü olmayanlara göre deplasman genliği bakımından daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.
- Gömülü temel sistemlerinde rezonansa kalırsa bile, rezonans durumundaki deplasman genliklerinin en fazla konforsuzluk anlamında rahatsızlık verdiği görülmektedir, yapısal güvenlik anlamında bir tehlike söz konusu değildir.
- Yay katsayıları rijitliği bakımından daha güçlü zeminlerde (PS-3E sahası gibi); deplasman genliği ve rezonans bakımından çok daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.
- Son olarak, bilindiği üzere;

- o temel sisteminin doğal frekası > makina doğal frekansı → high-tuned (over-tuned) foundation
- o temel sisteminin doğal frekası < makina doğal frekansı → low-tuned (under-tuned) foundation olarak adlandırılmaktadır.

PS-3E sahasında dinamik kayma modülü çok yüksek olduğu için gömülü temel sistemlerimiz tüm titreşim modlarında **high-tuned** foundation sınıfına girmektedir. Bu sebeple makinanın kısa devre v.b. gibi sebeplerden ötürü kapanıp yeniden açılması sonucunda rezonans durumu oluşmamaktadır.

PS-2E sahasında ise, dinamik kayma modülü daha düşük olduğu için gömülü temel sistemlerimiz yatay (x & y) titreşim modlarında **high-tuned** foundation, diğer (düşey, sallanma, yunuslama ve burulmalı) titreşim modlarında ise **low-tuned** foundation sınıfına girmektedir. **Low-tuned** temel sistemlerinde makinanın kısa devre v.b. gibi sebeplerden ötürü kapanıp yeniden açılması sonucunda rezonans durumu oluşacağından sistemin rezonans durumundaki deplasman genliği kontrol edilmelidir. Bizim sistemimizde, düşey yönlü (z) titreşim modunda toplam sönümleme oranı yüksek olduğu için rezonans kısa sürede sönümlenmektedir. Diğer (sallanma, yunuslama ve burulmalı) titreşim modlarında ise deplasman değerleri yapısal anlamda tehlike arz etmemektedir. Sadece sallanma modunda konforsuzluk anlamında az da olsa rahatsızlık hissedilebilecektir. Uygulamamızda bu durumu önlemek için sönümleyici malzeme kullanılmıştır.

## 1.7. Öneriler

- Makina temellerinde deplasman genlikleri ve rezonans limitlerini sağlayabilmek için titreşim sönümleyici önlemlerin kullanımı haricinde duruma göre temelin gömülmesi ve temel zemininin iyileştirilmesi (daha yüksek dinamik kayma modülü sağlamak için) gibi alternatif yöntemler de düşünülebilir. Bu methodlar ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi gerekirse birlikte de kullanılabilirler.
- Titreşim genlikleri makine üreticisi tarafından verilen sınır değerlerini aşmamalıdır.
- Genellikle, temel sistemi ağırlık merkezi ile makine ağırlık merkezinin aynı düşey eksen üzerinde olması sağlanmalıdır.
- Temel bloğunun üst kotu, bitmiş saha kotundan en az 300 mm yukarıda olmalıdır.
- Blok temellerde minimum kalınlık;  $0.60 + L / 30$  (metre)' den az olmamalıdır (L = Temel uzunluğu).
- Temelin yanal sallanma (rocking) titreşimine karşı yeterli rijitliğe sahip olmasına yönelik olarak genişliğinin temel tabanı ile makine ağırlık merkezi arasındaki düşey mesafenin 1.5 katından az olmaması tercih edilmelidir.
- Yatay düzlemde makine şaftına dik istikamette, (makine + temel) sistemi ağırlık merkezi ile temel tabanı ağırlık merkezi arasındaki ekzantisite temel genişliğinin (B) 0.05 inden fazla olmamasına dikkat edilmelidir.
- Yatay düzlemde makine şaftına paralel istikamette, (makine + temel) sistemi ağırlık merkezi ile temel tabanı ağırlık merkezi arasındaki ekzantisite temel boyunun (L) 0.05 inden fazla olmamasına dikkat edilmelidir.
- Dinamik yükler altındaki oturma hesaplarında aksi gösterilmedikçe zemin emniyet gerilmesi aşağıdaki değerleri aşmamalıdır:



- Yüksek hızlı makineler: Statik yükler için verilen emniyet gerilmesinin %50' si
- Düşük hızlı makineler : Statik yükler için verilen emniyet gerilmesinin %75' i

### Kaynaklar

1. ACI351.3R-04, Foundations For Dynamic Equipment, Reported by ACI Committee 351, United States, (2004).
2. API-686, API Recommended Practice For Machinery Installation and Installation Design, American Petroleum Institute, Washington, D.C., United States, (2009).
3. Arya, S.C., O' Neill, M. W. and Pincus, G., Design Of Structures and Foundations For Vibrating Machines, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, United States, (1984).
4. Aşılıoğlu, A., Dinamik Yüklü Temellerin Tasarımı ve Simetriden Sapmaların Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, (2009).
5. Bhatia, K.G., Foundations For Industrial Machines, Handbook For Practising Engineers, D-Cad Publishers, New Delhi, India, (2008).
6. Bhandari P.K., Sengupta A., Dynamic Analysis Of Machine Foundation, International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 4, April 2014.
7. Gül, F., Makina Temellerinin Tasarımı ve Titreşimlerin Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, (2007).
8. Güre, A., Dönel Makinelerin Temel Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar, İmo İstanbul Şubesi, Türkiye, (Mayıs 2018).
9. Major, A., Vibration Analysis and Design Of Foundations For Machines and Turbines, Collet's Holdings Limited, Budapest, Hungary, (1961).
10. Özkan, M. Y., Dinamik Yükler Altında Temellerin Tasarımı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Yayınları, Türkiye, (1994).
11. Özkan, M. Y., Dinamik Yüklere Maruz Temellerin Tasarımına Giriş, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Yayınları, Türkiye, (2019).
12. Prakash, S., Puri, V. K., Foundations For Machines: Analysis And Design, A Viley-Interscience Publication, United States, (1988).



# Eksenel Basınç Etkisindeki Çelik Elemanların Davranışında Geometrik Önkusurlar ve Artık Gerilmelerin Önemi

Haşim ÇAYIR<sup>1</sup>, Cüneyt VATANSEVER<sup>2</sup>, Muhammed Şükrü YAVAŞ<sup>3</sup>, Zekai CELEP<sup>4</sup>

## ÖZET

*Bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip enkesitlerden oluşan çelik elemanların eksenel basınç kuvveti etkisi altında davranışları incelenmiştir. Çelik elemanların sayısal modelleri katı sonlu elemanlar kullanılarak geliştirilmiştir. Yükleme artan eksenel basınç kuvveti şeklinde uygulanmıştır. Çelik malzemenin elasto-plastik gerilme-şekildeğiştirme davranışı sergilediği varsayılmıştır. Analizler ikinci mertebe etkilerini ve başlangıç kusurlarını dikkate alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan burkulma yükü, kesitin akmaya erişmesi durumu yanında yerel ve genel elastik burkulma durumları da gözetilerek değerlendirilmiştir. Eksenel basınç kuvveti altında güç tükenmesinin meydana geldiği andaki kritik burkulma gerilmeleri ve Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYE) Yönetmeliği'nde eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanların karakteristik dayanımları için tanımlanan eğrilerin gerilme değerleri; farklı başlangıç kusurları da göz önünde tutularak hesaplanmış ve tartışılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Çelik yapılar, burkulma analizi, artık gerilmeler, başlangıç kusuru.

## ABSTRACT

### **Importance of Geometric Imperfection and Residual Stresses on the Behavior of Steel Members Subjected to Axial Compression**

*This study investigated the behavior of steel elements consisting of cross-sections with various geometric properties subjected to axial compressive loads. Numerical models of the steel elements were developed using solid finite elements. Loading was applied in the form of monotonically increasing axial compressive force. It is assumed that the steel material exhibits elasto-plastic stress-strain behavior. Second-order effects and initial imperfections were considered in the finite element analyses of the models. Buckling loads were assessed considering elastic local and global buckling. Critical buckling stresses at which failure occurred under the*

---

1 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul - hcayir@fsm.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - cuneyt.vatansever@itu.edu.tr

3 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul - msyavas@fsm.edu.tr

4 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul - zcelep@fsm.edu.tr

*axial compressive forces and the stresses obtained from the curves of members subjected to axial compressive force in the Turkish Code for Design and Construction of Steel Structures (TCDCCS) and those found in the present analysis are given comparatively and discussed by considering various initial imperfections defined for the members.*

**Keywords:** *Steel structures, buckling analysis, residual stresses, initial imperfection.*

## **GİRİŞ**

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanların stabilite bakımından davranışı önemi sebebiyle uzun yıllardır çalışılan konulardan biridir. İki ucu mafsallı, burkulma gerilmesi orantılılık sınırı içinde kalan narin prizmatik bir basınç elemanının kritik burkulma yükü; malzemenin elastisite modülü, enkesitin atalet momenti ve elemanın boyuna bağlı olarak *Euler* tarafından hesaplanmıştır. Ancak burkulmaya neden olan gerilme, malzemenin orantılılık sınırını aşıyorsa gerilme ile şekildeğiştirme arasındaki ilişki doğrusal olmayacağından bu noktadan sonra elastisite modülünün kullanılması doğru değildir. *Engesser* yaptığı çalışmada bu bölgedeki kritik burkulma yükünün tanjant modülü kullanılarak hesaplanması gerektiğini vurgulamıştır (1). Daha sonra yapılan çalışmalarda elemanın burkulma ile güç tükenmesine ulaşmasında etkili olan parametrelerin çelik sınıfı, üretim metodu, enkesit şekli ve boyutu, eğilmenin asal eksen, başlangıç kusurları ve uç koşulları olduğu vurgulanmıştır (2).

Bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip enkesitlerden oluşan çelik elemanların eksenel basınç kuvveti etkisinde davranışları incelenmiştir. Çelik elemanların sayısal modelleri katı sonlu elemanlar kullanılarak geliştirilmiştir. Yükleme artan eksenel basınç kuvveti şeklinde uygulanmıştır. Çelik malzemenin elasto-plastik davranış sergilediği varsayılmıştır. Analizler ikinci mertebe etkilerini, başlangıç kusurunu ve artık gerilmeleri dikkate alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan burkulma yükü, kesitin akmaya erişmesi durumu yanında yerel ve genel elastik burkulma durumları da gözetilerek değerlendirilmiştir. Eksenel basınç kuvveti altında güç tükenmesinin meydana geldiği durumdaki kritik burkulma gerilmeleri ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYE) Yönetmeliği 2016'da (3) eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanların karakteristik dayanımları için tanımlanan eğrilerin gerilme değerleri; farklı başlangıç kusurları da elde edilen sonuçlar göz önünde tutularak tartışılmıştır.

## **ÇALIŞMANIN AMACI**

Çelik elemanların eksenel basınç dayanımının belirlenmesinde sınır durumlar; akma sınır durumu (malzemenin akma gerilmesine ulaşması), yerel burkulma ve genel burkulma sınır durumlarıdır. Basınç elemanları genel burkulma sınır durumuna; enkesitte gerilmelerin doğrusal-elastik düzeyi (orantılılık sınırı) aşmadığı bölge içinde kalarak veya enkesitte bazı kısımlarda bu düzeyin aşıldığı elastik olmayan bölgeler oluşarak ulaşabilir. Bu bölgeler, eksenel basınç kuvveti dayanım eğrisinde elastik ve elastik olmayan bölgeler olarak tanımlanır. Çelik elemanın; enkesiti oluşturan parçaların genişlik/kalınlık oranlarına bağlı olarak sınırlandırılan yerel burkulma sınır durumuna ulaşması halinde, tüm enkesit etkin olamayacağı için genel burkulma sınır durumlarına karşı gelen eksenel basınç kuvveti dayanımlarına ulaşamaz. Bu nedenle, enkesit parçalarının yerel burkulmalarını önlemek amacıyla, ÇYTHYE Yönetmeliği'nde enkesiti oluşturan elemanların genişlik/kalınlık oranları için sınırlar verilmiştir. Yönetmeliğe göre, narin enkesit parçalarına sahip bir çelik elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımı etkin enkesit alanına bağlı olduğundan, genel burkulma dayanımı azalır.

Bu çalışma, farklı geometrik özelliklere sahip narin ve narin olmayan enkesitlerden oluşan çelik elemanların eksenel basınç kuvveti altındaki davranışının ÇYTHYE Yönetmeliği'nde verilen tasarım esasları ve sınırları ile uyumunu ve başlangıç kusurlarının basınç elemanının davranışına etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

## ANALİTİK MODEL

### Geometri ve Malzeme

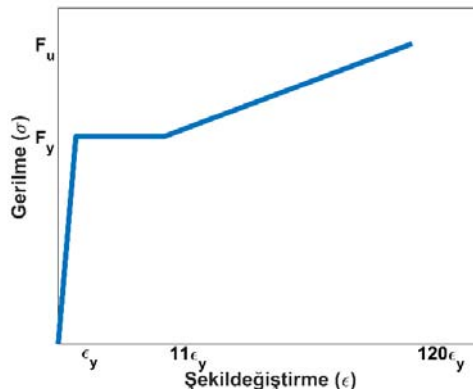
Bu çalışmada oluşturulacak analitik modeller için esas alınan enkesitler ÇYTHYE Yönetmeliği'nde enkesit parçaları için verilen narinlik sınırları göz önünde tutularak belirlenmiştir. Narin olmayan enkesitleri temsil etmek üzere geometrik özellikleri Tablo 1'de verilen IPE160, UPE240 ve L80.80.8 hadde profilleri kullanılmıştır. Narin enkesitlerin aksel basınç kuvveti altındaki elemanların davranışına etkisini değerlendirmek amacıyla, enkesitlerin gövde ve başlık parçalarının genişlik/kalınlık oranlarının ÇYTHYE Tablo 5.1A'da verilen  $\lambda_r$  sınır değerlerinden oldukça küçük, sınır değere yakın ve sınır değerden oldukça büyük olmak üzere, HE100M, HE650AA, HL1100A, HE300B ve HP360×109 olarak 5 adet hadde profil ve ayrıca bir adet yapma I-enkesit belirlenmiştir. Yapma I-enkesitin narin olmayan enkesit olması için başlık genişliği 500 mm ve kalınlığı 10 mm seçilmiştir (Tablo 2).

**Tablo 1** - Narin olmayan enkesitlerin geometrik özellikleri

Enkesit	h (mm) (gövde yüksekliği)	b (mm) (başlık genişliği)	$t_w$ (mm) (gövde kalınlığı)	$t_f$ (mm) (başlık kalınlığı)
IPE160	127.2	82.0	5.0	7.4
UPE240	185.0	90.0	7.0	12.5
HE100M	56.0	106.0	12.0	20.0
HE650AA	534.0	300.0	12.5	16.0
HE300B	208.0	300.0	11.0	19.0
HP360×109	280.6	371.0	12.8	12.9
L80.80.8	-	80.0	-	8.0

**Tablo 2** - Narin enkesitlerin geometrik özellikleri

Enkesit	h (mm)	b (mm)	$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)
HL1100A	988.0	400.0	18.0	31.0
Yapma I-enkesit	480.0	500.0	7.0	10.0



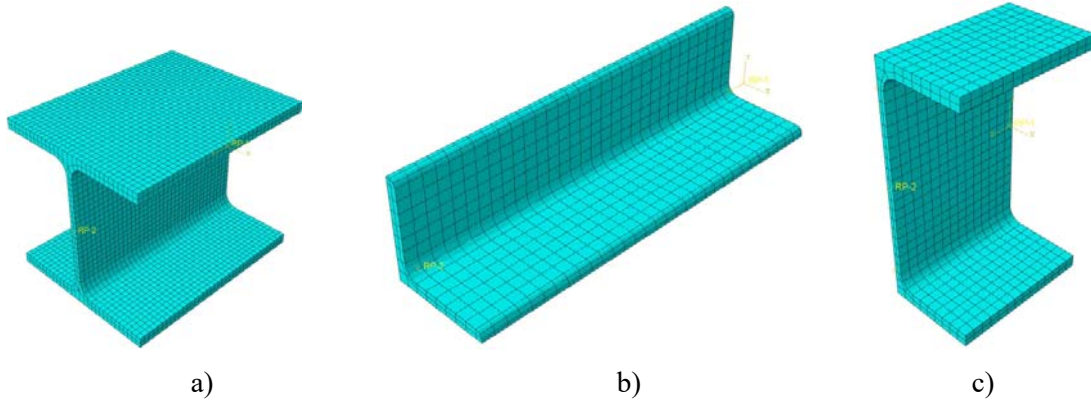
**Şekil 1** - Malzeme modeli.

Çelik elemanlarda; malzeme sınıfı S235, elastisite modülü  $E=200\text{GPa}$ , poisson oranı 0.3, birim hacim ağırlığı  $78.50\text{ kN/m}^3$  olarak alınmıştır. Çeliğin pekleşme özelliği de malzeme modeli oluşturulurken göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 1). *Baei ve diğerlerinin* (5) çalışmasından faydalanılarak pekleşmenin başladığı şekildeğiştirme değeri  $\varepsilon_s=11\varepsilon_y$ , en büyük gerilme değerine ulaşıldığında şekildeğiştirme değeri ise  $\varepsilon_u=120\varepsilon_y$  olarak dikkate alınmıştır.

### **Sonlu Eleman Modeli**

Çelik basınç elemanlarının sonlu eleman modeli ABAQUS bilgisayar yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır (4). Katı elemanlar kullanılarak oluşturulan sonlu eleman ağları, 10mm kenar boyutuna sahip, mümkün merteye kare eleman oluşturacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 2). Eleman tipi olarak eğrisel formda geometrik elemanları da çözümleyebilen (kuadratik) üç boyutlu, yirmi düğüm noktalı ve azaltılmış integrasyon yöntemini kullanan C3D20R tercih edilmiştir.

Çelik basınç elemanları iki ucunda dönme serbestliği olan (mafsallı) ve sadece eksenel doğrultuda yerdeğiştirme yapacak şekilde modellenmiştir. Her basınç elemanı için sınır koşulları aynı tutulmuş, yalnızca elemanın geometrik özellikleri ve boyu değiştirilmiştir.



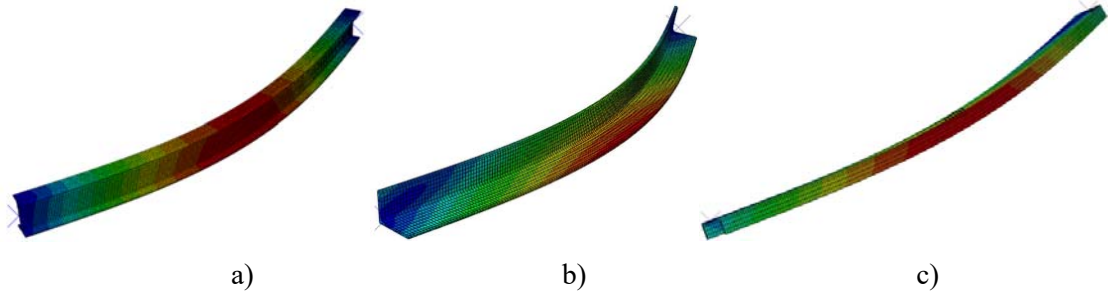
**Şekil 2 - Enkesit sonlu eleman modelleri, a)HE300B, b)L80.80.8, c)UPE240.**

### **Başlangıç Kusuru ve Artık Gerilmeler**

Çelik basınç elemanları, üretiminden nakliye ve montajına kadar birçok yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu süreçlerde elemanların geometrilerinde meydana gelen başlangıç kusuru ve üretim sürecinde enkesit parçalarının farklı hızlarda soğumaları nedeniyle meydana gelen artık gerilmeler basınç elemanlarının eksenel yük altındaki davranışlarında oldukça etkilidir. Tasarım yönetmelikleri, bu geometrik kusurları belirli esasların uygulanmasını sağlayarak dikkate almaktadır. Ancak tasarım sırasında varsayılan eleman davranışı gerçek eleman davranışından farklıdır. Bu nedenle yapılan analizlerde bu durumun dikkate alınması öngörülür. Bunun için çelik profillerin başlangıçtaki, şekil değıştirme biçiminin bilinmesi veya tahmin edilmesi gerekir.

Artık gerilmeler, enkesit yüksekliğinin genişliğine oranına bağlı olarak akma dayanımının %30-50'si olacak şekilde alınabilir (6). Bununla beraber gerilmelerin dağılımı başlık ve gövdede parabolik ve doğrusal değışimle beraber sabit olarak da kabul edilebilir (7).

Başlangıç kusuru, genellikle basınç elemanlarının başlangıçtaki şekil değıştirmiş (kusurlu) durumu, elemanın esas alınan herhangi bir burkulma moduna ait geometrisinin belirli katsayılar oranında ölçeklendirilerek tahmin edilebilir (8).



Şekil 3 - Profillerin 1. burkulma modları, a) HE300B, b) L80.80.8, c) UPE240.

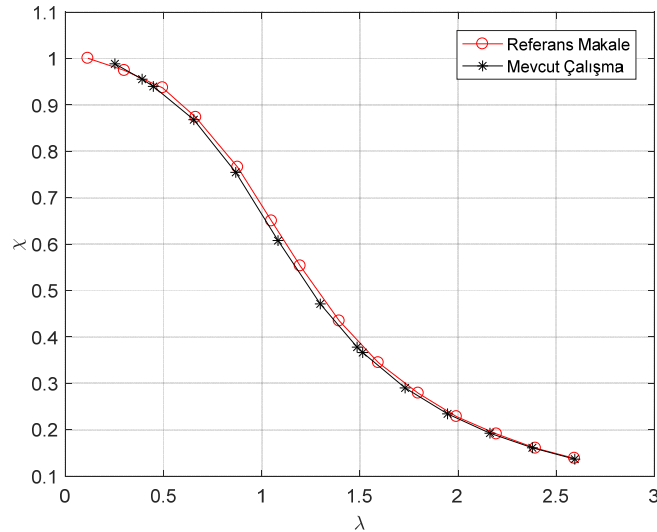
Bu çalışmada EN 1993-1-1 (9) uygun olarak, çelik elemanlardaki başlangıç kusuru ile artık gerilmeler, eleman boyuna bağlı olarak birlikte dikkate alınmıştır. Bunun yapılabilmesi için ilk olarak özdeğer burkulma analizi (eigenvalue buckling analysis) ile sistemin burkulma modları elde edilmiştir (Şekil 3). Doğrusal olmayan burkulma analizleri için başlangıç kusuru; herhangi bir moda veya birkaç modun bileşik haline ait geometrinin basınç elemanının boyunun belirli bir oranı ile ölçeklendirilmesi suretiyle modellenebilmektedir. Analizlerde başlangıç kusuru olarak, kesitin zayıf asal eksenini etrafında eğilme deformasyonu oluşturan 1. burkulma modu esas alınmıştır.

#### Analiz Yöntemi

Bu çalışmada yükleme artan aksenal basınç kuvveti şeklinde uygulanmıştır. Aksenal basınç kuvveti etkisindeki narin elemanlarda yerel burkulmalar meydana geldiğinden, stabil olmayan bu davranışın elde edilmesinde analiz yöntemi olarak yük ve yer değiştirmelerin her ikisini de bilinmeyen olarak dikkate alan *Riks* çözüm algoritması kullanılmıştır (10).

#### ANALİTİK MODELİN DOĞRULANMASI

Bu çalışma kapsamında oluşturulan sonlu eleman modelini doğrulamak için *Jönsson ve Stan* (6) tarafından yapılan çalışma esas alınmıştır. Çalışmada kullanılan yapı çeliğinin elastisite modülü ve akma dayanımı olarak sırasıyla 210 GPa ve 235 MPa kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak ise pekleşme bölgesinde E/100'lük eğime sahip iki doğru parçalı (bi-lineer) model kullanılmıştır.



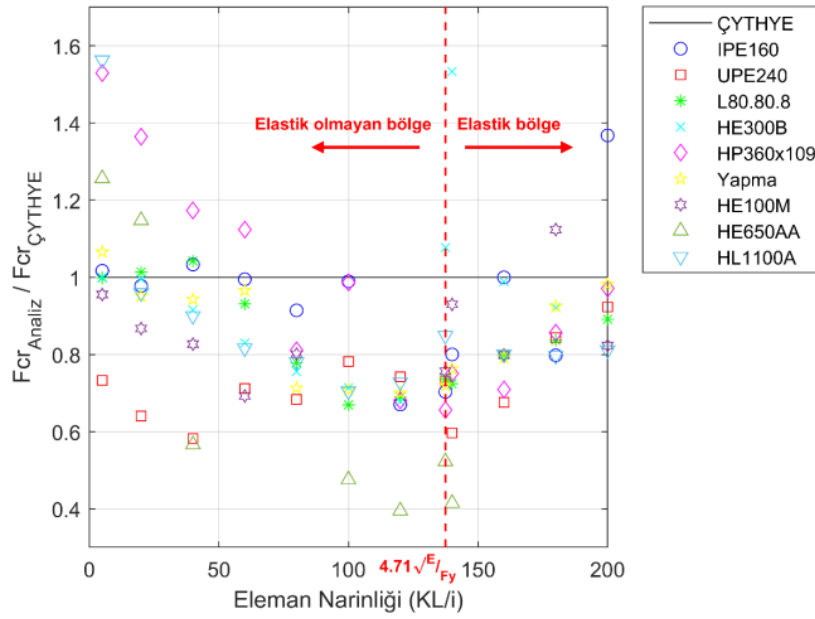
Şekil 4 - IPE160 Profili için elastik burkulma azaltma katsayısı.

Jönsson ve Stan, L/1000 oranında başlangıç kusuruna sahip IPE160 profilinden teşkil edilen bir basınç elemanının eleman narinlik oranına ( $\lambda=KL/i$ ) bağlı olarak  $\chi$ , burkulma azaltma katsayısını elde etmişlerdir. Çalışmalarında, burkulma katsayısı,  $K = 1.0$  ve atalet yarıçapı,  $i = 18.4$  mm olarak sabit tutulmuş; eleman boyu, L değiştirilmiştir. Bu çalışmada, Jönsson ve Stan'in araştırmasındaki malzeme modeli, kesit özellikleri ve başlangıç kusuru kullanılarak oluşturulan model, ABAQUS yazılımındaki Riks çözüm algoritması ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Jönsson ve Stan'in elde ettiği sonuçlarla birlikte Şekil 4'te gösterilmiştir.

Eğriler arasındaki uyum incelendiğinde; modelin geliştirilmesinde uygulanan yöntem ile esas alınan kabullerin, eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik elemanların davranışlarının belirlenmesinde uygun bir şekilde kullanıldığı sonucun doğrulanmasından anlaşılmaktadır.

## ANALİZLERE AİT SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

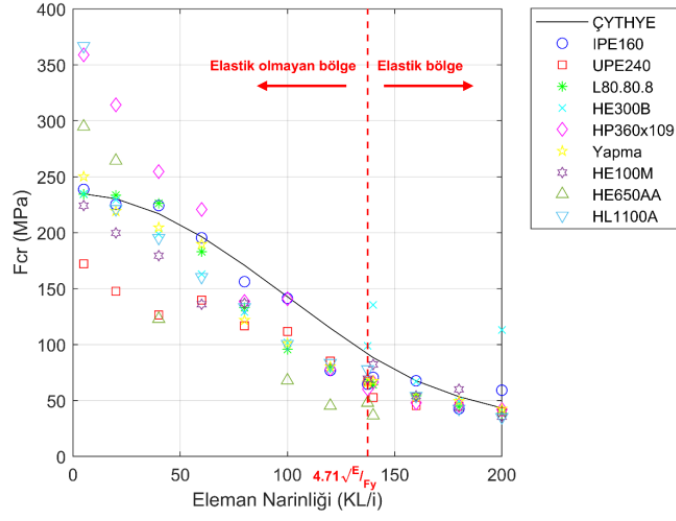
Farklı geometrik özelliklere sahip dokuz enkesitten oluşan basınç elemanlarının davranışları, artık gerilmeleri de içerdiği varsayılan başlangıç kusurunun etkileri artan eksenel basınç kuvveti altında incelenmiştir. Sonlu eleman modellerinde artık gerilmeler ile başlangıç kusurunu birlikte temsil etmek üzere, elemanın başlangıçtaki şekil değiştirmiş (kusurlu) durumu, EN 1993-1-1 referans alınarak, UPE240 enkesitinden oluşan basınç elemanı için orta noktasından L/150, diğer tüm elemanlar için ise L/200 değerinde şekil değiştirme yapmış yarım sinüs dalgası eğrisi şeklinde kabul edilmiştir. Analizlerden elde edilen  $F_{cr}$ , kritik burkulma gerilmelerinin ÇYTHYE Yönetmeliği'nde tasarım için önerilen kritik burkulma gerilmesine oranı eleman narinlik oranına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 5).



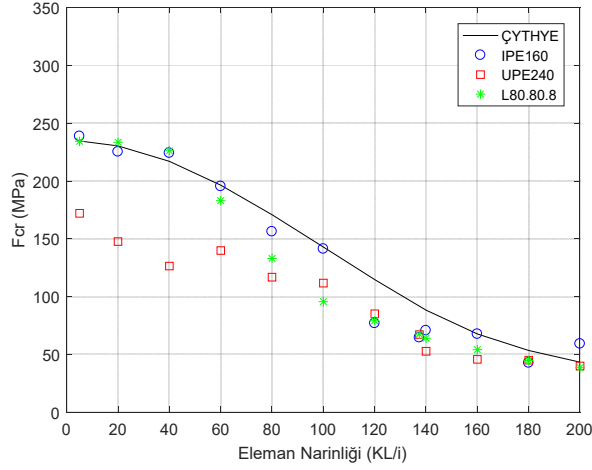
Şekil 5 - Kolon kapasite değerleri.

Sınırlı sayıda eleman ile yapılan bu analizlerden elde edilen kritik burkulma gerilmelerinin dağılımı incelendiğinde analizlerden elde edilen değerlerin %78'inin ÇYTHYE Yönetmeliği'nde önerilen değerin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum artık gerilme ve başlangıç kusurunun birlikte dikkate alınması durumu için tanımlanan başlangıç kusuru değerlerinin daha ayrıntılı incelenmesi gerektiğini göstermektedir (Şekil 6).

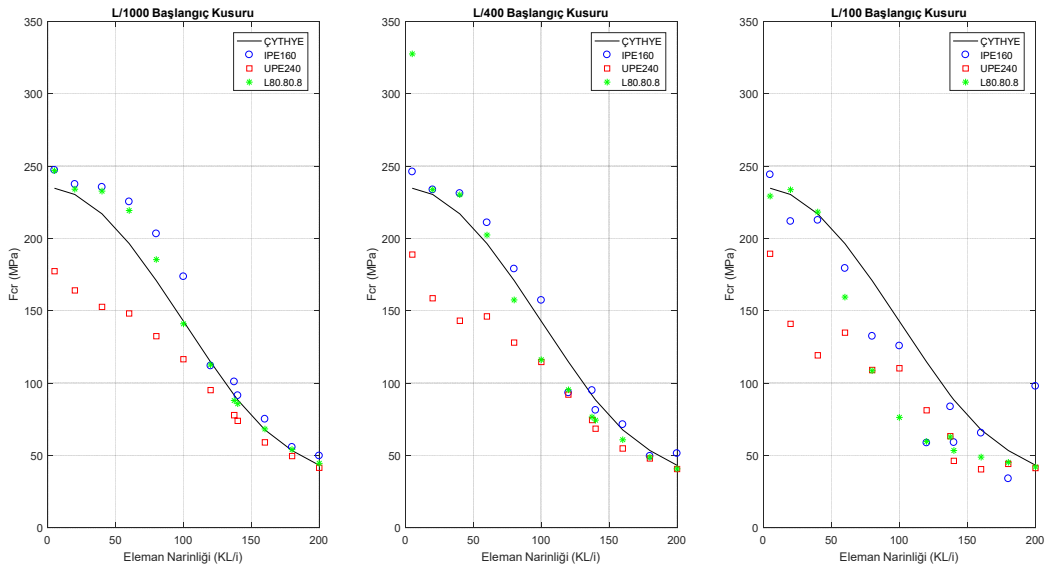




Şekil 6 - Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanlar için kapasite eğrisi ve analiz sonuçları.



Şekil 7 - Başlangıç kusurlarının (başlangıç kusuru + artık gerilme) davranışa etkisi.



Şekil 8 - Başlangıç kusurlarının davranışa etkisi.

EN 1993-1-1 kullanılarak çelik elemanlardaki başlangıç kusuru (artık gerilmeleri de içerecek şekilde) IPE160, UPE240 ve L80.80.8 enkesitlerinden oluşan basınç elemanları için sırasıyla L/200, L/150 ve L/100 olarak alınmıştır. Bu durumda analizlerden elde edilen kritik burkulma gerilmelerinin ÇYTHYE Yönetmeliğindeki karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanım eğrisinin altında kalan bir dağılım gösterdiği görülmüştür (Şekil 7).

Başlangıç kusurunun etkisi çalışma kapsamındaki elemanlar için ayrıca değerlendirilmiştir. Bunun için L/100, L/400 ve L/1000 değerleri kullanılarak analizler tekrar edilmiştir. Analizlerden elde edilen kritik burkulma gerilmeleri, yönetmeliğin tanımladığı karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanım eğrisiyle birlikte gösterilmiştir (Şekil 8). EN1090-2’de (11) geometrik başlangıç kusuru için verilen maksimum değer L/750’dir. Buna karşılık literatürdeki birçok çalışmada ortalama bir değer olarak L/1000 kullanılmıştır (12, 13). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da elemanın başlangıçtaki şekil değiştirmiş durumunu orta noktasından L/1000 değerinde şekil değiştirme yapmış yarım sinüs dalgası eğrisi şeklinde alarak elde edilen sonuçların, yönetmeliğin tanımladığı karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanım eğrisiyle uyuşacağını göstermektedir. Ancak bu durumun eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu daha kritik olan UPE240 enkesiti için ayrıca incelenmesi gerekmektedir.

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, farklı geometrik özelliklere sahip enkesitlerden oluşan çelik basınç elemanlarına ait sonlu eleman modellerinin artan eksenel yük altında ABAQUS bilgisayar yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Narin ve narin olmayan enkesit parçaları içeren elemanlarla yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Başlangıç kusuru ile artık gerilmelerin birlikte dikkate alınması amacıyla tanımlanan başlangıç kusuru değerlerinin daha detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.
- ÇYTHYE Yönetmeliği’nde deneysel çalışmaların (14, 15) bir sonucu olarak önerilen karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanım eğrisinin artık gerilmeler ile başlangıç kusurlarını da dikkate aldığı düşünüldüğünde, eksenel basınç kuvveti dayanımlarında gözlenen farklılıklar için, sınırlı sayıda örnekle sayısal olarak yürütülen bu çalışmanın deneylerle de desteklenmesi gerekmektedir.

## Kaynaklar

1. Johnston, B.G., The Structural Stability Research Council Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 3rd Ed., Wiley-Interscience, New York, N.Y., 1976, 616 p.
2. Bjorhovde R., Columns: From Theory to Practice, Engineering Journal/American Institute of Steel Construction, First Quarter, 2012, p:21-34.
3. Türk Standartları, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016, 204 sayfa.
4. ABAQUS, Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition, Hibbit, Karlsson, and Sorenson, Inc, RI, USA, 2017.
5. Baei, M., Ghassemieh M., Goudarzi., A Numerical Modelling of End-Plate Moment Connection Subjected to Bending and Axial Forces, The Journal of Mathematics and Computer Science, 2012;4(3), p:463-472.

6. Jönsson, J., Stan T. C., European Column Buckling Curves and Finite Element Modelling Including High Strength Steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017; Volume:128, p:136-151.
7. Szalai, J., Papp F., A New Residual Stress Distribution for Hot-Rolled I-Shaped Sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 2005; Volume:61, p:845-861.
8. Vatansever C., Yardımcı N., İnce Levhalı Çelik Perdelerin Artan Yatay Yükler Altında Analitik Olarak İncelenmesi, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye*, 16-20 Ekim 2007, ss: 585-594.
9. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, CEN - European committee for Standardization, Brussels (Belgium), 1992.
10. Driver R., Kulak G., Elwi A., Kennedy D., FE and Simplified Models of Steel Plate Shear Wall, *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(2), p:121-0130.
11. EN 1090–2: Execution of Steel Structures and Aluminium Structures – Part 2: Technical Requirements for Steel Structures, CEN - European committee for Standardization, Brussels (Belgium), 2008.
12. Greiner R., Kettler M., Lechner A., Freytag B., Linder J., Jaspart J.-P., Boissonnade N., Bortolotti E., Weynand K., Ziller C., Oerder R., SEMI-COMP: Plastic Member Capacity of Semi-Compact Steel Sections - A More Economic Design, European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2009.
13. F. Bijlaard, M. Feldmann, J. Naumes, C. Müller, G. Sedlacek, Consistency of Equivalent Geometric Imperfections Used In Design And The Tolerances for Geometric Imperfections Used In Execution, Report CEN/TC250-CEN/TC135-Liaison, N1721, February 2010.
14. Galambos, T.V., Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 4th Edition, Chap. 18, Wiley, New York, 1988.
15. Tide, R. H. R., A Technical Note: Derivation of the LRFD Column Design Equations, *Engineering Journal*, AISC 38 (no. 4): 137–9, 2001.



## 2.5MW Rüzgâr Türbininin Dinamik Özelliklerinin Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi

Onur ÖZTÜRKOĞLU<sup>1</sup>, Veysel YURTSEVEN<sup>2</sup>, Yaşar TANER<sup>3</sup>, Özgür ÖZÇELİK<sup>4</sup>, Serkan GÜNEL<sup>5</sup>

### ÖZET

Çalışmada Urla/İzmir'de hâlihazırda işlevsel olan 2.5MW üretim kapasiteli bir rüzgâr türbini incelenmiştir. Türbin kulesi üzerinden kule yüksekliği boyunca dağıtılmış şekilde tasarlanan veri toplama sistemi aracılığıyla titreşim verileri toplanmıştır. Titreşim verileri operasyonel modal analiz yöntemleri kullanılarak işlenmiş ve yapının dinamik özellikleri belirlenmiştir. Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin kulenin tahmin edilen dinamik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Aerodinamik sönümün de katkısıyla, yapıdaki toplam sönüm değerleri geniş bir aralıkta elde edilmiştir. Çevresel ve operasyonel faktörlerin modal parametrelere etkisinin net bir şekilde ortaya koyulabilmesi için, farklı operasyonel ve çevresel koşulları da içerecek şekilde uzun süreli kaydedilecek veri setleri ile çalışmaların yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Operasyonel modal analiz, veri toplama sistemi tasarımı, veri işleme, rüzgâr türbini.

### ABSTRACT

#### **Identification of the Dynamic Characteristics of the 2.5MW Wind Turbine Using Vibration Data**

In this study, a wind turbine with a production capacity of 2.5MW that is currently operational in Urla/Izmir is examined. Vibration data were collected through the data acquisition system designed to be distributed throughout the tower height. Acceleration data were processed using operational modal analysis methods, and the structure's dynamic characteristics were determined. In addition, the effect of environmental factors such as wind speed, wind direction and temperature on the estimated dynamic characteristics of the tower was investigated. With the contribution of the aerodynamic damping, the total damping values in the structure have been

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - onur.ozturkoglu@deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - veysel.yurtseven@ogr.deu.edu.tr

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - yasar.taner@deu.edu.tr

4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - ozgur.ozcelik@deu.edu.tr

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - serkan.gunel@deu.edu.tr

obtained in a wide range. It has been concluded that studies should be conducted with data sets to be recorded for a long time, including different operational and environmental conditions, in order to clearly reveal the effect of environmental and operational factors on modal parameters.

**Keywords:** Operational modal analysis, data acquisition system design, data processing, wind turbine.

## GİRİŞ

Fosil ve fosil türevi yakıtların kullanımı ekosisteme ciddi ve geri dönüşü olmayan zararlar vermektedir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan rüzgâr enerjisi, geleneksel enerji üretim yöntemlerine kıyasla yüksek verimlilik ve kısa amortisman süreleri gibi faktörler nedeniyle önem kazanmıştır. Son on iki yılda dünyada rüzgâr enerjisinde kurulu kapasite yaklaşık dört buçuk katına çıkarken [1], ülkemizde bu kapasite 4.7 katına çıkmıştır [2]. Türbinlerin rüzgâr, deprem, sıcaklık, dalga vb. etkileri altında yapısal davranışlarının incelenmesi sonucunda IEC [3], GL [4] ve RISØ [5] gibi çeşitli standartlar oluşturulmuştur.

Yenilenebilir enerjiye karşı artan talebi karşılamak amacıyla birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelere rüzgâr türbinleri kurulmuştur. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın "Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Haritası" [6] ile birlikte Afet ve Acil Durum Yönetimi Kurumu'nun (AFAD) "Türkiye Sismik Tehlike Haritası" [7] başlıklı yayınına bakıldığında, rüzgâr enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerin deprem tehlike düzeylerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle Türkiye’de inşa edilen rüzgâr enerjisi santrallerinin çoğunluğu deprem tehlikesinin yüksek olduğu bölgelerdedir. Rüzgâr türbini üreticileri ve paydaşlarının proje bilgilerini akademik ve mühendislik camialarıyla daha çok paylaşması; kule sismik davranışının çalışılması, raporlanması, akademik ortamda yayınlanması/tartışılması ve kule tasarımlarının geliştirilmesi ve ilgili yönetmeliklerin güncellenmesine imkân oluşturacaktır. Rüzgâr türbinlerinin sismik davranışlarının anlaşılması için çalışan merkezlerin, bilim insanlarının ve yayınların sayısının artması gerekmektedir [8].

Rüzgâr türbinlerinin dinamik özellikleri çevresel ve operasyonel koşulların değişiminden etkilenmektedir. Sıcaklık artışıyla beraber yapısal modların frekanslarında küçülmeler gözlenmekle beraber rotor-nasel hattının referans alınan bir yön (genellikle coğrafi kuzey yönü) ile yaptığı açıyı belirten nasel doğrultusu değişimi daha çok mod şekillerini etkilemektedir. Türbin kanatlarının hareket halindeyken kule yakınında geçişlerinde etkileşime girmesi sebebiyle aerodinamik sönümler meydana gelmektedir. Aerodinamik sönüm negatif ve pozitif değerler alabileceği gibi yalnızca deneysel olarak gözlemlenmek mümkündür. Rotor hızının değişimi ile birlikte türbin kulesinin yapısal modlarındaki sönüm oranları da değişebilmektedir [9-10]

Bu çalışma, aktif olarak çalışan bir rüzgâr türbininin operasyonel ve çevresel etkiler altında modal parametrelerini Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemleri kullanarak tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bu çevresel faktörlerin modal parametreler üzerindeki etkilerini anlamak, yapıyı sağlıklı izlemenin önemli bir parçasını oluşturacak ve rüzgâr türbininin karmaşık dinamik yapısının anlaşılmasını sağlayacaktır.

Sadece çıktı (only-output) tabanlı modal analiz olarak da bilinen OMA, bir yapının çeşitli çevresel uyaranlar altında tepkisini ölçmeye ve değerlendirmeye dayanır. Doğal çalışma koşulları altında, yapıya etkiyen kuvvetlerin ölçülemediği veya dışarıdan uyarmanın zor veya pratik olmadığı durumlarda sıkça kullanılan OMA yöntemleri inşaat mühendisliğinde köprüler, binalar, yaya köprüleri, tarihi yapılar, açık deniz platformları, rüzgâr türbinleri, barajlar, stadyumlar vb. yapıların modal parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada İzmir'in Urla ilçesinde aktif olarak çalışmakta olan 2.5MW'lık bir rüzgâr türbini için çeşitli sensörlerden (ivmeölçer, sıcaklık ve nemölçer) oluşan veri toplama sistemi tasarlanmış ve türbin kulesine yerleştirilmiştir. Veri toplama sistemi ve türbinin halihazırda bulunun Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) sisteminden gelen verilerin (rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık, rotor hızı, nasel doğrultusu ve pitch açısı) senkron olarak toplanabilmesi ve üniversite kampüsüne aktarımı için LabVIEW [12] yazılımı geliştirilmiştir. Toplanan veriler Artemis [13] bir OMA yöntemi olan İyileştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD) [14] yöntemi ile işlenmiş ve yapının dinamik karakterizasyonu yapılmıştır. Farklı operasyonel ve çevresel koşulların modal parametrelere olan etkisi yorumlanmıştır.

## AMAÇ

Çalışmanın asıl amacı çevresel ve operasyonel faktörlerin yapının modal özelliklerine etkisini tanımlayabilmektir. Bu sayede sonraki çalışmalarda çevresel ve operasyonel faktörlerin olumsuz etkilerinden arındırılmış ve sadece hasara duyarlı, güvenilir bir yapı sağlığı izleme sistemi geliştirilmesi mümkün kılınacaktır.

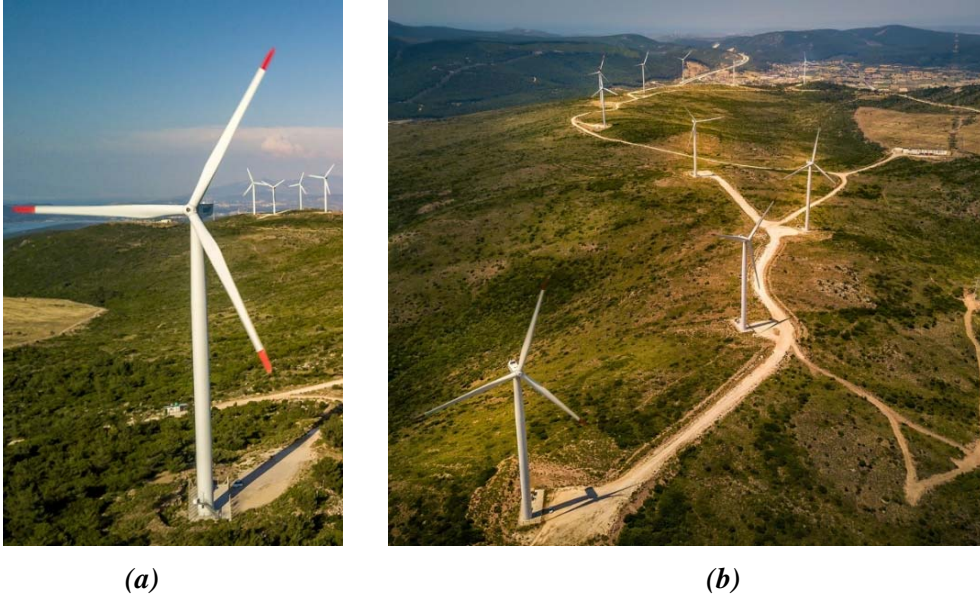
## RÜZGÂR TÜRBİNİNİN TANITILMASI

Araştırmada Urla/İzmir'de yerel bir enerji şirketi tarafından işletilen 2,5 MW kapasiteli bir rüzgâr türbini (Şekil 1) incelenmiştir. Türbin, 3 kanatlı ve yatay eksenli olup türbinin hub yüksekliği 90 metredir. Türbin kulesi, betonarme temel sistemine bulonlar ile sabitlenmiş ince cidarlı çelik bir silindir formundadır. Nasel, hub ve kanatlar türbin kulesi tepesinde bulunur. Rüzgâr türbininin çeşitli özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

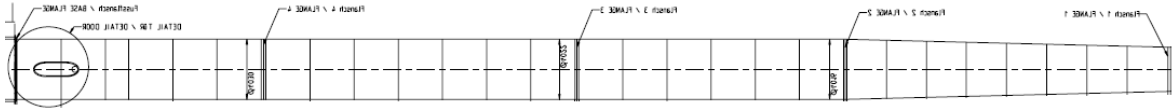
**Tablo 1 - Rüzgâr türbini özellikleri**

Özellikler	Değerler
Kurulu güç	2.5MW
Nominal rüzgâr hızı	13 m/sn
Devreye giriş rüzgâr hızı	3 m/sn
Devreden çıkış rüzgâr hızı	25 m/sn
Rotor hızı	9,6-16 rpm
Rotor çapı	90 m
Kule yüksekliği	80 m
Hub yüksekliği	90 m
Nasel kütlesi	91 ton
Rotor kütlesi	55 ton

Türbin kulesi birbirine civatalarla bağlı 4 bölümden oluşmaktadır. Her bir bölümün kalınlığı ve çapı yükseklikle boyunca azalmaktadır (Şekil 2). Kulenin malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1 - a) İzlenen rüzgâr türbini b) Rüzgâr enerji santralinin genel görünümü



Şekil 2 - Kule geometrisi (sol taraf temel, sağ taraf kule üst noktası).

Tablo 2 - Rüzgâr türbini kulesi malzeme özellikleri

Parametre	Değerler
Akma dayanımı	355 MPa
Çekme dayanımı	510-630 MPa
Elastisite modülü	210 GPa
Kayma modülü	81 GPa
Yoğunluk	7850 kg/m <sup>3</sup>
Poisson oranı	0.3

Kulenin üzerinde oturduğu zemin Aralık/2008 tarihinde yapılan zemin etüt çalışmasında incelenmiş ve bazı parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3 - Rüzgâr türbini sahası zemin özellikleri

Parametreler	Değerler
Taşıma kapasitesi ( $q_a$ )	3 kg/cm <sup>2</sup>
Zemin yatak katsayısı ( $k_s$ )	15000 t/m <sup>3</sup>
Birincil dalga hızı ( $V_p$ )	399-910 m/s
İkincil dalga hızı ( $V_s$ )	173-267 m/s



## VERİ TOPLAMA SİSTEMİ

Çevresel ve operasyonel faktörlerin rüzgâr türbininin modal özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir önceki bölümde tanıtılan rüzgâr türbini için veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Bu veri toplama sistemi kendi sensörleri aracılığı ile çeşitli seviyelerden ivme, sıcaklık ve nem verileri toplamaktadır. Bunlara ek olarak türbinin SCADA sisteminden rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık, nasele doğrultusu, pitch açısı ve rotor hızı bilgileri tasarlanan veri toplama sistemi aracılığıyla kaydedilmektedir. Tüm bu veriler senkronize olarak toplanmaktadır.

Türbin kule yüksekliği 80 metre olup, her 20 metrede bir üzerinde yürünebilen yatay platformlar bulunmaktadır. Bu seviyeler yerden yüksekliklerine göre şu şekilde isimlendirilmiştir; Seviye 1: 0 metre (temel), Seviye 2: 20 metre, Seviye 3: 40 metre, Seviye 4: 60 metre, Seviye 5: 80 metre (kulenin üstü). Kule yüksekliği boyunca kurulan sistemin bileşenleri ve sistemin genel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Her seviyede bulunan veri toplama sistemi bileşenleri şu şekilde listelenmiştir:

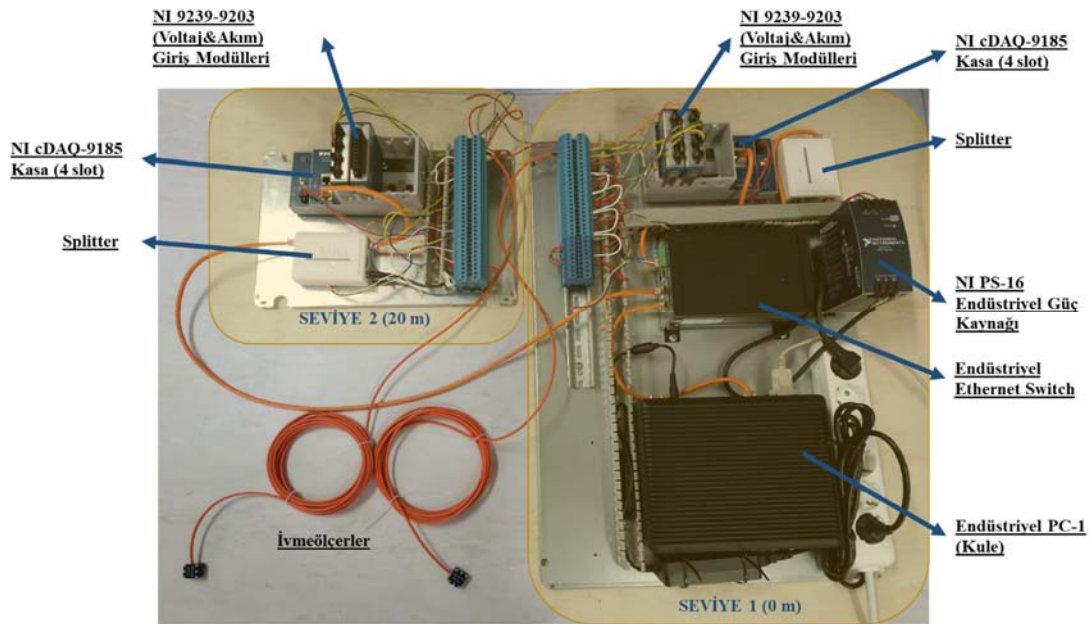
- **Seviye 1 (0 metre):** Bu seviyede bir adet üç eksenli ivmeölçer, üç adet tek eksenli ivmeölçer ve bir adet sıcaklık/nem sensörü bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak için iki adet NI 9239 ve bir adet NI 9203 modül modülü bir cDAQ-9185 kasaına bağlanmıştır. Bunlara ek olarak endüstriyel PC, PoE switch, güç kaynağı, UPS ve P2P anten temel seviyesine yerleştirilmiştir.
- **Seviye 2 (20-metre):** Bu seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak için bir cDAQ-9185 kasaına bir NI 9239 modülü bağlanmıştır.
- **Seviye 3 (40 metre):** Bu katta iki adet tek eksenli ivmeölçer ve bir adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak için bir cDAQ-9185 kasaına bir NI 9239 modülü bağlanmıştır.
- **Seviye 4 (60 metre):** Bu katta iki adet tek eksenli ivmeölçer bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak için bir cDAQ-9185 kasaına bir NI 9239 modülü bağlanmıştır.
- **Seviye 5 (80 metre):** Bu katta iki adet tek eksenli ivmeölçer ve bir adet sıcaklık/nem sensörü bulunmaktadır. Sensörlerden veri toplamak için bir cDAQ-9185 kasaına bir NI 9239 bağlanmıştır.

**Tablo 4 - Veri toplama sistemi bileşenleri.**

Cihaz	Özellik
Tek Eksenli İvmeölçer	Tek eksende ivmenin ölçümü
Tek Eksenli İvmeölçer	Üç eksende ivmenin ölçümü
Sıcaklık/Nem Sensörü	Sıcaklık ve rölatif nem ölçümü
NI 9239 Analog Giriş Modülü	Sürekli zamanlı ve genlikli analog sinyalleri ayrık zamanlı ve genlikli dijital sinyallere dönüştürme
NI cDAQ-9185 Kasa	Zamanlamayı, senkronizasyonu ve veri aktarımını kontrol eder (en fazla dört modül takılabilir)
NI PS-16 Endüstriyel Güç Kaynağı	Kuledeki tüm sistem için güç sağlama
P2P Wireless Anten	Verileri şalt sahasından türbin kulesine aktarma
Endüstriyel PC	Sistemi çalıştırmak için LabVIEW kodlarını çalıştırır ve veri akışını kontrol etme

İş İstasyonu	Kampüse ulaşan verinin analizleri için çeşitli kodlar çalıştırma
NAS	Toplanan tüm verileri yedekleme
UPS	Elektrik kesintisi durumunda sistemin kapanmasını önleme
Endüstriyel Ethernet Switch	Cihazların birbirleriyle iletişim kurmasını sağlama
Splitter	Veri ve güç sinyallerini ayırma

Veri toplama sistemi türbine monte edilmeden önce sahadaki konfigürasyona uygun olarak bir araya getirilip laboratuvar ortamında test edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3 - Veri toplama sistemi bileşenlerinin laboratuvar ortamında bir araya getirilmesi

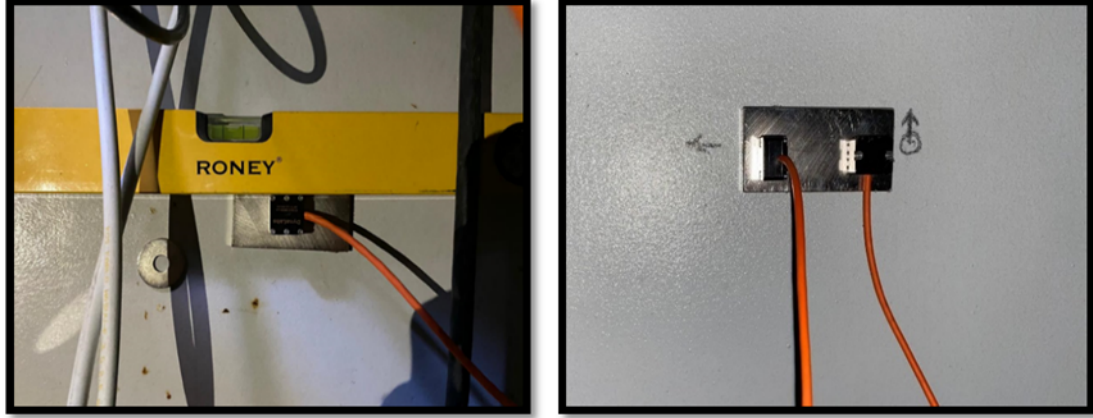
NI cDAQ-9185 kasaların üzerindeki IEEE 802.1AS protokolüne sahip ethernet kartlarının zamana bağlı senkronizasyon özelliği bulunmaktadır. Yani farklı seviyelerdeki kasalar Ethernet kablolarıyla birbirine bağlanarak ve zaman senkronizasyonuna sahip Ethernet kartları üzerinden senkron bir şekilde veri toplayabilmektedir. Sensörlerin çıkış tipine uygun (voltaj/akım) modülleri NI 9185 kasalara takılmış, sensörler ise çıkış türüne göre modüllere bağlanmıştır.

Bu proje için özel olarak üretilen 8 portlu endüstriyel switch, türbin kulesindeki tüm cihazların birbirleriyle iletişim kurmasını sağlamıştır. Aynı zamanda PoE kabloları ile switch üzerinden hem veri akışı hem de enerji akışı sağlanmıştır.

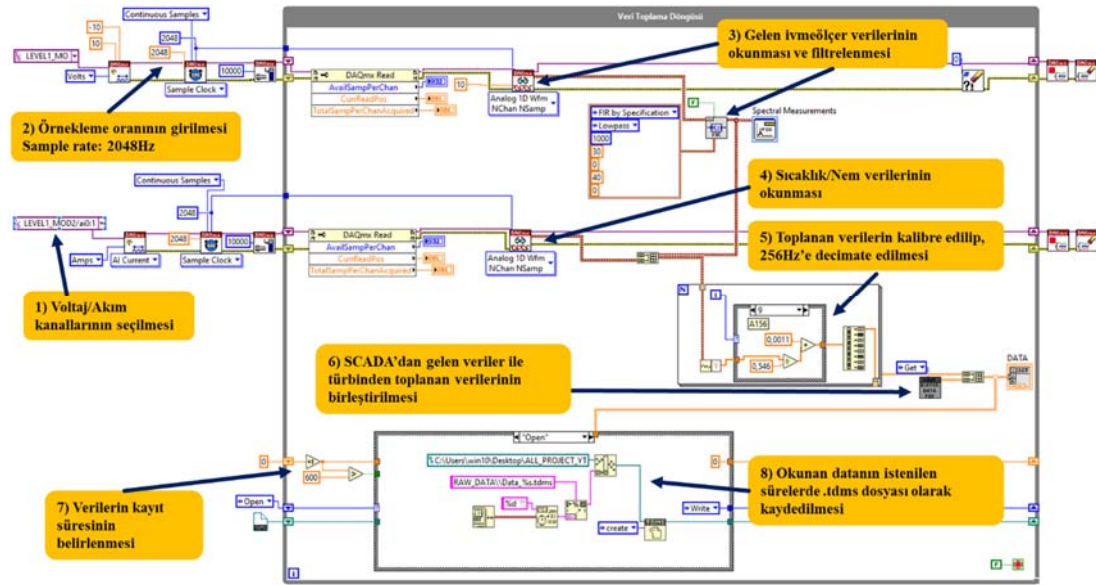
Kulenin iç kısmına üç farklı seviyede (0 m., 40 m. ve 80 m.) sıcaklık ve nem ölçer sensörler yerleştirilmiştir. Temel seviyesinde bir adet üç eksenli, üç adet tek eksenli ivmeölçer ve kule boyunca her bir seviyede iki adet tek eksenli ivmeölçer birbirine dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4). Yerleştirilen ivmeölçerlerin teknik özellikleri Tablo 5'te gösterilmiştir.



senkron bir şekilde bir araya getirilip Dokuz Eylül Üniversitesi kampüsünde bulunan iş istasyonuna anlık olarak aktarılmıştır. Bu işlemler için yazılan LabVIEW kodu Şekil 6'de görülmektedir.



Şekil 5 - İvmeölçerlerin yerleştirilmesi



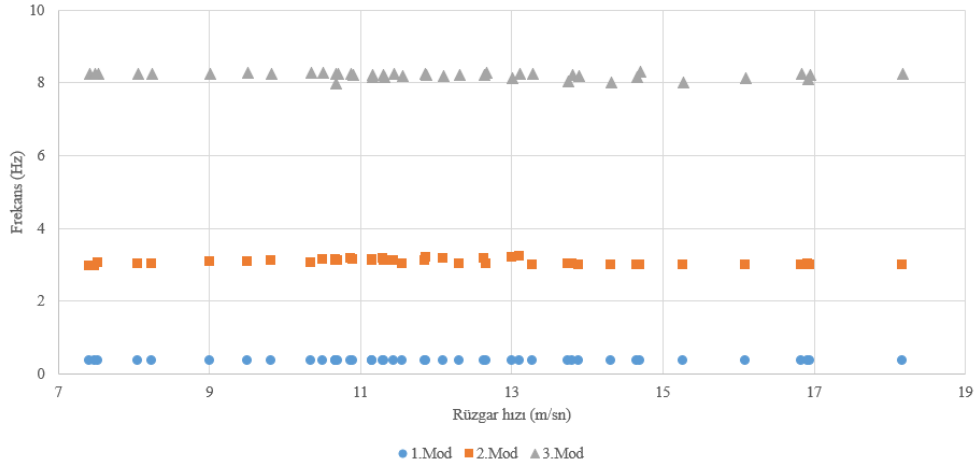
Şekil 6 - Türbinde çalıştırılan veri toplama döngüsü (LabVIEW)

Yapılan işlemler Şekil 6'da görüldüğü gibi sırayla ilerlemektedir. Öncelikle türbinden toplanacak verilere ait kanallar seçilmiştir. Donanım tipimiz NI-cDAQ olduğu için bu aşamada NI-DAQmx paletinden yer alan kanal seçme, örnekleme ayarlarını yapma, veri okuma gibi fonksiyonlar kullanılmıştır. Kanal seçiminin ardından verinin örnekleme frekansı belirlenerek toplanan veri bir döngü içerisinde okunmuştur. Alınan sinyallere; gerek olması durumunda uygun filtreler uygulanabilmektedir. Şekil 8'de görülen filtre ile sinyallerin aliasing yapması engellenmiştir. Voltaj ve akım çıkışlı sensör verileri ile SCADA verileri senkron bir şekilde toplanıp istenilen kayıt süreleri boyunca sürekli olarak .tdms dosya formatında kaydedilmiştir. Toplanan verilere ayrıca LabVIEW üzerinde yazılan farklı kodlar çalıştırılarak Dokuz Eylül Üniversitesi kampüsünde çalışan iş istasyonuna İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol, TCP) protokolü ile anlık olarak sürekli bir şekilde aktarılmaktadır.

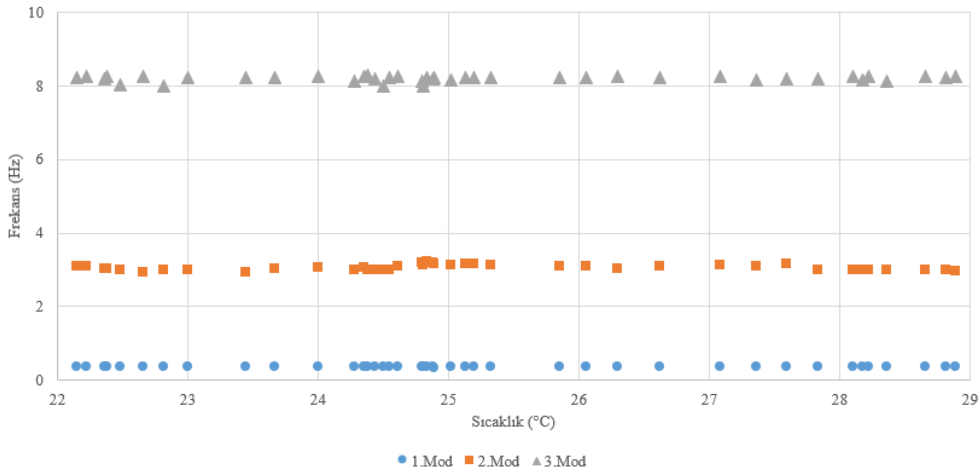
## ANALİZLER

Türbin kule yüksekliği boyunca her seviyeden veri toplayabilmek için dağıtılmış olarak tasarlanan veri toplama sistemi, laboratuvar ortamında gerekli testleri yapıldıktan sonra kuleye monte edilmiştir. 03.06.2022 saat 22.13 ile 04.06.2022 saat 05.12 arasında toplam 7 saat boyunca 10'ar dakikalık paketler halinde ivme, rüzgâr hızı, sıcaklık ve rotor hızı verileri senkronize olarak kaydedilmiştir. Kule üzerinde bulunan her seviyeden 2048 Hz örnekleme frekansı ile toplanan ivme verileri ilk önce köşe frekansı 30 Hz olan alçak geçiren (low-pass) filtreden geçirilmiştir. Daha sonra işlem süresini optimal düzeye getirmek için veri 256 Hz örnekleme frekansı ile yeniden örneklenmiş ve eğilimden arındırma (detrend) işlemi uygulanmıştır. 10 dakika uzunluğundaki 42 adet veri dosyası ile Artemis [10] ortamında bir Operasyonel Modal Analiz yöntemi olan EFDD metodu ile işlenmiş ilk üç yapısal moda ait frekans ve sönüm değerleri birbirine dik iki doğrultuda elde edilmiştir. Ayrıca her saat başında yapılan analizlerde iki doğrultudaki mod şekilleri kaydedilmiştir. Toplamda 84 adet analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerde X doğrultusu ivme ölçerlerin kuleye yerleştirildiği noktadaki teğetsel doğrultuyu, Y doğrultusu ise aynı noktadaki radyal doğrultuyu temsil etmektedir.

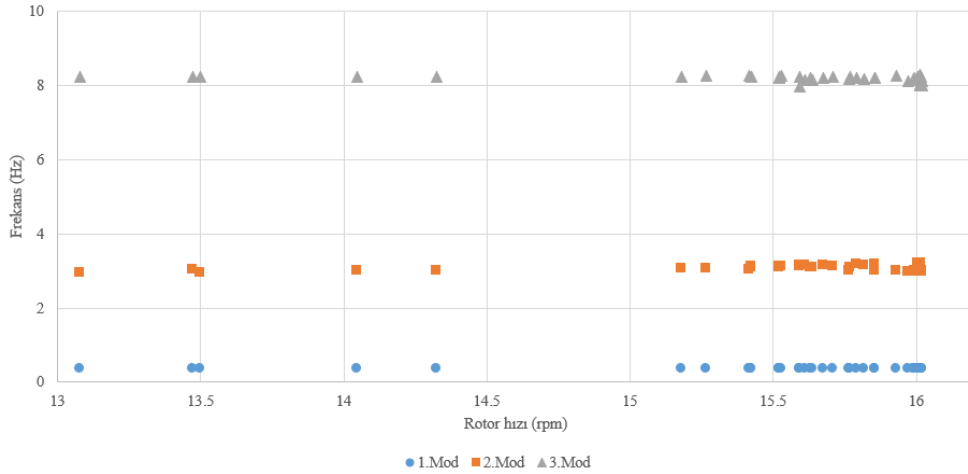
Türbin kulesinde teğetsel olarak yerleştirilen ivmeölçerler doğrultusunda yapılan analizler sonucunda ilk üç yapısal mod frekansının rüzgâr hızı, sıcaklık ve rotor hızıyla olan ilişkisi Şekil 7-9'da sunulmuştur. Bu doğrultuya dik olan Y doğrultusunda yapılan analizlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7 - Rüzgâr hızı – frekans ilişkisi.



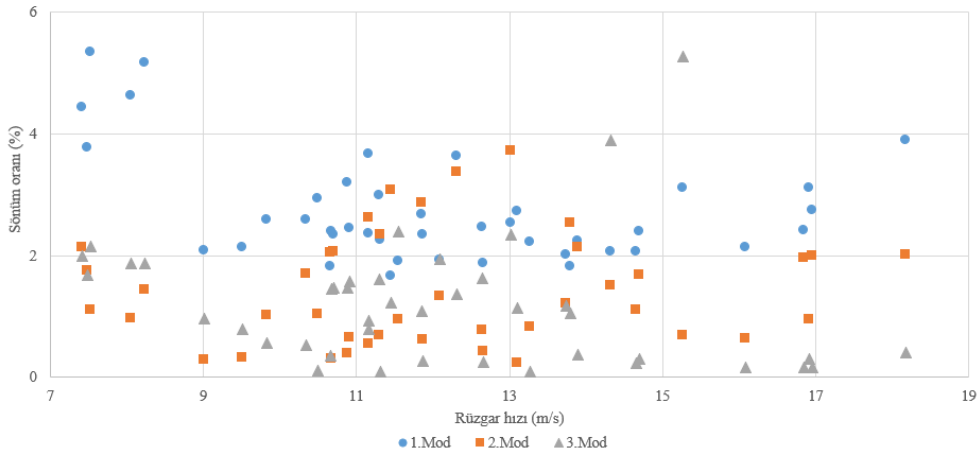
Şekil 8 - Sıcaklık – frekans ilişkisi.



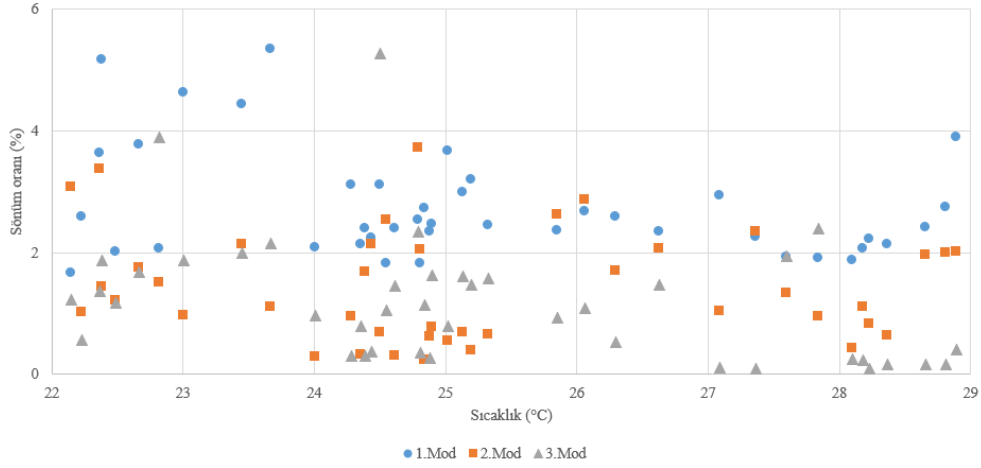
Şekil 9 - Rotor hızı- frekans ilişkisi.

Şekil 7-9 incelendiğinde, yapının 1. mod frekanslarının 0.36 Hz, 2. mod frekanslarının 2.98 Hz ve 3. mod frekanslarının 8.10 Hz civarında elde edildiği görülmektedir. 1. mod frekans değerleri tüm rüzgâr hızı, rotor hızı ve sıcaklık değerlerinde 0.36 Hz seviyesinde kararlı iken 2. ve 3. mod frekans değerlerinde küçük farklılıklar gözlenmektedir. Buna rağmen mod frekanslarının; rüzgâr hızı, sıcaklık ve rotor hızı parametrelerinin değişiminden etkilenmediği görülmektedir. Çalışmada kullanılan verinin toplandığı 7 saat sürecinde rüzgâr hızı 7 ila 18 m/sn, sıcaklık 22 ila 29 °C ve rotor hızı 13 ila 16 rpm değerleri arasında değişmektedir. Bu aralıklar, özellikle sıcaklık değerleri için, oldukça dar olduğundan çevresel ve operasyonel faktörlerin mod frekansları üzerinde etkisinin görülmesinde yeterli olmadığı düşünülmektedir.

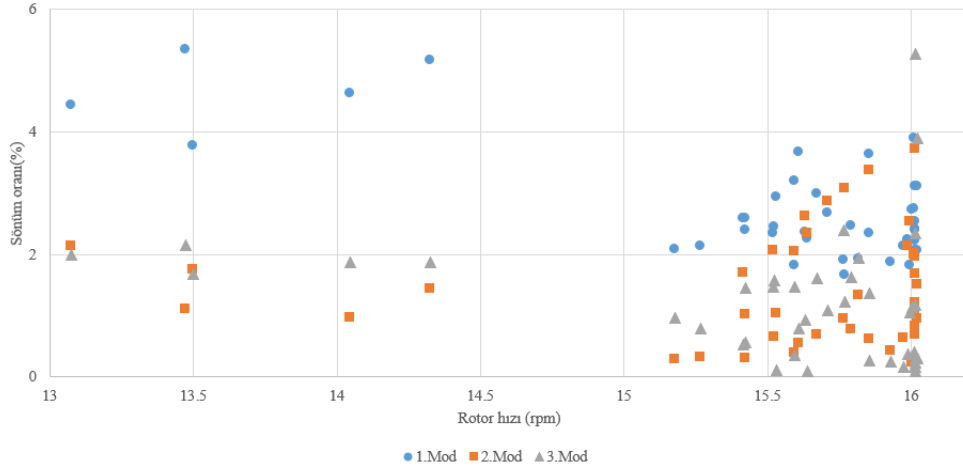
X doğrultusunda yapılan analizlerden ilk üç yapısal moda ait sönüm oranlarının rüzgâr hızı, sıcaklık ve rotor hızı ile olan ilişkisi Şekil 10-12'de sunulmuştur. Saat başı yapılan analizlerden elde edilen mod şekilleri Şekil 13'de gösterilmiştir. Y doğrultusunda elde edilen sonuçlar benzer özellikler göstermektedir.



Şekil 10 - Rüzgâr hızı – sönüm oranı ilişkisi.



Şekil 11 - Sıcaklık – sönüm oranı ilişkisi.

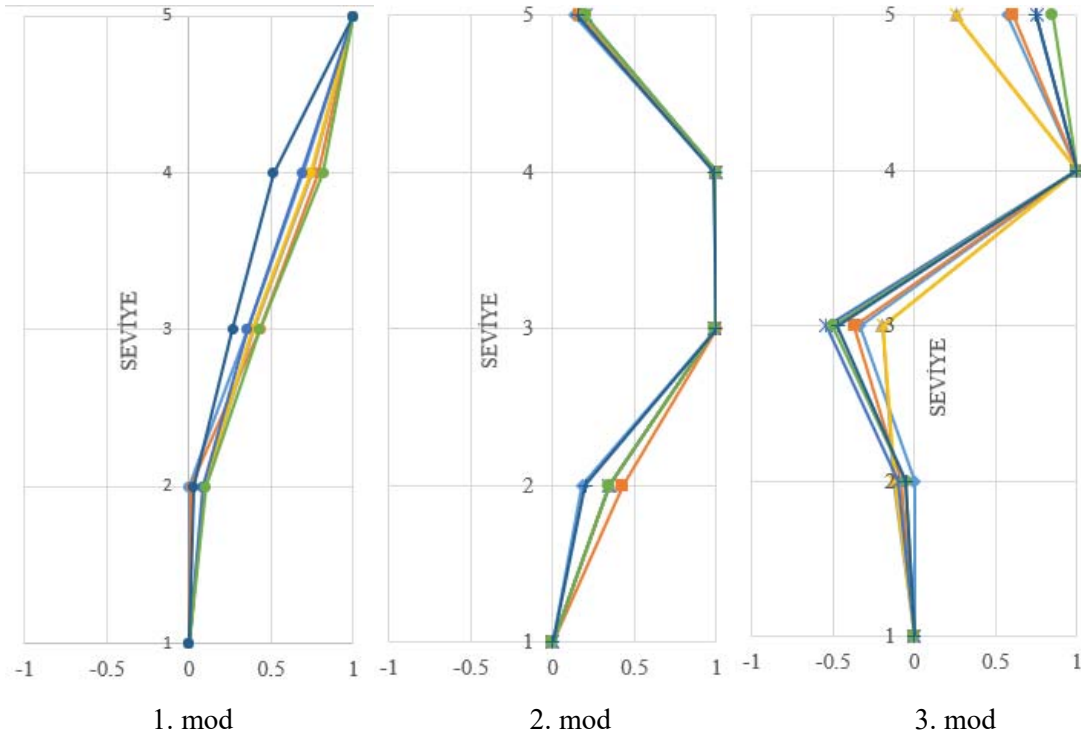


Şekil 12 - Rotor hızı – sönüm oranı ilişkisi.

Modal özellikler arasında sönüm oranı belirsizliği en yüksek parametredir. Buna ek olarak rüzgâr türbini yapılarında hareketli rotor kanatlarının kule önünden periyodik olarak geçmesi ile ortaya çıkan aerodinamik sönüm negatif ve pozitif değerler alabildiğinden bu parametrenin belirsizliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu sebeple ilk üç yapısal mod için analizlerden elde edilen sönüm oranlarının varyansının yüksek olduğu görülmektedir. Analizler rüzgâr türbini çalışır durumdayken toplanan veriler ile yapıldığından, aerodinamik sönümün de etkisi ile, yapıdaki sönüm değerleri bazı durumlarda alışılmalı değerlerin üzerinde elde edilmiştir. Şekil 13'te görüldüğü üzere üç mod için de elde edilen mod şekilleri her saat başı yapılan analizler için birbirine benzer elde edilmiştir.

## SONUÇ

Çevresel ve operasyonel faktörlerin, rüzgâr türbininin modal özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla, kullanımda olan bir rüzgâr türbini için, kule yüksekliği boyunca dağıtılmış bir veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem kendi sensörleri aracılığıyla topladığı ivme, sıcaklık ve nem verilerine ek olarak türbininin SCADA sistemi tarafından toplanan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, rotor hızı, nasel doğrultusu ve pitch açısı gibi değişkenleri de senkronize olarak kaydetmektedir.



Şekil 13 - Mod şekilleri.

Tüm veriler türbin sahasından üniversite kampüsüne anlık olarak aktarılmaktadır. Bu çalışmada 10 dakikalık paketler halinde 7 saat toplanan veri seti kullanılarak EFDD metodu ile türbinin dinamik özellikleri belirlenmiştir. Toplamda yapılan 84 adet analiz sonuçları incelendiğinde rüzgâr hızı, sıcaklık ve rotor hızı ile ilk üç yapısal moda ait frekans değerleri, sönüm oranları veya mod şekilleri arasında bariz bir ilişki tespit edilememiştir. Çevresel ve operasyonel faktörlerin modal parametrelere etkisinin net bir şekilde ortaya konulabilmesi için farklı operasyonel ve çevresel koşulları da içerecek şekilde uzun süreli kaydedilecek veri setleri ile çalışmalar yapılacaktır. Geliştirilmiş olan bu sistem kullanılarak uzun dönemli veri setleri elde edildiğinde, pitch açısı, nasel doğrultusu, nem ve türbin kulesi yüksekliği boyunca sıcaklık değişimi gibi parametrelerin de rüzgâr türbininin dinamik özelliklerine olan etkisini daha detaylı araştırılacaktır.

### Teşekkür

Yazarlar, 120M218 numaralı projede verdiği mali destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK), saha çalışmalarında verdiği desteklerden ötürü Dost Enerji'ye ve verdiği ekipman desteği için Kentkart A.Ş.'ye teşekkürlerini sunmaktadır. Bu yayında ifade edilen tüm görüşler, bulgular, sonuçlar ve öneriler yazarlara aittir, sponsor kuruluşların görüşlerini yansıtmayabilir.

### Kaynaklar

1. World Wind Energy Association. "World Market for Wind Power Saw Another Record Year in 2021". <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>



2. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Santralleri Birliği. "Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu" Ocak 2022.
3. International Electrotechnical Commission, International Standart Wind Turbines Design requirements (IEC 2005), 2005.
4. Guideline for the Certification of Wind Turbines (2010), Germanischer Lloyd, 2010.
5. Risø Wind Consult, INR, Wind Energy Department Risø National Laboratory Technical University of Denmark (DTU), 2002.
6. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Haritası". <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/bolgeler/TURKIYE-GENELI.pdf> erişim tarihi: 27 April 2022.
7. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). "Türkiye Sismik Tehlike Haritası". <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> erişim tarihi: 27 April 2022.
8. Katsanos, E. I., Thöns, S., & Georgakis, C. T., "Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review", *Wind Energy*, 19(11), 2113-2133, 2016.
9. Hu, W. H., Thöns, S., Rohrmann, R. G., Said, S., ve Rucker, W. (2015). Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system. Part I: Resonance phenomenon. *Engineering Structures*, 89, 260-272.
10. Hu, W. H., Thöns, S., Rohrmann, R. G., Said, S., ve Rucker, W. (2015). Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system Part II: Environmental/operational effects on dynamic properties. *Engineering Structures*, 89, 273-290.
11. Rainieri, C. and Fabbrocino, G. *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*, Springer, 2014, 104 p.
12. LabVIEW 2020 Professional development system by National Instruments. 11500 North Mopac Austin, Texas 78759 USA.
13. Structural Vibration Solutions ApS, "ARTEMIS Extractor, Release 4.0, User's Manual", Denmark, 2001.
14. Brincker R., Zhang L. ve Andersen P. (2001) Modal identification of output only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, S0964- 1726(1), 441-445.



## Kırılgnlık Eğrisi Kullanımının Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Depremden Sonra Yeniden Ayağa Kaldırılmasına Etkisi\*

Merve BAYRAKTAR<sup>1</sup>, Burcu GÜLDÜR ERKAL<sup>2</sup>

### ÖZET

*Yürütölen çalışmada depremden sonra elektrik kesintilerine sebebiyet verebilecek kritik konumları önceden tespit edebilmek ve gerekli önlemlerin alınması için bir altyapı oluşturmak amaçlanmıştır. İstanbul-Kadıköy bölgesindeki 2 bina kat planları kullanılarak modellenmiş, gerçek deprem verileri kullanarak doğrusal olmayan zaman tanım analizleri yapılarak kırılgnlık eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen kırılgnlık eğrileri depremden sonra orta gerilim elektrik dağıtım sistemlerini yeniden ayağa kaldırmak için tasarlanan Markov Karar Sürecinde (MKS) girdi olarak kullanılarak farklı deprem senaryoları için sonuçlar elde edilmiştir. Örnek alınan 30 baralı sistemde kullanılan kırılgnlık eğrileri özellikle M5'in üzerindeki depremlerde oldukça etkili ve hızlı sonuçlar vermiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Markov Karar Süreci, Kırılgnlık Eğrileri, Yeniden Elektriklendirme.

### ABSTRACT

#### ***The Effects of the Usage of Fragility Curves on Re-electrification of Electric Distribution Systems After an Earthquake***

*The study's objective is to identify the key locations that could result in power outages following an earthquake and to set up the framework for adopting the appropriate safety measures. Floor plans were used to model two buildings in the İstanbul-Kadıköy area, and fragility curves were produced using non-linear time history analyses and actual earthquake data. The Markov Decision Process (MKS), developed to restore medium voltage power distribution systems after an earthquake, was used to obtain results for various seismic situations. Using fragility curves yielded quick and effective results, especially for earthquakes greater than M5, using a 30-busbar system as an example.*

**Keywords:** Markov Decision Process, Fragility Curves, Re-Electrification.

---

1 Hacettepe Üniversitesi, Ankara - merve.bayraktar@hacettepe.edu.tr

2 Hacettepe Üniversitesi, Ankara - burcuguldur@hacettepe.edu.tr

## **GİRİŞ**

Enerji temininin güvenliği, toplumun genel elektrik kullanımını göz önüne alındığında, temel bir endişe kaynağıdır. Modern toplumun sorunsuz işleyişi günümüz dünyasında tümüyle elektrik enerjisine dayalıdır. Birçok temel hizmet (su, gaz, iletişim vb.) elektriğin sürekliliğine bağlı olarak sağlanmaktadır, bu durum elektrik sürekliliğini hayati bir noktaya taşımaktadır.

Muhtemel bir deprem sonrasında yardım ekiplerinin ve araçlarının hızlı bir şekilde deprem bölgelerine ulaştırılmasının ön koşulu olan iletişim altyapısının kesintiye uğramaması için yeniden elektrikleştirilmenin bir an önce gerçekleştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Depremden sonra meydana gelen olası elektrik kesintileri sadece iletişim için değil, içme suyu temini, arıtma tesislerinin sürdürülebilirliği ve hastanelerin hizmetine devam edebilmesi için de tehdit oluşturmaktadır.

Depremden sonra elektriğin sürekliliğinin sağlanamaması sonucu yapısal hasarı olmamasına rağmen hizmet veremeyen hastaneler olabilmektedir, örneğin 1999 Kocaeli depreminden sonra hastanelerin yarısı elektrikle beslenememiştir [1]. Depremlerden sonra meydana gelen bu elektrik kesintileri 1995 yılında Kobe, Japonya'da da meydana gelmiştir ve tüm deprem bölgesi üç ila beş günlük bir süre boyunca elektriksiz kalmıştır [2]. Elektrik enerjisi beslemesi, enerji tedarik sistemleri, müdahale planları, deprem risk değerlendirmesi ve yönetimine odaklanan deprem sonrası afet yönetimi araştırmaları artmaktadır, örneğin elektrik güç sistemlerinin sismik performans analizleri, Energy Working Group ve M. Shinozuka vd. çalışmalarında üzerinde durulan temel konu olmuştur [3-5]. Elektrik şebekelerinin restorasyonu çeşitli açılardan birçok araştırmada değerlendirilmiştir [6-12]. Qiu vd. ve Zhao vd. çalışmalarında olası felaketler için (felaket öncesinde) ağ restorasyonu yöntem önerilerinde bulunmuştur [6,7].

Bir depremin nerede ve ne kadar güçlü bir şekilde meydana geldiği yapıların hasar görülebilirliklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, deprem sonucunda sonsuz sayıda yıkım senaryosu ortaya çıkabilir. Bu, afet gerçekleşmeden geliştirilen senaryolarının kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Yeniden elektrikleştirme süreci için geliştirilen bu yöntemlerde ve yapılan çalışmalarda, doğrudan sahadan gelen verilere göre değil de oluşturulan senaryoya göre literatürde bulunan tahminsel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Mevcut çalışmada ise doğrudan sahadan gelen verilere göre ve depremin özelliklerini göre hazırlanan bilgiler kullanılmıştır. Çünkü elektrik dağıtım sistemlerinin düzgün çalışabilmesi için sistem gözlemlenebilirliğinin tam olarak sağlanması gerekmektedir.

## **AMAÇ**

Bu çalışmanın amacı, deprem meydana geldikten sonra orta gerilim elektrik dağıtım sisteminin en kısa sürede yeniden elektrikleştirilmesine yardımcı olacak bir arazi destek yazılımı geliştirmektir. Bu sorunun merkezini oluşturan deprem sonrası elektrik kesintilerini operasyonel bir arızadan ayıran en büyük fark, depreme bağlı olarak şebeke yapısında meydana gelen değişikliklerdir. Bu değişikliklerin temel nedeni, bazı sistem elemanlarının (elektrik direkleri, panolar, trafolar vb.) deprem nedeniyle hasar görmesi ve kullanılamaz hale gelmesidir.

Deprem meydana geldikten sonra, hastaneler, askeri üsler ve önemli devlet daireleri gibi kritik bölgelere elektrik enerjisinin geri kazandırılması büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla yeniden elektrikleştirme en kısa sürede tamamlanmalıdır. Elektrik ağının çöküşünden sonra ayağa kaldırılma sorunu araştırmacılar tarafından yıllarca araştırılmış ve belirli bir olgunluk kazanmıştır. Yeniden elektrikleştirme başlı başına bir sorun iken, afet durumlarında gelişen sorunların çözülmesi daha da zorlaşır. Bunun temel nedeni deprem nedeniyle birçok yapının yıkılması, ulaşımın ve iletişimin sağlanamamasıdır. Bir deprem sırasında ve sonrasında elektrik şebekesinin elemanları (elektrik direkleri, dağıtılmış üretim tesisleri, dağıtım trafoları) doğrudan zarar görebilir, çünkü bu elemanlar etrafındaki yapıların yıkılmasıyla kullanılamaz hale gelebilir.

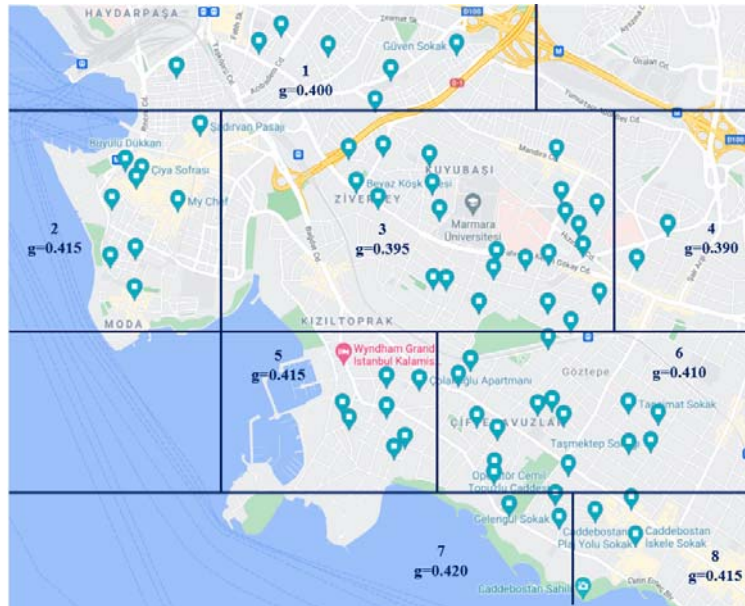
Bu çalışma, sistem operatörlerine elektrik şebekesini yeniden ayağa kaldırma konusunda karar desteği sağlayacak bir sistemde kullanılması için sahadaki gerçek verileri temsil eden doğru girdileri hazırlamayı amaçlamıştır. Geliştirilecek olan karar destek sistemi deprem verilerini de kullanarak şebeke elemanlarının zarar görme olasılığını tespit edebilmiştir.

## BİNA SEÇİMİ

Deprem sonrası meydana gelen elektrik kesintilerinin önüne geçebilmek için deprem sırasında ve sonrasında elektrik dağıtım sistemlerinin güvenliğini ciddi oranda tehdit eden binaların deprem sırasında hasar görebilirlikleri, bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuştur. Seçilen binaların hasar görme olasılıkları hesaplanmış ve elde edilen veriler elektrik dağıtım sistemlerinin yeniden elektrikleştirilebilmesi için kullanılmıştır. Kırılgnlık eğrileri elde etmek zor ve zahmetli bir iş olduğu için genellikle böyle çalışmalarda temsili eğriler kullanılmaktadır, ancak bu çalışmada bu yöntem tercih edilmemiştir. Kullanılan temsili kırılgnlık eğrileri binalara ve binaların bulunduğu zemine ait tüm detaylara uygun olarak hazırlanamadığı için, temsili kırılgnlık eğrilerinin kullanıldığı çalışmalar zaman zaman gerçekten uzaklaşabilmekte ve deprem sonrası yeniden elektrikleştirme sürecinin uzamasına sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, mevcut yapılar üzerinde gerekli tüm çalışmalar titizlikle yapılarak elde edilen spesifik kırılgnlık eğrileri kullanılmıştır.

## Elektrik Dağıtım Planları

Olası bir depremde binaların zarar görmesi nedeniyle bina içi veya çevresindeki elektrik dağıtım sistemi trafoları kullanılamaz hale gelebilir; bu nedenle modellenecek binaların seçiminde Kadıköy bölgesine ait gerçek elektrik dağıtım planları kullanılmıştır. Dağıtım planında elektrik sağlayıcılar, bunlardan çıkan elektrik yolları, bu yollarda elektriği sağlayan trafolar ve trafoların adresleri mevcuttur. Seçilecek binaların farklı g değerlerinde dağılımını gösterebilmek için binalar g değerlerine göre sınıflandırılmıştır. Kullanılan g değerleri tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan bir deprem için hesaplanan en büyük yer ivmeleridir. Şekil 1, içinde ve çevresinde elektrik dağıtım sistemleri bulunan binaların g değerlerine göre sınıflandırma haritasını göstermektedir.



Şekil 1 - Binaların 'g' değerlerine göre sınıflandırma haritası.

### **Binaların Sınıflandırılması ve Kat Planları**

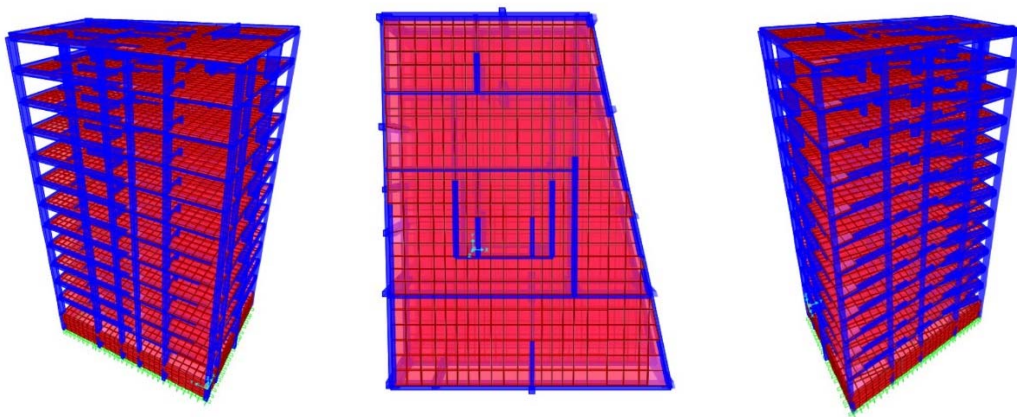
Sınıflandırma haritasının hazırlanmasının ardından, içinde veya çevresinde elektrik dağıtım sistemi bulunan binaların konumlarını ve etrafında bulunan trafoları kontrol etmek için İstanbul Kadıköy'e keşif düzenlenmiştir. Keşif süresince bazı binaların yıkıldığı, bazı binaların kentsel dönüşüme uğradığı ve bazı binaların içerisinden elektrik dağıtım sistemlerinin taşındığı görülmüştür. Bu doğrultuda elde edilen verilere göre, elektrik dağıtım sistemlerine hasar verebilecek mesafede ve durumda olan sadece altı bina tespit edilmiştir. Görsele göre iki bina 2 numaralı g bölgesinde, diğer binalar 3, 5, 6 ve 8 numaralı g bölgelerinde olduğu için g değeri çeşitliliği sağlanmıştır. Bu bildiride bu altı binadan ikisi için yapılan çalışmalar ve analizler anlatılmıştır. Seçilen binaların kırılgnlık eğrilerinin çıkarılabilmesi için binaların dinamik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bunu yapabilmek için gerekli olan belgeler binaların kat planlarıdır. Binaların 1970-1980 yıllarında yapılmış olması nedeniyle kat planlarını almak için Kadıköy Belediyesi ile iletişime geçilmiş ve çalışma kapsamında kat planları temin edilmiştir.

### **BİNA MODELLERİ**

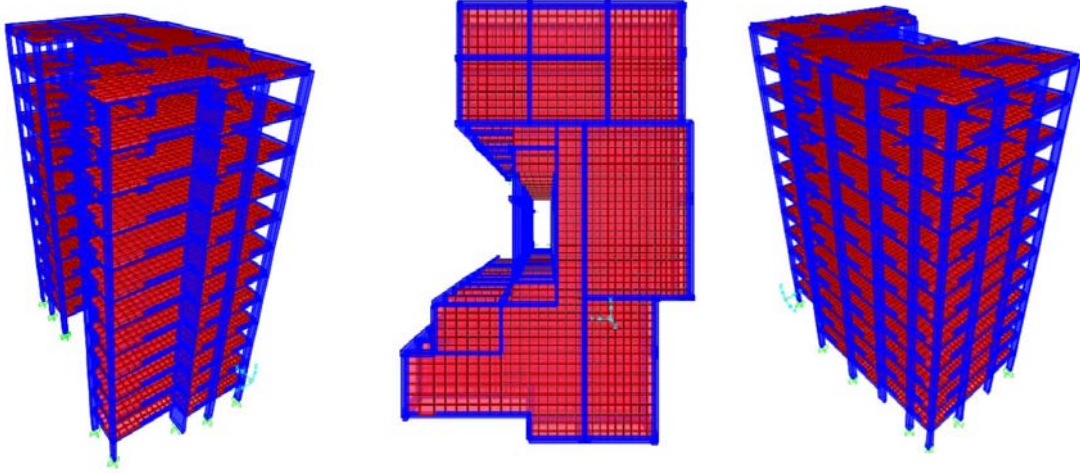
SAP2000 [13] programının bu çalışma kapsamında gerçekleştirilecek statik ve dinamik analizler için kullanılması uygun görülmüştür. Kat planları elde edildikten sonra SAP2000 programında 3 boyutlu modeller oluşturulmuştur. Binalardan 710-31 numaralı bina bodrum, zemin ve normal kat olmak üzere 3 farklı plandan, 1113-197 numaralı bina bodrum ve normal kat olmak üzere iki farklı kat planından oluşmaktadır. Binaların ikisi de 12 katlı olup 710-31 numaralı binanın yüksekliği 33,4 metre iken 1113-197 numaralı binanın yüksekliği 34,5 metredir.

### **3D-Model ve Modal Analiz**

Yapı girdi parametrelerine ve kat planlarına göre SAP2000 programında binaların modellemeleri yapılmıştır. Kat planlarının benzer olmaması sonucunda oldukça farklı modellerin oluşturulması sonraki aşamalarda elde edilecek sonuçları çeşitlendirmek için önemlidir. Şekil 2, SAP2000 programında oluşturulan bina modellerini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 2 - Binaların 3 boyutlu modelleri (a) 710-31 (b) 1113-197.

## YER HAREKETİ

SAP2000 programında modellenen binaların lineer olmayan zaman tanım alanı analizini yapabilmek için analiz edilecek yer hareketleri binanın davranışına göre seçilmeli ve ölçeklendirilmelidir. Deprem kaydı seçimlerinde öncelikle binaların tasarım spektrumlarının çizilmesi gerekmektedir. Gerçek yer hareketlerinin seçilebilmesi için öncelikle binaların tasarım spektrumları oluşturulmalıdır. Bu çalışmada, seçim ve ölçeklendirme işlemlerinden önce, binaların enlem ve boylamına göre Türk Deprem Yönetmeliği referans alınarak 2475 yıllık dönüş süresi için tasarım spektrumları oluşturulmuştur. Tasarım spektrumu belirlendikten sonra, hedef spektrumu belirlemek için tehlike spektrumu oluşturulmalıdır ve tasarım spektrumu ile karşılaştırılmalıdır. Tehlike spektrumları, OpenQuake [14] programı kullanılarak  $V_{s30}$  (ortalama kesme dalgası hızı) ve  $Z_{1.0}$  (1.0 km/s kesme dalgası hızı) değerleri temel parametre kabul edilerek oluşturulmuştur [15]. Binaların  $Z_{1.0}$  değerleri Denklem 1'e göre,  $V_{s30}$  değerleri ise İstanbul Belediyesi tarafından hazırlanan  $V_{s30}$  haritasına göre belirlenmiştir.

$$\ln(Z_{1.0}) = \frac{-7.15}{4} \ln\left(\frac{V_{s30}^4 + 571^4}{1336^4 + 571^4}\right) \quad (1)$$

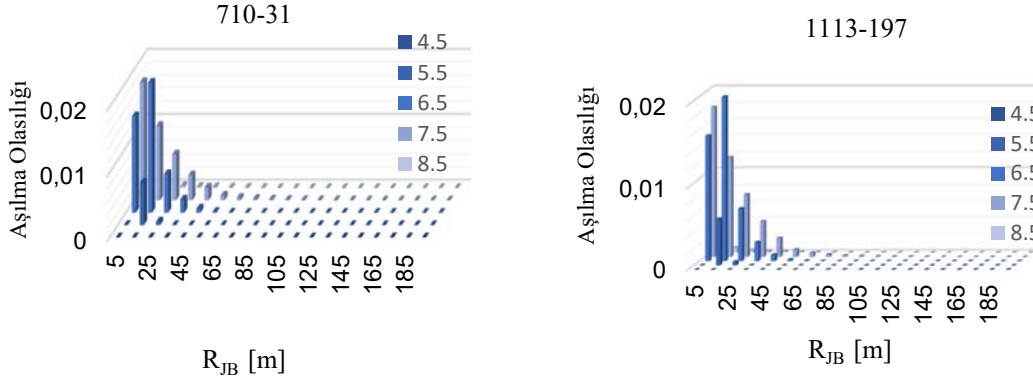
## Ayrıştırma İşlemleri

Yer hareketi seçimi işlemi için deprem parametrelerinin (büyüklük,  $M_w$ , Joyner-Boore mesafesi,  $R_{JB}$ ) en etkili oldukları referans aralıkları belirlenmelidir. Bu çalışmada yapılara en çok etki eden deprem parametrelerinin referans aralıkları OpenQuake programı yardımıyla ayrıştırma işlemi ile elde edilmiştir. Ayrıştırma sonuçlarına göre seçilen iki bina için 6,5 M büyüklük ve 15 kilometre Joyner-Boore mesafeleri en fazla etkiye sebep olan senaryo olarak belirlenmiştir. Şekil 3, ayrıştırma işleminin sonuçlarını göstermektedir.

## Yer Hareketi Kayıtlarının Elde Edilmesi

Ayrıştırma sonuçlarına göre her bina için aşılma olasılığı en yüksek ilk üç deprem senaryosu belirlenmiştir ve iki bina için toplam altı deprem senaryosu olmak üzere dört farklı grup belirlenmiştir. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) web sitesinden dört farklı

deprem parametre seti olarak yer hareketi kayıtları indirilmiştir. İlk set  $M_w$  için 6-7 M,  $R_{JB}$  için 0-20 kilometre ve  $V_{S30}$  için 600-900 m/s, ikinci set  $M_w$  için 7-8 M,  $R_{JB}$  için 0-30 kilometre ve  $V_{S30}$  için 600-900 m/s, üçüncü set  $M_w$  için 6-7 M,  $R_{JB}$  için 0-20 kilometre ve  $V_{S30}$  için 400-500 m/s ve dördüncü set  $M_w$  için 7-8 M,  $R_{JB}$  için 0-30 kilometre ve  $V_{S30}$  için 400-500 m/s olarak belirlenmiştir.



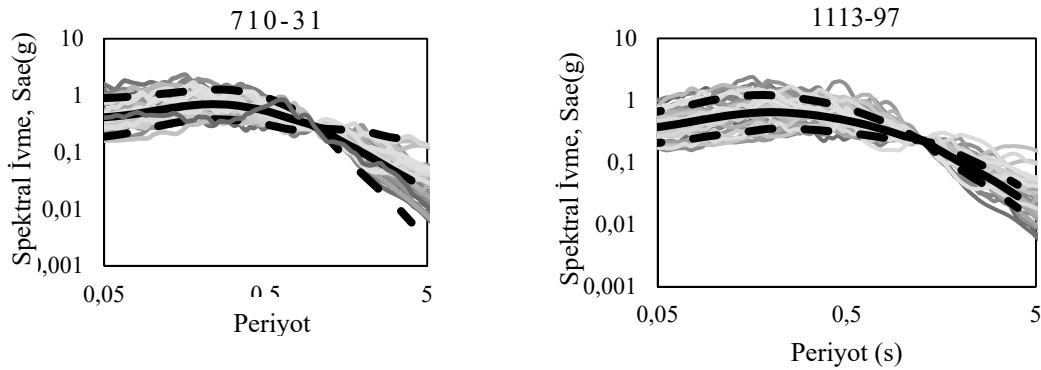
Şekil 3 - Ayrıştırma işlemi.

### Koşullu Spektrum ve Hedef Spektrum

Yer hareketlerinin doğru seçilebilmesi için hedef spektrum belirlenmesi çok önemlidir. Hedef spektrum, Lin vd. çalışmasında dört farklı yöntem kullanılarak değerlendirilmiştir [16]. Bu çalışmada, Yöntem 4'te en etkili dört farklı deprem senaryosu kullanıldığı için bu yöntemin kullanılması tercih edilmiştir. Yöntem 4'teki koşullu spektrum, 0,25 ağırlıklı dört farklı ortalama ve standart sapma değeri kullanılarak, Akkar vd., [17], Kale vd., [18], Boore vd., [19] ve Chiou ve Youngs vd., [20]'nin çalışmalarına göre hesaplanmıştır.

### Yer Hareketi Seçimi ve Ölçeklendirilmesi

Seçilen gerçek deprem kayıtları, binaların doğal titreşim periyotlarındaki  $S_{ae}$  değerine göre ölçeklendirilmiştir. Doğru kayıtları seçebilmek için periyot ve  $S_{ae}$  grafiğindeki x eksenini 0,2 T-1,5 T aralığında olacak şekilde güncellenmiştir. T her binanın doğal titreşim periyodunu ifade etmektedir ve  $\mu - \sigma$  ve  $\mu + \sigma$  eğrilerinin arasında kalan otuz farklı kayıt seçilmiştir, Şekil 4  $\mu - \sigma$  ve  $\mu + \sigma$  eğrilerini göstermektedir (Siyah kesikli çizgiler  $\mu - \sigma$  ve  $\mu + \sigma$  eğrileridir, siyah çizgiler koşullu ortalama eğrilerdir, gri çizgiler indirilen kayıtlardır).



Şekil 4 - Seçilen deprem parametreleri.



## ANALİZ DEĞERLENDİRMELERİ

Yer hareketi kayıtları seçildikten sonra, beş farklı dönüş periyoduna karşılık gelen aşılma olasılığı değerlerine göre SeismoMatch [21] programında hedef spektrum olarak düzgün tehlike spektrumunu belirlenerek her bir yer hareketi kaydının gerçek deprem verileri eşleştirilmiştir. Eşleşmelerde hedef spektrumu ile yer hareketi kaydının yüzde 90 ve üzeri eşleşmesi sağlanmıştır.

### Doğrusal Olmayan Zaman Alanı Analizi

Eşleştirmeler tamamlandıktan sonra kırılgenlik eğrilerini elde etmek için SAP2000 programında hazırlanan modeller üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerine başlanmıştır. Her bina için beş farklı aşılma olasılığı değerine sahip 60 farklı kayıt bulunduğundan, her binada 300 kayıt için doğrusal olmayan zaman alanı analizi yapılmıştır. Yani toplam 600 doğrusal olmayan zaman alanı analizi yapılmıştır. SAP2000 programında seçilen yer hareketi kayıtları fonksiyon olarak tanımlanarak analizler başarıyla tamamlanmıştır.

### Kat Deplasmanları

Her bina için 300 farklı yer hareketi kaydı ile doğrusal olmayan zaman alanı analizi ile elde edilen çatı deplasman değerleri, maksimum deplasman değerine göre listelenmiştir. En küçük aşılma olasılığının analizi, en yüksek yer değiştirme değerlerini ile sonuçlanmıştır. Bu çalışmadaki en küçük aşılma olasılığı 0.001 olarak tanımlanmıştır. Binaların çökme kriteri, çatı yer değiştirmesi değerlerinin binanın toplam yüksekliğinin 0,1 katından fazla olması olarak belirlenmiştir.

## KIRILGANLIK EĞRİSİ

Bir kırılgenlik eğrisi, belirli bir yapının çeşitli yükleme koşullarına tepkisinin belirli bir performans sınır durumunu aşma olasılığını temsil eder. Kırılgenlik eğrileri, analitik yöntemler kullanılarak veya gerçek olaylardan elde edilen ampirik verilerden türetilir. Bu çalışmada, analitik adımlar izlenerek kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir. Bu analitik adımlar sırasıyla; doğrusal olmayan sonlu eleman analitik modelinin oluşturulması, yapıların doğal titreşim periyodunun belirlenmesi için modal analiz yapılması, yer hareketinin seçilmesi ve ölçeklendirilmesi, gerçek yer hareketi kayıtları kullanılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmesi, analizler sonucu binaların yer değiştirme değerlerinin elde edilmesi ve lognormal dağılımı kullanılarak kırılgenlik eğrilerinin elde edilmesi; olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, oluşturulan MKS uygulamasına girdi olarak kullanılmak üzere kırılgenlik eğrileri elde edilmiştir. Sismik kırılgenlik fonksiyonunun en yaygın şekli lognormal kümülatif dağılım fonksiyonudur. Bu form denklem 2'de gösterilmiştir.

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x-\mu)}{\sigma}\right) \quad (2)$$

x: çatı yer değiştirmesi için belirli bir değer

$F(x)$ : kırılgenlik fonksiyonu

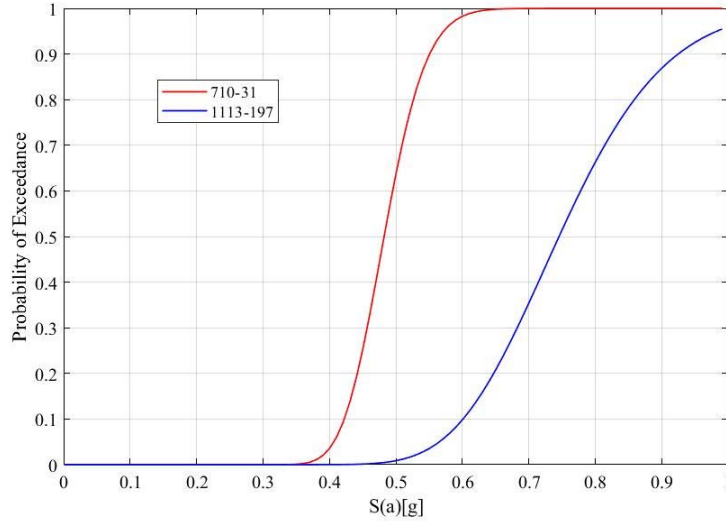
$\Phi(s)$ : standart normal kümülatif dağılım işlevi (genellikle Gauss olarak adlandırılır)

$\mu$ : bina için maksimum çatı deplasmanının ortalama değeri

$\sigma$ : bina için maksimum çatı yer değiştirmesinin standart sapması.

600 doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi sonucunda elde edilen çatı yer değiştirme verileri lognormal kümülatif dağılım fonksiyonuna girdi olarak kullanılmıştır.

Tüm yapıların düzgün kırılmalık eğrilerini elde edebilmek için MATLAB bilgisayar programı kullanılmıştır. Hazırlanan MATLAB kodunda elde edilen nokta temsillerinin logaritmik dağılımı sağlanarak iki farklı kırılmalık eğrisi elde edilmiştir. Şekil 5, seçilen binalar için elde edilen kırılmalık eğrilerini göstermektedir.



**Şekil 5 - Kırılmalık eğrileri.**

### **Markov Karar Süreci (MKS)**

Bu projede, depremde zarar görmüş olan elektrik dağıtım sisteminin ayağa kaldırılması işlemi MKS olarak modellenmiştir. MKS'nin her bir durumu şebekedeki bütün elemanlara dair durum bilgilerini içermektedir, çalışmada dağıtım sistemi elemanları bir bütün olarak ele alınmıştır. Bir hattın durumunun 'enerjili(E)', 'yıkık(D)' ve 'bilinmiyor(U)' olmak üzere üç durumdan biri olarak atanması planlanmıştır. U halindeki bir hattın yıkılmış olma olasılığı yukarıda hesaplanan kırılmalık eğrileri ile elde edilen olasılık değerleridir.

**Tablo 1 - MKS Senaryoları**

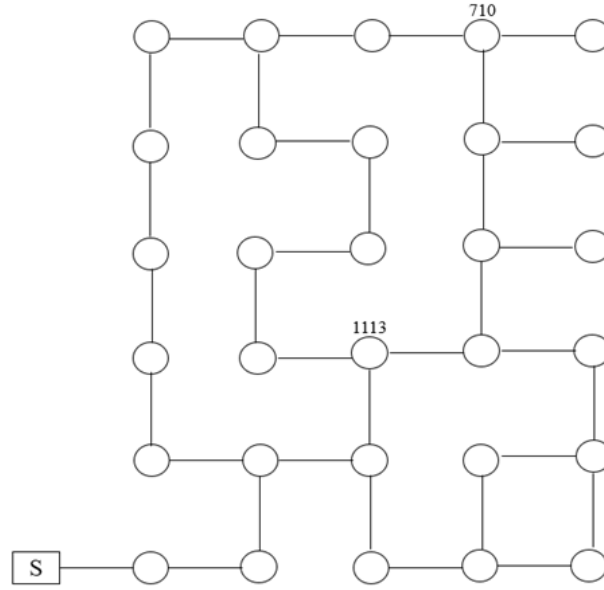
g değerleri	Aşılma Olasılıkları									
	0.35	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5	0.55	0.6	0.7
710	0	0.01	0.05	0.12	0.28	0.35	0.52	0.85	0.97	1
1113	0.15	0.45	0.8	0.9	0.92	0.98	0.99	1	1	1
Diğer baralar (Durum 1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diğer baralar (Durum 2)	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
Diğer baralar (Durum 3)	0 ile 0.5 arasında rastgele seçim									

Bu çalışma kapsamında geliştirilen MKS tabanlı karar destek yöntemi iki aşamada çalışmaktadır. Deprem gerçekleştiğinde, herhangi bir manevra yapılmadan önce, MKS maksimum enerjilendirilmiş alanı elde edecektir. İkinci aşamada ise karar destek mekanizması ile sahada fiziksel olarak aksiyon alınacaktır. Aksiyonların başarılı ya da başarısız olmasına göre MKS çözümü güncellenecektir. Kırılmalık eğrileri ile elde edilen olasılıkların elektrik dağıtım

sistemindeki birimlerin depremden sonraki durumlarının tahmin edilmesinde kullanılacaktır ve bu bilgiler MKS’de girdi olarak kullanılarak, depremden sonra yeniden elektrikleştirme için en uygun yol haritasının elde edilmesi planlanmaktadır. Örnek bir elektrik dağıtım sistemi üzerinde farklı kombinasyonlar oluşturmak için seçilen g değerlerine göre farklı olasılıklar kombine edilerek MKS sonuçları elde edilmiştir.

Kırılgnlık eğrilerinin sistemde seçilen elektrik yolları üzerindeki etkisini gösterebilmek için 10 farklı g değeri yani 10 farklı deprem senaryosu için eğrilerde belirlenen aşılma olasılık değerlerine göre karar destek sistemi çalıştırılmıştır. Seçilen binalar ve bölgedeki geri kalan diğer binalar için farklı deprem senaryolarında aşılma olasılıkları Tablo 1’de gösterilmiştir.

MKS sisteminde kırılgnlık eğrilerinin etkilerini göstermek için Kadıköy elektrik dağıtım sisteminden 30 bar içeren bir örnek seçilmiştir. Seçilen örnek sistem Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6 - Örnek MKS sistemi

Tablo 2 - MDP sisteminde aksiyon sayılarındaki değişimler

	0.35	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5	0.55	0.6	0.7
0.35	0	13	13	13	13	13	13	13	13	13
0.4	13	0	1	0	2	4	4	13	13	13
0.42	13	1	0	1	3	5	5	13	13	13
0.44	13	0	1	0	2	4	4	13	13	13
0.46	13	2	3	2	0	2	2	13	13	13
0.48	13	4	5	4	2	0	0	13	13	13
0.5	13	4	5	4	2	0	0	13	13	13
0.55	13	13	13	13	13	13	13	0	13	13
0.6	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0
0.7	13	13	13	13	13	13	13	13	0	0

Bu sistem üzerinde 3 farklı senaryo ile sistem çalıştırılmıştır. İlk senaryoda seçilen 6 binanın etki etmediği trafoların hiç hasar görmediği, senaryo ikide 0,5 g değerine kadar hasar görmediği, 0,5 g ve daha yüksek g değerlerinde ise yüzde 50 olasılıkla hasar gördüğü son olarak senaryo 3'te ise rastgele olarak bazılarının hasar görmediği bazılarının ise yüzde elli olasılık ile hasar gördüğü kabul edilmiştir. Bu senaryolar Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu tabloya göre 10 farklı deprem durumu için 3 farklı senaryo üzerinden çalışılarak MKS sistem sonuçları elde edilmiştir. MKS sistemi çalıştırıldığında senaryo 2'de 0,35 g için 102 durum, 0,7 g için 31 durum oluşturulmuştur. Yani, 0,7 g değerinde hasarlı bara tespiti, sadece 30 bara sahip bir sistemde bile durum sayısını üçte bire indirmektedir. Oluşan durum sayısı hem MKS sisteminin çalışma hızını hem de optimal yol seçimini önemli ölçüde etkilediğinden, bu noktada kırılabilirlik eğrilerinin sağladığı doğru parametrelerle durum sayısının azaltılması yeniden elektrikleştirme için çok önemlidir. Senaryolar arasındaki değişimi daha detaylı bir şekilde incelemek için ortak durum sayısı üzerinde değişen aksiyon sayıları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Bu sonuçlar öncelikle, eğrilerin kullanımının sistemin seçtiği yolu ne kadar değiştirdiğini ve doğru olasılıklar olmadan kullanılacak yolun deprem sonrası yeniden elektrikleştirmeyi ya oldukça geç sağlayabileceğini ya da hiç sağlayamayacağını göstermiştir. Görülebilecek bir diğer sonuç ise her bir deprem senaryosunun etkili olabilecek yeniden elektrikleştirme yolunu ne kadar etkilediği olmuştur.

## **SONUÇ**

Bu çalışmada Kadıköy bölgesinde bodrum katında veya bahçesinde elektrik dağıtım sistemi bulunan iki bina için gerçek kat planları üzerinden SAP2000 programı kullanılarak bina modelleri elde edilmiş, bu modellerde bölge için seçilen gerçek deprem verileri üzerinden doğrusal olmayan zaman tanım analizleri yapılarak kırılabilirlik eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen kırılabilirlik eğrileri 30 baralı örnek bir elektrik dağıtım sisteminde 3 farklı durum ile 10 farklı deprem senaryosu için analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kırılabilirlik eğrilerinin aksiyon sayısını doğrudan etkilediğini göstermiştir. Geliştirilen MKS sisteminin depremden sonra oluşan kaosun yönetilmesinde ve yeniden elektrikleştirmenin en kısa sürede sağlanmasında oldukça etkili olacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda, kullanılan 30 baralı sistemin genişletilmesi hedeflenmektedir.

## **Teşekkür**

Kadıköy Belediyesi'ne bina kat planlarını bizimle paylaştığı için teşekkür ederiz. Bu çalışma, Türkiye Bilimsel Araştırma ve Teknik Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje No: 118E183).

## **Kaynaklar**

1. R. C. Myrtle, S. F. Masri, R. L. Nigbor and J. P. Caffrey, Classification and prioritization of essential systems in hospitals under extreme event, Earthquake Spectra, 21(2005) 779–802.
2. M. Shinozuka, T.-C. Cheng, M. Feng and S.-T. Mau, Seismic performance analysis of electric power systems, Research Progress and Accomplishments 1997–1999, (1999) 61–69.
3. A.-P. E. Cooperation, Earthquake disaster management of energy supply system of APEC member economies. Energy Commission, Ministry of Economic Affairs, (2002)

4. M. Shinozuka, X. Dong, T. Chen and X. Jin, Seismic performance of electric transmission network under component failures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(2007) 227-244.
5. M. Shinozuka, S. Chang and T. Cheng, Advances in seismic performance evaluation of power networks, *APEC Seminar on Earthquake Disaster Management of Energy Supply Systems*, (2003).
6. F. Qiu and P. Li, An Integrated Approach for Power System Restoration Planning, *Proceedings of the IEEE*, 105(2017) 1234-1252.
7. Z. Zhao and B.-T. Ooi, Feasibility of fast restoration of power systems by micro-grids, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(2018) 126-132.
8. A. Golshani, W. Sun, Q. Zhou, Q. P. Zheng and J. Tong, Two-Stage Adaptive Restoration Decision Support System for a Self-Healing Power Grid, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(2017) 2802-2812.
9. N. Ganganath, J. V. Wang, X. Xu, C.-T. Cheng and K. T. Chi, Agglomerative Clustering Based Network Partitioning for Parallel Power System Restoration, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(2017) 3325-3333.
10. L. H. F. Neto, B. R. Pereira and G. R. da Costa, Smart Service Restoration of Electric Power Systems, *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, 2016, p. 1-5.
11. M. Ostermann, P. Hinkel, D. Raoofsheibani, W. H. Wellssow and C. Schneider, A minimum regret-based optimization approach for power system restoration in EHV grids, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL, USA, 2017, p. 1-5.
12. C. Loh and Y. Huang, Seismic fragility analysis of Highway bridges, *Monte Carlo Simulation*, (2001) 505-511.
13. CSI. SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design. *Computers and Structures Inc.*, Berkeley, California (2019).
14. GEM. The OpenQuake-engine User Manual. *Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.13.0* (2022).
15. M. Pagani, D. Monelli, G. Weatherill, L. Danciu, H. Crowley, V. Silva, P. Henshaw, L. Butler, M. Nastasi, L. Panzeri, M. Simionato and D. Vigano, *OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model*, *Seismological Research Letters*, 85-3, 2014.
16. T. Lin, C. B. Haselton and J. W. Baker, Conditional spectrum-based ground motion selection. Part I: Hazard consistency for risk-based assessments, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(2013) 1847-1865.
17. S. Akkar, M. A. Sandikkaya and B. Ö. Ay, Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader Europe region, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(2014) 517-547.
18. Ö. Kale and S. Akkar, A ground-motion logic-tree scheme for regional seismic hazard studies, *Earthquake Spectra*, 33(2017) 837-856.
19. D. M. Boore, J. P. Stewart, E. Seyhan and G. M. Atkinson, NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, 30(2014) 1057-1085.

20. B. S.-J. Chiou and R. R. Youngs, Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, 30(2014) 1117-1153.
21. Seismosoft. SeismoMatch 2020 – A computer program for spectrum matching of earthquake records (2020).

## Tarihi Kesme Taş Binaların Düzlemdışı Sismik Performansının Değerlendirmesi İçin Deneysel Ötelenme Limitleri

İbrahim Serkan MISIR<sup>1</sup>, Fikret KURAN<sup>2</sup>, Gökhan YÜCEL<sup>3</sup>, Ali Cihan DEMİR<sup>4</sup>, Ege YEŞİLBAŞ<sup>5</sup>, Cansu Beril ESER<sup>6</sup>, Serap TOPÇU<sup>7</sup>, Ömer ALDEMİR<sup>8</sup>

### ÖZET

Ülkemizde ve dünyada kültürel mirasın önemli bileşenlerinden biri kuşkusuz tarihi yığma yapılardır. Araştırmalar çoğunlukla duvarların düzlemiçi davranışına odaklanmıştır. Fakat bu yapılarda diyafram etkisi sınırlı olup duvar yükseklikleri ve desteklenmemiş duvar uzunlukları fazladır. Bu tür duvarlar deprem yükleri altında çoğunlukla düzlemiçi dayanıma ulaşmadan düzlemdışı yönde devrilmektedir. Şekil değiştirme esaslı bir yaklaşımla binaların hasar görülebilirliğinin analiz edilebilmesi için çeşitli tür duvarlar için düzlemdışı doğrultuda tepe ötelenmesi-hasar ilişkisinin ortaya konulması yararlı olacaktır. Sunulan çalışmada, tarihi kesme taş duvarları temsil eden iki ve üç tabakalı büyük ölçekli U-şekilli duvar numunelerinin çevrimsel düzlemdışı test sonuçları paylaşılmış ve benzer nitelikteki binaların performans değerlendirmesinde kullanmak üzere belirli hasar düzeylerine karşılık gelen izin verilebilir tepe ötelenme oranları önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tarihi yığma binalar, kesme taş duvar, deprem güvenliği, performans esaslı değerlendirme, düzlemdışı test, ötelenme sınırları.

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - serkan.misir.deu.edu.tr

2 Vakıflar Genel Müdürlüğü, Ankara - f.kuran@vgm.gov.tr

3 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye - gokhanyucel@osmaniye.edu.tr

4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - alicihan.demir@ogr.deu.edu.tr

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - ege.yesilbas@ogr.deu.edu.tr

6 Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa - cansu.eser@cbu.edu.tr

7 İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir - serap.topcu@idu.edu.tr

8 Gazi Üniversitesi, Ankara - omeraldemir@gazi.edu.tr

## ABSTRACT

### **Experimental Drift Limits for the Evaluation of Out-of-Plane Seismic Performance of Cut Stone Historical Buildings**

Historical masonry buildings are undoubtedly important components of cultural heritage in our country and in the world. Past research has generally focused on the in-plane behavior of masonry walls. However, in most of these structures, the diaphragm effect is limited, wall heights perpendicular to the plane are high and unsupported wall lengths are wide. These walls usually collapse out-of-plane under seismic loads before reaching their in-plane strength. In order to analyze the vulnerability of such structures with a performance-based approach, it would be useful to reveal the top drift-damage relationship for various characteristics of walls. In this study, the cyclic out-of-plane test results of two- and three-layered large-scale U-shaped wall specimens that can represent historical cut stone walls are shared. Moreover, the allowable top drift ratios corresponding to certain damage states are suggested to be used in the evaluation of numerical results of similar buildings.

**Keywords:** Historical masonry buildings, cut stone wall, earthquake safety, performance-based evaluation, out of plane test, drift limits.

## GİRİŞ

Tarihi yığma yapıların korunması ve sonraki nesillere aktarılması kültürel mirasın devamlılığı açısından önemlidir. Malzeme ve taşıyıcı sistem davranışı açısından benzersiz olan bu karmaşık yapılarda, betonarme ve çelik yapı tasarımındaki alışılmış sismik analiz yöntemleri doğrudan kullanılamamaktadır. Bir yığma yapının davranışı incelenirken düzlemiçi özelliklerinin yanında düzlemdışı hasar alma ve devrilme ihtimali de göz önünde bulundurulmalıdır [1]. Yığma yapıların düzlemdışı doğrultudaki hasar görülebilirliği yakın dönemlerde meydana gelen depremlerin sonuçlarıyla da gösterilmiştir [2,3]. Düzlemdışı hasara taşıyıcı elemanlar arasındaki zayıf çekme ve kayma mukavemetlerinin yön verdiği bilinmekle birlikte yığma yapılarda diyafram etkisi oluşturacak döşemelerin ve uygun bağlantı elemanlarının genel olarak eksik olması düzlemdışı hasarı artırmakta olup [3] duvar taşıyıcı elemanlarında düzlemiçi hasardan önce düzlemdışı devrilme ve göçmelere neden olabilmektedir. Literatürde yığma duvarların düzlemdışı davranışına odaklanan pek çok deneysel araştırma bulunmaktadır. Bu deneylerde düzlemdışı yüklere neden olan atalet kuvvetleri deplasman kontrollü aktivatör [4-7] veya hava yastığı [8-10], veya sarsma tablası [11,12] kullanılarak canlandırılmıştır. Derakhshan ve diğ. [8] altı tam ölçekli çok tabakalı duvar numunesi üzerinde hava yastığı ile düzlemdışı yarı statik testler gerçekleştirmiş, Ferreira ve diğ. [9] çift tabakalı taş duvar testleri üzerinde hem hava yastığı hem de aktivatör kullanmıştır. Maddaloni ve diğ. [7], tam ölçekli çift tabakalı duvar numuneleri üzerinde çevrimsel yükleme testleri gerçekleştirmiş, deneysel sonuçlarını kinematik hesaplar ile kıyaslanmıştır. Maccarini ve diğ. [10], U-şekilli duvar numuneleri üzerinde düzlemdışı yarı-statik yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Bu bildirinin yazarları tarafından yürütülen ve AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı tarafından desteklenen araştırma projesi [13, 14] kapsamında, düzlemdışı doğrultuda narin ve döşeme hizasında diyafram etkisi bulunmayan çok tabakalı taş yığma duvarların düzlemdışı davranışı incelenmiştir. Bunun için öncelikle, referans bir tarihi yığma yapıda tahribatsız ve yarı-tahribatlı testler ile duvar morfolojisi, mekanik ve dinamik özellikleri belirlenmiştir. Ardından bu bilgiler kullanılarak üretilen temsili duvar numunelerinin yarı-statik düzlemdışı testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bildiri kapsamında, düzlemdışı testler sırasında gözlenen hasar durumu ve karşılık gelen ötelenme oranları paylaşılmıştır.



## AMAÇ VE KAPSAM

Sunulan çalışmanın dayandığı araştırma projesi kapsamında, taş yığma duvarların deneysel düzlemdışı davranışı ve hasar sınırları konusunda deneysel veri seti üretilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu veri seti kullanılarak benzer yapıların deprem performansının şekil değiştirme esaslı bir yaklaşımla analiz edilebilmesi için belirli hasar sınırlarına karşılık gelen tepe ötelenme oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için farklı tabaka özelliklerine sahip dört adet U-şekilli büyük geometrik ölçekli taş duvar numunesi Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda inşa edilmiş ve test edilmiştir. Sismik yükleri temsil eden yarı-statik çevrimsel yatay yükler duvar numunelerinin cephe duvarına düzlemdışı doğrultuda uygulanmış, yük-yerdeğiştirme tepkisi ve hasar durumları dikkate alınarak tüm numuneler için ötelenme sınırları belirlenmiştir. Duvar numuneleri, İzmir Selçuk'ta bulunan tarihi İsabey Camii'nin avlu duvarları referans alınarak tasarlanmıştır (**Şekil 1a**). Bu yapıda düzlemdışı yöndeki desteksiz uzunluğu nispeten fazla olan, yaklaşık 15 m yüksekliğe ve 180 cm kalınlığa sahip çift ve üç tabakalı taş duvarlar bulunmaktadır (**Şekil 1b**). Sunulan çalışma kapsamında iki numunenin test sonuçları paylaşılmış ve izin verilebilir düzlemdışı tepe ötelenme oranları önerilmiştir.



(a)



(b)

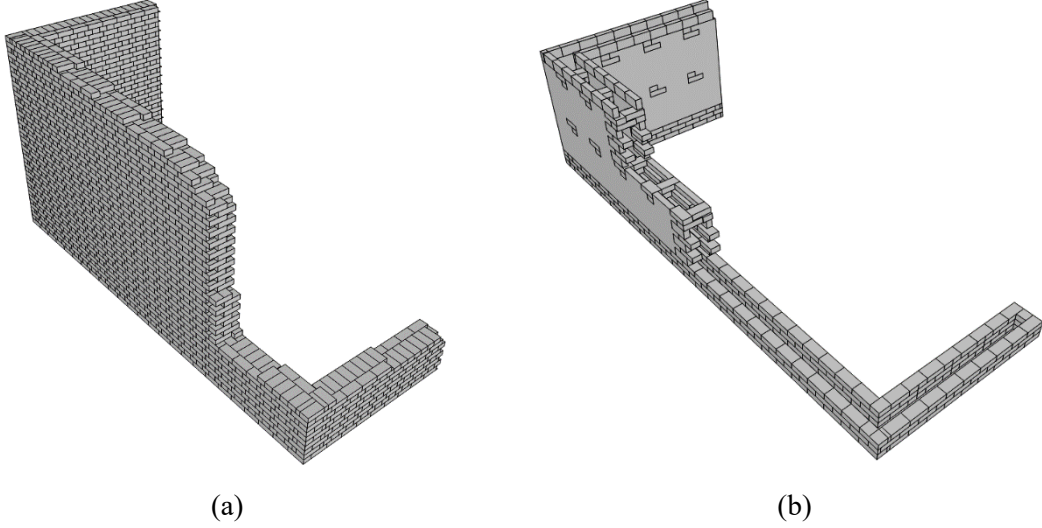
**Şekil 1** - (a) Referans tarihi yapının konumu ve (b) perspektif görünüşü.

## DENEY NUMUNELERİ

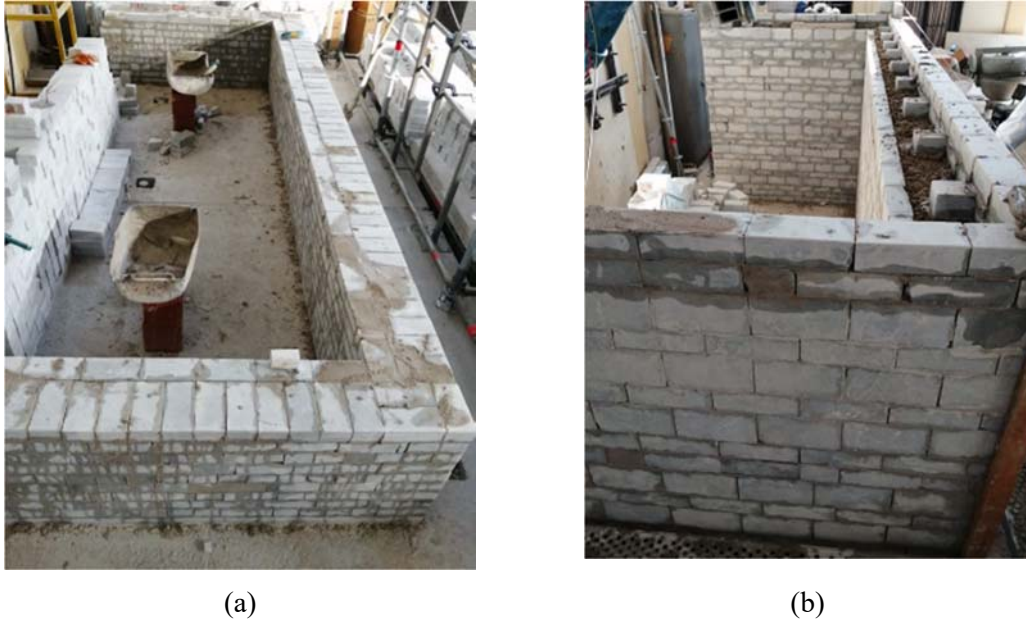
Numune tasarımında referans yapının batı ve kuzey cephe avlu duvarının geometrik ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Endoskopik incelemede duvar yüksekliğinin alt yarısının çift tabakalı, üst yarısının ise üç tabakalı yığma duvar kesitine sahip olduğu belirlenmiştir. Mineralojik-petrografik analiz ile harç bileşenleri, tarihi duvarların yassı kriko (flat-jack) testleri ile mekanik özellikleri ve ortamsal titreşim testleri ile modal özellikleri belirlenmiş, bu bulgulara göre duvar test numuneleri tasarlanmıştır [13]. Numunelerde kullanılan hidrolik kireç harcı referans yapının duvarlarında kullanılan az miktarda çakıl (%4), ağırlıklı olarak kum boyutunda kaya kırıntıları (%60) ve kireç bağlayıcı'dan (%36) oluşan harç içeriği ve 2.30 MPa ortalama duvar basınç dayanımı [13,14,16,17] temel alınarak tasarlanmıştır. Kullanılan mermer bloklar sırasıyla 94.2 ve 14.6 MPa ortalama basınç ve çekme dayanımına ve 2710 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptir.

Bölgedeki binaların tipolojisi dikkate alınarak dik bağlanan duvarları da içeren planda U şekilli duvar numuneleri hazırlanmıştır. Bu örme şekli, ön duvarın düzlemdışı davranışını önemli ölçüde etkilemekte olup diğer araştırmacılar tarafından da takip edilmiştir [10,15]. Orijinal kesme taş türündeki referans duvarın 15 m yüksekliği, 30 m genişliği ve laboratuvar kısıtlamaları nedeniyle test numuneleri 1/6 geometrik ölçekli planlanmış, 30 cm duvar kalınlığında ve orijinal duvardaki ortalama taş boyutunu temsil eden 20 cm × 6 cm × 10 cm ebatlarında mermer bloklar kullanılarak

referans duvardaki gibi 8.33 narinlik oranında örülmüştür. Çift tabakalı DMW numunesinde yatay ve düşey derzlerde hidrolik kireç harcı bulunmaktadır. Üç tabakalı duvar numunesi TMW'de ise iki dış tabaka taş ve üçüncü orta tabaka moloz dolgu olarak üretilmiştir. Mermer blokların duvar numunelerindeki yerleşimi **Şekil 2'de** ve üretim aşamaları **Şekil 3'te** verilmiştir.



**Şekil 2 - (a) İki tabakalı DMW ve (b) üç tabakalı TMW numunelerinde blok yerleşimi.**



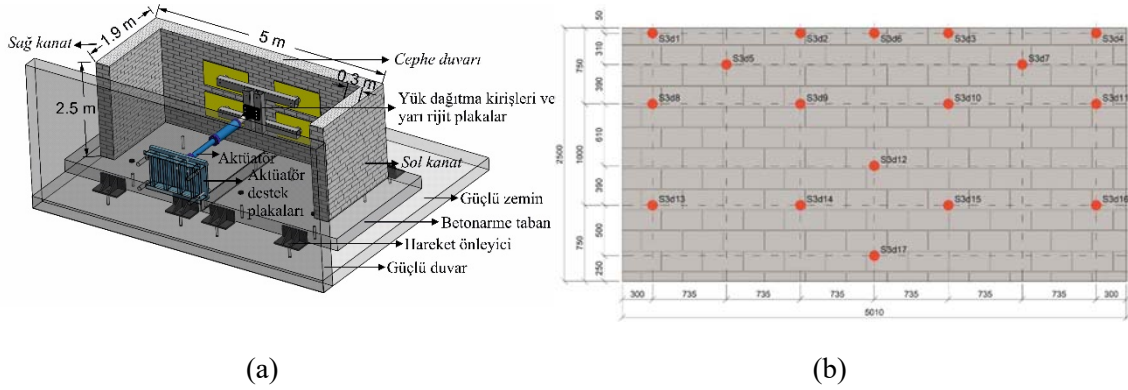
**Şekil 3 - (a) DMW ve (b) TMW numunelerinin üretim aşamaları**

## **DÜZLEMDIŞI DUVAR TESTLERİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

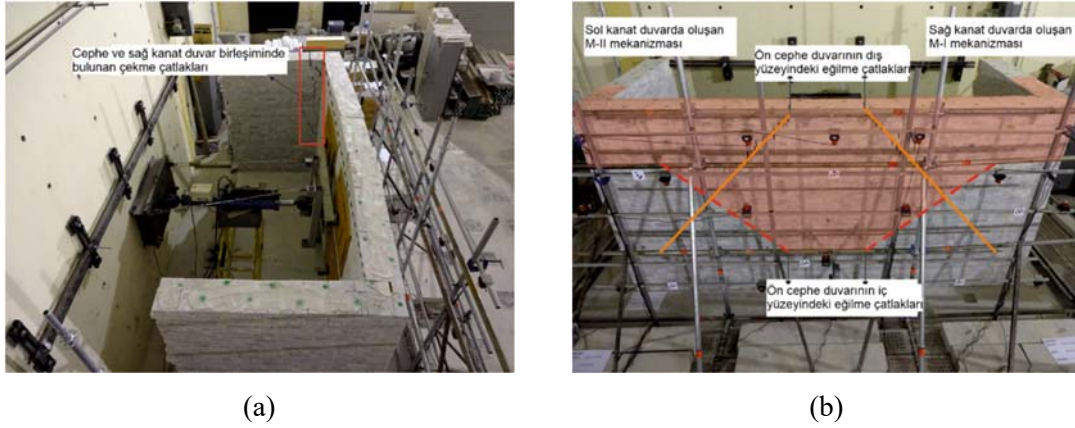
Numunelerin cephe duvarının arka yüzünden düzlemdışı doğrultuda uygulanan ve depremin yol açtığı yatay atalet kuvvetlerini temsil eden yükler **Şekil 4a**'da şematik olarak verilen yükleme sistemi kullanılarak genişletilmiş dört nokta üzerinden [6,18,19] uygulanmıştır. Yükleme noktaları yükseklik ve genişliğin üçte biri ve üçte ikisinden geçen eksenlerin kesiştiği noktalardır. Düzlemdışı duvar testleri, numunelerin deneysel davranışı göz önüne alınarak ve kademeli olarak artırılan tepe ötelenmeleri izlenerek deplasman kontrollü bir hidrolik aktivatör yardımıyla

yürütülmüştür. Başlangıçta uygulanan küçük ötelenmeler ile erken rijitlik ve dayanım kayıpları gözlenebilmiştir. Numunelerin cephe duvarında gelişen düzlemdışı yerdeğiştirmeler, betonarme yastık üzerine sabitlenen referans çerçeveye bağlı 17 adet ipli ölçerle izlenmiştir (Şekil 4b).

Yarı-statik çevrimsel testlerden elde edilen düzlemdışı yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5a ve 5b'de verilmiştir. İki ve üç tabakalı DMW ve TMW test numunelerinde en büyük tepe yükü sırasıyla 56.8 kN ve 53.7 kN olarak ölçülmüş ve bu yüke kadar doğrusal elastik varsayıma uygun bir yapısal davranış izlenmiştir. Yük-yerdeğiştirme davranışı her iki numunede küçük ötelenmeler için benzer olmakla birlikte DMW numunesi belirgin olarak daha büyük ötelenme kapasitesi sergilemiştir.



TMW numunesinde düzlemdışı yüklerin oluşturduğu eğilme etkileri %0.04 tepe ötelenmesinde cephe duvarın iç yüz tabanında kılcal çatlakların oluşumuna neden olmuştur. Cephe duvarın konsol davranışına bağlı oluşan bu çatlaklar yükün kaldırılmasıyla kapanmasına rağmen yüksek ötelenmelerde kalıcı hale gelerek davranışa hâkim olmuştur. Eğik çekme çatlakları, ilk yükleme adımlarından itibaren kanat duvarlarda görünür hale gelmiş (Şekil 7a), cephe duvarın düzlemdışı dayanımında hem konsol davranış hem de kanat duvarlarla olan bağlantı sebebiyle kemerlenme davranışı etkili olmuştur. Eğik çatlakların genişlemesi sonucu kanat duvarların düzlemdışı dayanımına katkısı azalmış, cephe duvarın göçmesinde konsol davranış hâkim olmuş ve buna bağlı olarak duvar tabanındaki çatlaklar oldukça genişlemiştir. Duvarın düzlemdışı göçme mekanizması, %0.4 tepe ötelenme oranında cephe duvarı tepesinden topuğa doğru uzayan eğilmeden kaynaklı dış yüzdeki çekme hasarıyla tetiklenmiştir (Şekil 7b'deki turuncu çizgiler). %0.8 tepe ötelenme oranında, cephe duvarın iç yüzünde gelişen çekme çatlakları göçme konisinin görünür hale gelmesine yol açmış, %2.8 tepe ötelenme oranında Göçmenin Önlenmesi (GÖ) sınır durumuna ulaşılmıştır.



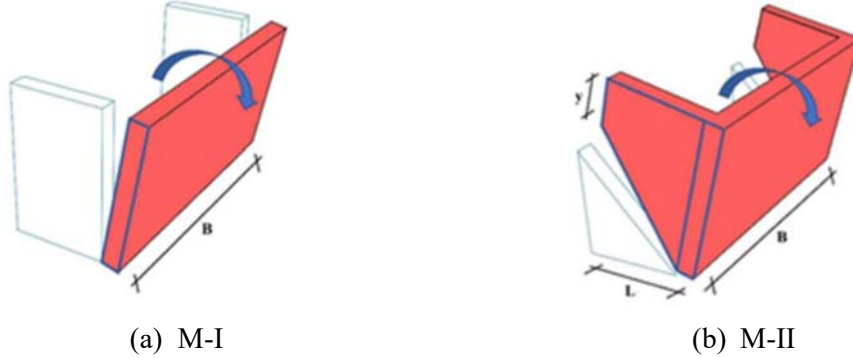
Şekil 6 - DMW numunesinde (a) birleşimde gözlenen hasar, (b) devrilme mekanizması.



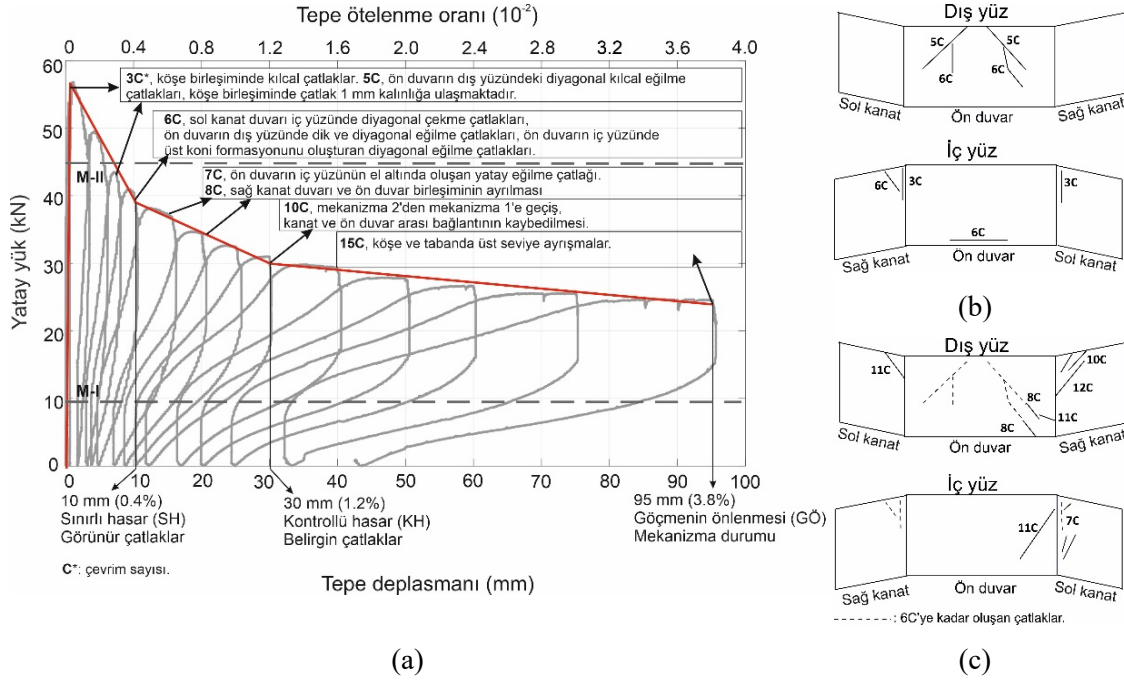
Şekil 7 - TMW numunesinde (a) birleşimde gözlenen hasar, (b) devrilme mekanizması.

Şekil 8a ve 8b'de görülen M-I ve M-II olarak isimlendirilen iki olası göçme mekanizması göz önünde alınarak elde edilen düzlemdışı kapasiteler (sırasıyla yaklaşık 10kN ve 40kN) deneysel yük-yer değiştirme grafiklerinde işaretlenmiştir. Test edilen deney elemanlarında M-II mekanizma durumu için hesaplanan dayanıma yaklaşık olarak ulaşılmış fakat ileri ötelenme seviyelerinde kanat duvarlarda oluşan hasar nedeniyle M-I göçme mekanizması yönünde bir

azalma görülmüştür. Şekil 9 ve 10'da yük-yer değiştirme grafikleri deney elemanlarının çatlak gelişimleri ile ilişkilendirilerek sunulmuştur.



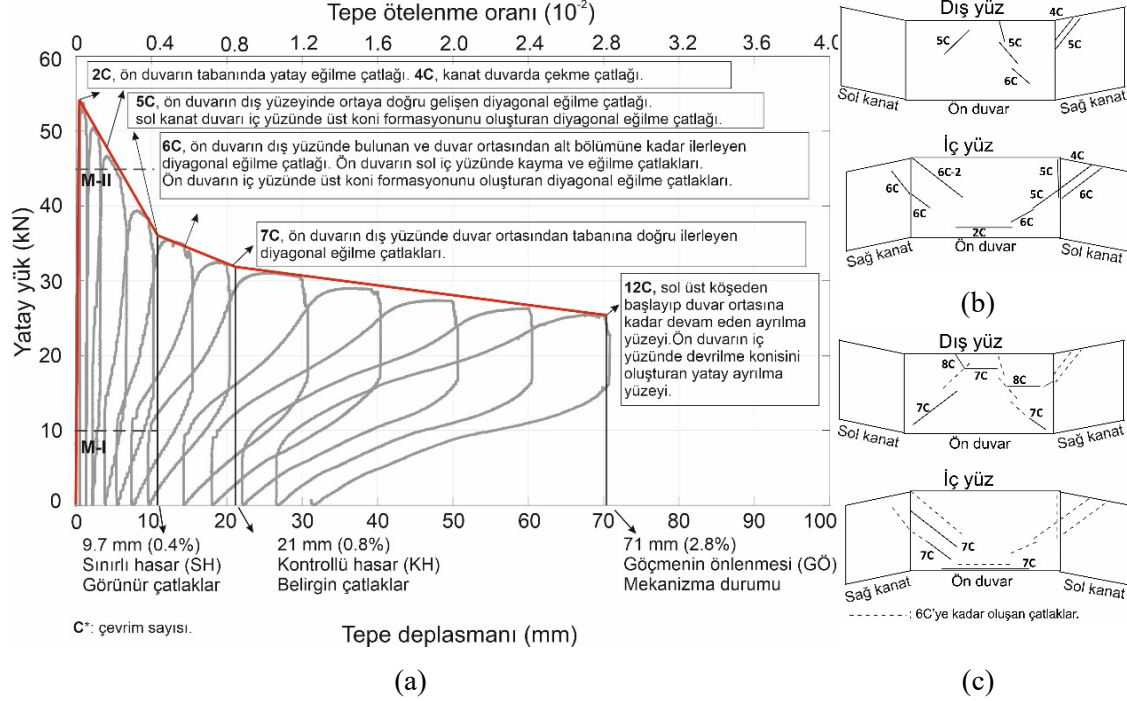
Şekil 8 - Gerçekleşmesi olası iki düzlemdışı göçme mekanizması [7].



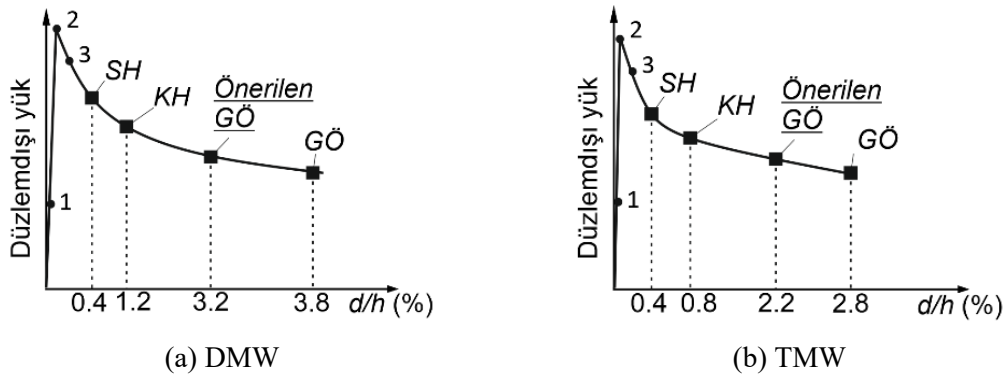
Şekil 9 - (a) DMW numunesinin yük-tepe ötelenmesi grafiği, 6. çevrim (b) öncesi ve (c) sonrasındaki çatlak gelişimleri.

EC8'de [20] (i) *Sınırlı Hasar (SH)*, (ii) *Kontrollü Hasar (KH)* ve (iii) *Göçmenin Önlenmesi (GÖ)* olmak üzere taşıyıcı elemanlar ve sistemler için farklı performans seviyeleri tanımlanmıştır. Bu performans seviyeleri arasındaki sınır durumlar, özellikle yük-yer değiştirme zarfı göz önüne alındığında, sırasıyla rijitlikteki değişim, nihai dayanım ve bu dayanımda genellikle %20'lik bir azalmayla ilişkilendirilmektedir. Test edilen numunelerin Şekil 11'te verilen zarf eğrileri üzerinde sırasıyla 1, 2 ve 3 ile belirtilen sınırlar, EC8'de tanımlanan sınır durumlara karşılık gelmektedir. Bununla birlikte, testler sırasında gözlenen hasar miktarı esas alınarak belirlenen izin verilebilir tepe ötelenme oranları da SH, KH ve GÖ harf kısaltmaları ile aynı şekiller üzerinde dikdörtgen noktalarla işaretlenmiştir. EC8 yaklaşımından farklı olarak deneysel hasar sınırlarında, kullanılabilirliğin sona ermesi, can güvenliğini etkileyecek şekilde duvar parçalarının ayrışması ve yapısal stabiliteyi tehlikeye atacak miktarda deformasyon gibi hasar gözlemleri esas alınmıştır. EC8 ve gözlemsel yaklaşımla belirlenen hasar sınırlarına karşılık gelen ötelenme

oranları **Tablo 1**'de kıyaslanmıştır. Çift tabakalı ve üç tabakalı duvarlarda göçme başlangıcına karşılık gelen sırasıyla %3.8 ve %2.8 tepe ötelenmesine kadar testlere devam edilebilmiştir. Bu değerler genel göçme kriteri olarak kabul edilen ve nihai dayanımda %20'lik bir azalmaya karşılık gelen ötelenmeye göre çok daha yüksek bir ötelenme kapasitesine karşılık gelmektedir.



Şekil 10 - (a) TMW numunesinin yük- tepe ötelenmesi grafiği, 6. çevrim (b) öncesi ve (c) sonrasındaki çatlak gelişimleri.



Şekil 11 - Düzlemsiz hasar sınırlarına karşılık gelen tepe ötelenme oranları.

**Tablo 1** - EC8 ve HG (hasar gözlemi) yaklaşımına göre belirlenen tepe ötelenme oranı (%) cinsinden izin verilebilir ötelenme sınırları (EC8 / HG).

Numune	Sınırlı Hasar-SH	Kontrollü Hasar-KH	Göçmenin Önlenmesi-GÖ
DMW	0.02 / 0.4	0.05 / 1.2	0.22 / 3.8 (3.2)*
TMW	0.01 / 0.4	0.04 / 0.8	0.24 / 2.8 (2.2)*

\* GÖ sınır durumu için önerilen değerler parantez içerisinde verilmiştir.

Test edilen numunelerde göçme durumuna (mekanizma) karşılık gelen yanal yükler, M-I ve M-II mekanizma durumları için kinematik yaklaşımla hesaplanan yanal yüklerin arasındadır (Şekil 9 ve 10). Gözlenen göçme mekanizmaları beklenen yapısal davranışla uyumlu olduğundan numunelerdeki ölçek etkisinin göçme mekanizmaları ve hasar dağılımı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Hasar gözleminin bir sonucu olarak belirlenen ötelenme sınırları birimsiz ötelenme oranları cinsinden ifade edildiği için numunelerin ölçeğinden bağımsızlaştırılmıştır.

## **SONUÇ VE ÖNERİLER**

Sunulan çalışmada, tarihi kesme taş duvarları temsil eden iki ve üç tabakalı büyük geometrik ölçekli U-şekilli duvar numunelerinin çevrimsel düzlemdışı test sonuçları paylaşılmış ve benzer nitelikteki binaların performans değerlendirmesinde kullanmak üzere belirli hasar düzeylerine karşılık gelen izin verilebilir tepe ötelenme oranları önerilmiştir. Duvar numuneleri üzerinde gerçekleştirilen yarı-statik testler, meydana gelen hasar dağılımının ayrıntılı bir şekilde gözlemlenmesine ve düzlemdışı tepe öteleme oranlarının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. İki ve üç tabakalı duvarın (sırasıyla DMW ve TMW) başlangıç rijitlikleri ve nihai dayanımları benzerdir. Her iki numune de başlangıçta nispeten düzgün bir yumuşama fazı göstermiş, neredeyse sabit yanal yük altında göçme öncesine kadar yer değiştirmeye devam etmiştir. Fakat üç tabakalı duvar, iç ve dış duvar tabakalarının ayrışması nedeniyle belirgin şekilde daha düşük bir ötelenme kapasitesi (yaklaşık %30) sergilemiştir. Bununla birlikte, testler sırasındaki hasar gözlemleri (kullanılabilirliğin sona ermesi, can güvenliğini etkileyecek şekilde duvar parçalarının ayrışması ve yapısal stabiliteyi tehlikeye atacak miktarda deformasyon) esas alınarak belirlenen izin verilebilir tepe ötelenme oranlarının EC8 (Eurocode 8) yaklaşımıyla elde edilen sonuçlardan çok daha yüksek olduğu, narin duvarların düzlemdışı performansının değerlendirilmesinde kullanılacak tepe ötelenme oranlarının, düzlemiçi ötelenme oranlarından anlamlı derecede daha büyük olabileceği belirlenmiştir.

## **Teşekkür**

Sunulan araştırma AFAD Ulusal Deprem Araştırma Programı tarafından desteklenmiş [Proje No: UDAP-C-16-05] ve Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mühendisliği Laboratuvarında yürütülmüştür. Yapı malzemelerinin önemli kısmının tedarigi ve numunelerin yapımı Kordon Restorasyon A.Ş. tarafından üstlenilmiştir. Yazarlar testler sırasındaki yardımları için Özgür Özçelik, İbrahim Gündoğan, Umut Yücel, Erkan Durmazgezer, Ercan Tuna, Emine Daş, Alperen Gülen, Cemerk Arar, Baran Selimoğlu ve Cem Göksoy'a teşekkürlerini sunar.

## **Kaynaklar**

1. Lourenço, P.B., Computational Strategies for Masonry Structures, Delft University of Technology, TU Delft, The Netherlands, 1996 (PhD. Thesis)
2. Oyarzo-Vera, C., and Griffith, M.C., “The Mw 6.3 Abruzzo (Italy) Earthquake of April 6th, 2009, On Site Observations”, Bull. N. Z. Soc. Earthq. Eng., Vol. 42, No. 4, December 2009, pp 302-307
3. Dizhur, D., Ingham, J., Moon, L., Griffith, M., et al., “Performance of Masonry Buildings and Churches in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake”, Bull. N. Z. Soc. Earthq. Eng., Vol. 44, No. 4, 2011, 279–296
4. Corradi, M., Speranzini, E., Bisciotti, G., “Out-of-Plane Reinforcement of Masonry Walls Using Joint-Embedded Steel Cables”, Bull. Earthq. Eng., Vol. 18, May 2020, 4755–4782

5. Bean Popehn, J.R., Schultz, A.E., Lu, M., Stolarski, H.K., Ojard, N.J., “Influence of Transverse Loading on the Stability of Slender Unreinforced Masonry Walls”, *Eng. Struct.*, Vol. 30, Issue 10, October 2008, 2830–2839
6. Misir, I.S., Ozcelik, O. Girgin, S.C., Yucel, U., “The Behavior of Infill Walls in RC Frames Under Combined Bidirectional Loading”, *J. Earthq. Eng.*, Vol. 20, Issue 4, Jan.2016, 559–586
7. Maddaloni, G., Di Ludovico, M., Balsamo, A., Prota, A., “Out-of-Plane Experimental Behaviour of T-Shaped Full Scale Masonry Wall Strengthened with Composite Connections”, *Compos. Part B Eng.*, Vol. 93, May 2016, 328–343
8. Derakhshan, H., Griffith, M.C., Ingham, J.M., “Airbag Testing of Multi-Leaf Unreinforced Masonry Walls Subjected to One-Way Bending”, *Eng. Struct.*, Vol. 57, Dec.2013, 512–522
9. Ferreira, T.M., Costa, A.A., Arêde, A., Gomes, A., Costa, A., “Experimental Characterization of the Out-of-Plane Performance of Regular Stone Masonry Walls, Including Test Setups and Axial Load Influence”, *Bull. Earthq. Eng.*, Vol. 13, March 2015, 2667–2692
10. Maccarini, H., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Ortega, J., Lourenço, P.B., “Out-of-Plane Behavior of Stone Masonry Walls: Experimental and Numerical Analysis”, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 179, August 2018, 430–452
11. Giaretton, M., Dizhur, D., Ingham, J.M., “Dynamic Testing of as-Built Clay Brick Unreinforced Masonry Parapets”, *Eng. Struct.*, Vol. 127, November 2016, 676–685
12. Senaldi, I.E., Guerrini, G., Comini, P., Graziotti, F. et al., “Experimental Seismic Performance of a Half-Scale Stone Masonry Building Aggregate”, *Bull. Earthq. Eng.*, Vol. 18, 2, 2020, 609-643
13. Misir, I.S., Ozcelik, O., Durmazgezer, E., Yucel, U., et al., Determination of Damage Limits for Out-of-Plane Earthquake Effects in Existing Historic and New Masonry Buildings in Turkey, AFAD - UDAP, Project ID: UDAP-C-16-05, Izmir, 2020
14. Misir, I. S., Yucel, G., Kuran, F., Eser, C. B., et al., “Experimental Out-of-Plane Damage Limits of Historical Stone Masonry Walls”, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 333, May 2022
15. Candeias, P.X., Campos Costa, A., Mendes, N., Costa, A.A. Lourenço, P.B. “Experimental Assessment of the Out-of-Plane Performance of Masonry Buildings Through Shaking Table Tests”, *Int. J. Archit. Herit.*, Vol. 11, 2017, 31–58
16. Demir, C., Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls, ITU, Istanbul, 2012, (PhD. Thesis)
17. Garijo, L., Zhang, X.X., Ruiz, G., Ortega, J.J., Wu, Z., “The Effects of Dosage and Production Process on the Mechanical and Physical Properties of Natural Hydraulic Lime Mortars”, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 169, April 2018, 325–334
18. Calvi, G.M., Bolognini, D., “Seismic Response of Reinforced Concrete Frames Infilled with Weakly Reinforced Masonry Panels”, *J. Earthq. Eng.*, Vol. 5, No 2, 2001, 153–185
19. Ricci, P., Di Domenico, M., Verderame, G.M., “Experimental Assessment of the In-Plane/Out-of-Plane Interaction in Unreinforced Masonry Infill Walls”, *Eng. Struct.*, Vol. 173, October 2018, 960–978
20. Cen, EN1998-3, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance — Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, European Committee for Standardization, 2005



# Betonarme Çerçevelerde Yumuşak Kat Etkilerinin Yeni Nesil Dolgu Duvarlar ile Azaltılması

Prost I. BALENDA BAKALA<sup>1</sup>, İbrahim Serkan MISİR<sup>2</sup>, Ömer ALDEMİR<sup>3</sup>

## ÖZET

Çeşitli amaçlarla zemin kat dolgu duvarları kaldırılmış çok sayıda binanın depremler sırasında artan yanıl deplasman talebiyle yumuşak kat/zayıf kat mekanizmaları sergilediği geçmiş depremlerden bilinmektedir. Sunulan çalışmada, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 'nde de kabul gören yeni nesil dolgu duvarların betonarme çerçevelerde yumuşak kat oluşumunu azaltmadaki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, çok katlı düzlemsel betonarme çerçeve modelleri üzerinde doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş, çerçeveleri yumuşak kat düzensizliğine zorlamak için yalnızca üst katların açıklıklarında dolgu duvar etkisi dikkate alınmıştır. Model kalibrasyonu için yarı statik test verisi kullanılmıştır. Simülasyonlar, yeni nesil duvar kullanımının ilk katları dolgusuz binalarda bile yumuşak/zayıf kat oluşumunu azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dolgulu betonarme çerçeveler, deprem güvenliği, yumuşak kat düzensizliği, yeni nesil dolgu duvarlar, esnek duvar.

## ABSTRACT

### **Reducing Soft Storey Effects in Reinforced Concrete Frames with New Generation Infill Walls**

Past earthquakes have shown that many buildings with unfilled first storey, exhibit soft-story/weak story mechanisms due to increased lateral displacement demand during earthquakes. In the presented study, the effects of a new generation infill wall, similar to a solution proposed as a new concept in the Turkish Building Earthquake Code-2018, on reducing the soft story formation in reinforced concrete frames were investigated. For this purpose, nonlinear analyzes were performed on multi-storey numerical models of infilled reinforced concrete frames with only the upper stories infilled in order to force the models to show a soft-story irregularity. Quasi-static test data was used for model calibration. Numerical simulations showed that the use of new

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - prost.balenda@ogr.deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - serkan.misir@deu.edu.tr

3 Gazi Üniversitesi, Ankara - omeraldemir@gazi.edu.tr

*generation infill walls has the potential to reduce the soft story formation even in the buildings with unfilled first stories.*

**Keywords:** *Infilled reinforced concrete frames, earthquake safety, soft storey irregularity, new generation infill walls, flexible wall.*

## GİRİŞ

Betonarme yapılar, sağladığı esnek tasarım olanakları ve yapım kolaylığı nedeniyle oldukça sık tercih edilmektedir. Genellikle betonarme yapıların inşasında, iç mekânı dışarıdan izole etmek ve bölmek için, çerçeveler arasına dolgu duvarlar inşa edilir. Böylece daha karmaşık bir kompozit yapı, yani duvar dolgulu betonarme çerçeve yapısı oluşturulur. Betonarme binalarda donatısız yığma duvarlar çok yaygın kullanılmasına rağmen, dolgu duvarlar yapısal olmayan eleman olarak kabul edilir ve yeni binaların tasarımında ve mevcut binaların değerlendirilmesinde yapısal davranış üzerindeki etkileri göz ardı edilir [1, 2]. Ayrıca, dolgu duvarların varlığının betonarme çerçeve yapısının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri tam olarak gösterilmemiştir [3]. Deprem hasarı üzerine yapılan diğer bir çalışmada [4], dolgu duvarlı betonarme yapının hasarının, dolgu duvar ve çerçeve arasındaki etkileşim nedeniyle boş çerçeve yapıdan açıkça farklı olduğu gösterilmiştir. Dolgu duvar yapısal olmayan bir eleman olmasına rağmen, yine de bir deprem etkisi altında yapısal sistemin mekanik davranışı ve deprem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [5, 6]. Negro ve Verzeletti [7], yığma duvarın ana yapının davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir. Genel olarak, yapısal olmayan duvar panellerinin varlığı, yapının yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı için faydalı bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yapının başlangıç rijitliğini artırarak atalet kuvvetlerinin de artmasına sebep olur. Dolgu duvarlar çerçevenin hem rijitliği hem de ötelenme davranışı üzerinde büyük değişikliklere neden olmakta ve değişikliklerin etkisi duvarın göçme moduna bağlı olarak avantajlı veya dezavantajlı olabilmektedir. Dolgu duvar, yapının rijitliğini ve statik yükler altındaki dayanımını artırsa da, araştırmalar, yığma dolgu duvar varlığının yapının dinamik yükler altındaki davranışını olumsuz etkileyerek, dayanım, rijitlik ve enerji tüketme kapasitesinde ani kayıplara neden olduğunu göstermiştir [8, 9]. Ayrıca, yığma dolgu duvarların kontrolsüz kullanımı yumuşak kat mekanizmaları ve kısa kolon davranışı gibi bazı istenmeyen durumlara neden olmaktadır [10, 11]. Öte yandan, bu tür istenmeyen durumların gerçekleşmesi, kullanılan dolgu duvar malzemesinin ve derz özelliklerinin (harçlı derz, kuru derz) mekanik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Çoğunlukla harç derzinin mekanik özellikleri ve daha özel olarak kesme davranışı, yığma yapıların zayıf noktalarına karşılık geldikleri ve doğrusal olmayan davranışı domine ettikleri için duvar davranışında baskın bir rol oynar [12]. Birçok ülkede, öncelikle bir park yeri veya mağaza oluşturmak için, dolgu duvarlı BA çerçeve binaların ilk katının açık bırakılması yaygındır. Bu binalarda ilk kat dışındaki tüm katlarda yığma dolgu duvarlar mevcuttur [13, 14, 15, 16]. Bu, yumuşak kat mekanizması olarak bilinen depremlerdeki en yaygın göçme nedenlerinden birine öncülük eder.

Yeni yapılacak binalarda ve değerlendirilecek mevcut binalarda yapısal olmayan dolgu duvarların kendi deprem performansı ve içinde bulunduğu yapının deprem performansına etkisi ayrı ayrı öneme sahiptir. Bu sebeple, yapısal davranışa katkı sağlayacak yeni nesil yığma dolgu duvar yapım tekniklerinin geliştirilmesi sürdürülebilir kentler oluşturabilmek için önemli bir konu haline gelmiştir. Bu teknikler yığma birim, harç, donatı, bağlantı elemanları vb. gibi malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu yaklaşımla, deprem hasarı ve göçme riskini azaltacak, gerekli fonksiyonel (termal, akustik ve deformasyon), dayanıklılığı karşılayacak duvar tasarımları hedeflenmektedir. Bu amaçla dolgu duvar hasarının sünek göçme modları ile gerçekleştiği bir yapım tekniği önerilmiştir. Mısır vd. [14], üst yüzünde uzunlamasına bir ray ve alt yüzünde uzunlamasına bir oluk bulunan yatay delikli “kilitli” kil tuğlalardan yapılmış dolgu duvarların performansını betonarme çerçeveler içinde test etti. Ardışık tuğla sıraları, harçsız olarak

döşendiğinden dolgu duvarın yatay düzlem içi yönde hareketi serbest hale getirilmiştir. 150 mm genişliğinde harçsız “kilitli” tuğlalarla doldurulmuş ve %3,5 ötelenme oranına kadar yük çevrimlerine tabi tutulmuş tek katlı tek açıklıklı bir dolgulu betonarme çerçeve numunesinde, geleneksel dolgulu numuneye göre kilitli dolgu duvarın yanal yük direncine katkısı belirgin derecede düşük kalmıştır. Kilitli duvar blokları  $\pm\%3,5$  ötelenme oranlarında dahi neredeyse hasar almadan çerçeve ile birlikte deforme olabilmektedir. Bu bildiri kapsamında, bahsi geçen deneysel çalışmadaki test numunelerinin sonlu eleman modelleri analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu referans numuneleri benzeştiren sayısal modellerin analizinden elde edilen kalibrasyon parametreleri kullanılarak çok katlı çerçeve modelleri kurulmuş ve kayar tuğla duvar kullanımının yumuşak kat mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## AMAÇ

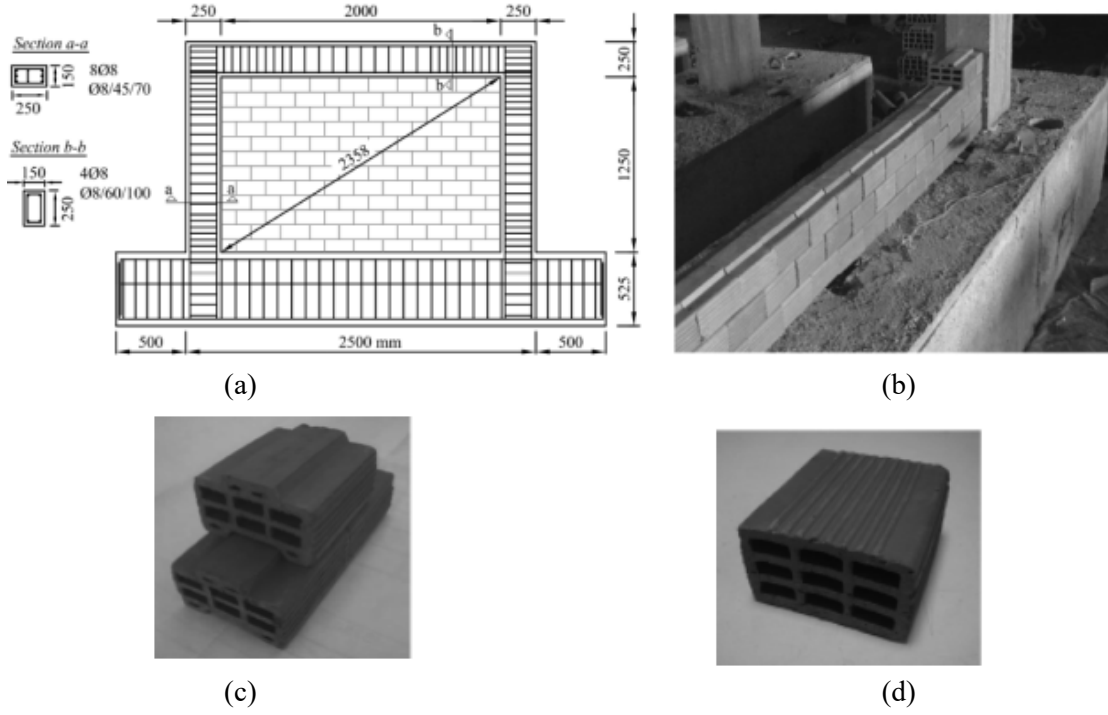
Genellikle yapı elemanlarının veya sistemlerinin yapısal davranışının etraflıca incelenebilmesi için laboratuvar testlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ne var ki maliyet, zaman ve fiziksel kısıtlar yeterli çeşitlilikte laboratuvar testinin gerçekleştirilmesinin önünde bir engeldir. Bu nedenle deneysel çalışmaların planlama aşamasında, numune ve deney düzeneğinin tasarımı süreçlerinde ve deneyi gerçekleştirilemeyen büyük boyutlu numunelerin davranışının irdelenebilmesi amacıyla sayısal model çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak inşaat mühendisliği malzemelerinin ve yapılarının sahip olduğu belirsizlikler nedeniyle numunelerin gerçekçi sonuçlar verecek sayısal modellerinin kurulması kolay değildir. Bu nedenle sayısal model sonuçlarının deneysel verilerle kalibre edilmesi ve belirsiz model parametrelerinin bu kalibrasyon sırasında tespit edilmesi gerekmektedir. Böylece kalibre edilmiş model parametreleri kullanılarak parametrik analizler yürütmek ve bulguları genelleştirmek mümkün hale gelmektedir. Sunulan bildiri kapsamında, bahsi geçen referans dolgulu betonarme çerçeve numunelerinin sayısal modelleri kurulmuş, deney sonuçlarıyla kalibre edilmiş ve kurulan çok katlı modellerin doğrusal olmayan davranışları yanal yükler altında incelenmiştir.

## SAYISAL MODELLER VE MODEL KALİBRASYONU

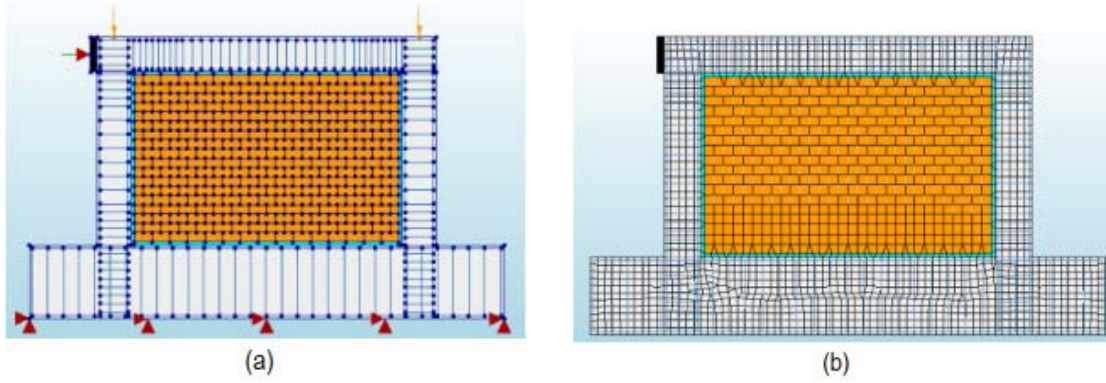
Bildiri kapsamında, Mısır vd. [14] tarafından test edilen iki adet dolgulu ve bir adet dolgunsuz çerçeve numunesinin sayısal modelleri hazırlanmıştır. Deney numuneleri ve test düzeneğine ilişkin detaylı bilgiler ilgili makalede yer almaktadır. Sayısal modellerin oluşturulması sırasında dikkate alınan numune geometrisi ve tuğla birimlere ait görüntüler **Şekil 1**'de sunulmuştur.

Model kalibrasyonu sırasında numuneler ile aynı geometrik özelliklere sahip sayısal modeller kullanılmıştır (**Şekil 2**). Sayısal modeller DIANA FEA v10.3 [17] yazılımında iki boyutlu olarak hazırlanmış, referans numunelerin donatı konfigürasyonu ve malzeme karakteristiği dikkate alınarak gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Modeller iki boyutlu olarak tasarlandığı için kolon ve giriş elemanlarda enine donatılar nedeniyle oluşan sargı etkisi ayrıca dikkate alınarak sayısal modele aktarılmıştır. Yığma duvar birimleri ise kayar tuğla özelliklerini de dikkate alabilmek için mezo modelleme tekniği esas alınarak hazırlanmıştır.

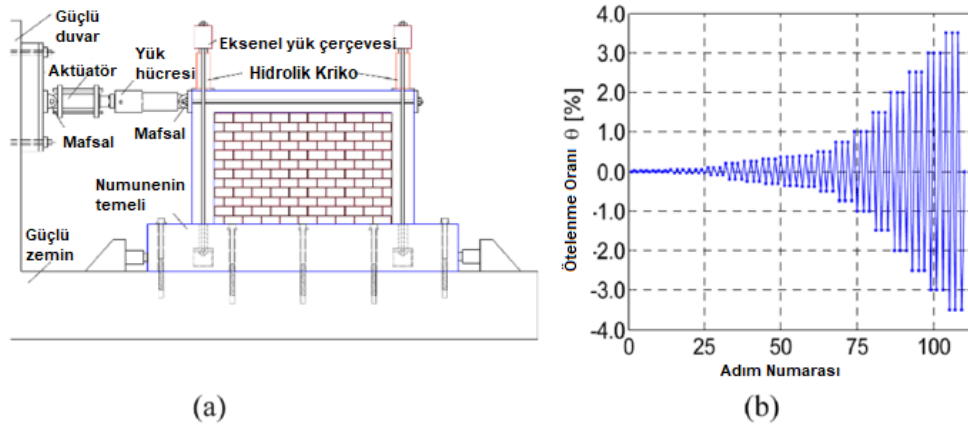
Hazırlanan sayısal modeller, referans numunelerin **Şekil 3**'te verilen deneysel konfigürasyonuna uygun yüklenmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Bu kapsamda **Şekil 2**'de görüldüğü gibi standart tuğla duvar (SBF), sismik boşluksuz kayar tuğla duvar (LBF) ve boşluklu poliretan köpük dolgulu kayar tuğla duvar (LBFPM) çerçeve sistemleri ve ilgili çalışmada kullanılan dolgunsuz çerçeve (BaF) **Şekil 2**'de görüldüğü gibi modellenmiştir.



Şekil 1 - (a) Deneysel elemanların geometrik özellikleri, (b) kayar duvarın imalat aşaması, (c) kilitli tuğla birimleri ve (d) standart tuğla birimi [15].



Şekil 2 - Sayısal modellere ait (a) donatı ve yükleme şeması ve (b) sonlu eleman ağı

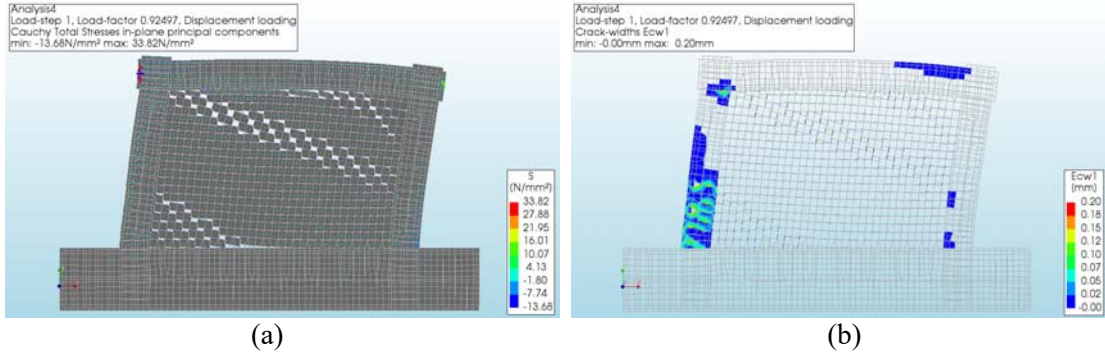


Şekil 3 - (a) Yükleme sistemi ve (b) yükleme geçmişi [14]

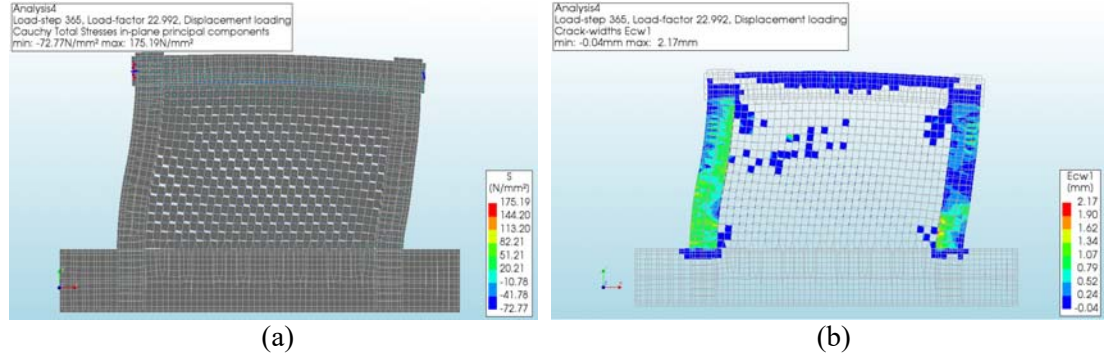
## Tek katlı Dolgulu Çerçeveslerin Model Kalibrasyonu

### SBF Modeli

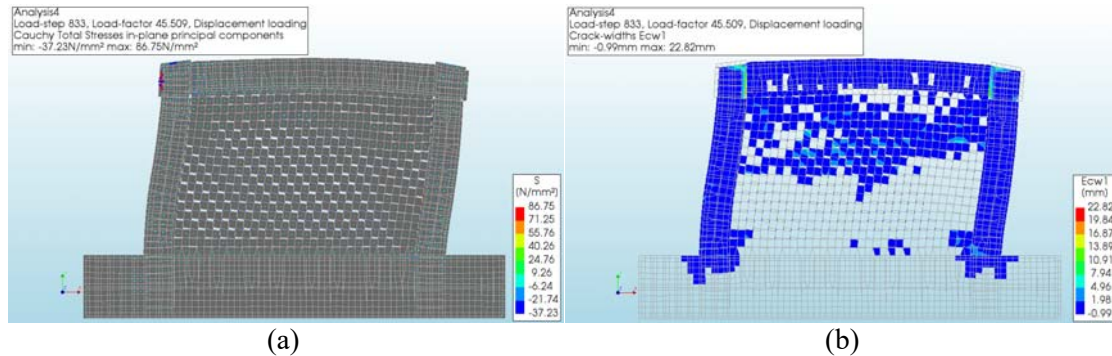
Standart tuğla duvarlı (SBF) modelin hasar ilerlemesi aşağıda açıklanmıştır. Kat öteleme oranı %0.06'ya ulaştığında, duvar sismik yük almaya ve kolon-temel birleşiminde beton çatlamaya başlamış (Şekil 4), kiriş ucunda çekme bölgesinde de çekme hasarı oluşmuştur. Karşılık gelen tepe yükü 85.51 kN'dur. Tepe ötelenmesi %1.5'e ulaştığında karşılık gelen tepe yükü 161.27 kN olup çekme gerilmelerinin çekme dayanımına ulaştığı duvar panelinde ve çerçeve elemanlarında çatlak genişlikleri önemli derecede artmıştır. (Şekil 5). 140.5 kN yüke karşılık gelen %3.0 ötelenme oranında, betonarme çerçevenin yanı sıra panelde de ileri düzey hasar görülmüştür (Şekil 6). Bu, duvarın basınç sınırına ulaşarak göçtüğü ve çerçevenin artık gerekli kuşatmayı sağlayamadığı durumdur.



Şekil 4 - SBF sayısal modelinde %0.06 tepe ötelenmesi için (a) düzlemiçi asal gerilmeler ve (b) çatlak ilerlemesi.



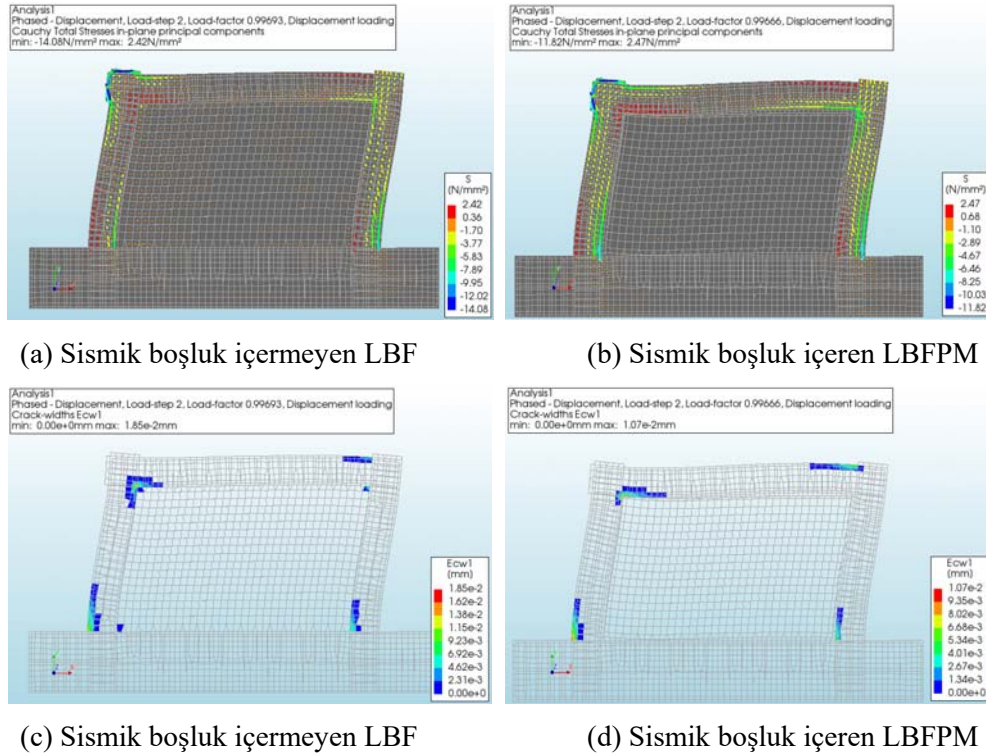
Şekil 5 - SBF sayısal modelinde %1.5 tepe ötelenmesi için (a) düzlemiçi asal gerilmeler ve (b) çatlak ilerlemesi.



Şekil 6. SBF sayısal modelinde %3.0 tepe ötelenmesi için (a) düzlemiçi asal gerilmeler ve (b) çatlak ilerlemesi.

### Sismik Boşluk İçermeyen LBF Modeli

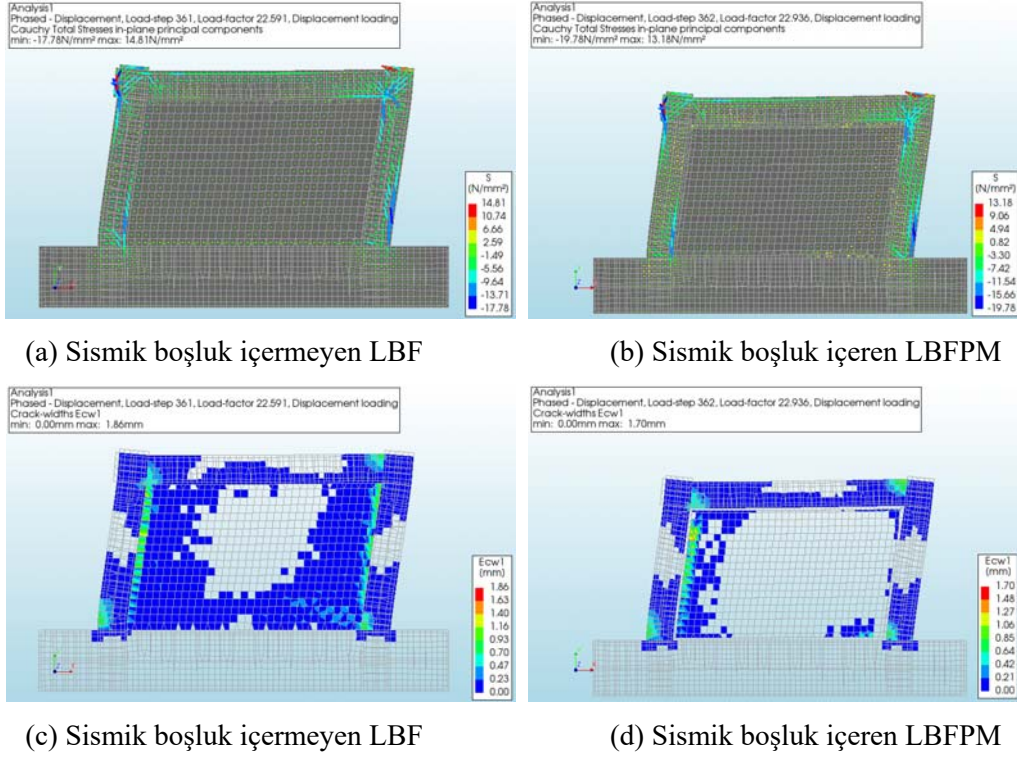
Ötelenme oranı %0.06 değerine ulaştığında (tepe yükü 37.38 kN) bazı çerçeve elemanlarında sayısal elde edilen çekme gerilmeleri (2.42 MPa) **Tablo 2**'de verilen çekme dayanımını aştığı için eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Bu aşamada duvar paneli hasarsız durumdadır (**Şekil 7a**) çünkü kayar duvar panelin basınç dayanımına henüz ulaşamamıştır. %1.5 ötelenme oranında çerçeve elemanlarda en büyük çekme çatlak genişliği 1.7 mm değerine ulaşmıştır. **Şekil 8c**'de görüldüğü gibi kolon elemanların alt kenarlarında çekme hasarı belirgin düzeye ulaşmıştır. Bu aşamada duvar paneli de duvar-kolon birleşiminde bazı hasarlar almaktadır. Fakat bu anda kayar tuğlalar arasındaki kayma mekanizması sayesinde panel ciddi bir hasar almaktan uzaktır. %3.3 ötelenme oranında (tepe yükü 110.3 kN) çerçeve belirgin hasara geçmekle birlikte sadece bazı dolgu duvar elemanlarında sınırlı hasar görülmüş ve çerçeve duvar arayüzünde daha çok kesme deformasyonlarına bağlı gerilme yığılmaları gelişmiştir (**Şekil 9c**). Fakat duvarda halen ciddi bir hasar oluşmamıştır.



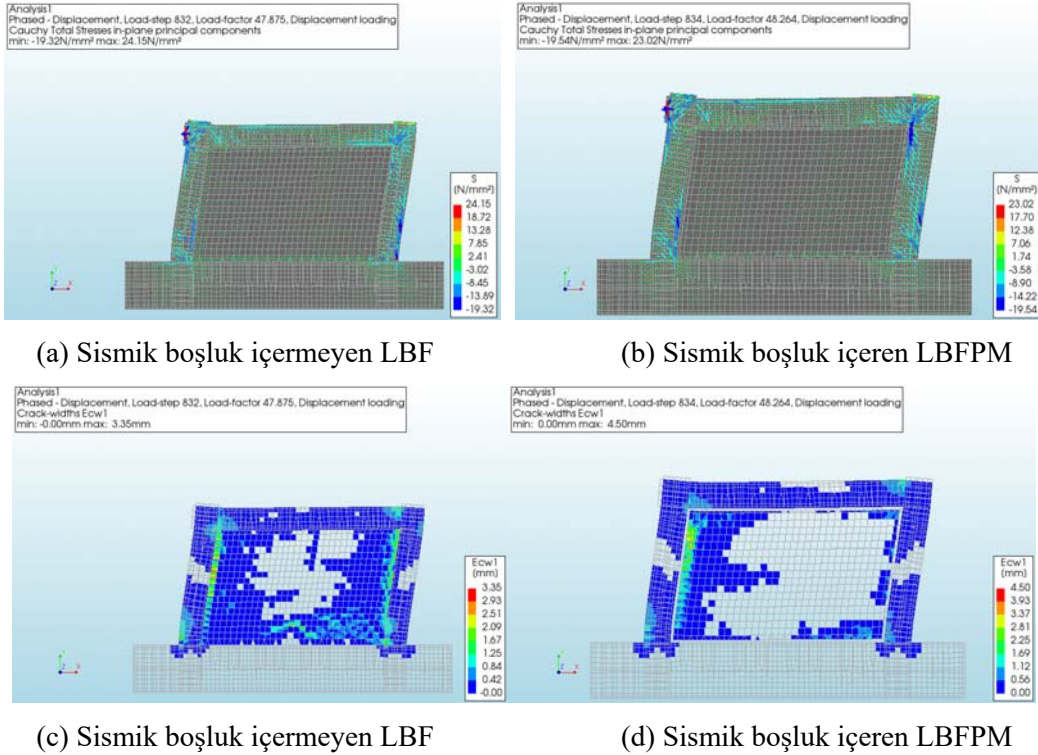
**Şekil 7** - LBF ve LBFPM sayısal modellerinde %0.06 tepe ötelenmesi için sırasıyla (a) ve (b) düzlemiçi asal gerilmeler, (c) ve (d) çatlak ilerlemesi.

### Sismik Boşluk İçeren LBFPM Modeli

Ötelenme oranı %0.06 değerine ulaştığında (tepe yükü 32.76 kN) bazı çerçeve elemanlarında sayısal elde edilen çekme gerilmeleri (2.47 MPa) **Tablo 2**'de verilen çekme dayanımını aştığı için eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Bu aşamada duvar paneli hasarsız durumdadır (**Şekil 7b**) çünkü kayar duvar panelin basınç dayanımına henüz ulaşamamıştır. %1.5 ötelenme oranında (93.14 kN) çerçeve elemanlarda en büyük çekme çatlak genişliği 1.7 mm değerine ulaşmıştır. **Şekil 8d**'de görüldüğü gibi kolon elemanların alt kenarlarında çekme hasarı belirgin düzeye ulaşmıştır. Bu aşamada duvar paneli de duvar-kolon birleşiminde bazı hasarlar almaktadır. Fakat bu anda kayar tuğlalar arasındaki kayma mekanizması sayesinde panel ciddi bir hasar almaktan uzaktır. %3.22 ötelenme oranında (tepe yükü 116.2 kN) çerçeve belirgin hasara geçmekle birlikte



Şekil 8 - LBF ve LBFPM sayısal modellerinde %1.5 tepe ötelenmesi için sırasıyla (a) ve (b) düzlemiçi asal gerilmeler, (c) ve (d) çatlak ilerlemesi.



Şekil 9 - LBF ve LBFPM sayısal modellerinde %3.2 tepe ötelenmesi için sırasıyla (a) ve (b) düzlemiçi asal gerilmeler, (c) ve (d) çatlak ilerlemesi.

sadece bazı dolgu duvar elemanlarında sınırlı hasar görülmüş ve çerçeve duvar arayüzünde daha çok kesme deformasyonlarına bağlı gerilme yığılmaları gelişmiştir (**Şekil 9d**). Fakat duvarda halen ciddi bir hasar oluşmamıştır. Tüm analizler sonucunda arayüz, beton ve duvar için kalibre edilen model parametreleri sırası ile **Tablo 1-3** boyunca sunulmuştur.

**Tablo 1** - Duvar-duvar arayüzü (Coulomb sürtünme modeli) için model parametreleri

	Y yönü	X yönü
Normal Rijitlik (N/mm <sup>3</sup> )	6000	30
Kayma Rijitliği (N/mm <sup>3</sup> )	30	6000
Sürtünme Açısı (Derece)	30	30
Genişleme Açısı (Derece)	0	0

**Tablo 2** - Beton malzemesi model parametreleri

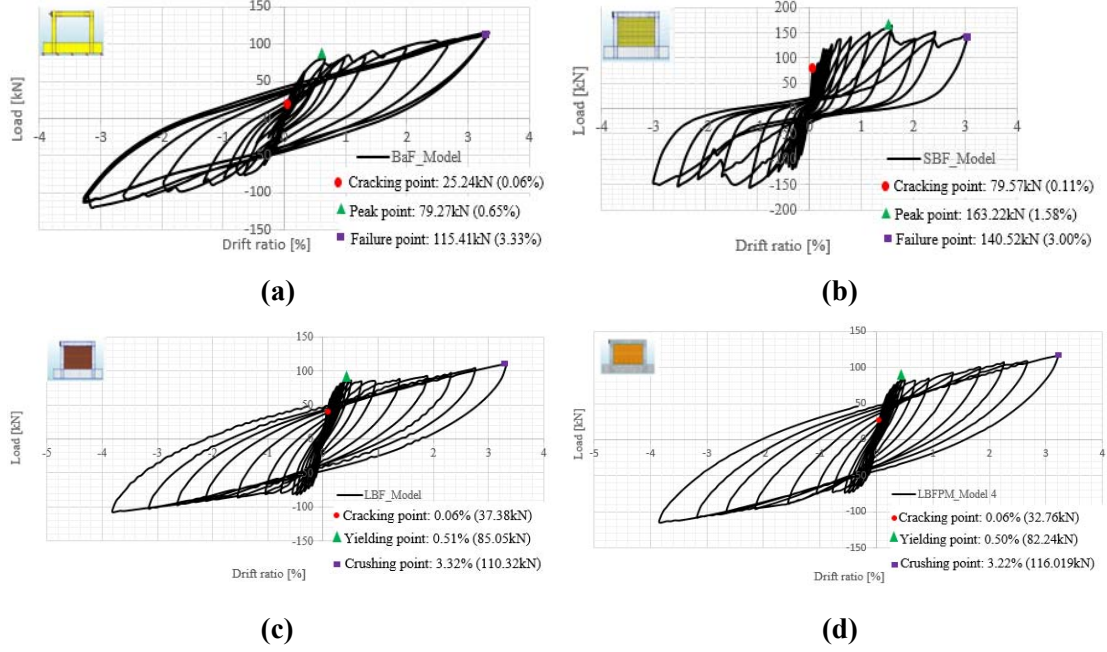
<b>Concrete Total Crack Strain Model (TCSM)</b>	
Elastisite Modülü	28000 MPa
Poison Oranı	0.2
Yoğunluk	2400 kg/m <sup>3</sup>
Çatlak Oryantasyonu	Rotation
Çatlak Bant Genişliği	ROTS
<b>Çekme Davranışı/CEB FIM MODEL Code 2010</b>	
Çekme Dayanımı	2.21 MPa
Mode-I kırılma enerjisi	125.17 N/m
<b>Basınç Davranışı: Maeakawa Concrete Model</b>	
Basınç Dayanımı	20 MPa

**Tablo 3** - Duvar birimi model parametreleri

<b>Concrete Total Crack Strain Model (TCSM)</b>	
Elastisite Modülü	1100 MPa
Poison Oranı	0.2
Yoğunluk	1800 kg/m <sup>3</sup>
Çatlak Oryantasyonu	Rotation
Çatlak Bant Genişliği	Rots
<b>Çekme Davranışı/CEB FIB Model Code, 2010</b>	
Çekme Dayanımı	0.2 MPa
Mode-I kırılma enerjisi	0.02 N/m
<b>Basınç Davranışı: Maeakawa Concrete Model</b>	
Basınç Dayanımı	1.1 MPa

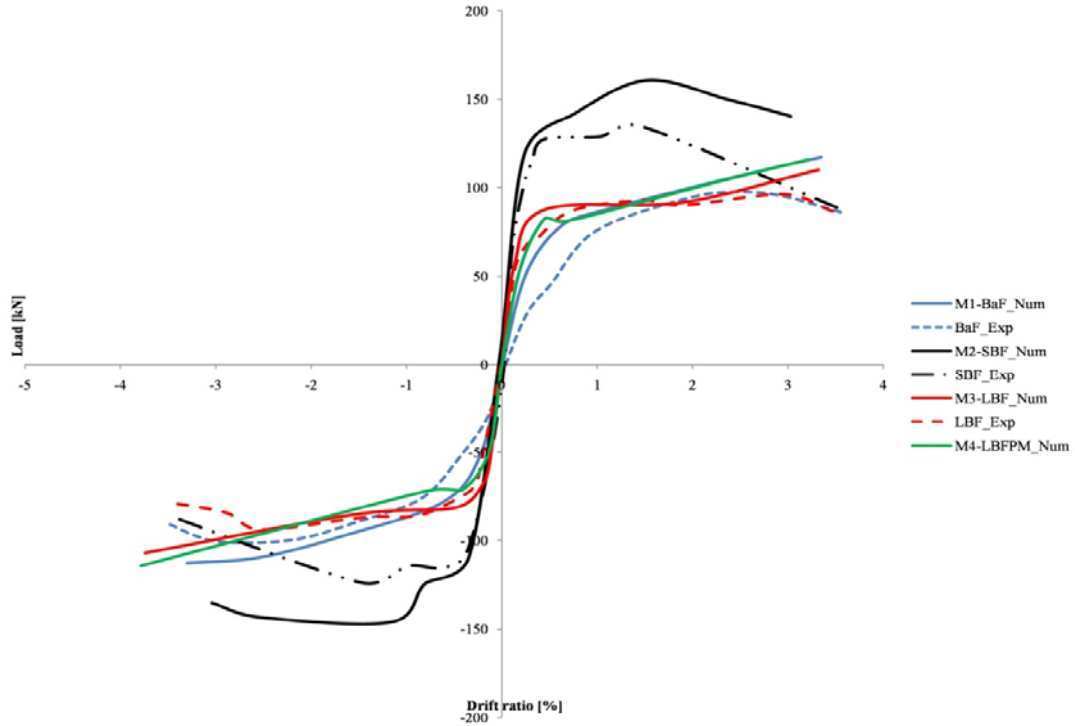


Yük-Ötelenme Eğrileri



Şekil 10. Tek katlı modellerin sayısal yük-ötelenme eğrileri

Şekil 10 incelendiğinde yatay yüklemelerin uygulanmasını hemen takiben elastik sınırın aşıldığı, betonda ve panelde oluşan çekme çatlakları ile birlikte yatay rijitliğin düştüğü ve yanal yükün büyük oranda donatı tarafından karşılandığı bölgeye ulaşıldığı görülür

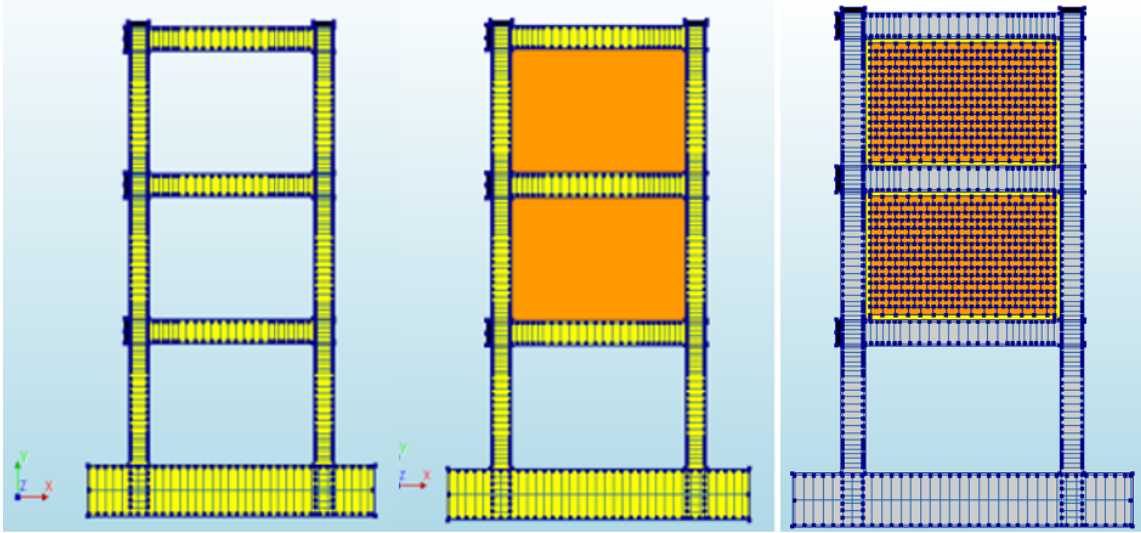


Şekil 11 - Sayısal ve deneysel zarf eğrilerinin karşılaştırılması

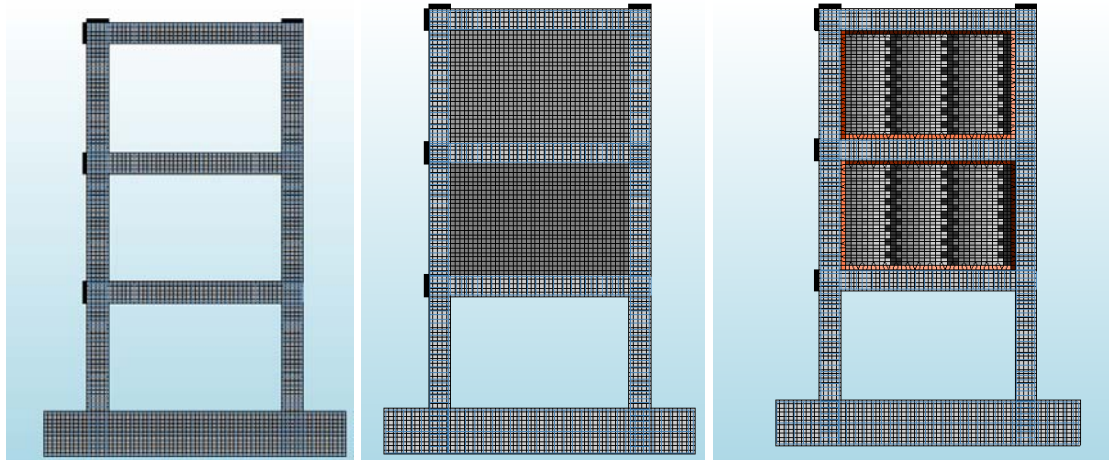
Yerdeğiştirme kontrollü yarı statik yüklemeye maruz sayısal modellerin analizi, referans numunelere uygulanan döngüsel yükleme ile tutarlı olarak, kurulan modellerin deneysel sonuçları kabul edilebilir bir yakınlıkla yakalayabildiğini göstermiştir. Sayısal modellerden elde edilen yük-tepe ötelenmesi zarf eğrileri Şekil 11'de verilmiştir.

### Üç Katlı Çerçeve Modellerinin Analizleri

Elde edilen kalibre edilmiş model parametreleri kullanılarak aynı çerçeve açıklığına ve kat yüksekliğine sahip üç katlı tek açıklıklı betonarme çerçeve modelleri (a) dolgusuz (BaF3), (b) yalnızca 2. ve 3. katı geleneksel dolgu duvarlı (SBF3) ve (c) yalnızca 2. ve 3. katı kayar dolgu duvarlı (LBF3) olmak üzere üç farklı dolgu duvar düzeninde kurulmuş (Şekil 12 ve 13) ve analiz edilmiştir. Üç katlı çerçeve modellerinde tüm kolonların tepesinden eksenel yük kapasitelerinin %10'u mertebesinde eksenel basınç kuvveti uygulanmış, ayrıca kat hizalarından uygulanan 1. mod şekliyle uyumlu çevrimsel yanal yer değiştirme yükleri altında doğrusal olmayan analizler tamamlanmış ve analiz sonucunda elde edilen hasar dağılımları Şekil 14'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre zemin katı boş bırakılan geleneksel dolgu duvarlı üç katlı model (SBF3) hasarın zemin

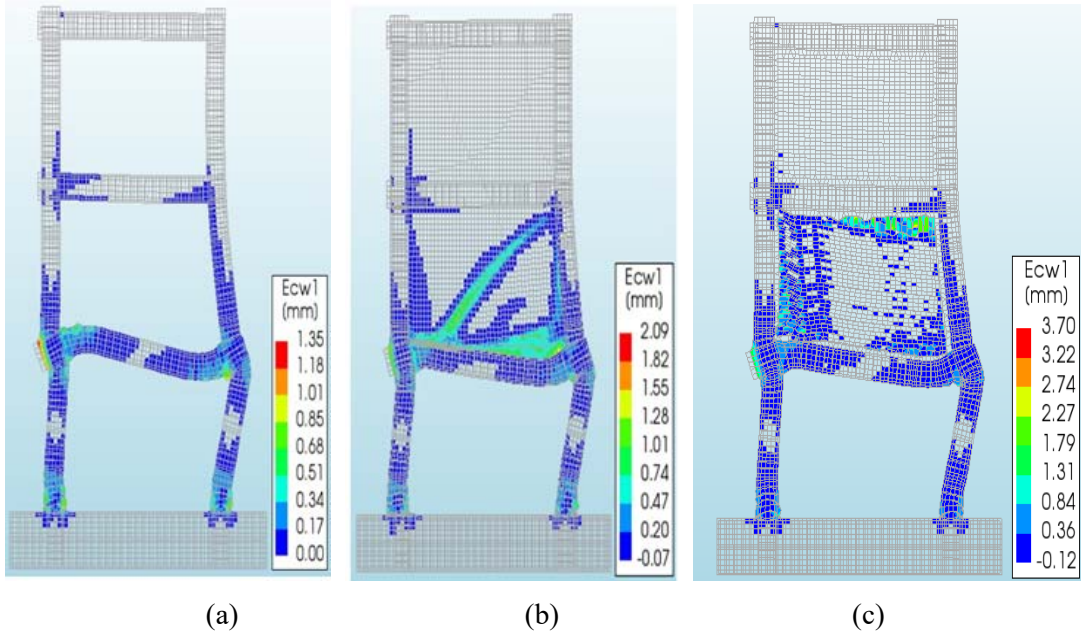


Şekil 12 - (a) Dolgusuz (BaF3), (b) 2. ve 3. katı klasik dolgu duvarlı (SBF3) ve (c) 2. ve 3. katı kayar dolgu duvarlı (LBF3) çerçeve modelleri

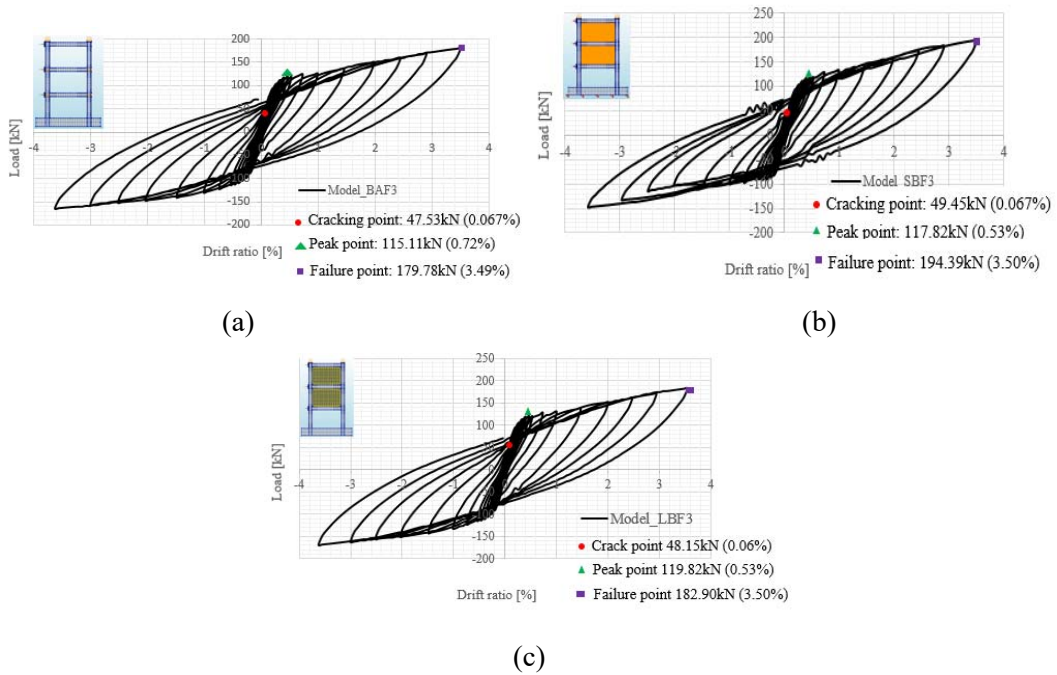


Şekil 13. BaF3, SBF3 ve LBF3 modellerinin sayısal ağı

katta yoğunlaştığı ve önerilen kayar duvar özellikleri tanımlanmış modele (LBF3) göre belirgin olarak daha yüksek şekil değiştirmeler ve dolayısıyla hasar göstermiştir. Kayar duvarlı LBF3 modeliyle elde edilen şekil değiştirmeler tüm katları boş çerçevenin sonuçlarına yakın olarak elde edilmiş, LBF3 modelinde zemin katın dolgusuz bırakılmasının olumsuz etkisi sınırlı kalmıştır. Üst katların rijitliğini azaltmak (çerçeveyi yumuşatmak) ve çerçeve-duvar paneli bağlantısının yol açtığı ilave momentten kaçınmak için ve ayrıca yumuşak katın karşılaştığı sorunu hafifletebilmek için çerçevenin kenarlarında tamamen izole edilmiş dolgu duvarlar kullanılmıştır.



Şekil 14 - BaF3, SBF3 ve LBF3 modellerine ait hasar dağılımları



Şekil 15 - Üç katlı modellerin yanal yük-yerdeğiştirme-ötelenme çevrimleri.

Analiz sonunda LBF3 modelinin duvarı gerekli mukavemeti sağlamaya devam etmiş, panelde diyagonal çatlakların gözlemlendiği SBF3 modeline kıyasla LBF3 panellerinde böylesi bir hasar gözlenmemiştir.

## **SONUÇ**

Bu bildiri kapsamında deneysel çalışmaları daha önce tamamlanmış dolgulu çerçeve numunelerini benzeştiren doğrusal olmayan iki boyutlu sonlu elemanlar modelleri kurulmuş ve deneysel sonuçlar kullanılarak model kalibrasyonu yapılmıştır. Sayısal analizler sonucunda elde edilen hasar dağılımı ve yük-ötelenme zarf eğrileri ve deney sonuçları kabul edilebilir yakınlıkta elde edilmiştir. Elde edilen model kalibrasyon parametreleri kullanılarak farklı dolgu durumlarına sahip üç katlı çerçeveleri analiz edilmiştir. Dikkate alınan çerçeve modelleri ülkemizde ve komşu ülkelerde sıklıkla karşılaşıldığı gibi zemin katı dolgu duvarsız, üst katları dolgu duvarlı olacak şekilde kurulmuştur. Bu durum geleneksel tuğla duvar kullanılması durumunda zemin katın ötelenme talebini artırmakta ve yumuşak kat mekanizması oluşma potansiyelini yükseltmektedir. Nitekim yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen hasar dağılımlarında zemin katı boş geleneksel dolgulu modelde boş çerçeve ve kayar dolgulu çerçeve modellerine göre belirgin şekilde daha yüksek şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Benzer modelin rijitliği daha düşük olan kayar dolgulu duvar tanımlanarak analiz edilmesi durumunda ise şekil değiştirmeler tüm katları boş çerçevenin sonuçlarına daha yakın elde edilmiş, bu modelde zemin katın dolgusuz bırakılmasının olumsuz etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür.

## **Kaynaklar**

1. Rodrigues, H., Varum, H., and Costa, A., "Simplified Macro-Model for Infill Masonry Panels," *J Earthq Eng*, Vol. 14, No. 3, 2010, pp 390-416
2. Mohammadi, M., and Akrami, V., "Application of Frictional Sliding Fuse in Infilled Frames, Fuse Adjustment and Influencing Parameters," *Struct Eng Mech*, Vol. 36, No. 6, 2010, pp 715-727
3. Dimova, S.L. and Negro, P., "Seismic Assessment of an Industrial Frame Structure Designed According to Eurocodes. Part 1: Experimental Tests and Their Numerical Simulation," *Eng Struct*, Vol. 27, 2005, pp 709-723
4. Yan, P.L., Sun, B.T., and Zhang, H.Y., "Seismic damage to RC frame teaching building in Lushan MS7.0 Earthquake," *China Civil Eng J*, Vol. 47, 2014, pp 24-28
5. Ricci, P., De Risi, M.T., Verderame, G.M., Manfredi, G., "Influence of Infill Distribution and Design Typology on Seismic Performance of Low- and Mid-Rise RC Buildings," *Bull Earthq Eng*, Vol. 11, 2013, pp 1585-1616
6. Hashemi, A., and Mosalam, K.M., *Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Including Effects of Infill Masonry Walls*, Pacific Earthquake Engineering Research Center-PEER, USA, No: 100, 2007, 268 p.
7. Negro P. and Verzeletti G., "Effect of Infills on the Global Behavior of RC Frames: Energy Considerations from Pseudodynamic Tests," *Earthq Eng Struct Dyn*, Vol. 25, 1996, pp 753-773
8. Negro, P., Colombo, A., "Irregularities Induced by Nonstructural Masonry Panels in Framed Buildings," *Eng Struct*, Vol. 17, No.7, 1997, pp 576-585

9. Dolsek, M., and Fajfar, P., "The Effect of Masonry Infills on The Seismic Response of a Four-Storey Reinforced Concrete Frame: A Deterministic Assessment," *Eng Struct*, Vol. 30, 2008, pp 1991-2001
10. Karadogan, F., S. Pala, A. Ilki, E. Yuksel, W. Mowrtage, P. Teymur, G. Erol, K. Taskin, and R. Comlek. "Improved Infill Walls and Rehabilitation of Existing Low Rise Buildings," *Seismic Risk Assessment and Retrofitting*, Springer, 2009.
11. METU-EERC, "Area survey of seismic and structural damage in relation to 23 October 2011 Mw 7.2 Van Earthquake," Research, METU/EERC 2011-04, Middle East Technical University, Turkey (In Turkish).
12. Stavridis, A., Shing, P.B., "Finite Element Modeling of Nonlinear Behavior of Masonry Infilled RC Frames," *J Struct Eng*, Vol. 136, No. 3, 2010, pp 285-296
13. Kaushik, H.B., Rai, D.C., Jain, S.K., "Effectiveness of Some Strengthening Options for Masonry-Infilled RC Frames with Open First Story," *J Struct Eng*, Vol. 135, No. 8, 2009, pp 925-937
14. Misir, I.S., Ozcelik, O., Girgin, S.G., and Kahraman, S., "Experimental Work on Seismic Behavior of Various Types of Masonry Infilled RC Frames," *Struct Eng & Mech*, Vol. 44, No. 6, December 2012, pp 763-774
15. Misir, I.S., Ozcelik, O., Girgin, S.C., and Yucel, U., "The Behavior of Infill Walls in RC Frames Under Combined Bidirectional Loading," *J Earthq Eng*, Vol. 20, No. 4, 2016, pp 559-586
16. Misir, I.S., "Potential Use of Locked Brick Infill Walls to Decrease Soft-Story Formation in Frame Buildings," *J PerformConstrFacil*, Vol. 29, No. 5, 2015, 04014133
17. DIANA FEA BV. DIANA - Finite Element Analysis, User's Manual release 10.3. Delft, The Netherlands.



## Deprem Dayanımı Yetersiz Riskli Binaların Hızlı Risk Tespit Yöntemi Kullanılarak Belirlenmesi: Elazığ İli Örneği

Rabia Nur SAĞLAM<sup>1</sup>, Tuba Nur İMİŞ<sup>2</sup>, Muhammed ULUCAN<sup>3</sup>, Nurbanu DEMİRBAŞ<sup>4</sup>, Ayşe Ruşen DURUCAN<sup>5</sup>, Hümeysra ŞAHİN<sup>6</sup>, Cengizhan DURUCAN<sup>7</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>8</sup>

### ÖZET

Kentsel dönüşüm çalışmalarına yön verilebilmesi için deprem sonrası ağır hasar görme veya yıkılma olasılığı yüksek olan riskli bina stokunun ivedilikle belirlenmesi gerekir. Bunu temin etmek için ülkemizde 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında Hızlı Risk Tespit Yöntemi geliştirilmiştir. Hızlı Risk Tespit Yöntemi; (i) binaların taşıyıcı sistem türünü, (ii) deprem tehlikesini ve (iii) binanın dışardan gözlenebilecek kusurlarını dikkate alarak binaların risk durumunu ve riskli binaların bölgesel olarak dağılımı tahmin etmeye dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemde; (i) binanın taşıyıcı sistemi ve (ii) deprem tehlike bölgesine göre binaya atanan taban puanından, binanın dışardan gözlenebilen kusurlarına (yumuşak kat, zayıf kat, kısa kolon, kapalı çıkma vb.) atanan olumsuzluk puanları çıkarılarak binanın performans puanı hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında Elazığ ili merkez mahallelerinden İzzet Paşa Mahallesi'nde, Hızlı Risk Tespit Yöntemi ile 505 adet binadan bilgi toplanmış ve binaların performans puanları hesaplanmıştır. Performans puanları dikkate alınarak riskli binaların yapı adalarına göre dağılımı belirlenmiş ve kentsel dönüşüm bakımından öncelikli yapı adaları harita üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi sonrası incelenen mahalleden elde edilen hasar verileri ile karşılaştırılarak yöntemin sahadaki durumu yansıtma oranı değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem tehlikesi, kentsel dönüşüm, yapısal kusurlar, Elazığ-Sivrice Depremi.

---

1 Fırat Üniversitesi, Elazığ - rabianaydin@gmail.com

2 Fırat Üniversitesi, Elazığ - tubanurimis@gmail.com

3 Fırat Üniversitesi, Elazığ - mulucan@firat.edu.tr

4 Fırat Üniversitesi, Elazığ - n.demirbas@firat.edu.tr

5 Fırat Üniversitesi, Elazığ - ardurucan@firat.edu.tr

6 Fırat Üniversitesi, Elazığ - hsahin@firat.edu.tr

7 Fırat Üniversitesi, Elazığ - cdurucan@firat.edu.tr

8 Fırat Üniversitesi, Elazığ - kealyamac@firat.edu.tr

## ABSTRACT

### ***Determination of Vulnerable Buildings with Insufficient Earthquake Resistance Using Fast Risk Evaluation Method: The Case of Elazig Province***

*The building stock that is likely to be severely damaged or collapsed after an earthquake must be determined immediately to manage the urban renewal works. In our country, in order to ensure this, a fast structural risk evaluation method has been presented in the scope of the Law No. 6306 about the Renewal of Areas Prone to Disaster Risk. The Fast Risk Evaluation is a method based on estimating the vulnerability of the buildings and the regional distribution of vulnerable buildings by taking into account; (i) the lateral load resisting type of buildings, (ii) the earthquake hazard and (iii) the defects that can be observed from the outside of the building. In this method, the performance score of the building is calculated by subtracting the negative scores assigned to the observable defects of the building (soft story, weak story, short column, closed overhang, etc.) from the basic score assigned to the building according to the building's; (i) load resisting system and (ii) earthquake hazard zone.*

*In the scope of the study, data was collected from 505 reinforced concrete buildings in Izzet Pasa which is one of the central districts of Elazig, by using the fast structural risk evaluation method, and the performance scores of the buildings were calculated. By using the performance scores, the distribution of vulnerable buildings in relation to building blocks was determined and the priority levels of building blocks for urban renewal works were shown on the map. In addition, the calculated results were compared with the damage data, obtained after the January 24 -2020 Elazig-Sivrice Earthquake, and the performance of the fast structural risk evaluation method in reflecting the observed data was evaluated.*

**Keywords:** *Earthquake risk, Urban renewal, Structural defects, Elazig-Sivrice Earthquake.*

## GİRİŞ

Riskli bina, deprem sonrası yıkılma veya ağır hasar görme ihtimali yüksek olan binadır. Özellikle deprem gerçeği dikkate alınmadan tasarlanan ve/veya inşa edilen binalar bu kapsamda değerlendirilmektedir. Son 20 yılda yaşanan hasar verici depremler (Körfez Depremi-1999, Bingöl Depremi-2003, Van Depremi-2010, Elazığ Depremi-2020) sonrası Türkiye’de deprem dayanımı yetersiz büyük bir bina stokunun bulunduğu tecrübe edilmiştir. Bu sebeple olası bir deprem sonrası can ve mal kayıplarının büyük oranda önlenmesi için riskli bina stokunun hızlı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Riskli bina stokunun hızlı bir şekilde belirlenmesi için hızlı risk tespit yöntemi geliştirilmiştir. Hızlı risk tespit yöntemi, deprem tehlikesi yüksek bölgelerde binalardan, sokak gezileriyle dışarıdan veya gerektiğinde kısmen içeriden veri toplanması ve toplanan veriler dikkate alınarak risk durumunun belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

Literatürde birçok hızlı risk tespiti yöntemi bulunmaktadır [1-4]. Bu yöntemler, değerlendirmede dikkate alınan parametreler ve risk hesap yöntemleri bakımından farklılık göstermektedirler. Ulusal hızlı risk tespit yöntemi, 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında, Riskli Binaların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar EK-A bölümünde açıklanan “Binaların Bölgesel Deprem Risk Dağılımını Belirlemek için Kullanılabilecek Basitleştirilmiş Yöntemler” adı altında sunulmaktadır [5]. Literatürde daha güvenilir ve hızlı risk tespit yönteminin geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Demirbaş vd. [6, 7] çalışmalarında, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi sonrası farklı seviyelerde hasar almış betonarme binaların performans puanları, ulusal ve uluslararası hızlı risk tespit yöntemlerini kullanarak hesaplanmış, mevcut hasar durumu ile performans puanları arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Hızlı risk tespit yöntemlerinin özellikle Kanada Sismik Tarama yönteminin mevcut hasar durumunu yansıtmada başarılı oldukları tespit edilmiştir. Türkel ve



Tekeli [8] çalışmalarında 100 adet mevcut konut tipi betonarme binanın, hızlı risk tespit yöntemi esaslarına göre risk değerlendirmelerini yapmışlardır. Bu çalışmada bina ağırlığının kolonların toplam kesme kuvveti kapasitesine oranı (RDP) bir parametre olarak seçilmiş, bu parametreye göre binaların risk değerlendirmesi yapılmış ve hızlı risk tespit yöntemi ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Elazığ İli kentsel dönüşüm çalışmalarının hızlı ve etkili bir şekilde yapılmasını sağlamak için yürütülen proje kapsamında elde edilen verilerin bir kısmı sunulmuştur. Yürütülen proje kapsamında, Elazığ İli için deprem tehlikesini esas alan risk haritalarının oluşturulması hedeflenmektedir. Çalışmada, yerleşimin 1950 yıllarda başladığı, nüfus yoğunluğunun ve riskli bina stokunun fazla olduğu, merkez mahallelerinden İzzet Paşa Mahallesi için yapılan çalışmanın sonuçları verilmiştir. Saha çalışmasında öncelikle, bina dışından veya gerektiğinde içerisinden, veri bilgi formları kullanılarak toplanan veriler ArcGIS paket yazılım programı [9] ile harita üzerine kaydedilmiştir. Hızlı Risk Tespit Yöntemi ile 505 adet binadan (betonarme ve yığma) bilgi toplanmış ve binaların performans puanları hesaplanmıştır. Çalışmada, sadece betonarme binaların risk durumu verilmiştir. Performans puanları kullanılarak ArcGIS Online [9] CBS ile mahalle için risk haritası oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçlar, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi sonrası incelenen mahalleden elde edilen hasar verileri ile karşılaştırılarak yöntemin sahadaki durumu yansıtma oranı değerlendirilmiştir.

## **AMAÇ**

Çalışma kapsamında mevcut Hızlı Risk Tespit Yönteminin, saha çalışması yapılan mahalledeki riskli bina stokunu belirlemedeki etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca riskli binaların mahalle için yapı adaları içindeki dağılımı elde edilerek kentsel dönüşüm açısından öncelikli yapı adalarının belirlenmesine çalışılmıştır.

## **HIZLI RİSK TESPİT YÖNTEMİ**

6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun kapsamında az, orta ve yüksek katlı binaların risk durumlarının belirlenmesi için kullanılması gereken kurallar verilmiştir [5]. Kanun kapsamında, az katlı betonarme binaların risk durumlarının belirlenmesinde, i) Detaylı Yöntem ve ii) Hızlı Yöntem kullanılmasına izin verilmektedir. Kanun kapsamında hızlı yöntem olarak değerlendirilebilecek, belirli alanlarda riskli olabilecek binaların bölgesel dağılımının belirlenmesi ve müdahale açısından öncelikli alanlara kararı verilmesi amacıyla kullanılacak, Hızlı Risk Tespit Yöntemi (Basitleştirilmiş Yöntem) önerilmiştir. Yöntem, istatistiksel olarak anlamlı sayıda bina ihtiva eden alanlarda uygulanabilmekte ve tekil binada risk değerlendirme amaçlı olarak kullanılamamaktadır.

Hızlı Risk Tespit Yöntemi, görsel inceleme ile binanın deprem davranışını olumlu/olumsuz etkileyen özelliklerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem sadece 1-7 kat arası betonarme binalar ile 1-5 kat arası yığma binaların risk tespiti için kullanılabilir. Yöntemde öncelikle sahada, bina dışından yapılan görsel inceleme ile veriler toplanmaktadır. Toplanan veriler dikkate alınarak binanın risk durumunu belirleyen Performans Puanı (PP) hesaplanmaktadır.

Performans Puanını (PP) hesabı için Denklem 1'de verilen bağıntı kullanılmaktadır. Binanın kat adedi ve bulunduğu deprem tehlike bölgesi dikkate alınarak, Tablo 1'de gösterilen Taban Puanı (TP) belirlenir. Binanın deprem dayanımını düşüren kusurlar ise (düşeyde düzensizlik, planda düzensizlik ağır çıkma, yumuşak/zayıf kat düzensizliği, kısa kolon, bitişik nizam durumu/çarpışma etkisi gibi) Tablo 2'de verilen olumsuzluk parametre puanlarının (OPi) olumsuzluk parametre değerleri (Oi) ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Olumsuzluk parametre

değerleri, görünen kalite ve bina nizam durumu dışındaki tüm olumsuzluk parametre değerleri için var (1) veya yok (0), görünen bina kalitesi için iyi (0), orta (1), kötü (2), yapı nizam durumu için ise ayrık (0) veya bitişik olma (1) durumlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Performans Puanının hesabında deprem perdesi bulunan binalarda, perdenin binanın deprem dayanımı üzerindeki olumlu etkisini yansıtabilmek için Tablo 1’de verilen Yapısal Sistem Puanı (YSP) eklenmektedir.

$$PP=TP+\sum(O_i*OP_i) + YSP \quad (1)$$

**Tablo 1 - Taban Puanı ve Yapısal Sistem Puanı**

Toplam Kat Sayısı	Taban Puanı (TP)				Yapısal Sistem Puanı (YSP)	
	Tehlike Bölgesi				Yapısal Sistem	
	I	II	III	IV	BAÇ	BAÇP
1 ve 2	90	120	160	195	0	100
3	80	100	140	170	0	85
4	70	90	130	160	0	75
5	60	80	110	135	0	65
6 ve 7	50	65	90	110	0	55

**Tablo 2 - Olumsuzluk Parametre Puanları (OP<sub>i</sub>)**

Toplam Kat sayısı	Yumuşak Kat	Görünen Kalite	Ağır çıkma	Kat Seviyesi/Bağımsız Bina Durumu				Düşeyde Düzensizlik	Planda Düzensizlik/Burulma	Kısa Kolon	Tabi Zemin Etkisi
				Aynı		Farklı					
				Orta	Kenar	Orta	Kenar				
1 ve 2	-10	-10	-10	0	-10	-5	-15	-5	-5	-5	-3
3	-20	-10	-20	0	-10	-5	-15	-10	-10	-5	-3
4	-30	-15	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3
5	-30	-25	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3
6 ve 7	-30	-30	-30	0	-10	-5	-15	-15	-10	-5	-3

## SAHA ÇALIŞMASI VE BULGULAR

Bu çalışma kapsamında, Elazığ İli Merkez mahallelerinden İzzet Paşa Mahallesi, Hızlı Risk Tespit Yöntemi kullanılarak betonarme binaların performans puanı hesaplanmış ve risk haritası oluşturulmuştur. Çalışmada, nüfus yoğunluğu ve eski bina stokunun fazla olması sebebi ile İzzet Paşa Mahallesi tercih edilmiştir. Şehir merkezinde konumlanan İzzet Paşa Mahallesi, 90.22 hektarlık yüzölçümüne ve 11790 kişilik nüfusa sahiptir [10]. 1950 tarihinde yerleşimin başladığı mahalle, paralel cadde ve sokak şeklinde planlanmıştır. Paralel şekilde planlanmış bu sokaklarda

genellikle bitişik nizam durumunda 3-4 katlı yığma yapılar hâkim iken, son 30-40 yılda giriş katı ticarethane olarak tasarlanan çok katlı betonarme binalar, mahallenin hakim bina stokunu oluşturmuştur (Şekil 1).

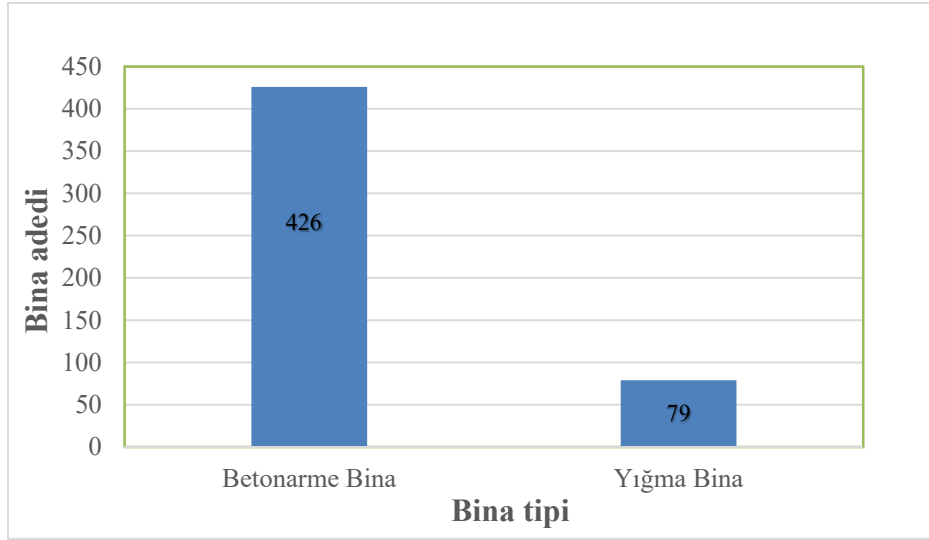


Şekil 1 - İzzetpaşa Mahallesi Tipik Bina Fotoğrafları

Çalışmada, öncelikle sahadan toplanan veriler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarından ArcGIS Online kullanılarak hızlı bir şekilde kaydedilmiştir. ArcGIS bir CBS paket yazılım programıdır. Öncelikle ArcGIS paket yazılım programına Elazığ altlık haritası eklenmiştir. Altlık harita eklendikten sonra ada/parsel katmanları eklenmiş ve öznitelik tablosu (veri bilgi formları) oluşturulmuştur. Sahada ArcGIS Online sistemine yüklenen veri bilgi formları ile veriler kaydedilmiştir (Şekil 2) ve İzzet Paşa Mahallesi'nin veri bankası oluşturulmuştur. Çalışmada İzzet Paşa Mahallesi'nde 505 adet binadan (426 betonarme bina, 79 yığma bina) veri toplanmıştır (Şekil 3).

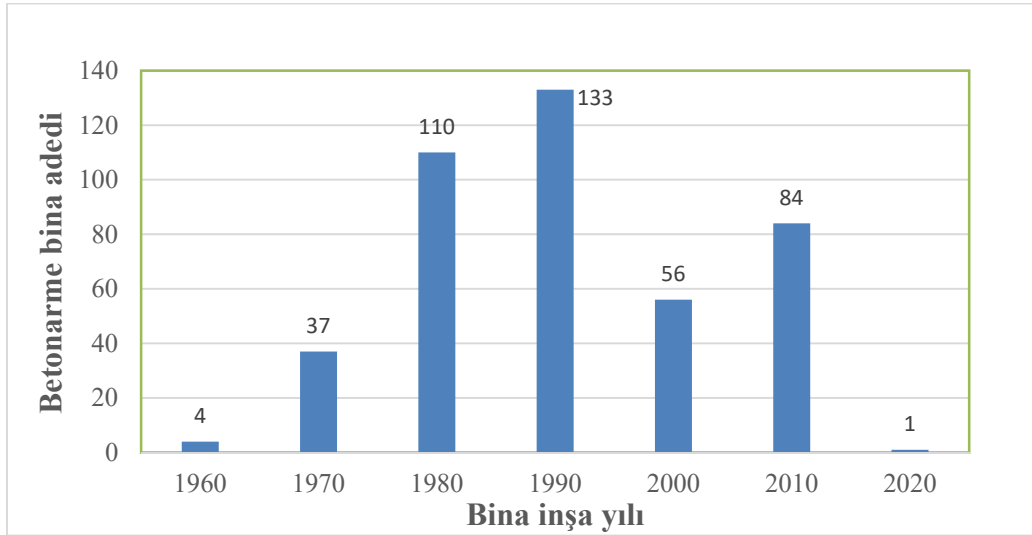


Şekil 2 - ArcGIS Online ekranında veri toplanan binaların görünümü



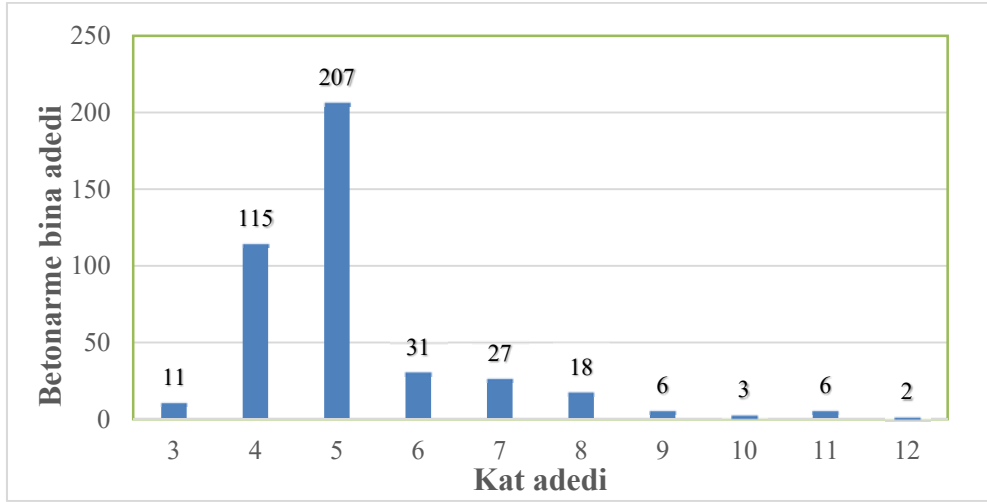
Şekil 3 - İzzet Paşa Mahallesi için bina tiplerinin (betonarme, yığma) sayısı

Şekil 3’de görüldüğü üzere İzzet Paşa Mahallesi’ndeki binaların büyük bir bölümünü (%84) betonarme binalar oluşturmaktadır. Betonarme binaların inşa yıllarının değişimi, on yıllık periyotlar halinde Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 4’teki grafik incelendiğinde mahalledeki binaların yarısından fazlasının 1970-2000 yılları arasında inşa edildiği görülmektedir. Bu yıllarda inşa edilen binaların bir kısmı, yığma binalar yıkılarak yerine inşa edilmiştir. Şekil 4’ten son 20 yılda inşa edilen bina sayısının arttığı görülmektedir. Bu durum eski bina stokunun yoğun olduğu ve boş arsa sayısının az olduğu mahallede kentsel dönüşüm çalışmalarının başladığının göstermektedir.



Şekil 4 - İzzet Paşa Mahallesi için betonarme binaların inşa yıllarının değişimi

İzzet Paşa Mahallesi’nde bulunan betonarme binaların kat sayılarının dağılımı Şekil 5’te verilmiştir. Şekil 5’teki grafik incelendiğinde mahallede bulunan betonarme binaların yaklaşık %76’sının 5 ve 4 katlı olduğu görülmektedir. Ayrıca saha çalışmalarında kentsel dönüşüm kapsamında dönüştürülen binaların bir bölümünün 8-12 kat arasında yapıldığı tespit edilmiştir.

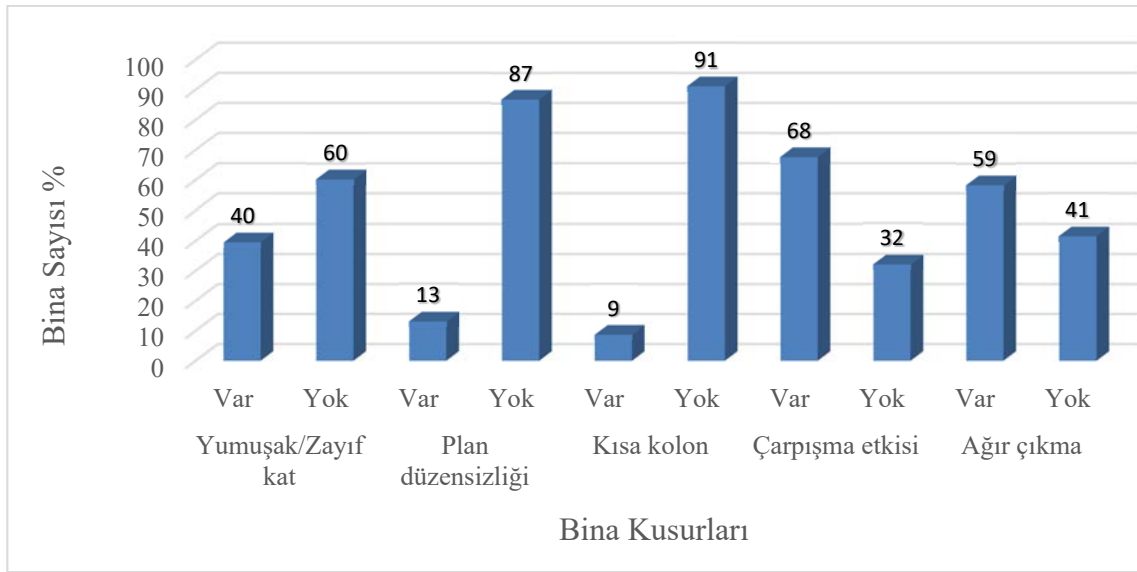


Şekil 5 - İzzet Paşa Mahallesi için betonarme binaların kat sayısının değişimi

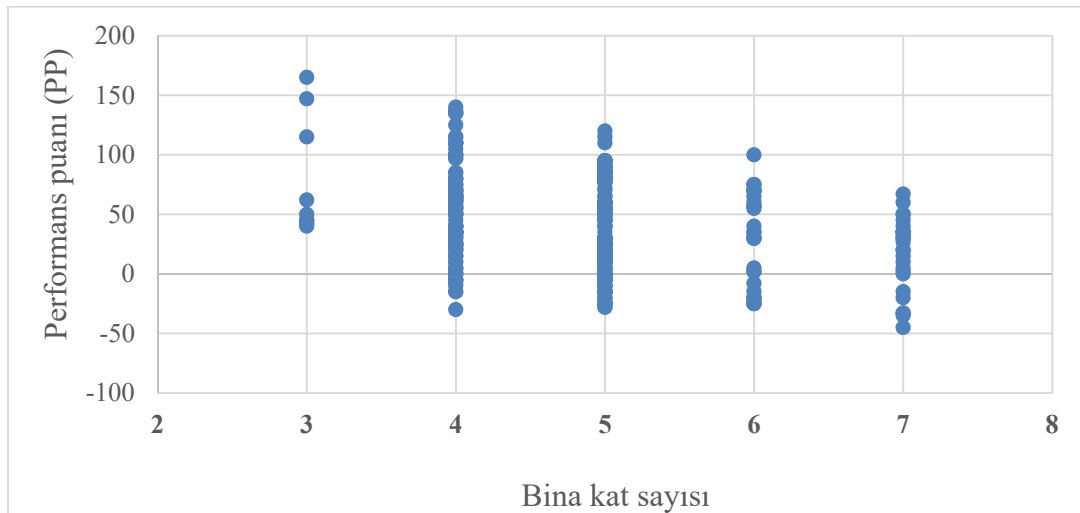
Bu çalışma kapsamında hızlı risk tespit yönteminin sınırları nedeniyle 1-7 kat arası betonarme binalar için performans puanı (PP) hesaplanmış ve risk değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirilen betonarme binaların risk durumunu etkileyen yapısal kusurların dağılımı Şekil 6'da verilmiştir. Grafikten mahallede yaygın olarak gözlenen kusurların, yumuşak kat/zayıf kat düzensizliği (%60) ile ağır çıkma (%59) olduğu görülmektedir. İzzet Paşa Mahallesinde betonarme binalar bitişik nizam tarzında ve komşu bloklar arasında yeterli derz boşluğu bırakılmadan inşa edilmiştir. Yapı adalarının büyük bir bölümü eğimli arazi üzerinde bulunan mahallede, bitişik nizamlı binalarda komşu bloklar arasında döşeme kotlarının farklı olması ve yeterli derz boşluğunun bulunmaması nedeniyle çarpışma etkisi risk teşkil etmektedir. İncelenen betonarme binaların %68'inde çarpışma etkisi ihtimalinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 6).

Binaların performans puanlarının hesaplanmasında, mahallenin deprem risk haritasındaki konumu esas alınarak deprem tehlike bölgesi 1 için taban puanları (TP) seçilmiştir. Elazığ ilinde 2004 yılından sonra tasarlanan ve inşa edilen betonarme binalarda deprem perdesinin kullanımı zorunlu kılınmıştır [10]. Bu nedenle performans puanı hesabında 2004 yılı ve sonrasında inşa edilen binalara yapısal sistem puanı (YSP) eklenerek, deprem perdesinin olumlu etkisi dikkate alınmıştır. Hesaplanan Performans Puanlarının (PP) katlara göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'den bina stokunun yarısından fazlasını oluşturan 4 katlı ve 5 katlı binaların Performans Puanlarındaki saçılımın fazla olduğu, ortalama -30 ile +140 puan arasında değiştiği gözlenmektedir. Binaların kat sayısı arttıkça performans puanlarında düşüş gözlenmiştir. 3 katlı binaların performans puanlarının diğer binalara oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, performans puanını düşüren yapısal kusurların genellikle 4 kat ve daha fazla katlı binalarda yaygın olarak yapılmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan yöntemde, bina bazında risk durumunu belirlemek için herhangi bir sınır değer bulunmamaktadır. Ancak binanın risk durumunun belirlenmesinde kullanılan yöntemle benzer parametreleri kullanan ve Sucuoğlu vd. [11] tarafından geliştirilen hızlı değerlendirme yöntemi (1-6 katlı betonarme binalar için kullanılmaktadır) tarafından önerilen sınır değer dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmıştır. Sucuoğlu vd. [11] riskli binaya ilişkin performans puanı sınır değerini 50 puan olarak esas almışlardır. İncelenen binalar için bu değer dikkate alındığında binaların %55'nin performans puanının 50 sınır değerinin altında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6 - Betonarme binalarda yapısal kusurların dağılımı

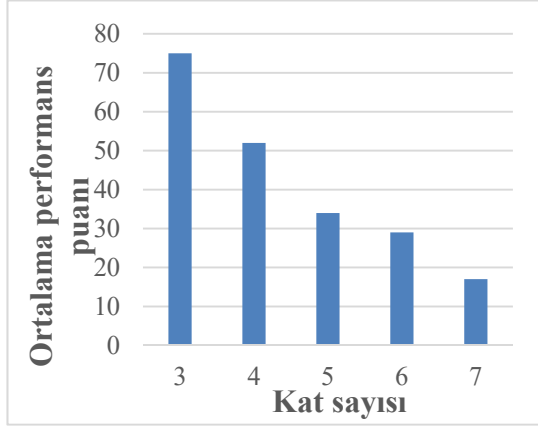


Şekil 7 - Betonarme binaların Performans Puanlarının (PP) bina kat sayısına göre değişimi

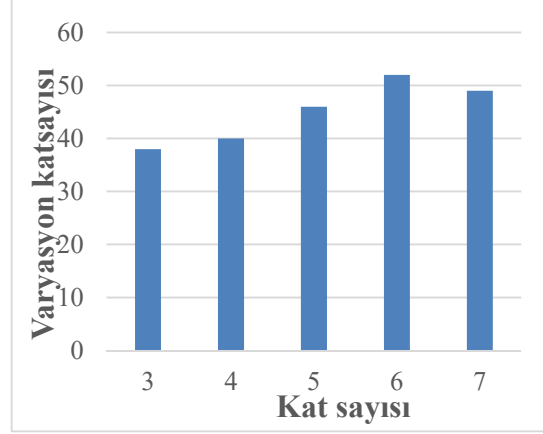
Performans Puanlarındaki saçılımın fazla olması nedeniyle sonuçları daha iyi yorumlayabilmek için binaların kat sayısına göre Performans Puanı (PP) ortalamasının değişim grafiği çizilmiş ve Şekil 8’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde kat sayısı arttıkça Performans Puanında meydana gelen düşüş açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca kat sayısına göre Ortalama Performans Puanının (PP) değişimi için varyasyon katsayısı grafiğide çizilmiş ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Kat sayısı arttıkça varyasyon katsayısında hesaplanan artış, kat sayısı arttıkça performans puanındaki saçılımın arttığını göstermektedir.

Mevcut yöntem risk bakımından öncelik sıralaması yapmaktadır. Yöntem kapsamında herhangi bir sınır değer önerilmediği için bina bazında risk değerlendirilmesi yani riskli/risksiz ayırımı yapılamamaktadır. Bu sebeple performans puanı değerleri dikkate alınarak, bina puanlarının yerleşim adalarına göre dağılımı ArcGIS programı kullanılarak harita üzerinde işlenmiş ve harita Şekil 10’da gösterilmiştir. Haritada düşük performans puanı koyu renkle, yüksek performans

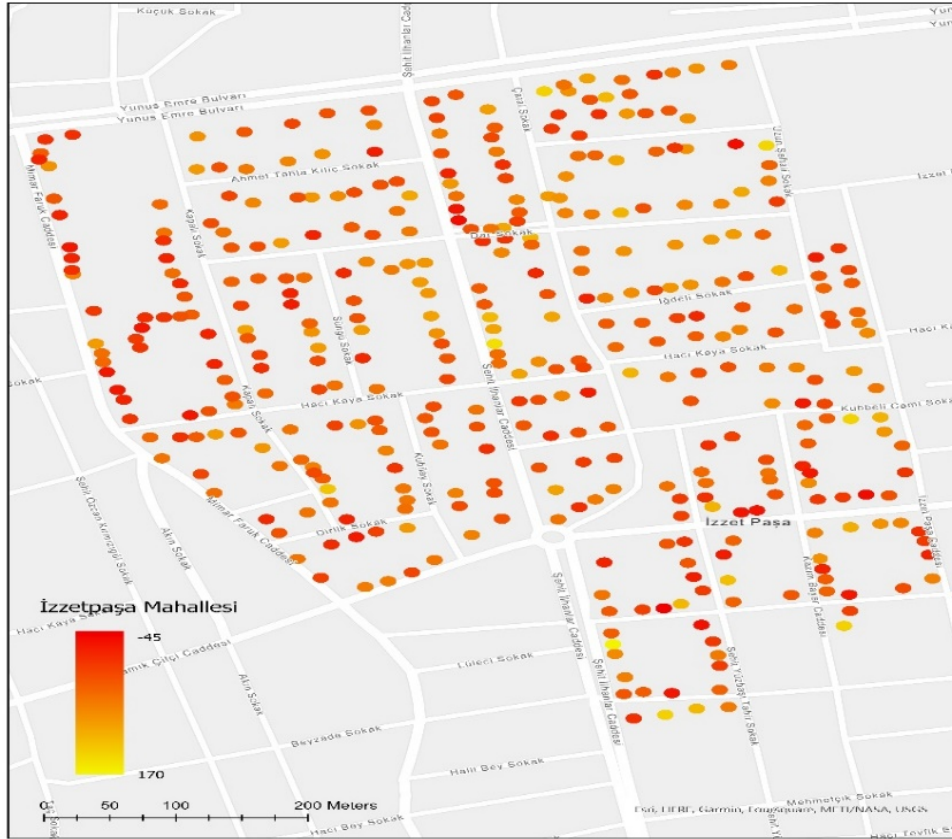
puanı açık renkle gösterilmiştir. Aradaki değerler ise düşük performans değerinden yüksek performans değerine doğru açılan renk tonu ile gösterilmiştir. Şekil 10'daki risk değerlendirme haritasına bakıldığında İzzet Paşa Mahallesi'nde işlek cadde ve sokaklara cephesi olan binaların performans puanlarının düşük olduğu, bu adaların diğer adalara göre daha fazla risk içerdiği düşünülmektedir.



Şekil 8 - Ortalama Performans Puanının (PP) kat sayısı ile değişimi

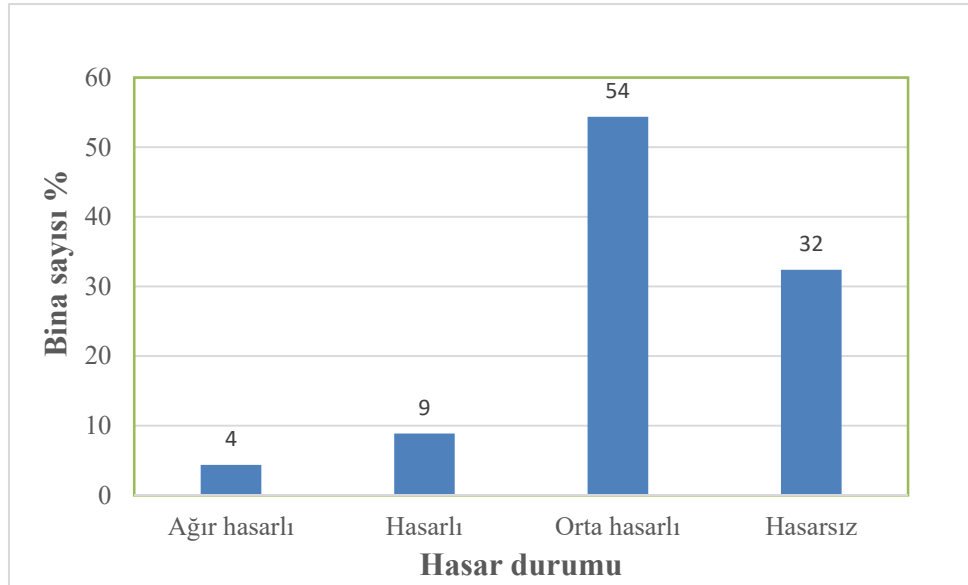


Şekil 9 - Ortalama Performans Puanının (PP) kat sayısı ile değişimi için varyasyon katsayısı



Şekil 10 - Bina risk durumunun harita üzerinde gösterimi

24 Ocak 2020 Elazığ Depremi sonrası gerek yazarların sahada yaptıkları çalışma, gerek Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından sahada yapılan çalışmalarda ağır hasar gören binaların büyük bir bölümünü 5 katlı binaların oluşturduğu gözlenmiştir [10]. Çevre Şehircilik Bakanlığı tarafından İzzet Paşa Mahallesi'nde tespit edilen hasar durumu Şekil 11'de verilmiştir. Deprem sonrası binalarda yaygın bir şekilde hasar olduğu, %13'de ise ileri derece hasar olduğu gözlenmiştir. Mevcut bina stokunun yarısından fazlasının performans puanının düşük olması ( $PP < 50$ ) deprem sonrası görülen yaygın hasar ile örtüşmektedir.



**Şekil 11** - 24 Ocak 2020 Elazığ Depremi sonrası İzzet Paşa Mahallesi için hasar durumu [10].

## **SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu çalışmanın amacı olası bir deprem sonrası hasar görme ihtimali yüksek olan riskli binaların, Hızlı Risk Tespiti Yöntemi kullanılarak hızlı bir şekilde tespit edilmesi ve risk haritasının oluşturulmasıdır. Bu amaç için Elazığ İli merkez mahallelerinden İzzet Paşa Mahallesi'nde ki bina stoku hızlı risk tespit yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Saha çalışmasında, ArcGIS Online CBS uygulaması ile gözlemsel inceleme ile toplanan bina verileri harita üzerine kaydedilerek bina veri tabanı oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında 505 adet binadan (426 betonarme, 79 yığma) veri toplanmıştır. Betonarme binalardan toplanan veriler dikkate alınarak performans puanları hesaplanmış, risk değerlendirilmesi yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Çalışma sonucu elde edilen verilere göre;

- Saha çalışmasında, mahalledeki binaların büyük bir bölümünün betonarme yapım tekniği kullanılarak inşa edildiği ve betonarme binaların yarısından fazlasının kat sayısının 4-5 katlı olduğu gözlenmiştir. Mahallede son on yılda kentsel dönüşüm çalışması ile binaların yenilediği, yenilenen binaların yüksek katlı olarak inşa edildiği tespit edilmiştir.

- Binaların performans puanlarını düşürerek risk durumunu artıran kusurlardan yumuşak/zayıf kat düzensizliği ile ağır çıkma kusurunun yaygın olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma, özellikle işlek caddelere cephesi olan binaların, zemin katlarının ticari amaçla kullanılması nedeniyle diğer katlara oranla yüksek ve büyük oranda duvarsız olarak inşa edilmesi sebep olmuştur. Bina plan alanının zemin kat tavan seviyesinde büyütülmesi nedeniyle gözlenen ağır çıkma kusuru, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice Depremi sonrası yaygın hasar oluşumuna neden olmuştur.



- Mahalledeki betonarme binaların büyük bir çoğunluğu bitişik nizamda inşa edilmiş ve komşu bina blokları arasına deprem derzi genellikle bırakılmamıştır. Yerleşim adalarının büyük bir bölümü eğimli arazi üzerinde olan mahalle için bitişik nizamda inşa edilen ve döşeme kotları farklı binalar için çarpışma etkisi risk oluşturmaktadır.

- Değerlendirilen binalar için Performans Puanlarının (PP), mevcut bina stokunun yarısını oluşturan 4 ve 5 katlı binalarda geniş bir aralıkta değiştiği gözlenmiştir. Kat sayısı arttıkça Performans Puanlarında (PP) düşüş gözlenmiştir. Mevcut yönetmelikte Performans Puanına dayalı bir sınır değer olmadığı için bina bazında risk değerlendirilmesi yapılamamıştır. Bu durum risk bakımından öncelikli binaların belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

- Performans puanları dikkate alınarak binaların risk dağılımı harita üzerinde gösterilmiştir. Özellikle işlek caddelere komşu olan yapı adalarında, performans puanı düşük binaların yoğunlaştığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma sonucunda Hızlı Risk Tespiti Yöntemi ile İzzet Paşa Mahallesiindeki binalar değerlendirilmiş ve risk haritası oluşturulmuştur. Binaların mevcut hızlı risk tespit yöntemi ile risk durumlarının değerlendirilmesinde, binanın inşa yılı dikkate alınmamaktadır. Özelde Elazığ İli için genelde Türkiye için yıllara göre inşa kalitesinde ve yönetmeliklere uygun olarak tasarlanmasında önemli iyileşmeler olmuştur. Çalışmada sadece 2004 yılından sonra inşa edilen binalarda deprem perdesinin bulunmasının olumlu etkisi dikkate alınabilmektedir. Yönetmeliğin son 20 yıllık periyotta inşaat kalitesindeki iyileşmeyi dikkate alacak şekilde yenilenmesinin uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Kentsel dönüşüm çalışmalarının etkili ve hızlı bir şekilde yürütülmesi için bu binalardan en riskli olanlarına kolayca karar verilebilecek bir değerlendirmeye ihtiyaç vardır. Mevcut Hızlı Risk Tespit Yönteminin bu ihtiyacı karşılayacak şekilde geliştirilmesi gerektiğinin uygun olacağı düşünülmektedir.

## **Teşekkür**

Makalenin yazarlarından R.S YOK 100/2000 bursiyeridir. Katkılarından dolayı YOK'e teşekkür ederiz.

ULUSAL DEPREM ARAŞTIRMA PROGRAMI (UDAP) kapsamında UDAP-Ç-21-62 nolu projemize verdiği destekten ötürü Afet ve Acil Yönetim Başkanlığı'na (AFAD) teşekkür ederiz.

## **Kaynaklar**

1. Federal Emergency Management Agency. Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook (FEMA P-154). 3rd ed. Washington D.C, USA, Nehr, 2015.
2. Institute for Research in Construction National Research Council Canada. "Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation". Ottawa, Canada, 36943, 1992.
3. Japan Building Disaster Prevention Association. "Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings-2001, Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings". Tokyo, Japan, 1st ed. 2001.
4. New Zealand Society for Earthquake Engineering. "Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes". New Zealand Society for Earthquake Engineering Study Group on Earthquake Risk Buildings, New Zealand, 30074-6, 2006.
5. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar, 6306 Sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 28695, 2013.

6. Demirbaş N, Şahin H, Durucan C. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Pamukkale University Journal of Engineering Sciences Hızlı değerlendirme yöntemlerinin performanslarının depremde hasar görmüş binalar kullanılarak değerlendirilmesi Evaluating the performances of rapid. 2022;28(3):390-401. doi:10.5505/pajes.2021.84115
7. Demirbaş N, Şahin H, Durucan C. Betonarme Yapılarda Deprem Sonrası Yapısal Hasarların Tahmini İçin Kullanılan Hızlı Değerlendirme Yöntemlerinin Etkinliklerinin Belirlenmesi. 2021;33(2):125-134.
8. Türkel YE, Tekeli H. Konut Türü Betonarme Binaların Deprem Risk Değerlendirmesi. J Polytech. 2018;0900(3):669-680. doi:10.2339/politeknik.418848
9. <https://www.arcgis.com/index.html#>
10. Şahin H, Alyamaç KE, Durucan AR, et al. 24 Ocak 2020 Mw 6.8 Sivrice/Elazığ Depremi Elazığ Bölgesi Yapısal Hasarlar İnceleme ve Analiz Raporu. Published online 2020:164.
11. Sucuoğlu H, Yazgan U, Yakut A. "A screening procedure for seismic risk assessment in urban building stocks". Earthquake Spectra, 23(2), 441-458, 2007.

# Taban İzolasyonlu Silo Yapısının Tasarımında Kullanılan İki Farklı Analiz Yönteminin Karşılaştırılması

Mert HACİEMİROĞLU<sup>1</sup>, Cenk ALHAN<sup>2</sup>

## ÖZET

Endüstriyel tesislerde üretim sürecinin aksamaması amacıyla taban izolasyonlu yapı uygulamaları tercih edilebilmektedir. Deprem izolasyonlu yapıların analizinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz için Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz (FNA) ve Doğrusal Olmayan Doğrudan İntegrasyon (DI) alternatifleri bulunmaktadır. DI analizlerinin FNA analizlerine göre gerçeğe daha yakın sonuç verdiği bilinmekle birlikte DI metodu ile gerçekleştirilen analiz sürelerinin uzun olması nedeniyle FNA analizleri tercih edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, 11 metre çapa ve 25 metre yüksekliğe sahip, taban izolasyonlu örnek bir tahıl depolama silosu tarihi bir deprem kaydı altında, DI ve FNA analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. İzolasyon seviyesindeki ivme ve deplasman sonuçları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. FNA ve DI analizlerinden elde edilen sonuçlarda farklılıklar olduğu ancak FNA analizinde kullanılan parametrelerin doğru tanımlanması ile DI ile yapılan analizlere benzer sonuçlar elde etmenin mümkün olabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz, Doğrusal Olmayan Doğrudan İntegrasyon, Taban İzolasyonu, Silo.

## ABSTRACT

### **Comparison of two Different Analysis Methods Used in the Design of Base Isolated Silo Structure**

Base isolated building applications can be preferred so that the production process in industrial facilities is not interrupted. There are Fast Nonlinear Analysis (FNA) and Nonlinear Direct Integration (DI) alternatives for nonlinear time history analysis in the analysis of base isolated structures. Although it is known that DI analysis gives more realistic results than FNA analysis, FNA analysis can be preferred because of the long time required to perform analysis with DI method. Within the scope of this study, a sample base isolated grain storage silo that is 11 meters in diameter and 25 meters in height is investigated using DI and FNA analysis methods under a

---

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mert.haciemiroglu@ogr.iuc.edu.tr

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - cenkalhan@iuc.edu.tr

*historical earthquake record. The acceleration and displacement results at the isolation level are presented comparatively. It is determined that although the results obtained from FNA and DI analysis methods are different, it is possible to obtain results close to DI analysis results defining the parameters used in the FNA analysis correctly.*

**Keywords:** *Fast Nonlinear Analysis, Nonlinear Direct Integration, Base Isolation, Silo.*

## GİRİŞ

Taban izolasyonlu yapı tasarımı son yıllarda dünyada olduğu gibi Türkiye’de de yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Taban izolasyonlu, üstyapıyı kauçuk ya da eğri yüzeyli sarkaç tipi mesnetler yardımıyla temel veya bodrum katlarından ayırmak suretiyle elde edilmektedir. Söz konusu deprem izolatörleri, binanın hâkim doğal titreşim periyodunu uzatmak ve taban izolasyonlu bina sistemine ilave sönüm katarak üstyapıya etkiyen etkin deprem yükünü azaltmak hedefiyle kullanılmaktadır [1]. Binalarda sismik cihazlarla taban izolasyonu uygulamaları 1980’li yıllar itibariyle artış göstermekle [2] beraber silo türü yapılarda taban izolasyonu uygulamalarının daha sınırlı olduğu söylenebilir. Silo türü yapılar ham madde depoları olarak kullanılmaları nedeniyle endüstriyel yapıların ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle deprem sonrası kesintisiz olarak kullanılma hedefi olan endüstriyel tesislerde silo yapılarının da benzer şekilde “iş kesintisi” yaratmayacak şekilde tasarlanması taban izolasyonu ile mümkün olabilmektedir ([3],[4]). Ülkemizdeki, dünyadaki ilk örnek olarak 12 adet silonun tek bir yalıtılmış düzlem üzerinde yer aldığı bir örnek tasarım ve uygulama gerçekleştirilmiştir [5].

Taban izolasyonlu yapıların tasarımı kapsamında, izolasyonlu sistemin doğal titreşim periyodu, yalıtım birimleri seviyesindeki taban kesme kuvveti, izolasyon sistemi yatay yerdeğiştirme, spektral ivme gibi ana tasarım parametreleri, üst yapının rijit bir blok gibi davrandığı kabulünden hareketle izolasyon sistemi ve üzerindeki üstyapının tek serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenmesi yaklaşımıyla yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Bu doğrultuda, Türk Bina Deprem Yönetmeliği-TBDY2018 [6] kapsamında Etkin Deprem Yüğü Yöntemi (EDYY) izolasyon sistemi ön tasarımı için kullanılabilirlikle birlikte, nihai tasarım için izolasyon sisteminin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gerekli olmaktadır. Silo türü yapılar TBDY2018 kapsamına girmemekle birlikte, benzer yaklaşımla taban izolasyonlu siloların tasarımında da doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yönteminin kullanılması gerektiği açıktır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi, TBDY2018’de tarif edildiği gibi, yapının konuşlandığı bölgenin depremselliği ve yerel zemin şartlarına göre seçilecek ve hedef tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilecek 11 adet yer hareketi ivme kaydı takımı kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Diğer taraftan, yapının nümerik modellemesi ve zaman tanım alanı analizi sonucu elde edilen deprem etkisi altındaki davranışının gerçek davranışa olabildiğince yakın olması gerekmektedir.

Taban izolasyonlu bina analizi ve tasarımında yaygın olarak kullanılan SAP2000 [7] programında doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz için Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz (Fast Nonlinear Analysis-FNA) ve Doğrusal Olmayan Doğrudan İntegrasyon (Nonlinear Direct Integration-DI) alternatifleri mevcuttur. DI analizlerinin FNA analizlerine göre gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesi ve FNA yöntemine kıyasla daha genel bir yöntem olmasına rağmen DI metodu ile gerçekleştirilen analiz sürelerinin uzun olması nedeniyle FNA analizleri tercih edilebilmektedir. Taban izolasyonlu bina tasarımında FNA yönteminin kullanılmasına yönelik endişeler önceki çalışmalarda ([8], [9]) ortaya konmuştur. Özuygur’un gerçekleştirdiği çalışmada 2 ve 3 katlı taban izolasyonlu, perdeli ve kolon-kiriş çerçeve sistemli bir yapıda DI ve FNA analizi sonuçları karşılaştırılmıştır [9]. Ancak, taban izolasyonlu silolar ile ilgili olarak DI ve FNA karşılaştırmasını içeren bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır.

## AMAC

Yapı dinamiği problemlerinin analitik çözümü, statik problemlere göre daha karmaşık olduğundan, çözümü sonlu sayıda zaman adımı kullanarak nümerik olarak elde etmek ve böylece basitleştirmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, iki farklı nümerik analiz yöntemi (Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz - FNA ve Doğrusal Olmayan Doğrudan İntegrasyon - DI) ve bu yöntemler ile taban izolasyonlu silo yapıları için deprem yükleri altında elde edilen yapısal davranışın karşılaştırmalı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, karakteristik dinamik özelliği bina türü yapılardan oldukça farklı olan taban izolasyonlu örnek bir silo yapısı için DI ve FNA yöntemleriyle tarihi bir deprem kaydı altında sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## MALZEME VE YÖNTEM

### Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ilk olarak 1981'de Yeni Zelanda'da ilk uygulama gerçekleştirilmiş olup günümüzde yaygın olarak Yeni Zelanda, Japonya ve Amerika [10] ve dünyanın pek çok diğer ülkesinde kullanılmaktadırlar. Kurşun çekirdekli izolatörlerin model yapısı düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlere benzemekle beraber, farkı izolatörün orta boşluğunda bulunan kurşun çekirdektir [1]. Bu çalışmada, izolasyon sisteminde kurşun çekirdekli izolatörler kullanılmıştır.

### Hızlı Doğrusal Olmayan Analiz (FNA)

FNA, doğrusal veya doğrusal olmayan yapısal sistemlerin statik veya dinamik değerlendirmesi için kullanılan bir modal analiz yöntemidir [11]. Hesaplama açısından verimli formülasyonu nedeniyle FNA, zaman tanım alanı analizi için çok uygundur ve hızı nedeniyle doğrudan entegrasyon uygulamaları yerine tercih edilebilmektedir. SAP2000 sonlu elemanlar programındaki FNA uygulamasında doğrusal elastik analitik modelde sınırlı sayıda doğrusal olmayan eleman kullanılmalı ve doğrusal olmayan elemanlar Link elemanı olarak modellenmiş olmalıdır. Doğrusal olmayan malzeme, kuvvet-deformasyon ilişkilerine ek olarak, Link elemanları, damper ve izolatörler gibi elemanları tanımlamak için kullanılabilir. FNA formülasyonunun verimliliği, büyük ölçüde, doğrusal olmayan elemanın kuvvet vektörü  $R_{NL}(t)$ 'nin rijitlik matrisinden ayrılmasından ve FNA'nın aşağıdaki şekilde ifade edilen sönümlü hareket denklemlerinden kaynaklanmaktadır [12].

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (1)$$

Denklem (1)'de, M sistemin kütle matrisi, C sönüm matrisi ve K rijitlik matrisidir. Elastik rijitlik matrisi K doğrusal olmayan elemanların rijitliklerini içermemektedir.  $\ddot{u}(t)$ ,  $\dot{u}(t)$  ve  $u(t)$  sırasıyla sistemin zamana bağlı ivme, hız ve yer değiştirme vektörüdür.  $R(t)$  sisteme etkileyen yük vektörüdür. Her bir zaman adımında modal denklemlerin çözümü yapılır; ancak  $R_{NL}(t)$  ile ifade edilen yük vektörü, doğrusal olmayan serbestlik dereceleri iterasyonla denklemin dengesini sağlayacak şekilde elde edilir. Bu prosedür sayesinde FNA yöntemi verimli bir doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi olarak kullanılabilir.

### Doğrusal Olmayan Doğrudan İntegrasyon (DI)

Doğrusal olmayan doğrudan integrasyon yöntemi, dinamik yüklemeye maruz kalan bir yapının hareket denge denklemlerinin tamamen entegre edildiği bir analiz yöntemidir [11]. Analizin,

her bir zaman adımında yapısal özelliklerin ve davranışların hesaba katıldığı iterasyon yöntemini içerir. Hareket denklemi aşağıdaki gibi verilir [12]:

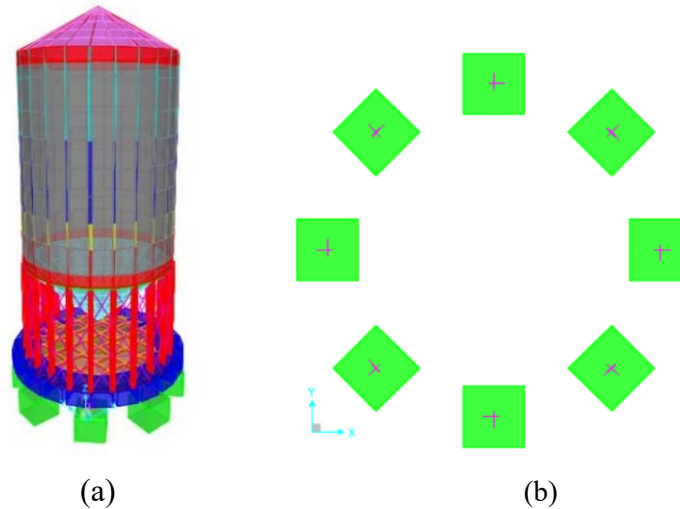
$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (2)$$

Entegrasyon, çıktı artışından bağımsız olarak, giriş kaydının her zaman adımında gerçekleştirilir. Burada  $F(t)$  dış yük vektörüdür. DI yönteminin en önemli özelliği ve analiz süresini arttıran husus, her zaman adımında yapının rijitlik matrisinin yeniden oluşturulmasıdır. Taban izolasyonlu yapılarda üstyapının esas itibarıyla doğrusal elastik davranış göstereceği düşünüldüğünde, analizin her adımında aynı üstyapı rijitlik matrisinin yeniden oluşturulması analiz süresini uzatan bir konu olarak düşünülebilir.

## BULGULAR

Bu bölümde, parametrik çalışmada kullanılmak üzere oluşturulan temsili taban izolasyonlu bir silo yapısına ait üst yapı ve sismik izolasyon sistemlerinin seçilen ve matematiksel modellemede kullanılan tasarım parametreleri aktarılmış ve silo yapısının DI ve FNA analiz yöntemleri ile çözümüne ait bilgiler sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında 11 m çapa ve 25 m yüksekliğe sahip tek bir taban izolasyonlu silo modeli ele alınmıştır. Modelde sekiz adet kurşun çekirdekli izolatör kullanılmıştır. Silo yapısı 12 m × 12 m aks sistemine yerleştirilen 8 adet pedestal üzerinde teşkil edilmiştir. 8 adet kurşun çekirdekli izolatör, simetrik yükleme nedeniyle tek tip seçilmiştir. 7 metre yüksekliğindeki, 24 adet HEA300 çelik kolon profilleri üstünde silo deposu yer almaktadır. Kolonlar arasında 6mm bükme sacdan elde edilmiş çelik çaprazlar bulunmaktadır. 1.2 mm kalınlığında çelik sac olduğu kabul edilen silo modeli etrafında, silo boyunca yükselen 1.5 ile 4 mm kalınlığında değişen ve bükme sacdan elde edilen 24 adet kolon mevcuttur. Siloya ait çelik malzeme özelliği S355 olarak seçilmiştir. Silo konsept boyutlandırması, çelik kolonlarla silo yükünü izolatörler üstünde yer alan betonarme kirişlere aktarılacak şekilde ilgili yönetmelikler ([13],[14],[15]) dikkate alınarak tasarlanmıştır. İlgili yönetmelikler dikkate alınarak ([6],[17],[18]) tasarlanan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlere ait tasarım parametreleri ve izolatör özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Dairesel kiriş boyutu 2 m genişlikte ve 1 m derinliktedir. Diyafram oluşturması amacıyla kirişli plak olarak tasarlanan izolatör üstü seviyesi döşemesinin kalınlığı 35 cm’dir. Betonarme yapı elemanlarında kullanılan beton sınıfı C40 ve donatı sınıfı B420C’dir.



**Şekil 1 - (a)Silo yapısı 3 boyutlu görseli (b)Pedestal yerleşimi analitik model görseli**

**Tablo 1 - Seçilen İzolatör Parametreleri ve Özellikleri**

<b>Tasarımdan Gelen Parametreler</b>	<b>Sembol</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
Bir İzolatörün Taşıdığı Eksenel Kuvvet	G+nQ	kN	1365
İzolatör Sayısı		Adet	8
Silo’da Depolanacak Ürün Yoğunluğu		kN/m <sup>3</sup>	5.5
<b>İzolatör Özellikleri</b>			
Alt Limit (LB) ve Üst Limit (UP) Sınır Aralığı	LB/UB		0.8/1.5
Kurşun Çekirdek Alanı	A <sub>p</sub>	mm <sup>2</sup>	31416
Tek Bir Elastomer Katmanın Çelik Plaka ile Yapışmış Yüzey Alanı	A <sub>r</sub>	mm <sup>2</sup>	1099557
Kauçuk Kayma Modülü	G <sub>v</sub>	Mpa	0.406
Toplam Kauçuk Yüksekliği	T <sub>r</sub>	mm	423
Kurşun Kayma Akma Gerilmesi	T <sub>yp</sub>	Mpa	10
Etkin Akma Yerdeğiştirme	D <sub>y</sub>	m	0.033
İzolatör Yer Değiştirme Kapasitesi	D	cm	63
Yer İvmesi	g	m/sn <sup>2</sup>	9.81
<b>İzolatörlerin Yer Değiştirme Hesabı</b>			
Etkin Akma Dayanımı	F <sub>y</sub>	kN	251.3
Yalıtım Biriminin Elastik Rijitliği	k <sub>2</sub>	kN/m	844.3
D’ye Karşılık Gelen Yatay Kuvvet	F	kN	755.3
D’ye Karşılık Gelen Etkin Rijitlik	K <sub>e</sub>	kN/m	1198.9
Etkin Sönüm Oranı	β <sub>e</sub>	%	20.1
Bina Ağırlığı	W	kN	10920
Sistemin Toplam Rijitliği	K <sub>M</sub>	kN/m	9591.2
Efektif Periyot	T <sub>M</sub>	sn	2.14
Sönüm Ölçekleme Katsayısı	η		0.632
2.14 Saniyede Spektral İvme	S <sub>ae(T)</sub>	g	0.875
Deplasman Değeri	D <sub>M</sub>	m	0.63
Burulmalı Deplasman Değeri	D <sub>TM</sub>	m	0.693

### Depremsellik

Taban izolasyonlu silonun izolasyon sistemi tasarımına yönelik deprem parametreleri, silonun konumlandığı kabul edilen bölge için daha önce hazırlanmış bir sahaya özel sismik tehlike analizi raporundan elde edilmiştir [16]. Gerçekleştirilen sayısal analizlerde 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan DD-1 deprem seviyesi dikkate alınmıştır. Tasarım spektrumu oluşturmak amacı ile 3 bileşenli 11 adet deprem kaydı kullanılmıştır. Kayıtlara ait bileşke spektrum hedef periyot aralığında (0.5TM ile 1.25TM) TBDY 2018 spektrumunun 1.3 katının altında kalmayacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Çalışma için DD-1 Deprem Yer Hareketi Düzeyi’nde, Yatay Elastik

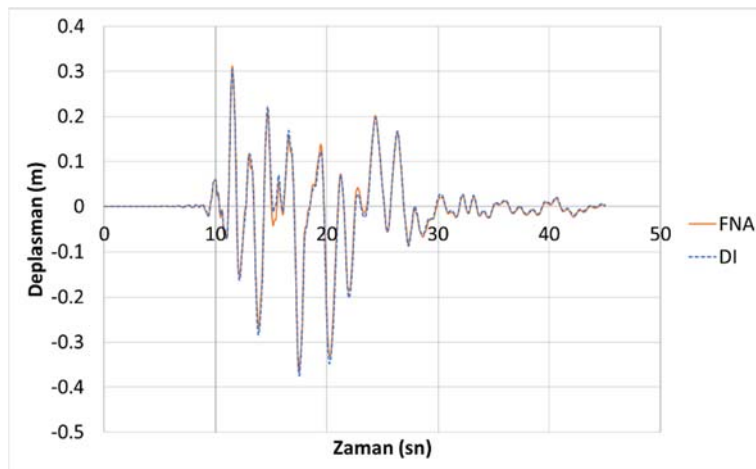
Spektrum'un elde edilmesi için gerekli olan, kısa periyot harita spektral ivme katsayısı  $S_s$  ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı  $S_1$  değerlerine, silonun konumlandığı kabul edilen bölge için <https://tdth.afad.gov.tr/> adresli internet sitesinden erişilmiştir. Haritadan elde edilen harita spektral ivme katsayıları  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  değerleri sırası ile, DD-1 seviyesi için 2.396 ve 0.648'dir. Yerel Zemin Sınıfı ZD için TBDY-2018 Tablo 2.1'den Yerel Zemin Etki Katsayıları elde edilmiştir.  $F_s$  ve  $F_1$  değerleri sırası ile 1.0 ve 1.937'dir. Tasarım spektral ivme katsayıları  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  sırası ile 2.396 ve 1.255'dir. Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları  $T_A$  ve  $T_B$  değerleri sırasıyla 0.054 ve 0.270'dir. FNA ve DI yöntemlerinin ürettiği sonuçlar açısından karşılaştırılmasına yönelik doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinde özellikleri Tablo 2'de verilen tarihi deprem kaydı kullanılmıştır.

**Tablo 2 - Deprem Kaydının Özellikleri**

Deprem	Moment Büyüklüğü	İstasyon	Bileşen		En Kısa Uzak km	Vs30 m/sn	Ölçeklendirme Katsayısı DD-1
			H1	H2			
Hector Mine	7.1	Hector	Rsn1787_ Hector_ Hec_Fn	Rsn1787_ Hector_ Hec_Fp	11.7	726	2.1

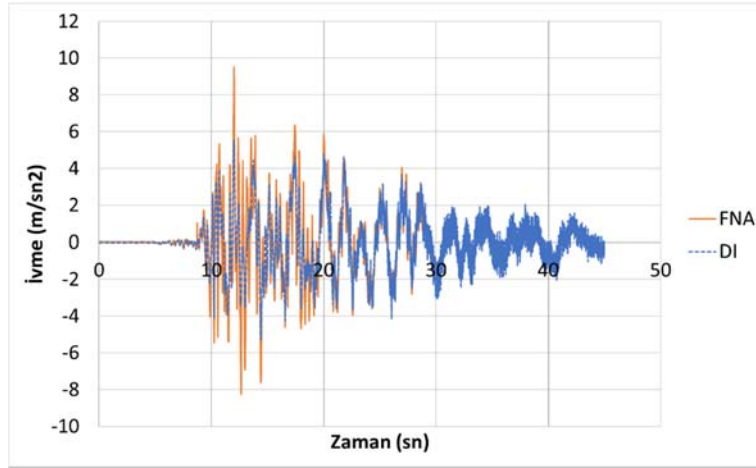
Analizlerin gerçekleştirildiği bilgisayar, donanımsal olarak 2208 Mhz-6 Çekirdek-12 Mantıksal işlemciye, WDC WD10SPZX-75Z10T2 HDD belleğe ve 16GB(RAM) fiziksel belleğe sahiptir. DI ve FNA analizleri paylaşılan donanım konfigürasyonuna sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiş olup 1 adet deprem analizi için süre karşılaştırması yapılmıştır. DI analizinin 76 dakikada tamamlandığı ve FNA analizinin 2 dakikada tamamlandığı tespit edilmiştir.

Programda modal analiz tipi Ritz vektör olarak seçilmiştir ve maksimum mod sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. DI ve FNA analizlerinde, tanımlanan aynı modal analiz tipi kullanılmıştır. Düşey yük ( $G+nQ$ ) durumları DI ve FNA için ayrı ayrı oluşturulmuş ve analiz programında çözüm tipi olarak FNA için "Modal", DI için "Direct Integration" seçilmiştir. FNA için modal sönüm değeri tüm modlar için sabit ve 0.05 olarak tanımlanmıştır. DI için modal sönüm değeri kütle ve rijitliğe bağlı katsayılar ile tanımlanmıştır [19]. Kütle oranı katsayısı "0" ve rijitlik oran katsayısı "0.0102" alınmıştır. Bu değer üst yapının taban izolasyonsuz olarak çözülmüş üst yapı periyoduna bağlı olarak hesaplanmaktadır. (üst yapı sönümü %5 ve taban izolasyonsuz silo yapısının hâkim doğal periyodu 0.64 sn olarak hesaplara dahil edilmiştir.)

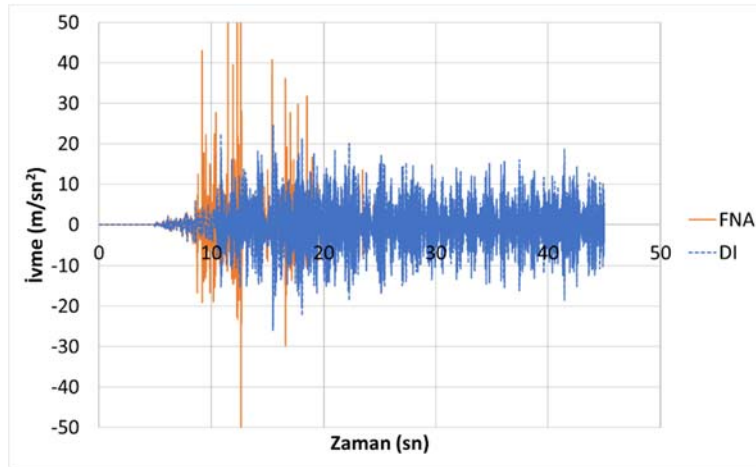


**Şekil 4 - FNA ve DI analizleri sonucunda izolatör üstü döşemede hesaplanan deplasman grafiği**





Şekil 5 - FNA ve DI analizleri sonucunda izolatör üstü döşemede hesaplanan yatay ivme grafiği



Şekil 6 - FNA ve DI analizleri sonucunda izolatör üstü döşemede hesaplanan düşey ivme grafiği

İzolator seviyesi üstünde seçilen bir noktada yatay deplasman, yatay ivme ve düşey ivme değerleri takip edilmiş ve grafikleri Şekil 4-Şekil 6'da sunulmuştur.

## TARTIŞMA VE SONUÇ

Gerçekleştirilen analizler sonucunda izolator üst kotunda yer alan döşemede seçilen bir noktada ivme ve deplasmanlar değerleri takip edilmiştir.

- Yatay deplasmanlar karşılaştırıldığında hem FNA hem de DI analizlerinin aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bu durumda mümkün olduğunca analitik modelin yalın olarak modellenmesinin sonucu olarak FNA ve DI analizlerinin birbiri yerine kullanılabilmesi ve FNA için analiz süresinin DI'ya kıyasla oldukça kısa olmasından ötürü tercih edilebileceği belirlenmiştir.
- Döşeme kotunda takip edilen yatay ivme değerleri karşılaştırıldığında, FNA analizinden elde edilen sonuçların DI analizinden elde edilen sonuçlarla genel uyum içerisinde olmasına karşın pik değerlerin FNA'da daha yüksek elde edildiği görülmüştür. FNA analizi ile DI analizine göre büyük değerler elde edilmesi nedeniyle üst yapı tasarımını FNA ile

gerçekleştirmek mümkün olmakla birlikte elde edilen yüksek yatay ivme değerleri nedeniyle ekonomik olmayan bir tasarım ortaya çıkabilir.

- Düşey ivme değerleri karşılaştırıldığında, FNA analizinde, DI analizlerinde belirgin olmayan ve belli “t” anlarında ortaya çıkan ivme değerlerinde sıçramalar (spike) olduğu görülmüştür. Düşey ivmenin etkin olduğu tasarımlarda FNA sonucu ortaya çıkan ani ivme sıçramaları nedeniyle suni olarak izolatör çekme kapasitesinin aşılması problemi yaşanabileceğinden DI yöntemi tercih edilmelidir.

### **Kaynaklar**

1. Naeim, F. and Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999
2. Martelli, M. Forni, P. Clemente Recent Worldwide Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 Sep 2012
3. Bitca D., Ursu E., Ioan P. Seismic Base Isolators For A Silo Supporting Structure, Mathematical Modelling in Civil Engineering, Vol.11-No:2 1-9-2015
4. Reshma R., Divya P.P., Comparison of Base Isolation Techniques for Reducing Seismic Vulnerability of Elevated Steel Silos, International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 5 Issue 4, April 2018
5. Hacıemiroglu, M., Artun, K., Tahaoğlu A.Ç., Ugurlu, E. and Alhan, C., Design of a Group of Silo Structure Located on a Common Seismic Isolation Basemat With Viscous Dampers, 6. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Gebze, Kocaeli, Turkey, 13-15 Oct 2021
6. TBDY, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı., 2018
7. CSI, SAP2000 23.0.0: Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA., 2021
8. N. Madutujuh, Simple, Fast, and Unconditionally Stable Direct Nonlinear Analysis using nathan-alpha Method, Engineering Software Research Centre, ESRC, Bandung, Indonesia, 2015
9. Özüygür, A. F, Deprem Yalıtımlı Binaların Ticari Yazılımlarla Analizinde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, DÜMF Mühendislik Dergisi, 2018
10. Gökhan E., Betonarme Yapılarda İzolatör Kullanımının Taşıyıcı Sistem Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009
11. Wilson, E.L., Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, 3rd Ed., Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, 2002
12. <https://wiki.csiamerica.com/pages/viewpage.action?pageId=9536464> [Ziyaret Tarihi: 14.06.2022]
13. Türk Standartları, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS500), Türk Standartları Enstitüsü, 1985
14. Türk Standartları, (1997), Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri (TS498), Türk Standartları Enstitüsü, 1997

15. ASCE Standard, Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE 7-10), American Society of Civil Engineers, No. ASCE/SEI 7-10, Reston, VA., 2010
16. Polat Ş., Mert A., Üretim Tesisi Deprem Tehlike Değerlendirmesi ve Zemin Bağımlı Tasarım Yer Hareketlerinin Belirlenmesi, Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2020
17. American Concrete Institute Standard, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318-08), American Concrete Institute, 2018
18. Eurocode 8, Design of Structures For Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions And Rules For Buildings, 2003
19. Chopra, A.K. Dynamics of structures 2007. Pearson Education India.



# Deprem Bölgelerinde Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel Kullanımının Yapı Uygulamaları Üzerinden İncelenmesi

Aygül CEYLAN<sup>1</sup>, Z. Canan GİRGIN<sup>2</sup>

## ÖZET

Çapraz Lamine Ahşap (CLT) panel; yatay kuvvetler altında düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ve iki yönlü eğilme dayanımı olan döşeme elemanı gereksinimini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. Yeni Zelanda, İtalya, Japonya ve Kanada gibi deprem riskinin yüksek olduğu ülkelerde, ahşap çok katlı yapı uygulamalarındaki kullanımı artarak devam etmektedir. Bu çalışmada; en büyük yer ivmesi (PGA) 0,20–0,90g aralığındaki ülkelerde, yapı uygulamaları üzerinden, taşıyıcı sistemde CLT panellerin farklı uygulamaları ve diğer yapı elemanlarıyla birlikte kullanımı incelenmiştir. Ayrıca bu kapsamda, literatürde yer alan enerji yutabilen CLT birleşimleri araştırmalarına paralel olarak; Türkiye’de üretilen çivi ve metal levha kullanılarak gerçek boyutlu bir CLT duvar-döşeme birleşimi oluşturulmuş, monotonik deprem yüklerini temsilen çekme kuvveti altındaki etkinliği deneysel incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çapraz lamine ahşap (CLT) panel, yapı birleşimleri, depreme dayanıklı yapı.

## ABSTRACT

### *Investigation of Cross Laminated Timber (CLT) Panel Usage in Earthquake Regions*

Cross Laminated Timber (CLT) panel was developed to meet the requirement of a load-bearing wall with high in-plane rigidity and floor members with two-way bending strength under horizontal loads. In countries where earthquake risk is high such as New Zealand, Italy, Japan, and Canada, its use in multi-storey building applications continues to increase. In this study; the different applications of CLT panels in the structural system and their use with other structural members were examined through building applications in countries with the peak ground acceleration (PGA) in the range of 0.20–0.90g. Also, in this context; in parallel with the studies in the current literature on CLT connections that can dissipate seismic energy, a full-size CLT wall-floor connection setup was organized through nail fasteners and metal plates produced in

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - aceylan@yildiz.edu.tr

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - zcgirgin@yildiz.edu.tr

*Türkiye, and its effectiveness under tensile force representing monotonic earthquake loads was experimentally investigated.*

**Keywords:** *Cross-Laminated Timber (CLT) panel, connections, earthquake resistant building.*

## **GİRİŞ**

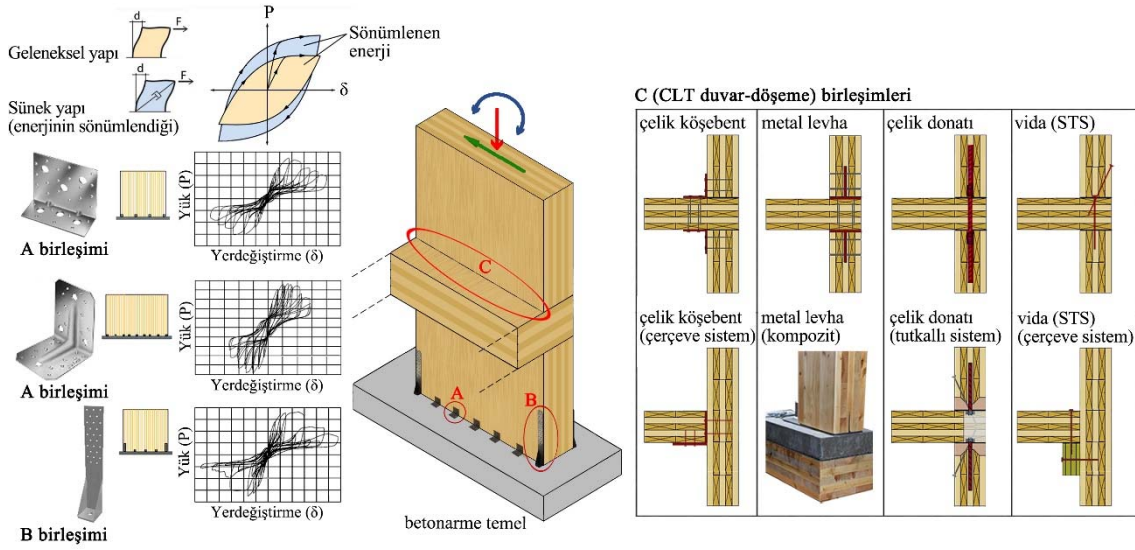
Çapraz lamine ahşap (*Cross Laminated Timber, CLT*); 1990'lı yıllarda Avrupa'da, ahşap çok katlı yapı üretiminde özellikle yanal yükler etkisindeki taşıyıcı duvar gereksinimini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. CLT panel; 3, 5, 7 ya da daha fazla ahşap tabakanın, lifleri birbirine dik yönde, çoğunlukla geniş yüzeylerinden tutkallanarak birleştirilmesiyle oluşturulan, ön üretilmiş yapı elemanlarıdır. Taşıyıcı sistem gereksinimlerine göre değişmekle birlikte özel üretimler dışında, CLT panelin genişliği 120-300cm ve uzunluğu 500-1.650cm aralığında olup kalınlığı ise 50,8cm'e ulaşabilmektedir [1,2].

2000'li yıllarla birlikte, Kanada, İtalya, Yeni Zelanda ve Japonya gibi deprem riskinin yüksek olduğu yerlerde; düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ve iki yönlü eğilme dayanımı olan döşeme sistemi olarak kullanımı artarak devam etmektedir. Ancak ETA onayı alarak CE işaretli panel üretimi yapılabilmesine karşın taşıyıcı sistemde, CLT yapı elemanlarının uygulanmasına ilişkin ortak ve kapsamlı bir yönetmelik bulunmamaktadır. Uygulamalardan elde edilen bilgiler ile 2010 yılında Kanada'da [1] ve 2013'te A.B.D.'de [3] kılavuz niteliğinde el kitapları yayımlanmıştır. Günümüzde CLT panel ile yapı uygulamaları, ülkeye ve uygulayıcı firmaya göre değişkenlik gösterebilen detaylar olarak paylaşılmaktadır. Bu nedenle çalışmanın amacı; en büyük yer ivmesi 0,20-0,90g aralığındaki farklı ülkelerde, özellikle yoğun kullanıcısı olan yapı uygulamaları üzerinden, taşıyıcı sistemi oluşturan CLT panel kullanımının farklılıklarının incelenmesidir.

Ahşap taşıyıcı sistemin deprem davranışını, yapı elemanlarının birleşimleri belirlemektedir. CLT paneller, rijit ancak gevrek özellikte yapı elemanlarıdır ve taşıyıcı sistemde süneklik, panel birleşimleri ile sağlanır. Çelik, betonarme ve ahşap çerçeve sistemler ile kolaylıkla bütünleştirilebilen paneller, metal parçalar (çelik köşebent, birleşim levhaları vb. ile çivi, vida, bulon, kavela vb.) kullanılarak birleştirilir. Deprem riskli alanlarda tasarlanan ve uygulanan CLT birleşimlerin davranışının belirlenebilmesi ve enerji yutabilen (sünek) birleşimlerin geliştirilebilmesi amacıyla dünyada birçok çalışma yürütülmektedir. Ancak nüfusunun büyük bir bölümü deprem riski altında olan Türkiye'de konuyla ilgili devam eden bilimsel çalışmalar çok yeni ve oldukça sınırlı sayıdadır. Bu nedenle çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi'nde hazırlanan doktora tezi [4] kapsamında Türkiye'de üretilen çivi, metal levha vb. ile oluşturulan gerçek boyutlu CLT duvar-döşeme birleşiminin, monotonik deprem yüklerini temsilen çekme kuvveti altındaki etkinliğini inceleyen bir deneysel çalışmanın sonuçlarına da yer verilmiştir.

## **CLT PANEL BİRLEŞİMLERİNİN DEPREM DAVRANIŞI**

Yapıya etkiyen yükler altında birleşimlerin davranışı, yük-yerdeğiştirme( $P-\delta$ ) zarf eğrisi ile değerlendirilmektedir. Rijit ve gevrek özellikteki CLT paneller ile yapı sistemlerinde süneklik, panel birleşimlerinde sağlanır. Depreme dayanıklı ahşap yapı tasarımı kapsamında yapılan araştırmalarda; panellerin özellikle deprem riski yüksek alanlardaki etkinliği üzerine birleşim ve taşıyıcı duvar deneyleri [5-10] ile 1:1 ölçekli CLT yapı deneyleri [11-13] yapılmaktadır. Birleşim deneyleri; yapı deneyleri ile karşılaştırıldığında, küçük ölçekli ve düşük maliyetli olup, CLT panellerin davranışının belirlenebilmesi için uygun ve öncü niteliktedir. Bu araştırmaların ortak amacı; enerji yutabilen (sünek) panel birleşimlerinin (Şekil 1) geliştirilmesidir.



Şekil 1 - CLT panel birleşimleri ve davranışları [1,14–16'dan uyarlanmıştır]

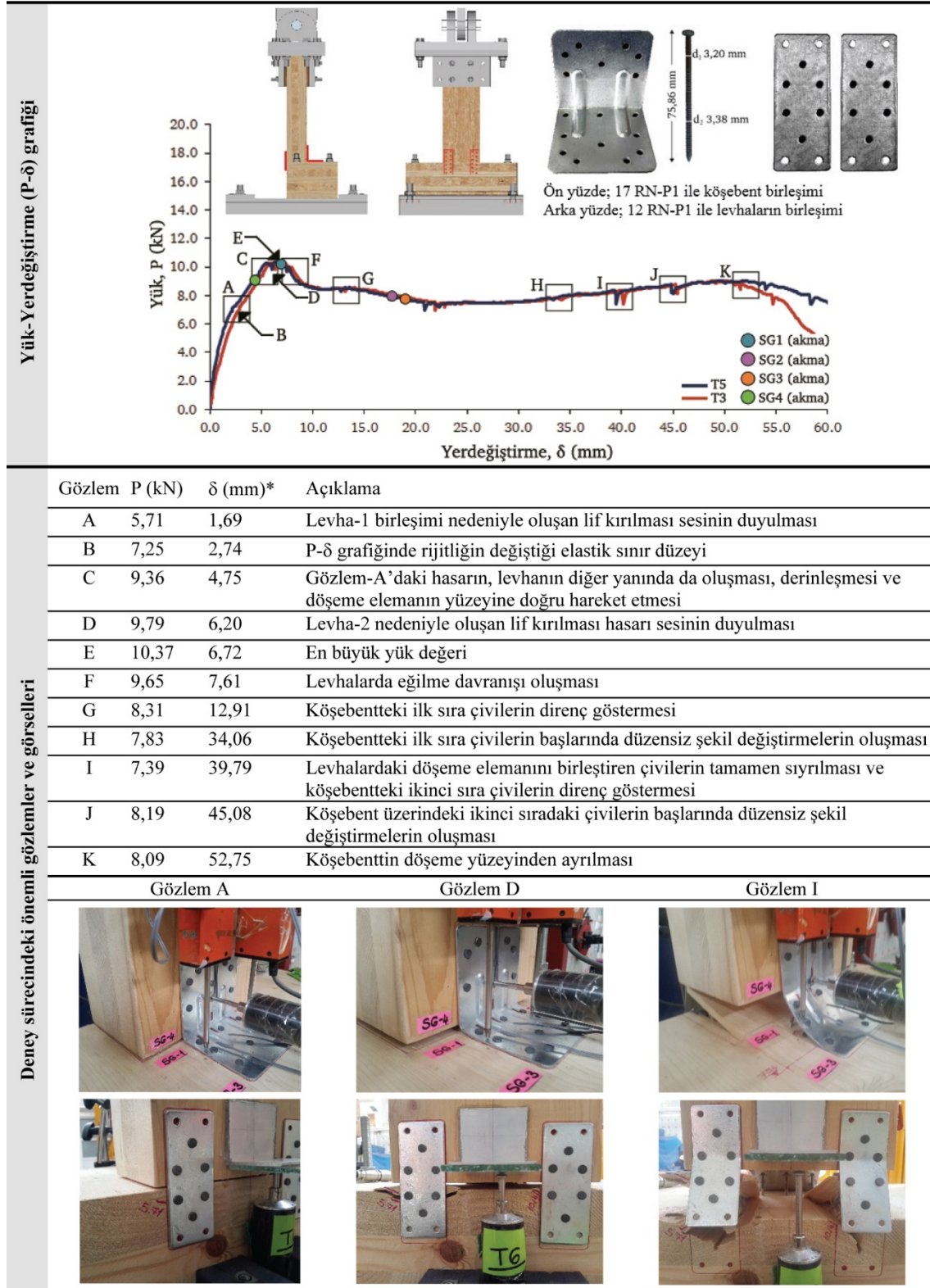
Nüfusunun büyük bölümü deprem riski altında olan Türkiye’de, deprem ivmesinin yapının kütlesi ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde; daha hafif ve dayanıklı taşıyıcı sistemlere gereksinim olduğu açıktır. Bu nedenle incelenmesi gereken öncelikli alanlardan biri; Türkiye’de yerli kaynaklar ile üretilebilen metal birleşimli CLT panellerin davranışlarının araştırılması konusudur. Bu kapsamda ülkemizde yerli üretim metal parçalar (çivi, metal levha vb.) ile oluşturulan gerçek boyutlu CLT duvar-döşeme birleşimleri, monotonik deprem yüklerini temsilen çekme kuvveti altında deneysel incelenmiştir [4].

Metal birleşimlerde; ön yüzde rijitliği arttırılmış hazır delikli eşit kollu çelik köşebent, arka yüzde ise iki metal levha kullanılmış olup, bu parçalar fosfat kaplı halkalı çiviler<sup>†</sup> ile birleştirilmiştir. Birleşimin davranışı, deney düzeneğine yerleştirilen ölçüm araçları ve görüntüleme yöntemleri ile kayıt altına alınarak incelenmiştir. Deney çalışmasından elde edilen veriler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- $P-\delta$  grafiğinde; en büyük yük düzeyine ulaşıncaya kadar doğrusal davranış olduğu; sonrasında, döşeme tabakasında oluşan lif kırılmaları ve göçmeler ile çivi başlarındaki düzensiz şekil değiştirmeler sonucunda, yük düzeyinde ani azalmalar olduğu görülmüştür.
- Arka yüzde, levha-1’in döşeme elemanına birleştiği üst tabakada, ilk lif kırılmasından ( $P=5,71$  kN) sonra, çatlak açılarak, rijitliğin değiştiği elastik sınıra  $P=7,25$  kN düzeyinde ulaşılmıştır.
- Deney örneğinin arka yüzündeki lif kırılmasının, tabakayı oluşturan yaş halkasının yaklaşık şeklini izleyerek derinleştiği görülmüştür. Bu kapsamda hasar düzeyinin; çivilerin birleşim bölgesine yakınlığı ve yaş halkası yoğunluğu ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır.
- Birleşimin arka yüzündeki metal levhalar, birleşimin çekme kuvvetine karşı dayanımını arttırmıştır.

<sup>†</sup> Öncesinde, çivi tipine karar verilebilmesi için CLT örnekler üzerinde çivi çekme deneyleri yapılarak sıyrılmaya dayanımı, çakılma biçimi ve ahşabın lif yapısı ilişkilendirilmiş, en iyi davranışı gösteren fosfat kaplı çivinin [17] uygulanmasına karar verilmiştir.

**Tablo 1 - CLT duvar-döşeme panel birleşimi deneyinin P- $\delta$  grafiği ve gözlemleri [18]**



\* T3 ve T5'in ortalamasıdır.



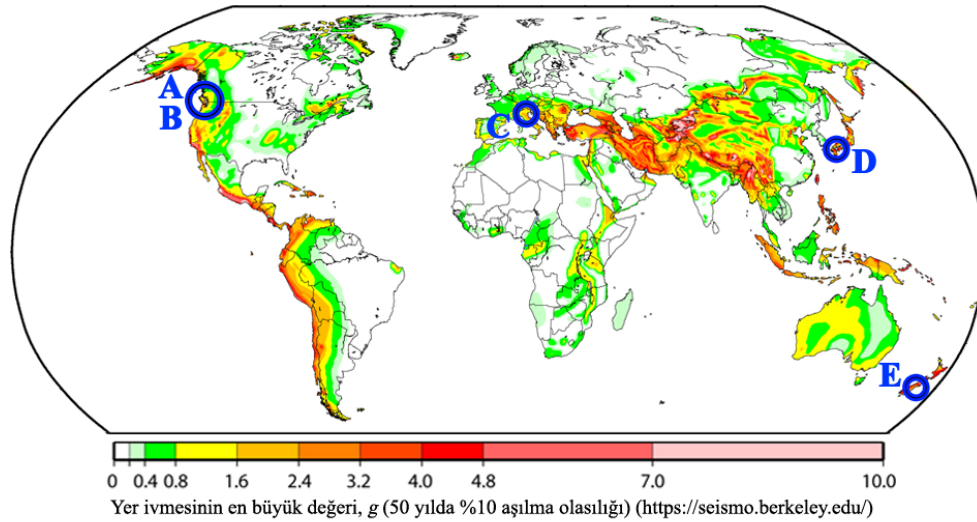
- Rijitliği artırılmış köşebentte eklenen üç çivinin, arka levhalardaki göçme sonrasında, köşebenttin döşemeye tutunmasını arttırdığı ve böylelikle diğer halkalı çivilerin sıyrılmasını geciktirdiği gözlemlenmiştir.
- Arka yüzdeki levhalarda oluşan hasarın belirginleşmesi ile elastik sınır sonrası, köşebent üzerindeki şekil değiştirme ölçümlerinde akma sınırına ulaşılmıştır.
- CLT döşeme paneli tabakalarını birleştiren tutkalda, dayanım açısından herhangi bir sorun oluşmamıştır.
- Fosfat kaplı halkalı çiviler, tutunma yeteneği açısından en iyi davranışı göstermiştir.

Deneilerin sonucunda; kullanılan yerli üretim güçlendirilmiş köşebent ve levha gibi metal parçalar ile enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca araştırmanın sonuçlarının, yeni çalışmalara yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

## CLT PANEL KULLANIMININ YAPI UYGULAMALARI ÜZERİNDEN İNCELENMESİ

Çağdaş ahşap yapıların başlıca özelliklerini (dayanım ve dayanıklılık, hafiflik, yangına karşı dayanıklılık, sürdürülebilirlik vb.) sağlamasının yanı sıra depreme dayanıklı yapı tasarımında, CLT panel kullanımı, rijitlik açısından önemli bir yeniliktir. Bu kapsamda dünyada; konut üretimi dışında kamu yapıları, eğitim kampüsleri, havaalanları, endüstriyel üretim alanları ve kapalı spor merkezleri gibi büyük ölçekli yapılarda, köprülerde ve güçlendirme projelerinde, özellikle taşıyıcı duvar ve döşeme elemanı olarak CLT panel kullanımı artarak devam etmektedir.

Yapı uygulamaları ve birleşim detayları, ülkeye ve panel uygulamasını yapacak firmaya göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle çalışmada; en büyük yer ivmesi 0,20–0,90g aralığındaki farklı ülkelerde (Kanada/A.B.D., İtalya, Japonya ve Yeni Zelanda), özellikle yoğun kullanımlı yapı uygulamaları üzerinden CLT kullanımındaki farklılıklar incelenmiştir (Şekil 2).



Yapının adı	Yapım yılı ve yeri	g değeri
A UBC Yer Bilimleri Binası	2012, Vancouver, Kanada	0,20–0,35 g
B Cooley Eğitim Merkezi	2015, East Palo Alto, A.B.D.	0,55–0,90 g
C Cento (Corporeno) Okul Binası	2012, Ferrara, İtalya	0,20–0,35 g
D Kyushu Araştırma Merkezi	2018, Kumamoto, Japonya	0,20–0,35 g
E Kaikoura Belediyesi Hizmet Binası	2014, Kaikoura, Yeni Zelanda	0,55–0,90 g

Şekil 2 - CLT panel kullanımına ilişkin incelenen yapı uygulamaları

### UBC Yer Bilimleri Binası

Taşıyıcı sistem tasarımında, glulam kolon-kiriş sisteminin yanı sıra geniş açıklıklı (~24m) amfilerde ek olarak çelik kiriş ve glulam stabilite çaprazları ile dayanım artırılmıştır. Sismik etkilere karşı yapıda kayma dayanımı, glulam çaprazlar ile karşılanmaktadır. Ayrıca LVL<sup>‡</sup>-beton kompozit döşeme sistemi ile yapısal titreşimlerin engellenmesinin yanı sıra hafif bir sistem elde edilmiştir. Beş katlı iç avlusunda, iki kollu ve sahanlığı konsol çalışan kırık plak şeklinde CLT bir merdiven bulunur (Tablo 2).

### Cooley Eğitim Merkezi

Kaliforniya'da CLT panel kullanılan ve yönetmeliklere göre uygulanan ilk yapıdır. Tasarımda, çok amaçlı etkinlik alanındaki açıklığın geçilebilmesi ve aynı zamanda deprem kuvvetleri altında diyafram davranışını sağlayabilecek bir döşeme sistemi elde edilebilmesi amacıyla CLT panel kullanımına karar verilmiştir. Çatı, glulam kirişlerin üzerine yerleştirilen panellerden oluşmaktadır. Ayrıca yanal stabilitenin artırılması amacıyla çelik çaprazlar da kullanılmıştır (Tablo 3).

### Cento (Corporeno) Okul Binası

Emilia Depremi ( $M_w=5,8$ , 2012)'nde hasar alan bölgede, tamamıyla CLT paneller ile kısa bir sürede tamamlanan proje, depreme dayanıklı olmasının yanı sıra sürdürülebilir özellikte kalıcı bir okul yapısıdır. Panel elemanlar, Avusturya, Almanya ve İsviçre'deki PEFC/FSC sertifikalı sürdürülebilir ormanlardan elde edilmiştir. Yapı kabuğunu oluşturan CLT paneller, dış çevreden taş yünü yalıtımlı alçı paneller (120 mm) ile korunmaktadır (Tablo 4).

### Kyushu Araştırma Merkezi

Proje, 2016 yılında Kumamoto Depremi'nde hasar görerek kullanılamaz duruma gelen araştırma yapısının yerinde tasarlanmıştır. Yapının zemin katında deney çalışmalarının yapıldığı laboratuvarlar, ikinci katında ise kütüphane bulunmaktadır. CLT panel yapım sisteminin, Japonya'da Ar-Ge işlevli yapılarda kullanımına yönelik ilk projedir<sup>§</sup>. Ahşap yapı elemanlarının su etkileşiminin önlenmesi için yapı girişi, birkaç basamaklı betonarme bir zemin ile sağlanmıştır (Tablo 5).

### Kaikoura Belediyesi Hizmet Binası


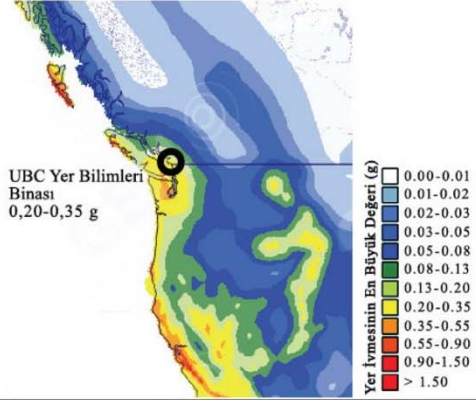
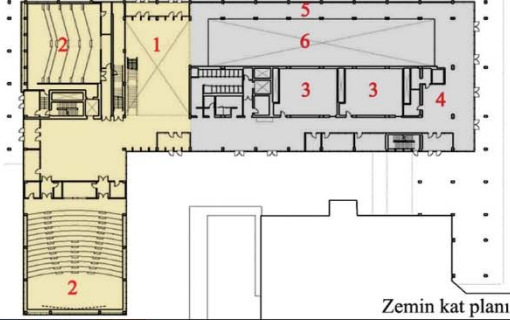
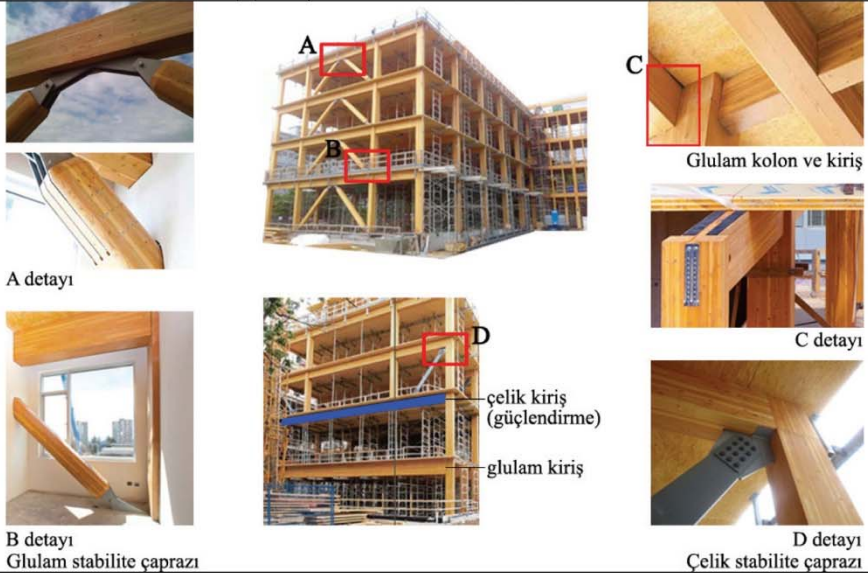
Yeni Zelanda'da, yerel orman kaynaklarından elde edilen ahşap ile ardgermeli lamine teknolojisinin taşıyıcı sistem olarak kullanıldığı ilk yapıdır. Sismik etkinliği yüksek bir bölgede yer alması ve yapının yanal yükler altında rijitliğinin sağlanabilmesi amacıyla kompozit (%30 LVL-%70 CLT) taşıyıcı duvar panelleri tasarlanmıştır. Bu elemanlar, CLT panellerde en büyük şekil değiştiriminin gerçekleştiği uç bölgeler ile ağırlık merkezindeki ardgerme bölgelerine; LVL tabakaların eklenmesi ile üretilmiştir. Ayrıca deprem kuvvetleri altında yapı birleşimlerinde enerjinin sönmülenebilmesi amacıyla perde duvarların dış yüzeylerinin her iki yanında dişli çelik donatılar da yerleştirilmiştir. Panel elemanların düşey birleşimlerinde elastik şekil değiştirme; sönmüleyici donatıların kısmen uzamasına izin verecek şekilde, 0,5mm ile sınırlandırılmıştır. Kaikoura Depremi ( $M_w=7,8$ , 2016) sonrasında yapılan incelemede; taşıyıcı duvarların mesnet bölgesinde eğilme hasarı ya da enerji sönmüleyici donatıların akması vb. olumsuz bir durum görülmemiş olup yapı, Afet Koordinasyon Merkezi olarak da kullanılmıştır (Tablo 6).

---

<sup>‡</sup> Lamine kaplama ahşap (*Laminated Veneer Lumber, LVL*).


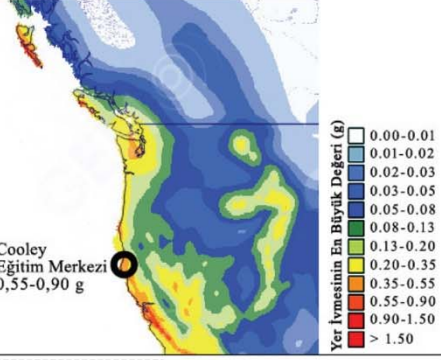
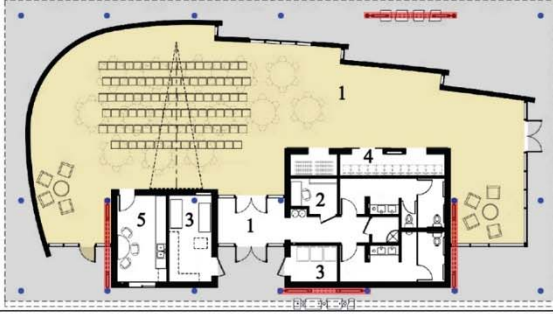
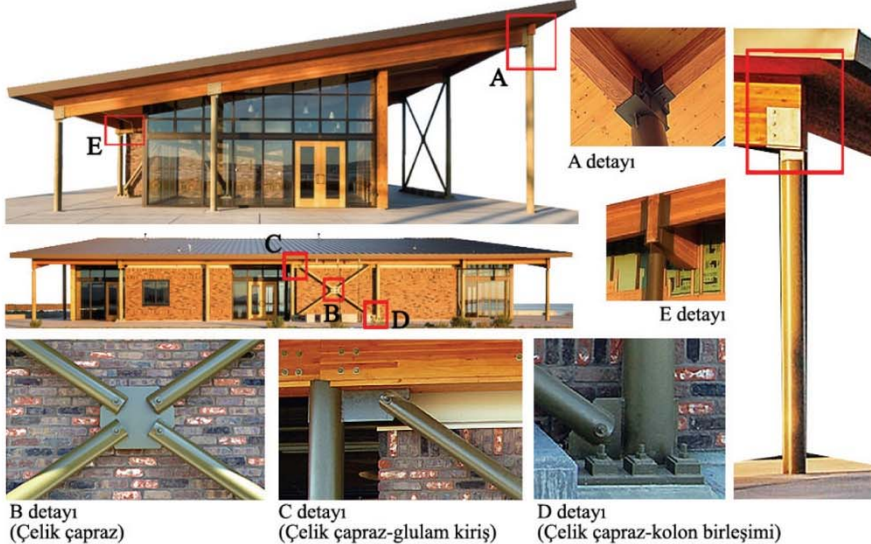
<sup>§</sup> Proje öncesinde tohum üretim alanı olarak kullanılan bölgede, zemin iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

**Tablo 2 - UBC Yer Bilimleri Binası taşıyıcı sistem özellikleri ve birleşim detayları\***

<b>Adı</b>	UBC Yer Bilimleri Binası	
<b>Yeri</b>	Vancouver, Kanada	
<b>Yapım Yılı</b>	2012	
<b>Mimari ve Strüktürel Tasarım</b>	Perkins+Will Equilibrium Consulting	
<b>Yapı Özellikleri</b>	İşlev: Eğitim Kat sayısı: 5 İnşaat alanı: 15,238 m <sup>2</sup> İnşaat süresi: 2010-2012 İnşaat maliyeti: 48,7 milyon \$	
<b>Yer İvmesinin En Büyük Değeri (g)</b> <a href="https://maps.openquake.org/">https://maps.openquake.org/</a>	<b>0,20–0,35 g</b> (50 yılda aşılma olasılığı %10)	
<b>Zemin Türü</b> FAO, <a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>	Yumuşak (andisol)	
<b>Taşıyıcı Sistem Elemanları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Glulam çerçeve sistem</li> <li>- Çelik-glulam kiriş (amfi)</li> <li>- CLT panel taşıyıcı duvar</li> <li>- CLT panel döşeme</li> <li>- 89 mm LSL-beton kompozit döşeme (~6,4 m açıklık)</li> <li>- Betonarme zemin kat döşemesi</li> <li>- Glulam ve çelik çaprazlar (amfi)</li> <li>- CLT merdiven (iç avlu)</li> <li>- CLT giriş saçağı (5 tabakalı)</li> </ul>	
<b>Yapımın Planı</b>	 <p>Zemin kat planı</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 İç avlu</li> <li>2 Amfi</li> <li>3 Sınıf</li> <li>4 Kafe</li> <li>5 Müze</li> <li>6 Laboratuvar</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Ahşap sistem (Akademik birimleri)</li> <li>— Betonarme sistem (Laboratuvar birimleri)</li> </ul>	
<b>Birleşim Detayları</b>	 <p>A detayı</p> <p>B detayı Glulam stabilite çaprazı</p> <p>C detayı Glulam kolon ve kiriş</p> <p>D detayı Çelik stabilite çaprazı</p> <p>çelik kiriş (güçlendirme) glulam kiriş</p>	


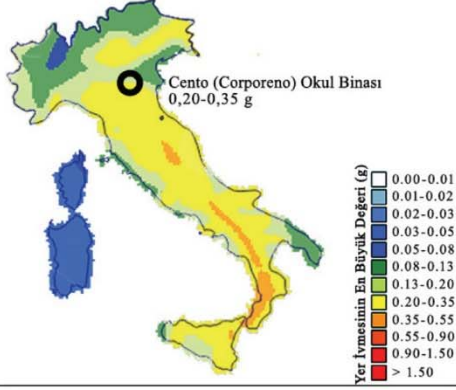
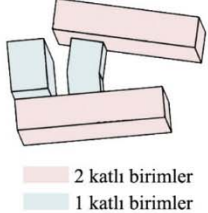


\*[19–24'den uyarlanmıştır.]

Tablo 3 - Cooley Eğitim Merkezi taşıyıcı sistem özellikleri ve birleşim detayları\*

<b>Adı</b>	Cooley Eğitim Merkezi	
<b>Yeri</b>	East Palo Alto, A.B.D.	
<b>Yapım Yılı</b>	2015	
<b>Mimari ve Strüktürel Tasarım</b>	FOG Studio KPFF Engineers	
<b>Yapı Özellikleri</b>	İşlev: Eğitim Kat sayısı: 1 İnşaat alanı: 372 m <sup>2</sup> İnşaat süresi: 2014-2015 İnşaat maliyeti: 2,7 milyon \$	
<b>Yer İvmesinin En Büyük Değeri (g)</b> <a href="https://maps.openquake.org/">https://maps.openquake.org/</a>	<b>0,55–0,90 g</b> (50 yılda aşılma olasılığı %10)	
<b>Zemin Türü</b> FAO, <a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>	Yumuşak (andisol)	
<b>Taşıyıcı Sistem Elemanları</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Glulam çatı kirişleri</li><li>- CLT çatı paneli</li><li>- Çelik stabilite çaprazı</li><li>- Çelik kolonlar (saçağı taşıyan)</li><li>- Betonarme zemin kat döşemesi</li><li>- Kazık temel sistemi</li></ul>	
<b>Yapının Planı</b>	 <p>1 Giriş 2 Ofis 3 Teknik hacim 4 Depo 5 Mutfak</p> <p>Çok amaçlı etkinlik alanı Açık etkinlik alanı</p> <p>● Çelik kolon — Çelik çapraz</p> <p>Zemin kat planı</p>	
<b>Birleşim Detayları</b>	 <p>A detayı E detayı B detayı (Çelik çapraz) C detayı (Çelik çapraz-glulam kiriş) D detayı (Çelik çapraz-kolon birleşimi)</p>	


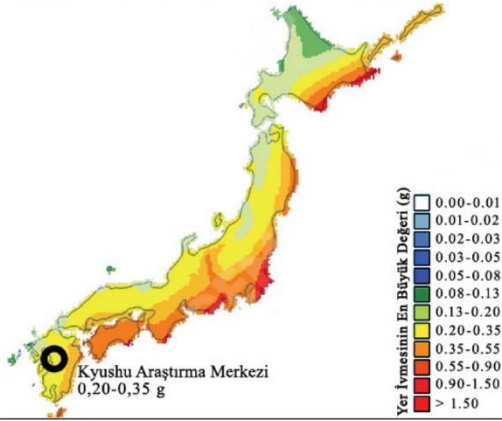
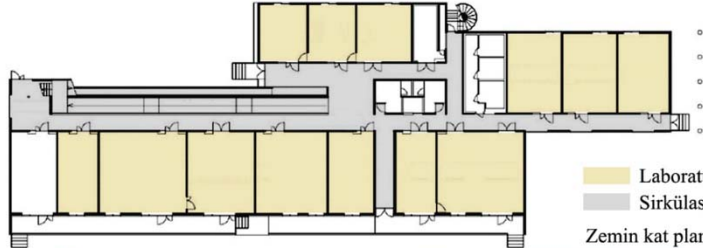

\*[25–27'den uyarlanmıştır.]

**Tablo 4 - Cento (Corporeno) Okul Binası taşıyıcı sistem özellikleri ve birleşim detayları\***

<b>Adı</b>	Cento (Corporeno) Okul Binası	
<b>Yeri</b>	Ferrara, İtalya	
<b>Yapım Yılı</b>	2012	
<b>Mimari ve Strüktürel Tasarım</b>	Duccio Randazzo, Francesca Cibelli Claudio Contini	
<b>Yapı Özellikleri</b>	İşlev: Eğitim Kat sayısı: 2 İnşaat alanı: 6,200 m <sup>2</sup> İnşaat süresi: 2012 (78 gün) İnşaat maliyeti: 6,5 milyon \$	
<b>Yer İvmesinin En Büyük Değeri (g)</b> <a href="https://maps.openquake.org/">https://maps.openquake.org/</a>	<b>0,20–0,35 g</b> (50 yılda aşılma olasılığı %10)	
<b>Zemin Türü</b> FAO, <a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>	Yumuşak (inceptisol)	
<b>Taşıyıcı Sistem Elemanları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CLT taşıyıcı duvar ve döşeme panelleri (1,750 m<sup>3</sup> ahşap)</li> <li>- CLT merdiven ve asansör shaftı</li> <li>- Tek doğrultuda CLT kirişler, 16 m açıklık (yemekhane)</li> <li>- İki yöne eğimli CLT kirişler (spor salonu)</li> <li>- Betonarme zemin kat döşemesi</li> </ul>	
<b>Yapımın Planı</b>	  <p>2 katlı birimler 1 katlı birimler</p> <p>1 Spor salonu 2 Yemekhane 3 Merdiven ve asansör</p> <p>Sınıflar Sirkülasyon</p> <p>Zemin kat planı</p>	
<b>Birleşim Detayları</b>	 <p>CLT panellerin vida (döşeme-döşeme) ve metal levha (duvar-döşeme) ile birleşimi</p> <p>Tek doğrultulu CLT kiriş uygulaması (spor salonu)</p> <p>Merdiven ve asansör shaftı uygulaması</p>	


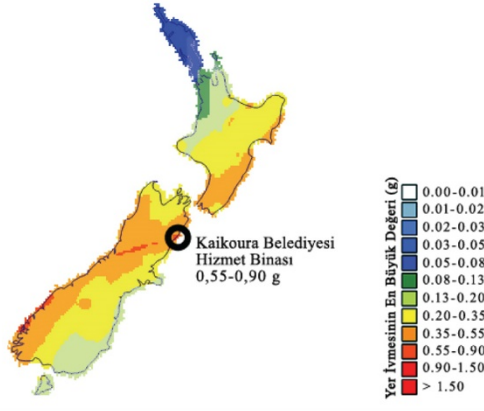
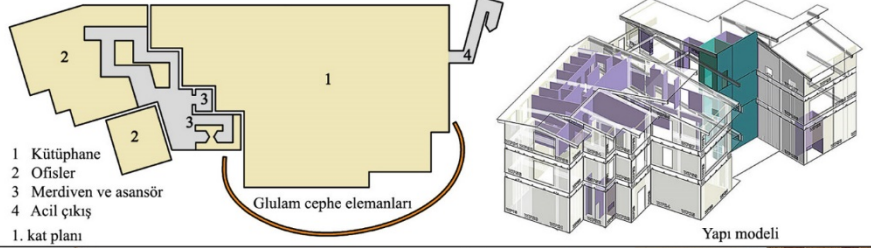
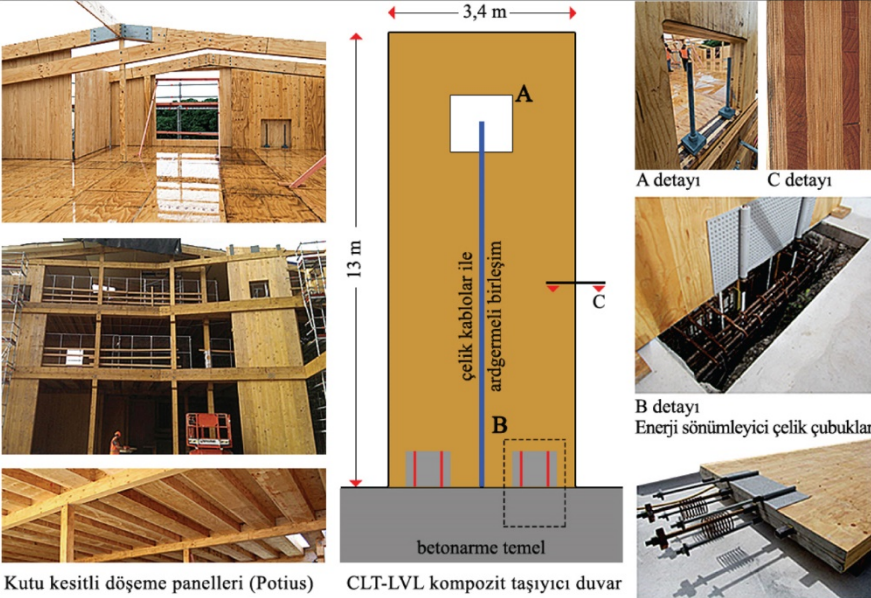
\*[28–31'den uyarlanmıştır.]

Tablo 5 - Kyushu Araştırma Merkezi taşıyıcı sistem özellikleri ve birleşim detayları\*

Adı	Kyushu Araştırma Merkezi	
Yeri	Kumamoto, Japonya	
Yapım Yılı	2018	
Planlama ve Uygulama	E.P.A. Kamiyama Const.	
Yapı Özellikleri	İşlev: Eğitim Kat sayısı: 2 İnşaat alanı: 1.424,23 m <sup>2</sup> İnşaat süresi: 2017-2018 İnşaat maliyeti: 6 milyon \$	
Yer İvmesinin En Büyük Değeri (g)	<b>0,20–0,35 g</b> (50 yılda aşılma olasılığı %10) <a href="https://maps.openquake.org/">https://maps.openquake.org/</a>	
Zemin Türü	Yumuşak (spodosol) FAO, <a href="http://www.fao.org/">http://www.fao.org/</a>	
Taşıyıcı Sistem Elemanları	<ul style="list-style-type: none"><li>- CLT panel sistem</li><li>219,8 m<sup>3</sup> duvar (302 adet) paneli</li><li>331,2 m<sup>3</sup> döşeme (222 adet) paneli</li><li>- CLT panel özellikleri: Yerel sedir ve selvi ağaçlarından</li><li>3 tabakalı, 90 mm</li><li>5 tabakalı, 150 mm</li><li>7 tabakalı, 210 mm</li><li>- Betonarme zemin kat döşemesi</li><li>- Kazık temel sistemi</li></ul>	
Yapının Planı	 <p>Laboratuvarlar Sirkülasyon Zemin kat planı</p>	
Birleşim Detayları	 <p>CLT duvar-döşeme panelleri Ahşap kolon-döşeme birleşimi</p>	

\*[32–36'dan uyarlanmıştır.]

**Tablo 6 - Kaikoura Belediyesi Hizmet Binası taşıyıcı sistem özellikleri ve birleşim detayları\***

<b>Adı</b>	Kaikoura Belediyesi Hizmet Binası	
<b>Yeri</b>	Kaikoura, Yeni Zelanda	
<b>Yapım Yılı</b>	2014	
<b>Mimari ve Strüktürel Tasarım</b>	DesignBASE CGW, Gavin Robertson	
<b>Yapı Özellikleri</b>	İşlev: Ofis Kat sayısı: 3 İnşaat alanı: 2,400 m <sup>2</sup> İnşaat süresi: 2012-2014 İnşaat maliyeti: 6,8 milyon \$	
<b>Yer İvmesinin En Büyük Değeri (g)</b> <a href="https://maps.openquake.org/">https://maps.openquake.org/</a>	<b>0,55-0,90 g</b> (50 yılda aşılma olasılığı %10)	
<b>*Zemin Türü</b>	Yumuşak (inceptisol)	
<b>Taşıyıcı Sistem Elemanları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LVL çerçeve sistem</li> <li>- %70 CLT- %30 LVL kompozit taşıyıcı duvar (3,4x13m, 15 adet)</li> <li>- Ardgermeli duvar paneli birleşimleri (Macalloy)</li> <li>- Kutu kesitli döşeme panelleri (Potius)</li> <li>- Betonarme zemin kat döşemesi</li> <li>- Glulam güneş kırıcılar</li> <li>- LVL merdiven (çelik kirişli)</li> <li>- İnce yapıda CLT kullanımı (bölücü duvar, danışma bankosu vb.)</li> </ul>	
<b>Yapımın Planı ve Modeli</b>	 <p>1 Kütüphane 2 Ofisler 3 Merdiven ve asansör 4 Acil çıkış 1. kat planı</p> <p>Glulam cephe elemanları</p> <p>Yapı modeli</p>	
<b>Birleşim Detayları</b>	 <p>3,4 m</p> <p>13 m</p> <p>A</p> <p>çelik kablolar ile ardgermeli birleşim</p> <p>B</p> <p>betonarme temel</p> <p>A detayı</p> <p>C detayı</p> <p>B detayı</p> <p>Enerji sönmüleyici çelik çubuklar</p> <p>Kutu kesitli döşeme panelleri (Potius)</p> <p>CLT-LVL kompozit taşıyıcı duvar</p>	

\*[37-40'dan uyarlanmıştır.]

## **SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER**

CLT paneller, çok katlı ahşap taşıyıcı sistem tasarımında, düşey yüklerin yanı sıra yapının yatay yüklere karşı rijitlik gereksinimini karşılaması amacıyla geliştirilmiştir ve dünyada kullanımı artarak devam etmektedir. Bu çalışmada; en büyük yer ivmesi 0,20–0,90g aralığındaki ülkelerde (Kanada/A.B.D., İtalya, Japonya ve Yeni Zelanda), yoğun kullanımlı beş yapıda taşıyıcı sistemi oluşturan CLT panel kullanımının farklılıkları incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- En büyük yer ivmesinin 0,55–0,90g olduğu Yeni Zelanda ve A.B.D.’deki yapılarda; yanal rijitliğin artırılabilmesi amacıyla glulam/LVL moment aktaran çerçeve ve çelik çaprazlar ile CLT paneller birlikte uygulanmıştır. Kaikoura Belediyesi Hizmet Binası’nda ise ardgermeli kompozit (CLT-LVL) paneller ile enerji sönümleyici çelik donatılı sünek bileşimler birlikte kullanılmıştır.
- 0,20–0,35g aralığındaki Kanada ve İtalya’daki yapılarda; taşıyıcı sistemlerin tamamıyla CLT duvar ve döşeme panelleri ile oluşturulduğu ancak geniş açıklıklı alanlarda (spor salonu, yemekhane vb.) ayrıca tek doğrultuda çalışan CLT kirişlerin de uygulanabildiği görülmüştür.
- Diğer yapılar ile karşılaştırıldığında, inşaat alanı ve kat sayısı fazla olan UBC Yer Bilimleri Binası’nda; geniş açıklıklı amfilerin çokluğu nedeniyle yanal yüklere karşı rijitliğin artırılması amacıyla glulam çerçeve sistem, CLT duvar panelleri, çelik kat kirişleri ve kat boyunca devam eden glulam/çelik çaprazlar ile taşıyıcı sistem oluşturulmuştur.
- Yangına karşı dayanıklılığının sağlanabilmesi amacıyla yapılarda, gizli panel birleşimleri ya da alçı paneller ile koruma yöntemi uygulanmıştır.

Çalışmada ayrıca, Türkiye’de üretilen çivi, metal levha vb. ile oluşturulan gerçek boyutlu CLT duvar-döşeme birleşiminin, monotonik deprem yüklerini temsilen çekme kuvveti altında davranışı deneysel incelenmiştir. Sonuçta, yerli üretim güçlendirilmiş köşebent, metal levha ve fosfat kaplı halkalı çiviler ile enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin elde edilebileceği görülmüştür. Türkiye’de depreme dayanıklı ahşap yapı uygulamalarında, CLT panel yapı sisteminin kullanımının sağlanması ve yaygınlaştırılabilmesi için özellikle yapı birleşimlerinin davranışlarını inceleyen araştırmaların öncelikli ve önemli olduğu düşünülmektedir.

## **Teşekkür**

Bu çalışma, FDK-2018-3367 proje numarası ile Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’nce desteklenmiştir.

## **Kaynaklar**

1. FPInnovations, Cross-Laminated Timber, CLT Handbook, (ed.) S. Gagnon, C. Pirvu, Canada, SP-528 E, QC, 2011.
2. ANSI/APA PRG 320, Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, APA-The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, 2018.
3. FPInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Cross-Laminated Timber, CLT Handbook, (ed.) E. Karacabeyli, B. Douglas, USA, SP-529 E, QC, 2013.
4. Ceylan, A., Çapraz Lamine Ahşap Panel Yapı Sistemleri ve Birleşim Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2021.



5. Uibel, T., Blaß, H. J., “Edge Joints with Dowel Type Fasteners in Cross Laminated Timber”, 44th CIB-W18 Meeting, 40-7-2, Bled, Slovenia, 2007.
6. Popovski, M., Schneider, J., Schweinsteiger, M., “Lateral Load Resistance of Cross-Laminated Wood Panels”, 11<sup>th</sup> WCTE, 20-24 June, Trentino, 3394–3403, 2010.
7. Gavric, I., Seismic Behavior of Cross-Laminated Timber Buildings, Ph.D. Thesis, University of Trieste, Italy, 2013.
8. Loss, C., Hossain, A., Tannert, T., “Simple Cross-Laminated Timber Shear Connections with Spatially Arranged Screws”, Engineering Structures, 173(340–356), 2018.
9. O’Ceallaigh, C., Harte, A. M., “The Elastic and Ductile Behaviour of CLT Wall–Floor Connections and The Influence of Fastener Length”, Engineering Structures, 189(319–331), 2019.
10. Schneider, J., Stiemer, S. F., Tesfamariam, S., Karacabeyli, E., Popovski, M., “Damage Assessment of Cross Laminated Timber Connections Subjected to Simulated Earthquake Loads”, 12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand, 2012.
11. Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M., Yasumura, M., Minowa, C., Kawai, N., “SOFIE Project–3D Shaking Table Test on a Seven-Storey Full-Scale Cross-Laminated Timber Building”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(13), 2003-2021, 2013.
12. Costa, A. C., Candeias, P. X., Seismic Performance of Multi-Story Timber Buildings-TUGraz Building, Final Report of Timber Buildings Project, 2013.
13. Popovski, M., Gavric, I., “Performance of a 2-story CLT House Subjected to Lateral Loads”, Journal of Structural Engineering, 142(4), E4015006, 2016.
14. Ugalde, D., Almazán, J. L., Santa María, H., Guindos, P., “Seismic Protection Technologies for Timber Structures: A Review”, European Journal of Wood and Wood Products, 77(2), 173-194, 2019.
15. Popovski, M., Schneider, J., Schweinsteiger, M., “Lateral Load Resistance of Cross-Laminated Wood Panels”, 11<sup>th</sup> WCTE, 20-24 June, Trentino, 3394-3403, 2010.
16. Ceylan, A., Girgin, Z. C., "Earthquake Resistant Design and Sustainability Through Wooden Composites in Multi-Storey Structures", 2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 25-29, İstanbul, Türkiye, 2215, 2014.
17. Ceylan, A., Girgin, Z. C., “Comparisons on Withdrawal Resistance of Resin and Phosphate Coated Annular Ring Nails in CLT Specimens”, Construction and Building Materials, 238, 117742, 2020.
18. Ceylan, A., Girgin, Z. C., “Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Duvar-Döşeme Birleşiminin Yapısal Davranışının Deneysel İncelenmesi”, Megaron, 14(4), 521-529, 2019.
19. Mayo, J., Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design. Routledge, New York, 2015.
20. Smith, R. E., Griffin, G., Rice, T., Solid Timber Construction-Process, Practice, Performance, University of Utah, Integrated Technology in Architecture Center, College of Architecture and Planning, 2015. <https://www.nibs.org/reports/site-studies-solid-timber-construction>
21. Karsh, E., Gafner, B., “The Flying Stair at the University of British Columbia’s Earth Sciences Building”, 18<sup>th</sup> Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2012.
22. Canadian Wood Council, Innovating with Wood, A Case Study Showcasing Four Demonstration Projects, Ottawa. Erişim tarihi: 10.06.2022. [https://cwc.ca/wp-content/uploads/flipbooks/publications-casestudy-Four-demonstration-Case-Study\\_May\\_30/](https://cwc.ca/wp-content/uploads/flipbooks/publications-casestudy-Four-demonstration-Case-Study_May_30/)

23. Equilibrium Consulting Inc., UBC Earth Sciences Building. Erişim tarihi: 10.06.2022. <https://www.eqcanada.com/projects/ubc-earth-sciences-building/>
24. Perkins&Will, Earth Sciences Building, ArchDaily, 2013. <https://www.archdaily.com/343465/earth-sciences-building-perkins-will>
25. FOG Studio, Cooley Landing Education Center, Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.fogprojects.com/projects/cooleylanding>
26. Structurlam Mass Timber Corporation, Cooley Landing Education Center, Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.structurlam.com/portfolio/project/cooley-landing-education-center/>
27. SEAOC, Cooley Landing Education Center, Excellence in Structural Engineering Awards, 2016. <https://cdn.ymaws.com/www.seaoc.org/resource/resmgr/docs/EISE2016/4a-displayboard-cooleylandin.pdf>
28. Nuovo Polo Scolastico Di Corporeno, “Corporeno New School Campus”, Arketipo Magazine, Poste Italiane S.p.A., 70/13 (120–121), 2013.
29. Randazzo, D., Cibelli, F., Nuovo polo scolastico di Corporeno, BinderHolz. 2012. <https://www.arketipomagazine.it/nuovo-polo-scolastico-di-corporeno-d-randazzo-f-cibelli/>
30. Sistem Costruzioni S.R.L., Polo Scolastico, Corporeno Cento (Ferrara), Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.sistem.it/realizzazioni/strutture-polifunzionali/istituti-scolastici/polo-scolastico-corporeno-cento-ferrara/>
31. Ambientevario, Polo Scolastico Di Corporeno Cento, Erişim tarihi: 25.06.2022. <http://www.ambientevario.it/progetto/corporeno/>
32. Passarelli, R. N., Koshihara, M., “The Implementation of Japanese Cross Laminated Timber: Current Situation and Future Tasks, WCTE, August 20-23, Seoul, 2018.
33. Nakano, K., Karube, M., Hattori, N., “Environmental Impacts of Building Construction Using Cross-Laminated Timber Panel Construction Method: A Case of The Research Building in Kyushu, Japan”, Sustainability, 12(6), 2220, 2020.
34. Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Woodist Yamasa Mokuzai, Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://yamasa-woodist.com/projects-case05.html>
35. FFPRI, Joint experiment building of the Kyushu branch of the Forestry Research Institute, Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/kys/shishoshokai/shisetsu/jikkentou.html>
36. Japan CLT Association, Forest Research Institute Kyushu Branch Joint Experiment Building, Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.clta.jp/>
37. DesignBASE, New Kaikoura District Council Building, 2014, Erişim tarihi: 12.12.2019. <http://www.designbase.co.nz/about-us/news/new-kaikoura-district-council-building/>
38. Pres-Lam, Kaikoura Civic Centre, Erişim tarihi: 25.06.2022. <http://pres-lam.com/projects/kaikoura-civic/>
39. XLam, Rocking Shear Walls Withstand Kaikoura Earthquake, XLam Cross Laminated Timber Panels. Erişim tarihi: 25.06.2022. <https://www.eboss.co.nz/ebossnow/xlam-cross-laminated-timber-panels-rocking-shear-walls-seismic-performance>
40. Leslie, S., Hewson, N., Kaikoura District Council XLam Building, Case Study, XLam, 2016, Erişim tarihi: 25.01.2020. <https://www.xlam.co.nz/>

## Betonarme Kirişlerde Çelik Halat Kullanımının Yapısal Davranışa Olan Etkisinin İrdelenmesi

Muzaffer YAZAR<sup>1</sup>, Beyza TAŞKIN<sup>2</sup>, Metin AYDOĞAN<sup>3</sup>

### ÖZET

Bu çalışmada betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak çelik halatların kullanılması deneysel olarak incelenmiştir. Çelik halatlar ile geleneksel betonarme çelikleri gerilme-şekildeğiştirme özellikleri bakımından farklılıklar gösterir. Yüksek dayanıma sahip çelik halatların kullanılması durumunda, geleneksel betonarme çelikli kesitle aynı davranışa daha az donatı alanıyla ulaşılabilmeyeceği araştırılmıştır. Hazırlanan numuneler eğilme deneylerine tabi tutulmuştur. Numunelerin hiçbirine normal kuvvet etkililmemiştir. Yapılan deneylerde kuvvet-deplasman, moment-deplasman ve moment-dönme eğrileri çıkarılmıştır. Deneyler süresince kirişlerde oluşan çatlaklar da gözlenerek, hasar oluşumları incelenmiştir. Deneysel çalışmaya ek olarak analitik çözümler yapılmıştır. Çelik halatların herhangi bir kuvvet verilmeden betonarme kirişlerde kullanılması durumunda, akma değerlerine ulaşamadığı, betondan sıyrıldığı ve aderansını kaybettiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme, betonarme kiriş, çelik halat, eğilme deneyi.

### ABSTRACT

#### *Investigation of the Effect of Steel Strands on Structural Behavior in Reinforced Concrete Beams*

*The use of steel strands as bending reinforcement in reinforced concrete beams has been experimentally investigated. In the experiments, force-displacement, moment-displacement and moment-rotation curves were derived. During the experiments, the cracks formed in the beams were also observed and the damage formations were examined. In addition to the experimental work, analytical analyzes were carried out. It has been determined that when steel strands are used on reinforced concrete beams without any force, they cannot reach yield strengths, slip from the concrete and lose its bond. Therefore expected behaviour of beams with steel strands cannot be observed.*

**Keywords:** Reinforced concrete, reinforced concrete beam, steel strand, bending test

---

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - yazarmu@itu.edu.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - btaskin@itu.edu.tr

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - aydoganm@itu.edu.tr

## **AMAC**

Betonarme, inşaat sektöründe en çok kullanılan, beton ve çeliğin beraber kullanılmasıyla oluşan kompozit malzemedir. Beton yüksek basınç dayanımına, düşük çekme dayanımına sahiptir. Çelik ise hem basınç hem de çekmede yüksek dayanıma sahiptir. Bu iki malzemenin bir araya gelmesiyle betonarme oluşmaktadır. Bu çalışmada geleneksel betonarme çeliğinin yanında yüksek mukavemete sahip çelik halat kullanılmıştır. Her iki çelik için de çekme testleri yapılarak malzeme karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmaya ek olarak yapılan analitik çözümde geleneksel betonarme çeliği ve çelik halatı çekme deneylerinden elde edilen gerilme şekildeğiştirme verileri kullanılmıştır. Numunelerdeki donatı miktarları eşdeğer çekme kuvveti verecek şekilde seçilmiştir. Böylelikle yüksek mukavemetli çelikler kullanılarak daha az donatıyla aynı moment kapasitesine sünek davranışından ödün vermeden ulaşılması amaçlanmaktadır. Geleneksel olarak kullanılan donatılara nazaran daha yüksek akma dayanımına sahip çelik halatların geleneksel betonarme çelikleriyle beraber betonarme kirişlerde kullanılması durumunda kirişlerin yapısal davranışı irdelenmiştir. Bu çalışmada geleneksel betonarme çeliği yerine daha yüksek mukavemetli çelik halatların geleneksel betonarme çelikleri gibi kullanılması durumunda davranışa etkileri incelenmek istenmiştir. Bu yüzden çelik halatlara herhangi bir öngerme veya ardgerme kuvveti uygulanmamıştır. Bu inceleme sonucunda çelik halatların betonarme kirişlere ve eksenel yükün ihmal edildiği kolonlarda dayanıma katkısı deneysel ve analitik çalışmalarla ortaya konmuştur.

## **DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **Literatür Araştırması**

Arsava (2011) tarafından yapılan deneysel ve analitik olarak yürütülen çalışmada çelik halatların betonarme kirişlerde kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Bunun için çelik halat içeren 6, geleneksel çelik içeren 7 olmak üzere toplamda 13 numune hazırlanmıştır. Elastik ve elasto-plastik olarak iki eğri tanımlanarak, çelik halat için elastisite modülü 200000 MPa ve akma dayanımı 1700 MPa alınarak, maksimum donatı oranı için verilen ifade aşılmadan donatı miktarları seçilirse öngerme halatlarının kullanılabilirlikleri belirtilmiştir. [1]

Giduquio vd. (2015) yaygın şekilde kullanılan Grade 60 (414 MPa) yerine Grade 100 (690 MPa) ve SD685 (690 MPa) çeliklerinin betonarme kirişlerde kullanılmasını araştırmıştır. Deney sonuçlarında her iki yüksek mukavemetli çeliğin kullanılmasının ACI şartnamesine göre uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Basınç bölgesindeki donatıların burkulması betonarme kesitin davranışını önemli ölçüde etkilediği için etriye aralıklarının en küçük basınç donatısı çapının 8 katı ile sınırlandırılmasının önemi vurgulanmıştır. [2]

Kelly vd. (2014) depreme dayanıklı yapılarda çerçeve elamalarında ve perdelerde Grade 60 (414 MPa) çeliği yerine daha yüksek mukavemete sahip Grade 80 (550 MPa) çeliğinin kullanılmasını inceleyerek tasarım gereksinimlerini belirlemeyi amaçlamıştır. Bu çeliğin ACI 318'e göre az bir değişiklik ile kullanılabilirliği belirlenmiştir. Grade 100 (690 MPa) ve Grade 120 (820 MPa) çelikleri için ise daha geniş çaplı bir çalışma yapılması gerektiği belirtilmiştir. [3]

### **Yöntem**

Deneysel olarak yürütülen bu çalışma kapsamında 3 adet kirişi temsil eden ve 1 adet kolonu temsil eden numune hazırlanarak eğilme testine tabi tutulmuştur. Numuneler 1, 2a, 2b ve 3 olarak adlandırılmışlardır. Numune 1 yalnızca geleneksel betonarme çeliği içermektedir. Diğer numunelerde hem çelik halat hem de geleneksel betonarme çeliği kullanılmıştır. 2a ve 2b numuneleri tipik numunelerdir. 1, 2a ve 2b numunelerine dört nokta monotonik eğilme testi, 3 numunesine ise üç nokta çevrimsel eğilme testi yapılmıştır. Bütün numuneler için orta nokta

kuvvet açıklık ortası görelî yerdeğiştirme değerleri okunmuştur. Normal kuvvetin etkisi araştırılmadığından, deney numunelerine eksenel kuvvet uygulanmamıştır. 3 numaralı numunenin çok az veya sınırlı seviyede normal kuvvete maruz kalan kolonları temsil ettiği dūřünülerek çalışmaya dahil edilmiştir. Dolayısıyla herhangi bir normal kuvvet uygulanmadan çevrimsel yūklemeye tabi tutulmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarına gōre ilerleyen çalışmalarda farklı durumlar için de çalışma yapılabilereği dūřün÷lmüştür. Deneyler sūresince numunelerde oluşan çatlaklar ve çatlak ilerlemeleri gōrsel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmayı desteklemek amacıyla analitik bir çalışma da yapılmıştır. Deney dūzenekleri sonlu elemanlar yōntemiyle matematiksel olarak modellenmiştir. Deney sonuçları ile analitik hesap sonuçları karşılaştırılmıştır. Analitik modelleme için Vector5 isimli program kullanılmıştır.

## Malzeme Karakteristik Özellikleri

### Beton

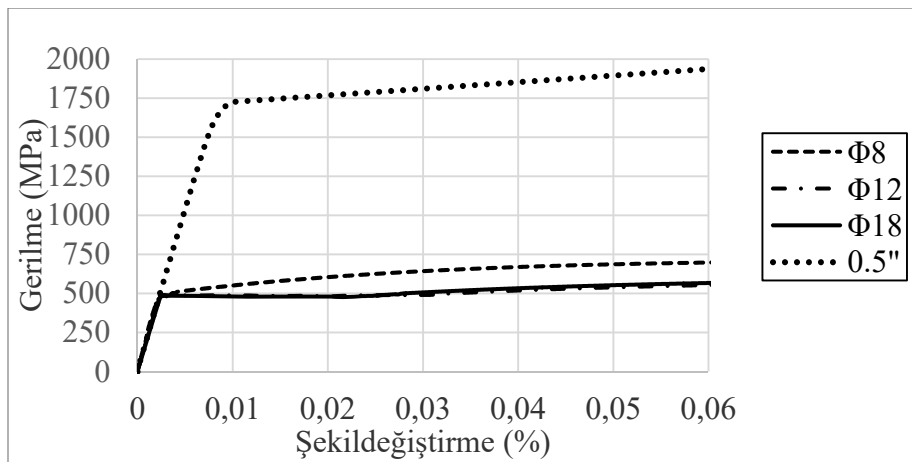
Betonun basınc dayanımlı 150 mm ebatlarındaki 2 adet betonarme kūp numune kullanılarak 32.2 MPa ve 30.6 MPa olarak belirlenmiştir. Basınc dayanımlı değerleri kūp numune dayanımından silindir basınc dayanımlına çevrilmiştir. Analitik öz÷mlenmede silindirik basınc dayanımlı kullanılmıştır.

### Geleneksel Betonarme eliği

Deneyde kullanılan çekme donatısının akma dayanım değeri 480 MPa olarak bulunmuştur. Deneyde kullanılan çaplar sırasıyla boyuna donatılar için 18 ve 12, kesme donatıları için de 8 mm'dir. 3 çap için de 3'er adet olmak ũzere toplamda 9 adet donatı için çekme testi yapılarak gerilme Şekildeğiştirme grafikleri elde edilmiştir. Şekildeğiştirme değerleri %6'ya kadar verilmiştir.

### elik Halat

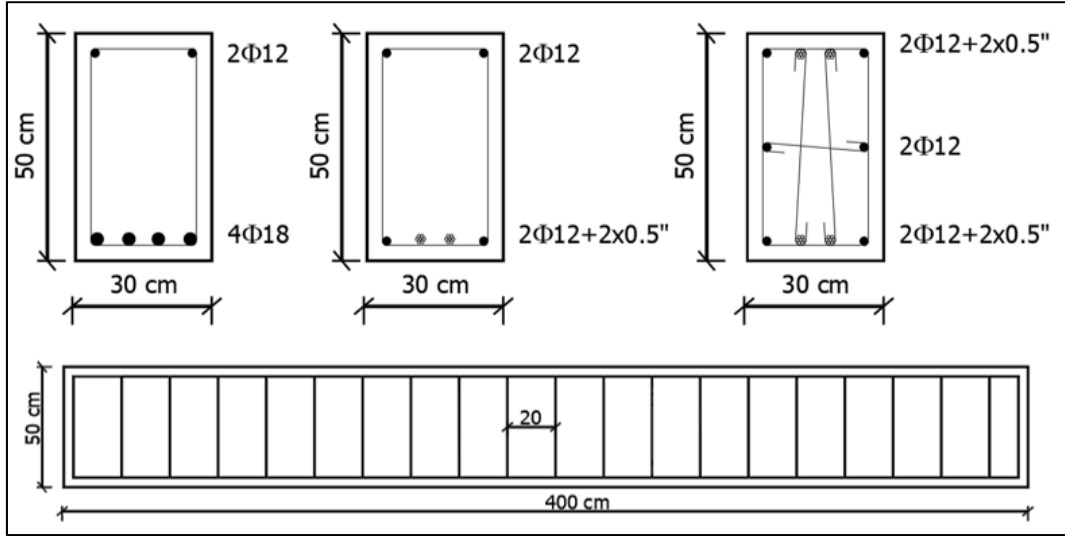
Bu çalışmada elik halat olarak 0.5 in çapında toronlar kullanılmıştır. elik halatlara çekme testi uygulanarak karakteristik Özellikleri belirlenmiştir. Bu deney sonuçlarına gōre elik halat elastisite mod÷l÷ 207000 MPa, akma dayanımı 1730 MPa ve çekme dayanımı 1960 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 1 - elik halat ve S420 betonarme çeliği gerilme Şekildeğiştirme değerleri.

## Numune Özellikleri

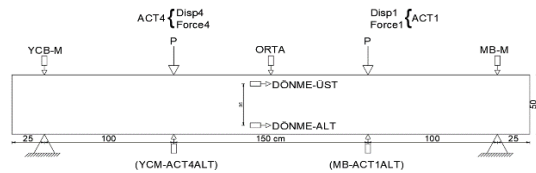
Deney numuneleri 1, 2a, 2b ve 3 olarak isimlendirilmişlerdir. Bütün numunelerin genişlikleri 30 cm, yükseklikleri 50 cm, boyları ise 4 m olarak teşkil edilmişlerdir Kesme donatısı olarak bütün kirişlerde 8 mm çapında ve 20 cm aralıklarla etriye konmuştur. 1 numaralı numune yalnızca betonarme çeliği ile donatılmıştır. Altta 18 mm çapında 4 adet donatı üstte 12 mm çapında 2 adet montaj donatısı kullanılmıştır. 2a ve 2b numuneleri tipik olup S420 çeliği ve çelik halat ile beraber donatılmışlardır. Deney sonuçlarının doğruluğunu ve aynı tip numuneler için benzer sonuçların çıktığını teyit etmek için 2a ve 2b numuneleri tip numune olarak düşünülmüştür. Altta 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde, 2 çelik halat ortada ve üstte 12 mm çapında 2 adet S420 donatısı kullanılmıştır. 3 numaralı numunede altta 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde, 2 adet çelik halat ortada ve üstte 12 mm çapında 2 adet S420 çeliği köşelerde ve 2 adet çelik halat ortada kullanılmıştır. Gövde bölgesinde 2 adet 12 mm çapında S420 donatısı koyulmuştur. Çelik halatlar, kiriş uçlarına yerleştirilen 100x150x5mm boyutlarındaki plakalara 3mm kaynak ile ankre edilmiştir.



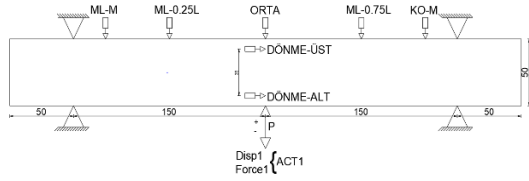
Şekil 2 - Sırasıyla 1, 2a (2b) ve 3 numuneleri en kesitleri ve boykesiti

## Deney Düzenekleri

1, 2a ve 2b numaralı numuneler monotonik, 3 numaralı numune ise çevrimsel yükleme ile yüklenmiştir. Dolayısıyla 2 deney düzeneği kullanılmıştır. 1. deney düzeneğinde mesnet noktalarında, yükleme noktalarında ve orta noktada düşey yerdeğiştirmeler okunmuştur. Kiriş kesitinin orta bölgesinde altta uzama ve üstte kılma değerleri okunmuştur. 2. Deney düzeneğinde mesnetlerde, mesnetlerden 75 cm uzakta ve orta noktalarda düşey yerdeğiştirmeler okunmuştur. Kiriş kesitinin orta bölgesinde altta uzama ve üstte kılma değerleri okunmuştur. Uzama ve kılma betonun dışına yerleştirilen aletlerle ölçülmüştür. Donatıların üzerine herhangi bir şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmemiştir.



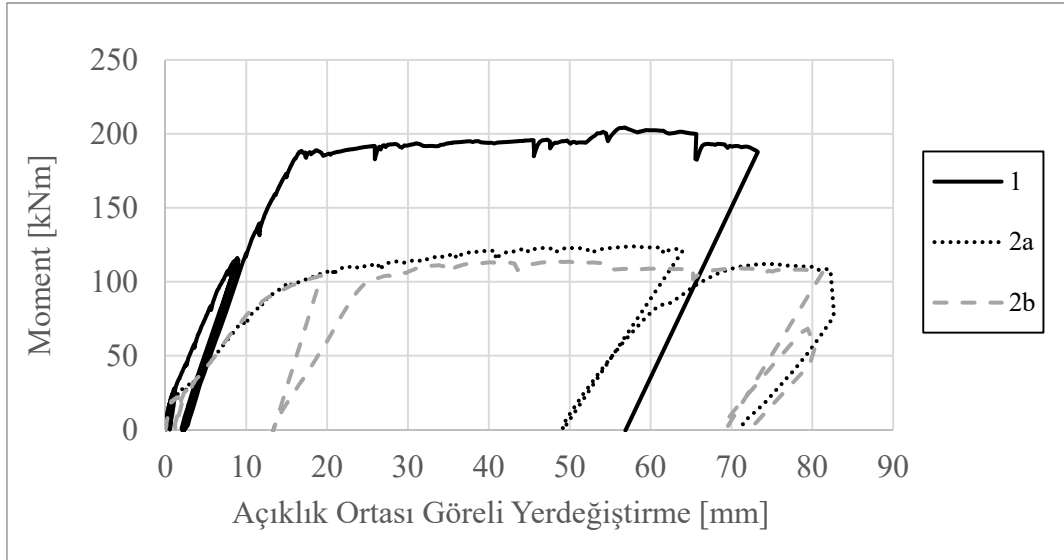
Şekil 3 - Numune 1, 2a ve 2b test düzeneği



Şekil 4 - Numune 3 test düzeneği

### Deney Sonuçları

Sadece geleneksel donatı içeren 1 numaralı numunede eğilmeden dolayı ilk çatlakın oluştuğu moment 18 kNm olarak okunmuştur. İlk kayma çatlakları ise 85.5 kN yükte meydana gelmiştir. 190.2 kNm momentinde betonda basınç ezilmeleri oluşmuştur. Bu numune betonarmeden beklenen sünek davranışı, çatlak oluşumlarını göstermiştir. 2a numunesinin ilk eğilme çatlakları 22 kN yükte, ilk kayma çatlakları 72.4 kN yükte oluşmuştur. 2b numunesinin ilk eğilme çatlakları 17 kN yükte oluşmuştur. İki numunenin de eğilme çatlakları açıklık ortasına yakın bölgelerde oluşmuştur. 2 numune için de moment açıklık ortası yerdeğiştirme değerleri birbirine yakındır.

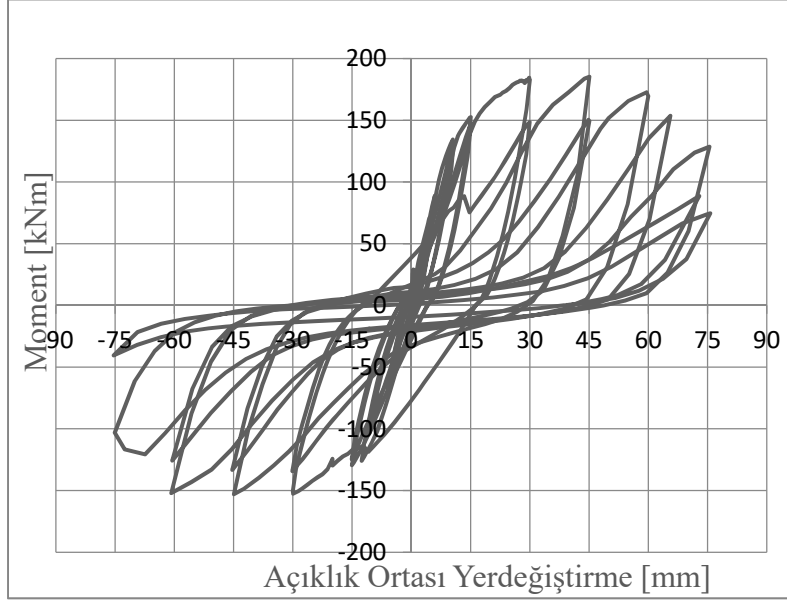


Şekil 5 - Numune 1, 2a ve 2b açıklık ortası moment yerdeğiştirme.

Çelik halatlı 2a ve 2b numuneleri çekme donatısı miktarları numune 1 ile eşdeğer çekme kuvvetine sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre numune 1 yaklaşık 200 kNm moment kapasitesine sahipken, yaklaşık aynı moment kapasitesine ulaşması gereken 2a ve 2b numuneleri yaklaşık 120 kNm moment kapasitesine ulaşmıştır. Deneyler sırasında çelik halatların betondan sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Sıyrılmadan dolayı yaşanan aderans kayıpları çelik halatların beton ile tam çalışmasını engellemiştir. Dolayısıyla çelik halatların beklenen şekilde değiştirmeleri yapamadığı ve akma dayanımına ulaşamadığı görülmüştür. Bu da kirişlerin beklenenden yüzde 40 daha az moment kapasitesine ulaşmalarına neden olmuştur. İlk eğilme çatlakları bakımından geleneksel numune ve çelik halatlı numuneler yakın değerleri almıştır. Yüklemelerin devamında çatlaklar incelendiğinde geleneksel numunedeki çatlakların çelik halatlı numunelerdekilere göre daha sık ve genişliklerinin daha az olduğu görülmüştür. Geleneksel numunede eğilme çatlakları orta bölgede yoğunlaşmış ve sıklaşmıştır. Çelik halatlı numunelerde çatlaklar daha hızlı ilerleme kaydetmiştir. Çelik halatlar geleneksel betonarme çelikleriyle beraber kullanıldıklarında, çelik

halatlardaki aderans kayıpları kesitin istenildiği gibi moment kapasitesine ve çatlak düzenine ulaşmasını engellemektedir.

3 numaralı numune çevrimsel yüklemeye tabi tutularak davranışı gözlenmiştir. Çatlak oluşumları, hasar ilerlemeleri takip edilmiştir. Bu kesitin moment kapasitesinin 220 kNm mertebesinde olması beklenirken deneyde ulaştığı en yüksek moment değeri 175 kNm mertebesinde dir. Beklenen ile görülen arasında yaklaşık %20 fark görülmüştür. Bu numunede oluşan çatlaklar aralıklı ve ilerlemelerinin hızlı olduğu görülmüştür. Çelik halatların beton ile aderansı yeterli olmadığından, çelik halatlar akma kapasitelerine ulaşamamıştır. Bu durumda beklenen moment kapasitesine ulaşamamıştır.



**Şekil 6** - Numune 3 açıklık ortası moment yerdeğiştirme.

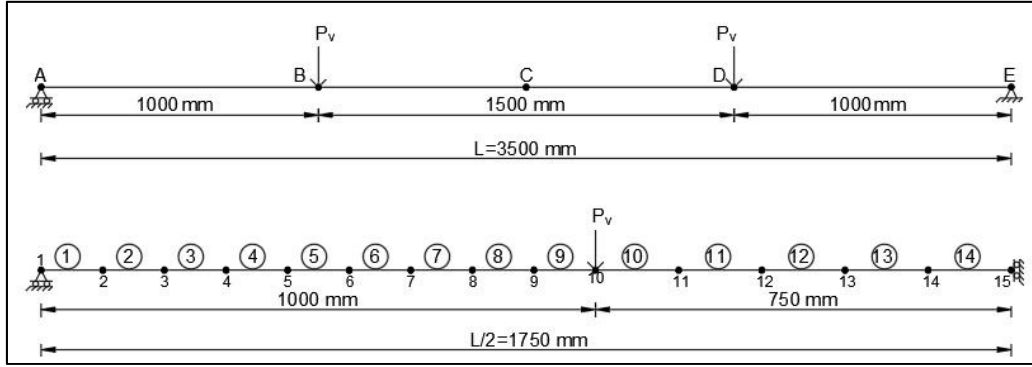
## ANALİTİK ÇALIŞMA

### Vector5 ile Sonlu Eleman Analizi

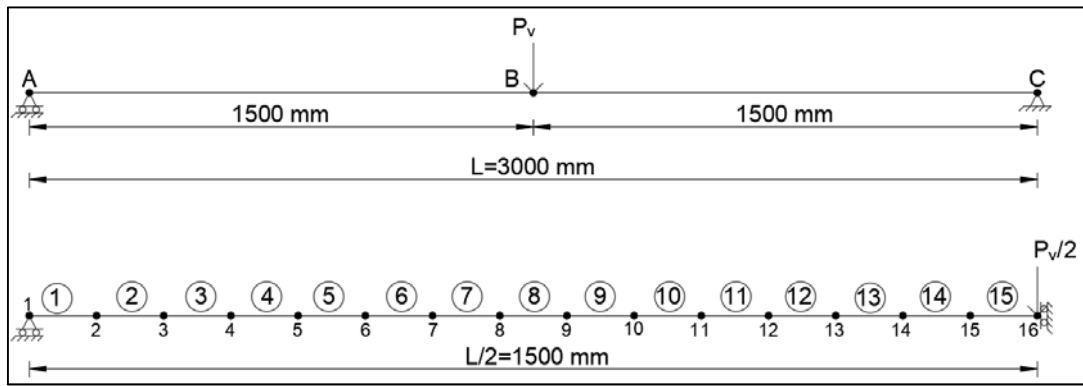
Deneysel çalışmada elde edilen sonuçları doğrulamak üzere Vector5 programı kullanılarak analitik çözümleme yapılmıştır. Vector5 rijitlik yöntemi kullanarak önce çerçeve çözen sonra da her eleman için eleman uzunluğu boyunca yayılı doğrusal olmayan fiber model yaklaşımıyla kesit analizi yaparak her kesitte, dengelenmemiş kuvvetleri dengelemeye çalışarak yatay kuvvet dengesini bulur. Sonuç olarak her eleman için iç kuvvetleri, her elemandaki fiberler için şekildeğiştirme, gerilme, kuvvet gibi değerleri vermektedir. Sistem simetrik olduğundan kirişin yarısı modellenmiştir. Sol mesnet yatayda kayıcı, sağ mesnet ise dikeyde kayıcı ankastre mesnet olarak kabul edilmiştir. 15 düğüm noktası tanımlanarak 14 eleman oluşturulmuştur. Yüke kadar olan 1 metrelik parça 111.1 milimetrelik 9 elemana, kuvvetten açıklık ortasına kadar olan 750 milimetrelik parça 150 milimetrelik 5 parçaya bölünmüştür. 10. nokta kuvvetin etkidiği ve itme analizi için düşey yerdeğiştirmenin verildiği noktadır.

Numune 3 için iki mesnet arası 3000 mm'dir. Toplamda 16 düğüm noktası ve 15 eleman oluşturulmuştur. Her eleman 100 mm uzunluğunda olup, 15 eleman 1500 mm kiriş uzunluğu tanımlanmıştır.





Şekil 7 - Numune 1, 2a ve 2b sonlu eleman modeli



Şekil 8 - Numune 3 sonlu eleman modeli

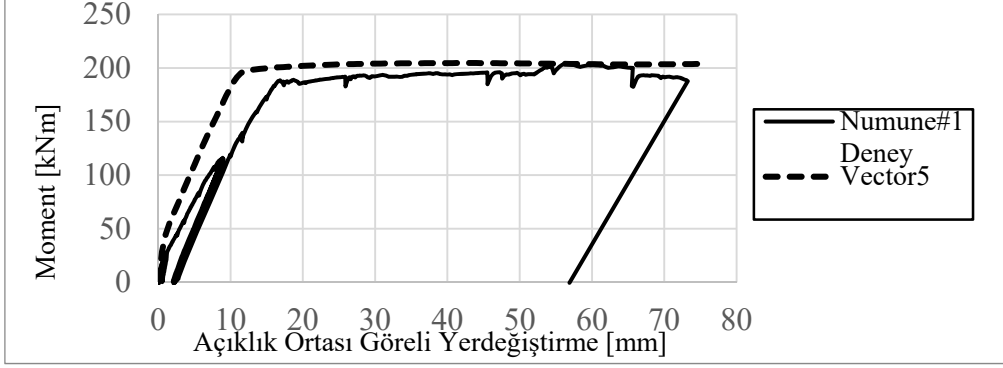
Deneyde kullanılan donatılar için çekme testi sonuçları analitik modelde malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Deneyde kullanılan beton için gerilme şekildeğiştirme deneyi yapılmadı, yalnızca 2 adet küp numuneye basınç testi yapıldı. Bu iki numunenin 22 günlük ortalama kübik basınç dayanımı 31.4 MPa olarak hesaplandı ve silindirik basınç dayanımına çevrildi. Silindirik basınç dayanımı 24 MPa olarak kabul edildi. Vector5 programında programın kabul ettiği sargılı ve sargısız beton modelleri kullanıldı. Çelik halatın gerilme şekildeğiştirme özellikleri, çekme deneylerinin sonuçlarından elde edilmiştir. Öngerme halatları için TS 3233'te kabul edilen elastisite modülü 190000 olmasına rağmen çekme deneyleri sonucu çıkan değer olan 207000 MPa elastisite modülü olarak kabul edilmiştir. Akma dayanımı 1730 MPa akma şekildeğiştirmesi 0.0084 ve çekme dayanımı 1960 MPa ve şekildeğiştirmesi 0.065 olarak alınmıştır.

### Deney ve Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

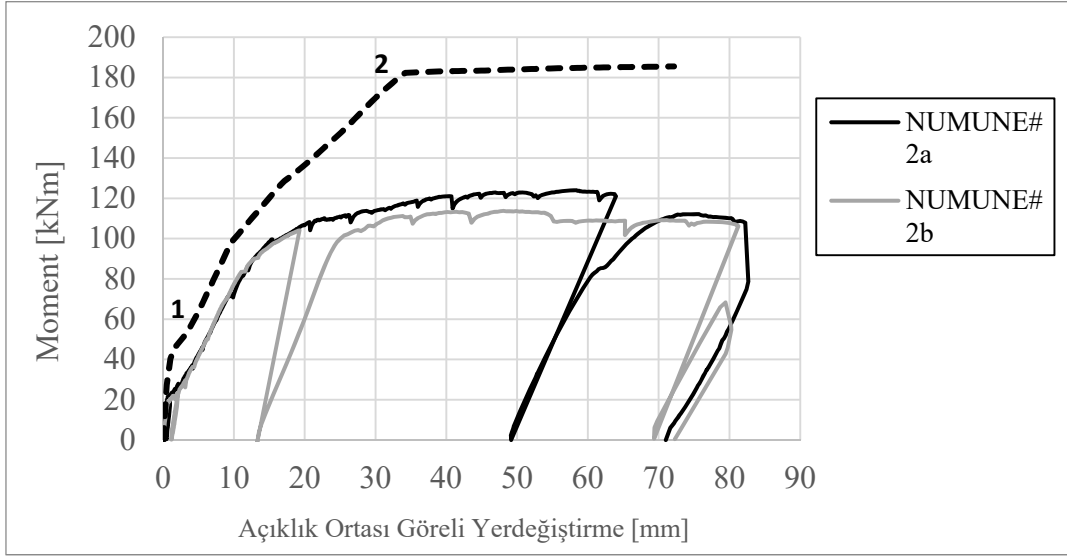
Numune 1 için Vector5 programı kullanılarak yapılan çözümün deney sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir.

İlk numunede deney sonuçları analitik hesap ile yakın sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla beton ve geleneksel betonarme çeliği için malzeme modellerinin doğrulandığı kabul edilmiştir. Çelik halat için de malzeme modeli eklenerek itme analizi gerçekleştirildi. Hem çelik halat hem de geleneksel betonarme çeliği içeren 2a ve 2b numuneleri için analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar belli bir noktaya kadar yakınlık göstermektedir. Bir noktadan sonra sonuçlar birbirinden ayrılmaya başlamıştır. Şekil 9'da gösterilen bu 1 numaralı nokta geleneksel betonarme çeliğinin akmaya

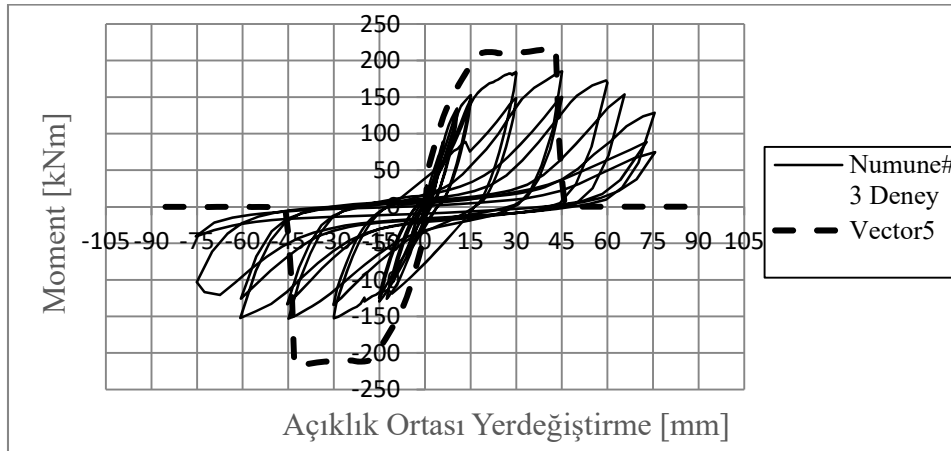
başladığı andır. Bu noktadan sonra analitik hesapta kesitin taşıyabildiği momentin arttığı görülmüştür. 2 numaralı noktadan itibaren kesitin taşıdığı momentin yataylaştığı noktadır. Bu nokta ise çelik halatın akmaya başladığı andır. Deney sonuçlarında çelik halatların akma kapasitelerine ulaşamadığı görülmektedir.



Şekil 9 - Numune 1 Deney ve Vector5 sonuçları



Şekil 10 - Numune 2a ve 2b analitik ve deney sonuçları



Şekil 11 - Numune 3 analitik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Çelik halatın kullanıldığı betonarme elemanlarda tersinir yükler altındaki davranışın incelenmesi amacıyla, 3 numaralı numune çevrimsel yüklemeyle test edilmiştir. Çevrimsel yüklenen elemana herhangi bir normal kuvvet etkililmemiştir. Çevrimsel yükleme analizinden önce monotonik yükleme analizi yapılarak deney sonuçlarında elde edilen çevrimsel yükleme moment açıklık ortası yerdeğiştirme grafiğinde iskelet eğrisi yakalanmaya çalışılmıştır. Şekil 10'da numune 3 için deney ve analiz sonuçları verilmiştir.

### Çelik Halat Malzeme Dayanımının Değiştirilmesi ile Vector5 Analizi

Çelik halatın ve geleneksel betonarme çeliğinin beraber kullanılması durumunda, malzeme modelleri aynen kullanılarak oluşturulan analitik modeller deney sonuçlarını yakalayamamaktadır. Bunun sebebi aderans kayıplarından dolayı çelik halatın akma değerlerine ulaşamamasıdır. Dolayısıyla ortalama bir gerilme hesaplanarak, bu bulunan değer çelik halat için akma değeri olarak kullanılacaktır. Çekme bölgesindeki betonarme çeliği ve çelik halatlar düşünülürse, üzerlerine gelecek toplam yük altında bir  $\Delta$  yerdeğiştirmesi yaptıkları kabul edilip, toplam uzunluğa da  $L$  denilirse, şekildeğiştirme denklem 1'deki bağıntı yazılabilir.

$$\frac{\Delta}{L} = \varepsilon_{ort} = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (1)$$

Bu hesaplanan ortalama şekildeğiştirme betonarme kesitlerde düzlem kesit düzlem kalır kabulü yapıldığından, tarafsız eksene dik uzaklığı aynı olan iki eleman için aynı olmalıdır. Dolayısıyla denklem 1'de gösterilen ifadedeki  $\varepsilon_1$  olarak ifade edilen betonarme çeliği şekildeğiştirmesi,  $\varepsilon_2$  olarak ifade edilen çelik halat şekildeğiştirmesi ile aynı ve  $\varepsilon_{ort}$  değerine eşit olmalıdır.  $F_1$  geleneksel betonarme çeliğinde oluşan kuvvet,  $F_2$  ise çelik halatta oluşan kuvvettir. Çelik halatın akma anında çekme bölgesinde bir kuvvet eşitliği yazılabilir. Bu kuvvet denkliği kullanılarak ortalama gerilme bulunabilir. Geleneksel betonarme çeliğinin taşıdığı kuvvet denklem 2 ile hesaplanabilir.

$$F_1 = A_{s1} \times \sigma_1 \quad (2)$$

Çelik halatın taşıdığı kuvvet denklem 3 ile hesaplanabilir.

$$F_2 = A_{s2} \times \sigma_2 \quad (3)$$

Çekme bölgesindeki toplam kuvvet ise  $F_1$  ve  $F_2$  kuvvetlerinin toplamına eşit kabul edilebilir.

$$F = F_1 + F_2 \quad (4)$$

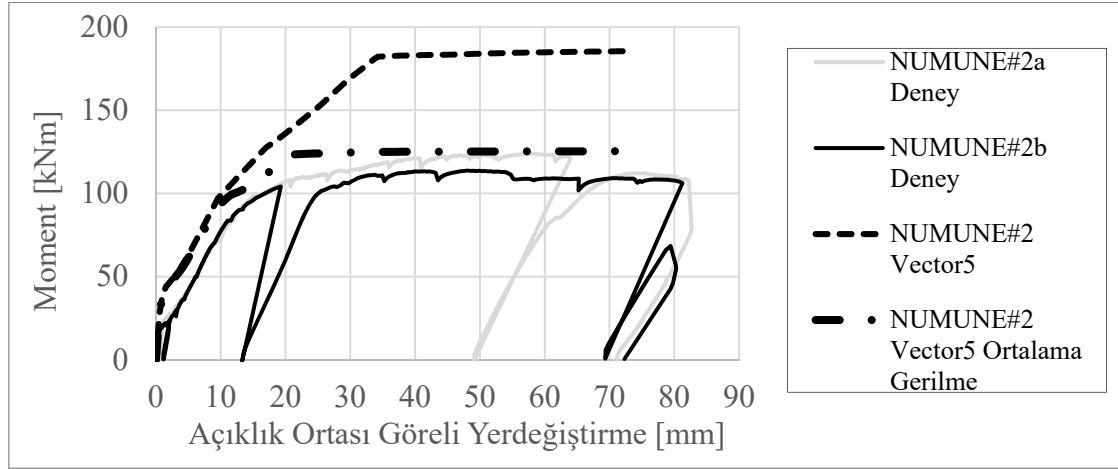
Denklem 5 kullanılıp geleneksel betonarme çeliği ve çelik halatın taşıdığı toplam kuvvet, bu kuvveti taşıyan toplam çekme donatısı enkesit alanına bölünerek ortalama bir gerilme hesaplanabilir.  $\sigma_1$  geleneksel betonarme çeliği için,  $\sigma_2$  çelik halat için sırasıyla gerilme durumlarıdır.  $A_{s1}$  ve  $A_{s2}$  de sırasıyla geleneksel betonarme çeliği ve çelik halat için çekme bölgesindeki toplam enkesit alanlarıdır.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_1 \times A_{s1} + \sigma_2 \times A_{s2}}{(A_{s1} + A_{s2})} \quad (5)$$

Çelik halatın akma anında gerilmesi 1730 MPa, geleneksel betonarme çeliğinin gerilmesi 480 MPa, çelik halatın çekme bölgesindeki toplam enkesit alanı 189.2 mm<sup>2</sup> ve geleneksel betonarme çeliğinin çekme bölgesindeki toplam enkesit alanı 226 mm<sup>2</sup> olarak alınıp denklem 5'te yerine konursa ortalama gerilme 1050 MPa olarak bulunabilir.

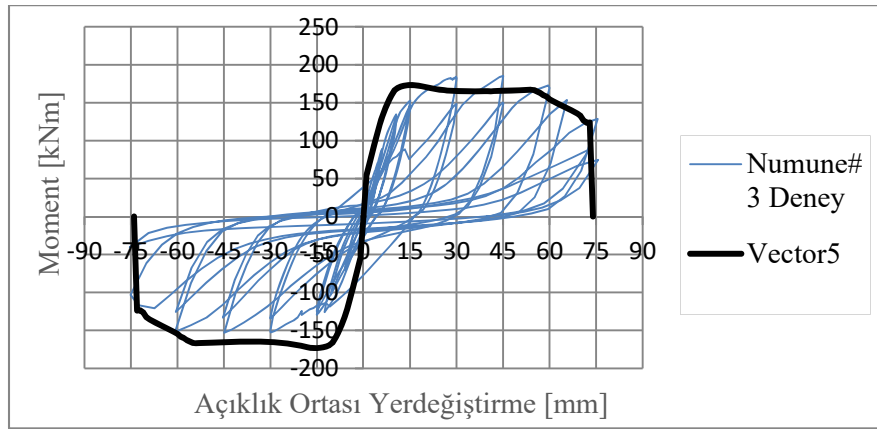
$$\sigma_{ort} = \frac{480 \times 226 + 1730 \times 189.2}{(226 + 189.2)} = 1050 \text{ MPa} \quad (6)$$

Bu değer çelik halatın akma dayanımı olarak kabul edilmiştir. Şekil 11'de 2a ve 2b numuneleri için deney sonuçları, gerçek malzeme modellerinin kullanıldığı analitik çözüm ve hesaplanan ortalama gerilmenin kullanıldığı analitik çözüm yer almaktadır.



Şekil 12 - Numune 2 deney ve analitik sonuçlar

Ortalama gerilme ile hesaplanan moment açıklık ortası yerdeğiştirme eğrisinin deney sonuçlarına yaklaştığı belirlenmiştir. Bu değerler çelik halatın akma dayanımına ulaşmadığını belirli bir gerilme değerinde yataylaştığını göstermiştir. Bu değer ortalama şekildeğiştirmeler kullanılarak hesaplanan ortalama gerilme değeridir. Numune 3 için de numune 2 için yapılan kabuller yapılarak Vector5 programında yine çelik halat için ortalama gerilme değeri girilerek analiz yapılmıştır. Bu grafiklere bakıldığında ortalama gerilme değerleri kullanılarak hesaplanan değerler gerçek sonuçlara yakın değerler almaktadır.



Şekil 13 - Numune 3 deney ve analiz (ortalama gerilme) sonuçları

## SONUÇ

Bu çalışmada betonarme kirişlerde ve sınırlı düzeyde normal kuvvete maruz kalan betonarme kolonlarda eğilme donatısı olarak geleneksel betonarme çeliği S420 ile beraber yüksek mukavemetli çelik halatların kullanılması araştırılmıştır. Bu amaçla kirişi temsil eden 3, kolonu temsil eden 1 numune deneye tabi tutulmuştur. Çelik halatların herhangi bir kuvvet verilmeden betonarme kirişlerde ve eksenel kuvvetin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu betonarme kolonlarda kullanılması deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çelik halatlı numunelerdeki donatı miktarı, yalnızca geleneksel betonarme çeliği içeren numune ile eşdeğer çekme kuvvetini verecek şekilde belirlenmiştir. Bu durumda donatılar akma kapasitelerine ulaşırlarsa yaklaşık olarak aynı moment kapasitesine sahip olacaklardır. Deney sonucunda geleneksel ve çelik halatlı numunelerin aynı moment kapasitelerine ulaşamadıkları görülmüştür. Geleneksel numune yaklaşık 200 kNm, çelik halatlı numuneler yaklaşık 120 kNm momente erişmişlerdir. Deneylerde çelik halatların betondan sıyrılması ve aderans kayıpları yaşaması sebebiyle istenen şekilde değiştirmelere ve gerilmelere ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenlerden dolayı çelik halatlı numunelerin moment kapasitelerine ulaşamadığı ve kontrol numunesine göre %40 daha az kapasiteye ulaştığı görülmüştür.

Kirişlerde oluşan eğilme çatlakları da deney süresince gözlenmiştir. Çelik halatlı numunelerde çatlaklar daha hızlı yayılmıştır. Bu kirişlerdeki eğilme çatlakları daha az sayıda, daha fazla genişlikte ve daha seyrek olarak görülmüştür.

Numune 1 deney sonuçları ile örtüşecek şekilde Vector5 programı ile analizler yapılarak malzeme modelleri doğrulanmıştır. Numune 1 ve numune 2 için deney düzeneği dahil diğer her değişken aynı olduğu için yalnızca numune 2 analitik modelinde kesite çelik halatlar tanımlanarak Vector5 programında analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçların deney sonuçlarına yakın olmadığı görülmüştür. Analitik olarak düzlem kesit düzlem kalır kabulü yapıldığından çelik halatın tam olarak kuvvet taşıdığı kabul edilmektedir. Gerçekte ise çelik halatın akma değerine ulaşamadığı belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak ortalama gerilme hesaplanarak, analitik modelde çelik halatın akma ve çekme dayanım değerleri ortalama gerilme değerine göre yeniden girilmiştir. Çıkan sonuçların deney sonuçları ile yakın olduğu görülmüştür.

Son numune için, deney düzeneği değiştirildiği için yeniden düğüm noktaları tanımlanarak eleman ağı oluşturulmuştur. Donatılar da kesit içine tanımlanarak gerçek malzeme değerleriyle analiz yapılarak deney sonucu elde edilen çevrimsel yüklemde elde edilen yük yerdeğiştirme ve moment yerdeğiştirme değerleri için iskelet eğrileri çıkarılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analitik sonuçlar ile deney sonuçlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Numune 3 için çelik halatın akma ve çekme dayanımları ortalama gerilme seviyelerine düzeltilip tekrar analiz yapılmıştır. Bu durumda iskelet eğrisinin deney sonuçlarını yakaladığı belirlenmiştir.

Bu deneysel çalışmada donatılara şekil değiştirme ölçerler yapıştırılamamıştır. Dönme ve eğrilik değerlerini hesaplamak amacıyla kirişlerin orta noktalarında beton dış yüzeylerine yatay yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Deney sonuçlarının hem kendi içinde hem de analitik sonuçlarla karşılaştırılması moment açıklık ortası görelî yerdeğiştirme üzerinden yapılmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda betonarme çeliğine ve çelik halata şekil değiştirme ölçerler yapıştırılması, daha farklı donatı düzenlemeleriyle daha fazla sayıda betonarme numunesi hazırlanması daha detaylı incelemeler yapılmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma hakkında her aşamadaki detaylı bilgiler Yazar (2019)'da bulunabilir. [12]

### **Kaynaklar**

1. Arsava, T., (2011). "Investigating Use Of Untensioned Prestressing Strands In Reinforced Concrete Flexural Members", Graduate Thesis, Atılım University, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Istanbul.
2. B. Giduquio, Min-Yuan Cheng, and Leonardus S. B. Wibowo (2015). High-strength flexural reinforcement in reinforced concrete flexural members under monotonic loading, ACI Structural Journal, V. 112, No. 6, November-December.
3. Kelly, D.J. & Lepage, Andres & Mar, David & Restrepo, Jose & Sanders, J.C. & Taylor, A.W. (2014). Use of high-strength reinforcement for earthquake-resistant concrete structures. NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering. 10.4231/D3Z31NP6Z.
4. Chu, P. and Guner, S. (2016), "User Bulletin 5: Determination of Material Properties," Online Publication, 11 pp.
5. Guner, S. and Vecchio, F. J. (2008), "User's Manual of VecTor5," Online Publication, 88 pp.
6. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., 1988, Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of the Structural Division. Vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826.
7. Viana, H. F. and Guner, S. (2014), "User Bulletin 1: Beam Modeling with VecTor5," Online Publication, 20 pp.
8. TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
9. TS500, 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
10. TS708, 2016, Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
11. Yazar, Muzaffer. *Betonarme Kirişlerde Çelik Halat Kullanımının Yapısal Davranışa Olan Etkisinin İrdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019.

## Az Katlı Binalar İçin Çapraz Yay Gruplarından Oluşan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi

Varol KARAYEL<sup>1</sup>, Ercan YÜKSEL<sup>2</sup>, Tansu GÖKÇE<sup>3</sup>, Fatih ŞAHİN<sup>4</sup>

### ÖZET

Az katlı bina türü taşıyıcı sistemler için yeni bir sismik yalıtım sistemi geliştirilmiştir. Tümüyle yerli malzeme kullanılarak oluşturulan sistemde; sismik yalıtım katı, iki ucu mafsalı çelik kolonlar ile çapraz yay kutularından oluşmaktadır. Önerilen sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin belirlenmesi için sarsma masası deneyleri ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu, ¼ ölçekli, üç katlı çelik çerçeve, sismik yalıtım katlı ve ankastre durumlar için gerçek deprem kayıtları etkisinde tek eksenli sarsma masası üzerinde denenmiştir. Deneylerde, sismik yalıtım katlı numunede masa üzerindeki ivmelerin katlara geçişte önemli ölçüde küçüldüğü tespit edilmiştir. Sismik yalıtım uygulanmış numunede kararsızlık ve deprem sonrasında merkeze dönme problemi yaşanmamıştır. Sismik yalıtım uygulanmış numunede kullanılan çelik kolonların uçlarındaki mafsalarda sürtünmeden dolayı oluşan eşdeğer sönümün kritik sönümün yaklaşık %20'si düzeyinde olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem güvenliği, sarsma masası deneyi, sismik yalıtım, yay kutusu, zaman tanım alanında analiz.

### ABSTRACT

#### **A New Seismic Isolation System Made of Spring Tube Braces for Low-rise Buildings**

For low-rise buildings, a new seismic isolation system based on spring tube braces was studied. An isolation story consisting of pin-ended steel columns and spring tube braces is arranged at the foundation level and/or any intermediate story of the building. A series of experimental and analytical studies were carried out to evaluate the capability of the proposed seismic isolation system. Three-story ¼ scale 3D steel frames, with the proposed seismic isolation story and fixed base model, were tested on the uni-axial shake table. The transmitted accelerations from ground to floor levels were largely diminished by means of the isolation system, contrary to the fixed-based specimen. Results showed no stability or self-centering problems for the proposed isolation

---

1 İF Mühendislik ve Müşavirlik Ltd., İstanbul - ifmuh@ifmuhendislik.com.tr

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - yukselerc@itu.edu.tr

3 University of Bristol, Dept. of Civil Engineering, Bristol, UK - tansu.gokce@bristol.ac.uk

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - sahinmehm@itu.edu.tr

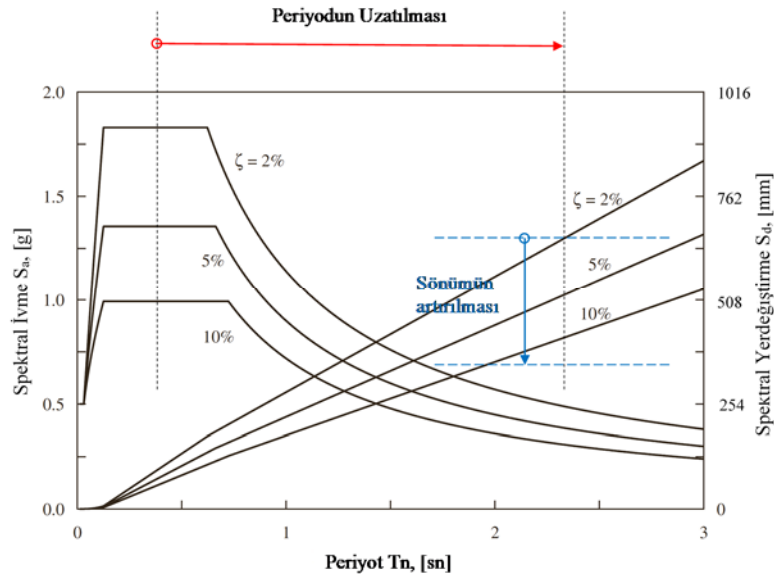
system. The equivalent damping arising from the seismic isolation story was roughly 20%. This relatively high damping property can be attributed to the friction on the pinned connections of the beam to the columns of the isolation story.

**Keywords:** Seismic safety, shaking table test, base isolation, spring tube, time history analysis.

## 1. GİRİŞ

Binaların kuvvetli yer hareketleri sırasında yıkıcı hasarlardan korunabilmesinin, doğal titreşim periyotlarının uzatılması ve ilave sönüm sağlanması ile mümkün olabileceği bilinmektedir, [1], [2], (Şekil 1). Pasif sismik yalıtım yöntemlerinin esasları da bu prensiplere dayanmaktadır, [3], [4]. Bu çalışmada önerilen yeni sismik yalıtım sisteminin çıkış noktası, deprem mühendisliğinde istenmeyen bir göçme biçimi olan *yumuşak kat hasarlı* binalar üzerinde yapılan gözlemler olmuştur.

Bu gözlemler, çoğu kez hasarların yumuşak katta toplandığını, üst katların ise az hasarlı ya da tümüyle hasarsız olduğunu göstermiştir. Buradan çıkarılabilecek iki önemli sonuç; *i.* Binaya giren deprem enerjisinin çok önemli bir bölümünün hasarlı yumuşak kat tarafından tüketildiği, *ii.* Yumuşak katın üst katlara nazaran görece düşük yatay rijitliği nedeniyle üst katlara geçen ivmelerde önemli azalmalar olduğudur. Tipik bir yumuşak kat hasarı, Şekil 2 'de yer alan fotoğrafta görülmektedir. Geçmiş bazı çalışmalarda binanın temel titreşim periyodunun uzatılmasının yollarından birinin yumuşak birinci kat kullanımı olduğu belirtilmektedir [5]. Esnek ilk kat kullanımı çok uzun yıllar önce yapı mühendisleri tarafından da önerilmiştir [6], [7], [8], [9]. Yapı mühendisleri çalışmalarında, ilk kat kolonlarına ait yatay rijitliklerin üst kat kolonlarına göre daha küçük tasarlanmaları halinde; deprem anında deformasyonların bu zayıf ilk katta toplanacağını ve üst katlara giden ivmelerin önemli ölçüde azalacağını belirtmişlerdir. Ancak bu durumda ilk kat yatay yerdeğiştirmeleri aşırı büyüyeceğinden, eksenel yüklerden dolayı oluşacak ikinci mertebe momentlerinin ilk kat kolonlarında çok önemli hasarlara sebep olacağı ve binanın göçmeye kadar gidebileceğini de vurgulamışlardır.



Şekil 1 - Elastik tasarım spektrumu (A. Chopra).





Şekil 2 - Çok üniteli ahşap bir yapıda yumuşak kat hasarı (UC, Berkeley).

Fintel ve Khan [10], *yumuşak ilk kat yöntemi* olarak isimlendirdikleri değiştirilmiş önerilerinde; deprem sırasında ilk kat kolonlarının öncelikle akarak enerjinin çok önemli bölümünün yutulacağını ve yerdeğiştirmelerin de kontrol edileceğini belirtmişlerdir. Ancak Chopra ve diğ. [11], bu yöntem ile daha büyük sönüm elde edilmesi durumunda yerdeğiştirmelerin kontrol altına alınmasının güçleşeceği ve akmaya giden kolonları burkulmaya götüreceği yüklerin önemli ölçüde azalacağı; dolayısıyla, kolonların kararsızlığı ve göçmenin kaçınılmaz olacağını ifade etmiştir. Bu sebeple binadaki ivmeleri azaltacak *yumuşak ilk kat yöntemi*, mimarların estetik gereksinimleri için ihtiyaç duymalarına kadar geçecek çok uzun sürede göz önünde tutulmamıştır, [12]. Todorovska, eğik kolonlar kullanılarak üretilecek yumuşak bir katın fiziksel olarak sarkaç gibi davranacağından, sismik yalıtım sistemi olarak kullanılabilceğini belirtmiştir, [13]. Çalışmada uygun eğim açıları ve etkinlikleri yer hareketinin frekans içeriğine bağlı olarak araştırılmıştır. Comartin, yumuşak katlı binalarda eksenel yükün ikinci mertbe etkilerini ortadan kaldırmak üzere sismik güçlendirmeye yönelik ilave kolonlar önermiştir, [14]. Bu öneri aynı zamanda, ilave düşey taşıyıcı elemanlar kullanılarak ikinci mertbe etkilerinin engellenmesi durumunda, yumuşak katın sismik yalıtım katı olarak kullanılabilceğinin de bir ispatı olmaktadır.

Helisel yayların titreşimleri azaltmak üzere kullanımları yaygındır. Endüstriyel binaların içindeki ağır makine ve ekipmanların mesnetlerindeki titreşimlerin binanın diğer taraflarına geçişini engellemek üzere de helisel yaylar kullanılmaktadır. Standart bir yalıtım sistemi helisel yaylar ile kurşun veya viskoz sönümleyicilerden oluşmaktadır. Bu şekilde oluşturulacak bir sistem binaları sismik etkilerden korumak için kullanılabilir, [15]. Diğer taraftan bu tip uygulamalarda, yayların düşey rijitliği, daha çok düşey yer hareketleri için zayıf kaldığından, bina temelinde önemli miktarlarda kalkma oluşmakta, bunun olumsuz etkisi olarak da binanın uç bölgelerinde çok yüksek düşey ivmelenmeler ortaya çıkmaktadır, [16].

Günümüzdeki mevcut sismik yalıtım sistemleri öncelikle iki ana grupta toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla; kauçuk veya kurşun çekirdekli kauçuk gibi elastomerik mesnetler ve sürtünmeli kayıcı mesnetlerdir, [17]. Doğal kauçuğun görece düşük sönüm özelliği sebebiyle (LDRB) ilave sönüm araçları da kullanılabilir, [18]. Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler (HDRB) büyük yerdeğiştirme ve sönüm kapasitesine sahip olduklarından, [19] aynı zamanda ekonomik ve etkin sismik yalıtım elemanlarıdır, [20]. Enerji tüketiminin kurşun çekirdek vasıtasıyla sağlandığı kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (LRB) Avrupa, Japonya ve Yeni Zelanda'da yaygın olarak kullanılmaktadır, [21]. Düz veya eğri yüzeyli sürtünmeli kayıcı mesnetlerde enerji sürtünme vasıtasıyla tüketilmektedir, [22], [23].

Düşük maliyetli sismik yalıtım sistemlerinin geliştirilmesine ait araştırma çalışmaları da her zaman güncelliğini korumuştur. Calabrese, kauçuk atıklarından yararlanılarak düşük maliyetli bir sismik yalıtım sistemi geliştirmişlerdir, [24]. Çalışmada, elyafı güçlendirilmiş atık kauçuklardan oluşturulmuş sismik yalıtım sistemine sahip binanın dinamik davranışını değerlendirmek üzere

tek eksenli sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda atık kauçukların düşük maliyetli sismik yalıtım potansiyeline sahip oldukları gösterilmiştir.

Doudoumis ve diğ. [25] düşük maliyetli bir sismik yalıtım sistemi elde etmek için bina temeli ile doğal zemin arasına sanal bir zemin tabakası yerleştirmiştir. Düşük kesme direncine sahip sanal zemin tabakasının kesme direnci kuvvetli sismik hareket sırasında aşılıarak bina temelinin kayması sağlanmaktadır.

## 2. AMAÇ

Bu çalışmanın amacı *kararlı yumuşak kat mekanizmasından* faydalanılarak az katlı binalar için düşük maliyetli yeni bir sismik yalıtım sisteminin geliştirilmesidir. Önerilen sistem sadece yeni inşa edilecek binalarda değil, deprem güvenliği yetersiz olan mevcut binalarda da kullanılabilir. Göreli düşük maliyeti sebebiyle gelişmekte olan ülkelerde kullanılması hedeflenmektedir. İki ucu mafsallı çelik kolonlar ve çapraz yay kutularından oluşan sismik yalıtım katı, binanın temel seviyesinde oluşturulabileceği gibi tercih edilen herhangi bir ara katında da teşkil edilebilir. Düşey yükler pandül çelik kolonlar ile taşınırken sistemin yatay kararlılığı çapraz yay kutuları tarafından sağlanmaktadır. Sismik yalıtım katının çelik kolonları, üst ve alt döşemelerine ve temele göre rijit kirişler ile bağlanmaktadır. Mafsallı bağlantıların sıklığı mafsallık üzerindeki pimler yardımıyla ayarlanmaktadır.

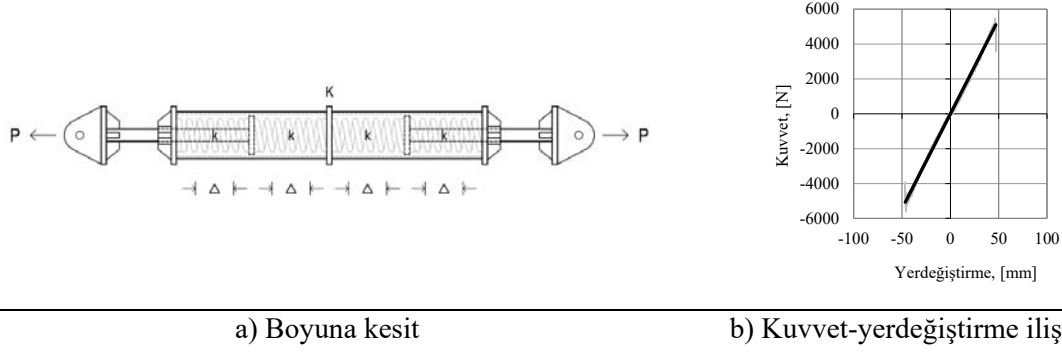
DeneySEL çalışmalardan önce deney numunelerinin matematik modelleri üzerinde bir ön analitik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, önerilen sismik yalıtımlı sistem etkinliğinin gösterilmesine yönelik; taban kesme kuvveti, ivme ve kat yerdeğiştirmeleri gibi parametreler karşılaştırılmıştır, [26].

Önerilen sismik yalıtım sisteminin mevcut yalıtım sistemlerine göre avantaj ve yenilikleri aşağıda sıralanmıştır.

- i. Binaya ayrıca bir bakım katı ilave edilmesine gerek yoktur. Sismik yalıtım katı başka amaçla da kullanılabilir.
- ii. Yeni sismik yalıtım sistemi diğer yalıtım sistemlerinin aksine aygıt olarak tanımlanmamakta, doğrudan binanın bir katını temsil etmektedir. Bu sebeple, binanın yapısal tasarımı sırasında yalıtım katının tüm elemanları doğal olarak göz önünde tutulmaktadır.
- iii. Sismik yalıtım katının çelik kolonlar, doğrusal yaylar ve yay kutuları gibi elemanları tümüyle yerli malzemeler ve görece düşük yerli işçilik maliyetleri ile üretilebilmektedir.
- iv. Sistem elemanlarının bakımı ve değiştirilmesi daha kolaydır.
- v. Maliyeti diğer yalıtım sistemlerine göre daha düşüktür, [27].
- vi. Yalıtım katındaki mafsalların sürtünmesi sebebiyle ortaya çıkan sönüm göreceli olarak yüksektir.
- vii. Merkeze gelme sorunu yaşanmamaktadır, [28].
- viii. Göçmeye karşı emniyet mekanizması sistemin kendisi tarafından sağlanmaktadır, [29], [30].
- ix. Küçük depremler ve rüzgar yükleri altında konfor şartının sağlanmasına yönelik olarak basit bir kilitleme sistemi ile sismik yalıtım katının başlangıç rijitliği artırılabilir, [31].

### 3. ÇAPRAZ YAY KUTULARI ve YALITIM KATI

Önerilen sismik yalıtım sistemi iki ucu mafsallı çelik kolonlar ve çapraz yay kutularından oluşmaktadır.



Şekil 3 - Yay kutusunun özellikleri.

#### 3.1. Çapraz Yay Kutuları

Çapraz yay kutuları iki ucunda pistonları olan çelik boru gövdeden oluşmaktadır. Borunun içerisinde aksel rijitlikleri özdeş ve  $k$  olan dört adet doğrusal elastik basınç yayı yer almaktadır. Yay kutusu çekmeye maruz kaldığında dış yaylar basınca, yay kutusu basınca maruz kaldığında ise iç yaylar basınca çalışmaktadır. Yay kutusunun boyuna kesiti ve kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3' de verilmektedir.

Yay kutusunun aksel rijitliği ( $K$ ) özdeş basınç yayların aksel rijitliklerinin ( $k$ ) yarısına eşittir, Denklem 1.

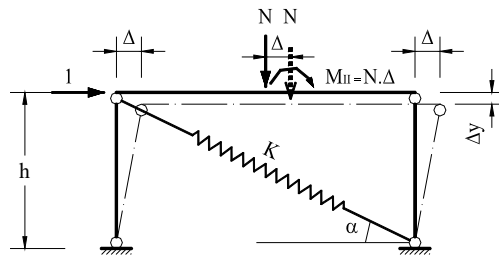
$$P = K \times 2\Delta = k \times \Delta \quad (1)$$

$$K = k / 2$$

Yay kutularının tek eksenli yükleme deneyleri, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Statik testler analitik ve deneysel yay aksel rijitliklerinin uyumlu olduklarını göstermiştir, [26], [32].

#### 3.2. Yalıtım Katı

Binanın temel seviyesinde veya herhangi bir ara katında teşkil edilebilen yalıtım katı iki ucu mafsallı çelik kolonlardan ve yay kutularından oluşmaktadır. İki ucu mafsallı çelik kolonlar rijit kirişler ile birleşmektedir. Yalıtım katının yatay rijitliği yay kutularının aksel rijitlikleri ile sağlanmaktadır, Şekil 4.



Şekil 4 - Yalıtım katının birim yük altındaki yerdeğiştirmiş hali.

Yalıtım katının yatay rijitliği ( $K_x$ ) yay kutusunun eksenel rijitliği ( $K$ ) ve eğim açısı ( $\alpha$ ) göz önünde tutularak hesaplanmaktadır, Denklem (2). Şekil 4'deki yalıtım katının ikinci merteye yatay rijitliği ise Denklem (3) ile hesaplanabilmektedir. Denklemdaki ( $N/h$ ) oranı düşey yükün ikinci merteye etkisini temsil etmektedir, [33].

$$K_x^I = K \times \cos^2 \alpha \quad (2)$$

$$K_x^{II} = K \times \cos^2 \alpha - (N/h) \quad (3)$$

Yalıtım katı üzerinde gerçekleştirilen benzeştirilmiş statik deneylerden ve analitik çalışmalardan elde edilen, birinci ve ikinci merteye yatay rijitlikler ile yay kutusu iç kuvvetlerinin birbirleri ile örtüşükleri gösterilmiştir, [34].

## **4. TEK EKSENLİ SARSMA MASASI DENEYLERİ**

### **4.1. Deney Numuneleri**

Önerilen sismik yalıtım sisteminin etkinliğini ortaya çıkarmak üzere bir dizi tek eksenli sarsma masası deneyi yapılmıştır.

¼ ölçekli, tek açıklıklı, üç katlı moment taşıyabilen çelik çerçevelerden oluşan 3D deney numunesi, üç katlı çelik üst yapısı ve rijit betonarme bir bodrum katı olan prototip binayı temsil etmektedir. Bodrum katın rijit betonarme çevre perdeleri sebebiyle üst yapı ile birlikte titreşime katılmayacağı bilindiğinden, sarsma masası üzerinde fazla kütlelen kurtulmak üzere ankastre yapının bodrum katı kaldırılarak deneyler sırasında ihmal edilmiştir.

Deney numunesinin iki doğrultudaki açıklığı 1 m ve kat yükseklikleri 0.75 m'dir. Yapısal özelliklerin belirlenmesi için prototipten numuneye geçiş sırasında modelleme kuralları uygulanmıştır, [35]. Modelleme kuralları gereği uzunluklar ¼ ile zaman ½ ile küçültülmüştür. Döşeme düzlem içi rijitliği katlarda ikincil kirişleme ile ızgara haline getirilen döşeme sistemi ile sağlanmaktadır. Çelik kolon, ana giriş ve ikincil döşeme kirişlerinin kesit özellikleri Şekil 5a'da yer almaktadır.

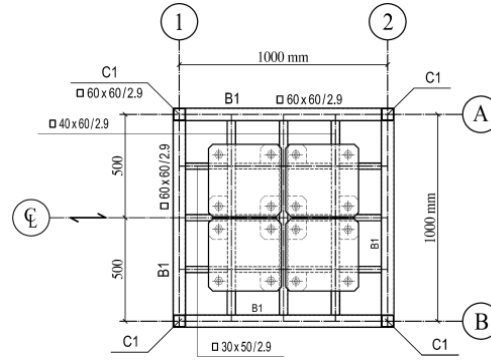
Sismik yalıtımlı deney modelinde, sismik yalıtım katı 3 katlı modelin altına bodrum kat olarak ilave edilmiştir. Rijit bodrum çevre perdeleri yatay yerdeğiştirme serbestliği için gerekli boşluk sebebiyle binadan uzaklaştırılacağından, modelde bodrum çevre perdelerine yer verilmemiştir. Böylelikle, ankastre ve sismik yalıtımlı deney numunelerinin üst yapıları karşılaştırılabilir duruma getirilmiştir. Ankastre ve sismik yalıtımlı numunelerin geometrik bilgileri Şekil 5b ve 5c'de verilmektedir.

Testler tek eksenli sarsma masası üzerinde yapıldığından, 3D numunelerin yükleme düzlemine dik kararlılıkları 1 ve 2 aksları üzerinde tertiplenen ilave düşey çaprazlar ile sağlanmıştır, (Şekil 5a). Düşey çapraz levhaların et kalınlıkları 3 mm olarak seçilmiştir.

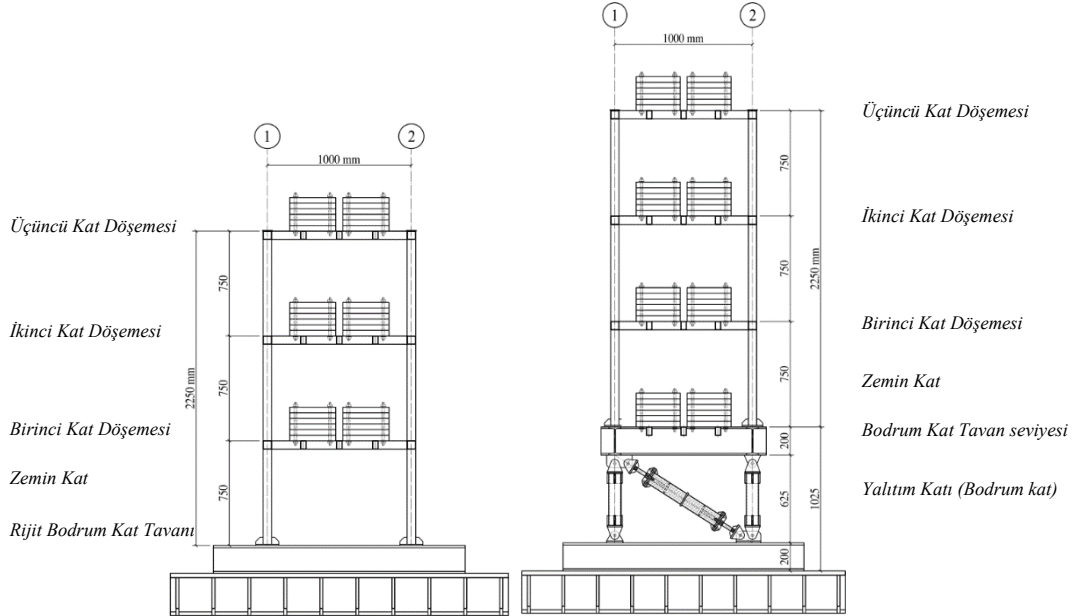
Çapraz yay kutularının yatayla yaptığı açı ( $\alpha$ ) 32°'dir. Boru kolonların dış çapı 88.9 mm olup, cidar kalınlıkları 4 mm'dir. Yalıtım katının kolon alt ve üst uçlarındaki mafsal eksenleri arasındaki mesafe ile ifade edilen yüksekliği ( $h$ ) 510 mm'dir. Her bir yay kutusunun eksenel rijitliği  $K=110$  kN/m olup, yalıtım katının yay kutuları eksenini doğrultusundaki toplam eksenel rijitliği  $2 \times 110 = 220$  kN/m 'ye karşı gelmektedir. Sarsma masası üzerindeki deney numunelerinin genel görünüşleri Şekil 6 'da sunulmaktadır.

#### 4.2. Sarsma Masası ve Veri Toplama Düzenği

Numunelerin dinamik deneyleri İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarındaki tek eksenli ARI-1 sarsma masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sarsma masasının yerdeğiştirme kapasitesi  $\pm 325$  mm'dir.  $\pm 2g$  kapasiteli ivme ölçerler, sarsma masasının üzerine ve numunelerin katlarına yerleştirilmiştir. Yatay yerdeğiştirmeler sarsma masasının üzerinde ve numunelerin tepe kotlarında ölçülmüştür. Bunlara ilave olarak, sismik yalıtımlı numunede sismik yalıtım katına, ankastre numunede de birinci kat döşeme seviyesine birer adet ilave yerdeğiştirme ölçer konumlandırılmıştır. Kritik zemin kat kolonları ve birinci kat döşeme seviyesi (zemin kat tavanı) kirişlerinin her iki ucuna şekildeğiştirme ölçerler yapııştırılmıştır. Sismik yalıtımlı numunede ayrıca yalıtım katındaki iki ucu mafsallı kolonların ortalarına da birer şekildeğiştirme ölçer yapııştırılmıştır. Modelleme kurallarına göre oluşturulan kat kütleleri; sismik yalıtımlı numunenin yalıtım katında  $1.38 \text{ kNsn}^2/\text{m}$  üst katlarında  $1.04 \text{ kNsn}^2/\text{m}$ , ankastre numunenin tüm katlarında  $1.04 \text{ kNsn}^2/\text{m}$  dir. Kütleler katlardaki döşeme ızgara kirişlerine rijit olarak bağlanmıştır, Şekil 6.



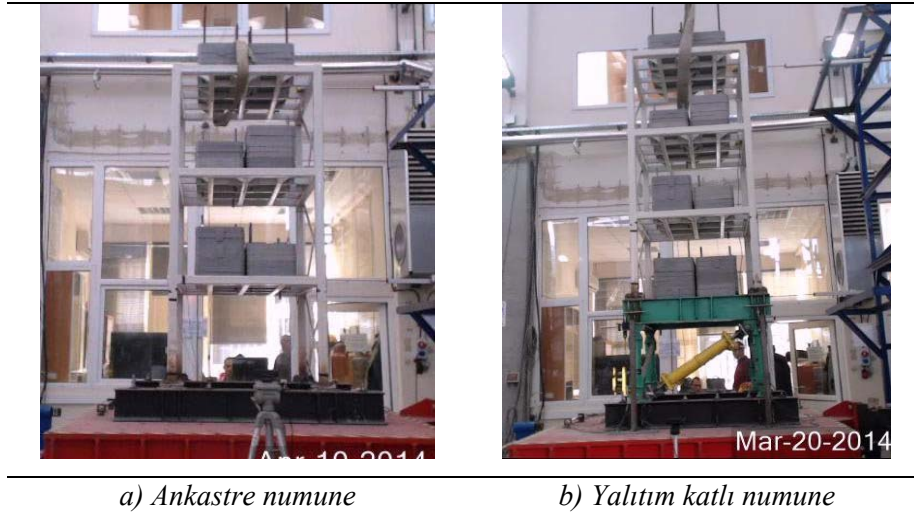
a) Plan ve kütle yerleşimi



b) Ankastre numune

c) Yalıtım katlı numune

Şekil 5 - Numune geometrileri.

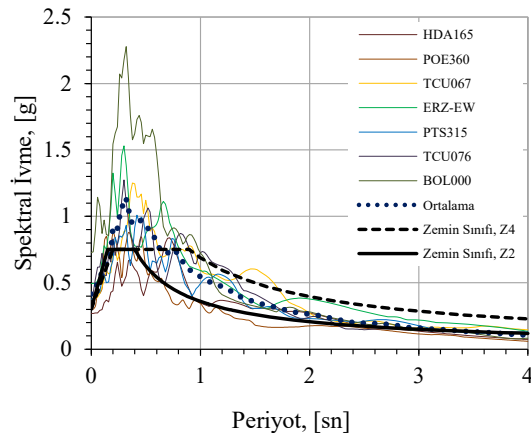


Şekil 6 - Sarsma masası üzerindeki deney numuneleri.

### 4.3. Seçilen Deprem Kayıtları

Tablo 1 - Seçilen depremlere ait büyüklükler.

Kayıt	Sembol	$M_s$	d [km]	PGA [cm/sn <sup>2</sup> ]	PGV [cm/sn]
Superstition Hills 11/24/1987 USGS 9400 Poe Road S.	POE360	6.60	11.20	294.3	32.8
Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU076 S.	TCU076	7.62	16.03	408.1	64.2
Duzce 12/11/1999 Bolu S.	BOL000	7.14	17.16	714.2	56.4
Loma Prieta 10/18/1989 Hollister Diff. Array S.	HDA165	7.10	45.10	263.9	43.9
Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU067 S.	TCU067	7.62	28.70	318.8	66.6
Superstition Hills 11/24/1987 USGS 5051 P. Test Site S.	PTS315	6.60	15.99	369.8	43.9
Erzincan 03/13/1992 Erzincan S.	ERZ-EW	6.90	8.97	486.6	64.3



Şekil 7 - Elastik spektral ivme grafikleri.

Çalışmada kullanılan ve Tablo 1 'de verilen ivme kayıtları PEER NGA' den [36] alınmıştır. Kayıtlara ait PGA ve PGV büyüklükleri tablonun son iki kolonunda yer almaktadır. Seçilen deprem kayıtlarına ait elastik tepki spektrum eğrileri, ortalama spektrum eğrisi ve Türk Deprem Yönetmeliğinde [37] orta ve zayıf zeminler için önerilen tasarım spektrum eğrileri Şekil 7'de yer almaktadır.

#### 4.4. Serbest Titreşim Karakteristikleri

Deney numunelerin birinci temel titreşim frekansları ve bunlara karşı gelen kritik sönüm oranlarını elde etmek üzere, serbest titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Ankastre numune için elde edilen temel titreşim frekansı ve buna karşı gelen kritik sönüm oranı sırasıyla, 3.6 Hz ve %3 olmuştur.

Yalıtımlı numunenin birinci temel titreşim frekansı, uygulanan yedi deprem kaydı için 0.58 Hz ile 0.70 Hz aralığında elde edilmiştir. Sonuçların bu aralıkta elde edilmesinin sebebinin mafsallardaki sürtünme ve depremden depreme değişen yatay yerdeğiştirmelerden kaynaklı ikinci mertebe etkiler olduğu düşünülmektedir. Sismik yalıtımlı numunenin eşdeğer sönüm oranı, enerji eşitliği yöntemi ve dinamik kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Sonuçlara sırasıyla Bölüm 4.6 ve 4.7' de yer verilmektedir.

#### 4.5. Sarsma Masası Deneyleri

##### *Tepe Katı ile Sarsma Masası İvmelerinin Karşılaştırılması*

Ankastre ve sismik yalıtımlı numuneler için sarsma masası ve tepe katında elde edilen en büyük ivmeler sırasıyla Tablo 2 ve 3' de verilmiştir. Tablolardan da görüleceği üzere, uygulanan tüm deprem kayıtları için sismik yalıtımlı numune için elde edilen ivme değerleri ankastre numune için elde edilenlerden çok küçüktür. Sismik yalıtımlı numunede masa üzerindeki ivmeler tepe katında azalmakta olup, ankastre numunede ise tersine artmaktadır. Tepe katı ile sarsma masası arasında en büyük ivme oranı  $1.92/3.54=0.54$  iken, bu oran ankastre numunede  $11.16/2.61=4.28$  olarak elde edilmektedir. Sismik yalıtımlı ve ankastre numuneler için elde edilen en büyük tepe ivmeleri sırasıyla, 1.92 ve 11.16 m/sn<sup>2</sup> olmuştur.

**Tablo 2** - Ankastre numuneye ait en büyük ivmeler.

Depremler	Sarsma Masası	Numune Tepe	İvme Oranı
	[m/sn <sup>2</sup> ]	Katı [m/sn <sup>2</sup> ]	
POE360	2.38	7.70	3.24
TCU076	3.11	9.02	2.90
BOL000 %50	2.27	9.66	4.26
HDA165	2.67	8.71	3.26
TCU067	2.61	11.16	4.28
PTS315	2.49	8.60	3.45
ERZ-EW %75	2.79	9.36	3.35

**Tablo 3** - Sismik yalıtımlı numuneye ait en büyük ivmeler.

Depremler	Sarsma Masası	Numune Tepe Katı	İvme Oranı
	[m/sn <sup>2</sup> ]	[m/sn <sup>2</sup> ]	
POE360	3.32	1.18	0.36
TCU076	3.77	1.64	0.44
BOL000	2.83	0.80	0.28
HDA165	2.92	1.11	0.38
TCU067	3.54	1.92	0.54
PTS315	3.27	1.64	0.50
ERZ-EW %75	3.62	1.08	0.30

*Tepe Katı ile Sarsma Masası Yerdeğiştirmelerinin Karşılaştırılması*

Sismik yalıtımlı ve ankastre numunelerin en büyük tepe katı yerdeğiştirmelerine ait karşılaştırmalara Tablo 4’de yer verilmektedir. Yalıtımlı duruma ait yerdeğiştirme büyüklükleri ankastre duruma göre daha büyüktür. Yatay yerdeğiştirmeler yalıtımlı numunenin yalıtım katında birikmekte, üst katlarda görelî yerdeğiştirmeler çok azalmaktadır. Bunun diğer bir anlamı da, sismik yalıtımlı numunede üst yapının rijit cisim hareketine çok yakın davrandığıdır. Sismik yalıtımlı ve ankastre numuneler için en büyük tepe yerdeğiştirmeleri sırasıyla, 85 mm ve 24 mm olarak elde edilmiştir.

*Zemin Kat Kolonlarındaki Eksenel Şekildeğiştirmeler*

Her iki durum için zemin kat kolonlarının alt uçlarındaki eksenel şekildeğiştirme değerleri Tablo 4’ün son iki kolonunda verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi, yalıtımlı numunenin kolonlarındaki boyuna şekildeğiştirmeler ankastre numuneninkilere göre çok daha küçüktür. Ankastre numune kolonları için elde edilen eksenel şekildeğiştirmelerin akma şekildeğiştirmelerine çok yakın olduğu görülmektedir. Sismik yalıtımlı numunenin zemin kat kolonlarının akma şekildeğiştirmesine ulaşma ihtimali çok düşüktür. Ankastre numunede BOL000 Depremi’nin %50 olarak uygulanması sırasında, kolonlarda akma limitleri aşılmaya başladığından, doğrusal ötesi davranışa geçmemek üzere, ankastre numune için BOL000 deprem kaydı %50 ölçekli olarak uygulanmıştır.

**Tablo 4** - Tepe katı yerdeğiştirmesi ve şekildeğiştirme karşılaştırmaları.

Depremler	Tepe Katı Yerdeğiştirmesi		Zemin Kat Kolon Şekildeğ.	
	Ankastre [mm]	Yalıtımlı [mm]	Ankastre [mm/mm]	Yalıtımlı [mm/mm]
POE360	15.0	53.0	0.000947	0.000122
TCU076	19.0	69.0	0.001138	0.000178
BOL000 %50	24.0	19.0	0.001215	0.000144
HDA165	14.0	69.0	0.000914	0.000114
TCU067	21.0	85.0	0.001402	0.000199
PTS315	17.0	62.0	0.001121	0.000154
ERZ-EW %75	17.0	60.0	0.001130	0.000125



*Zemin Kat Kesme Kuvvetlerinin Tayin Edilmesi*

Zemin kat kolonlarındaki eğilme momentleri, şekildeğiştirme ölçerlerden gelen veriler ve “düzlem kesit eğilmeden sonra da düzlem kalır” prensibine dayanarak elde edilebilmektedir. Devamında kolon uç momentlerinin toplamının kat yüksekliğine bölümü ile kolon kesme kuvvetleri tayin edilmektedir. Kolon kesme kuvvetlerinden de kat kesme kuvvetine geçilmektedir. Uygulanan 7 farklı deprem kaydı için elde edilen en büyük kolon kesme kuvvetleri ve kat kesme kuvvetleri Tablo 5 ve Tablo 6’ da verilmiştir. Ankastre ve sismik yalıtımlı durum için elde edilen ortalama zemin kat kesme kuvvetleri sırasıyla, 21.30 kN ve 3.19 kN değerlerindedir.

**Tablo 5** - Ankastre numunenin zemin kat kolonlarına ait eğilme momenti ve kesme kuvveti hesaplamaları.

Depremler	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	V	V <sub>kat</sub>
	$\varepsilon_b=(SG11+S$ $G12)/2$	$\varepsilon_t$ $=(SG13+SG1$ $4)/2$	$\sigma_b =E\varepsilon_b$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_t =E\varepsilon_t$ [kN/m <sup>2</sup> ]	M [kNm ]	M [kNm ]		
POE360	0.000765	0.000328	160650	68775	1.932	0.827	4.31	17.24
TCU076	0.000925	0.000410	194250	86100	2.336	1.036	5.27	21.08
BOL000 %50	0.001000	0.000390	210000	81900	2.526	0.985	5.49	21.96
HDA165	0.000750	0.000335	157500	70350	1.895	0.846	4.28	17.12
TCU067	0.001150	0.000465	241500	97650	2.905	1.174	6.37	25.48
PTS315	0.000905	0.000405	190050	85050	2.286	1.023	5.17	20.68
ERZ-EW %75	0.001160	0.000460	243600	96600	2.930	1.162	6.39	25.56

**Tablo 6** - Sismik Yalıtımlı numunenin zemin kat kolonlarına ait eğilme momenti ve kesme kuvveti hesaplamaları.

Depremler	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	V	V <sub>kat</sub>
	$\varepsilon_b=(SG11+S$ $G12)/2$	$\varepsilon_t$ $=(SG13+SG1$ $4)/2$	$\sigma_b =E\varepsilon_b$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_t =E\varepsilon_t$ [kN/m <sup>2</sup> ]	M [kNm ]	M [kNm ]		
POE360	0.000110	0.000055	23100	11550	0.278	0.139	0.65	2.60
TCU076	0.000164	0.000084	34335	17640	0.413	0.212	0.98	3.92
BOL000	0.000135	0.000075	28350	15750	0.341	0.189	0.83	3.32
HDA165	0.000098	0.000050	20475	10500	0.246	0.126	0.58	2.32
TCU067	0.000190	0.000087	39900	18270	0.480	0.220	1.09	4.36
PTS315	0.000140	0.000062	29400	12915	0.354	0.155	0.80	3.20
ERZ-EW %75	0.000108	0.000058	22575	12075	0.272	0.145	0.65	2.60

Zemin kat kesme kuvvetleri, üst katların kütle toplamı ile en büyük mutlak ivmelerin çarpımından da elde edilebilmektedir. Her iki yöntem ile elde edilen zemin kat kesme kuvvetleri

karşılaştırmalarına ankastre numune ve sismik yalıtımlı numune için sırasıyla Tablo 7 ve 8’de yer verilmektedir. İki yöntem arasındaki ortalama göreceli farklar %11.28 ve %7.50 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 7** - Ankastre numuneye ait zemin kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Depremler	Şekildeğ. Tabanlı	İvme Tabanlı	Görelî Farklar
	[kN]	[kN]	[%]
	(1)	(2)	[(1)-(2)]/(2)
POE360	17.24	17.86	3.47
TCU076	21.08	25.55	17.50
BOL000 %50	21.96	23.32	5.83
HDA165	17.12	20.82	17.77
TCU067	25.48	27.22	6.39
PTS315	20.68	22.46	7.93
ERZ-EW %75	25.56	31.98	20.08
Ortalama	21.30	24.17	11.28

**Tablo 8** - Yalıtımlı numuneye ait zemin kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Depremler	Şekildeğ. Tabanlı	İvme Tabanlı	Görelî Farklar
	[kN]	[kN]	[%]
	(1)	(2)	[(1)-(2)]/(2)
POE360	2.60	2.59	0.39
TCU076	3.92	3.65	7.40
BOL000	3.32	3.03	9.57
HDA165	2.32	2.56	9.38
TCU067	4.36	4.27	2.11
PTS315	3.20	3.68	13.04
ERZ-EW %75	2.60	2.91	10.65
Ortalama			7.50

İki farklı yöntem ile elde edilen zemin kat kesme kuvvetlerinin birbiri ile yeterli uyumlu içerisinde oldukları görülmektedir. Sismik yalıtımlı numunenin zemin kat kesme kuvveti ankastre numuneye göre oldukça küçük olup, aralarındaki oran 1/7 düzeyindedir.

Uygulanan depremler için sismik yalıtımlı numunenin yalıtım katındaki en büyük taban kesme kuvveti talepleri Tablo 9’da yer almaktadır. Yalıtım katının üzerindeki kütle toplamı 4.98 kNsn<sup>2</sup>/m olarak göz önünde tutulmuştur.

Uygulanan tüm depremler sırasında sismik yalıtım katında herhangi bir kalıcı yerdeğiştirme ortaya çıkmamıştır. Bu sebeple, önerilen sismik yalıtım sisteminde merkeze gelme problemi söz konusu değildir.

Yerdeğiştirme talebinin yalıtım katının yerdeğiştirme kapasitesini aşması halinde; yay kutusundaki basınç yayları tümüyle kapanıp yay kutusu fonksiyonunu kaybederek rijit bir diyagonal eleman haline gelmektedir. Depremin o safhasında yalıtım katının yatay rijitliği

arttığından üst katlara giden ivmeler doğal olarak bir miktar artış göstermektedir. Buna rağmen sistemin yatay kararlılığı korunmaktadır. Dolayısıyla, yalıtım katının *göçme-emniyet mekanizması* sistemin kendisi tarafından üretilmektedir. Bu olay ERZ-EW deprem kaydının %100 ölçekli olarak uygulanması sırasında ortaya çıkmıştır. Daha sonra yay kutusunun içindeki yaylar tamir edilerek, ERZ-EW deprem kaydı %75 ölçekli olarak uygulanmıştır, Tablo 3.

**Tablo 9** - Yalıtım katındaki en büyük taban kesme kuvveti talepleri

Depremler	İvme	F = m×a
	[m/sn <sup>2</sup> ]	[kN]
POE360	0.981	4.89
TCU076	1.329	6.62
BOL000	1.181	5.88
HDA165	0.859	4.28
TCU067	1.435	7.15
PTS315	1.276	6.35
ERZ-EW %75	0.935	4.66
Ortalama		5.68

#### 4.6. Eşdeğer Sönümün Tayini için Enerji Denge Denkleminin Uygulanması

Hareket denkleminin zaman tanım alanında doğrudan integrasyonu ile enerji denge denklemi elde edilmektedir, (Denklem 4), [38].

$$\int m\ddot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int c\dot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int f_s\dot{u}(t)dt = -\int m\ddot{u}_g(t)\dot{u}(t)dt \quad (4)$$

Denklemdaki  $m$ ,  $c$  ve  $f_s$  sırasıyla, kütle, sönüm ve rijitlik kuvvet matrislerini,  $\ddot{u}$  ve  $\dot{u}$  görelî ivme ve görelî hızı  $\ddot{u}_g$  ise yer ivmesini ifade etmektedir. Sönüm matrisi  $c$  Denklem (5) 'de verildiği biçimde yazılabilecektir;

$$c = 2\xi\omega m \quad (5)$$

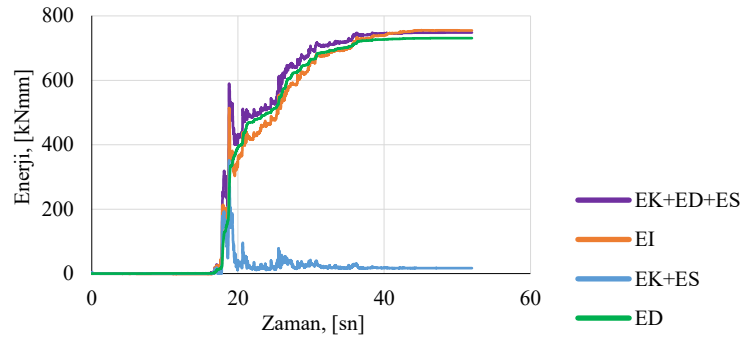
denklemdaki  $\xi$  kritik sönüm oranına  $\omega$  açısal frekansa karşı gelmektedir. Denklem (4) aşağıdaki Denklem (6) biçimine de dönüştürülebilir.

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (6)$$

Denklem (6)'nın sol tarafı ( $E_K$ ) kinetik, ( $E_D$ ) sönüm ve ( $E_S$ ) şekildeğiştirme olmak üzere yapının enerji bileşenlerini temsil etmektedir. Sağ tarafı ( $E_I$ ) ise binaya giren toplam enerjiyi ifade etmektedir.

Sismik yalıtımlı deney numunesi için, enerji terimleri tümüyle deney sırasında toplanan verilerden oluşturulmaktadır. Bunlar ivme ölçerlerle ölçülen ivmeler, yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerden üretilen hızlardır. Deneylerden toplanan bu verilere *Butterworth* sayısal filtresi, 15 Hz olarak uygulanmıştır. Denklem (6)'daki  $E_K$ ,  $E_S$  ve

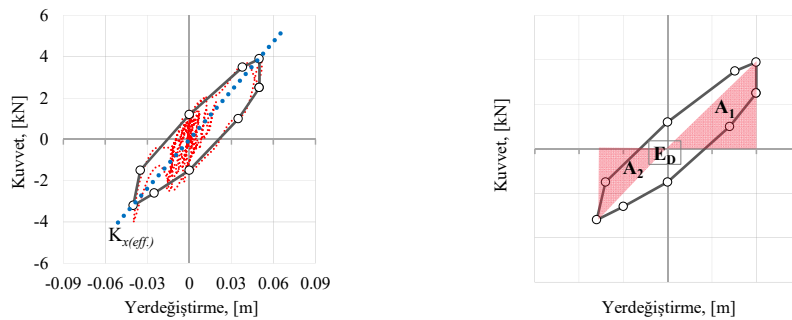
$E_I$  doğrudan deneylerden gelen veriler kullanılarak hesaplanmakta, buna karşılık eşdeğer sönüm oranı ( $\xi$ ) için enerji eşitliğini sağlamak üzere, ardışık yaklaşım şeklinde tahmin yapılmaktadır. Deneyler sırasında sismik yalıtımlı numunede herhangi bir plastik şekildeğiştirme tespit edilmediğinden,  $f_s$  olarak elastik kuvvetler kullanılmıştır. TCU076 depremine ait enerji denkleminin grafik gösterimi Şekil 8’de verilmektedir. Yedi farklı deprem için uygulanan ardışık yaklaşım yöntemi sonunda, % 18-20 aralığında bir eşdeğer viskoz sönüm oranı ( $\xi$ ) elde edilmiştir. Sismik yalıtımlı sistemde ortaya çıkan yüksek sönümün sebebinin, yalıtım katındaki mafsallarda ortaya çıkan sürtünme olduğu görüşüne varılmıştır. Bölüm 5’de yer alan sismik yalıtımlı numunenin hesap modelleri kullanılarak zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde, kritik sönüm oranı ( $\xi$ ) sistematik olarak artırılarak analizler tekrarlandığında, eşdeğer sönüm oranının ( $\xi$ ) %18-20 değerleri için, deney ve analiz sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür, Şekil 11.



Şekil 8 - Yalıtımlı numune için enerji denge grafiği, (TCU076).

#### 4.7. Deneysel kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri

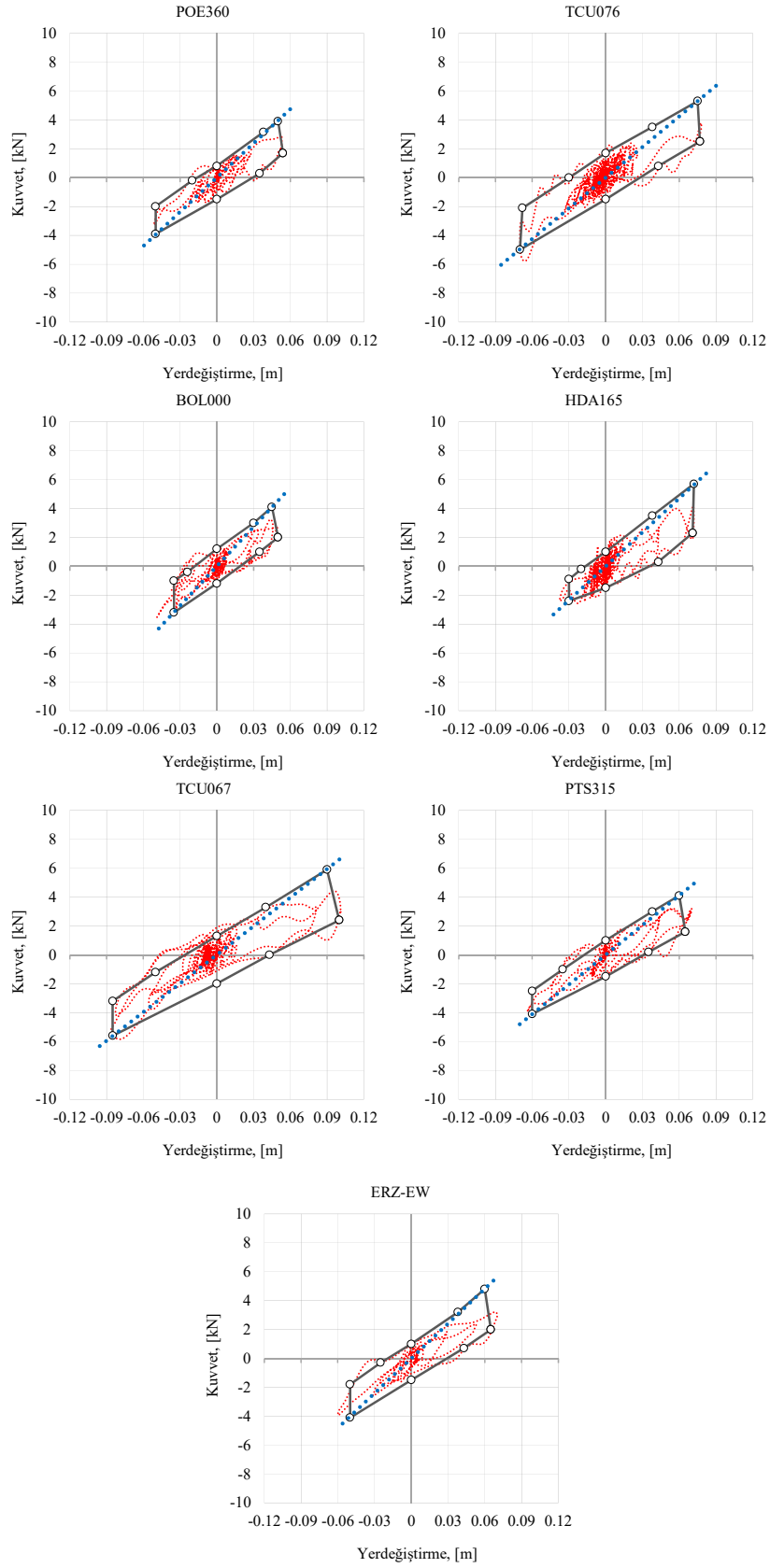
Tüm depremler için yalıtım katının kuvvet-görelî yerdeğiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Yalıtım katının üzerindeki kütle ile anlık mutlak ivmeler çarpılarak anlık kuvvetler ve buna karşı gelen anlık görelî yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Bu şekilde kuvvet-yerdeğiştirme döngüleri oluşturulmuş ve döngülerin etrafından geçirilen zarflardan faydalanılarak, etkin yatay rijitliklere  $K_{x(eff)}$  ulaşılmıştır, Şekil 9a. Eşdeğer sönüm oranı da Denklem (7) kullanılarak elde edilmekte, denklemdeki  $E_D$  en büyük çevrimin alanını ifade etmekte ve o çevrimde tüketilen enerjiye karşılık gelmekte,  $A_1$  ve  $A_2$  alanları ise şekil değiştirmeye ait enerji miktarlarını temsil etmektedir, Şekil 9b.



a) Çevrimsel döngü, zarf ve etkin rijitlik

b) Eşdeğer sönümün tayini

Şekil 9 - Yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.



Şekil 10 - Sismik yalıtım katı için oluşturulan kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.

$$\xi_{eq} = E_D / (2\pi \times (A_1 + A_2)) \quad (7)$$

Bu işlemler tüm depremlere uygulanmıştır, Şekil 10. Uygulanan tüm depremler için eşdeğer sönüm oranı %18-20 aralığında elde edilmiştir. Ayrıca ortalama etkin rijitlik değeri 76.1 kN/m olarak hesaplanmıştır. Mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmaksızın hesaplanan teorik rijitlik değeri ise 61.3 kN/m'dir.

## 5. ANALİTİK MODELLEME ve DENEY SONUÇLARININ DOĞRULANMASI

### 5.1. Analitik Modelin Oluşturulması

Sismik yalıtımlı ve ankastre deney numunelerinin 3D matematik modelleri kurularak, zaman tanım alanında, geometrik bakımdan doğrusal olmayan dinamik analizleri (NTHA) SAP2000n [39] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde kolon, kiriş ve ikincil kiriş elemanların tümü genel çubuk elemanlar ile temsil edilmiştir. Sismik yalıtımlı modelde yalıtım katının etkin yatay rijitliği,  $K_{x(eff)}$ , doğrusal elastik yay kutularının eksenel rijitlikleri ile temsil edilmiştir. Bu etkin yatay rijitlik deneysel kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinden elde edilen sürtünme kaynaklı ilave rijitliği de içermektedir, (Bkz., Şekil 10).

Sismik yalıtımlı modeldeki yay kutularını temsil etmek üzere, eşit eksenel çekme ve basınç rijitliğine sahip doğrusal elastik yaylar kullanılmıştır. Yalıtım katındaki kolon ve kirişlerin birleşim bölgeleri ile yay kutularının uçlarındaki plakaları temsil etmek üzere o bölgelerde sonsuz rijit çubuk elemanlar tertiplenmiştir. Yalıtım katı kolonlarının her iki ucuna mafsal atanmıştır. Yayılı kütle kullanımı amacıyla, her katın kütlesi o kattaki düğüm noktalarına dağıtılmıştır. Analizlerde (NTHA), Hilber-Hughes-Taylor direkt integrasyon yöntemi ve Rayleigh tipi sönüm kullanılmıştır.

### 5.2. Serbest Titreşim Analizleri

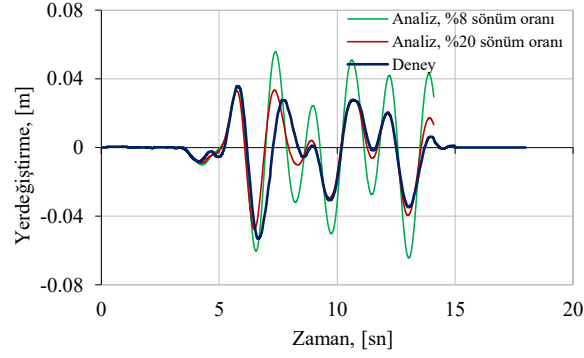
Sismik yalıtımlı ve ankastre numuneler için önce serbest titreşim analizleri icra edilmiştir, Tablo 10. Sismik yalıtımlı numunede deneysel frekans ile analitik frekansın oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Buna karşılık ankastre numunede deneysel ve analitik frekans arasında bir miktar fark olduğu gözlenmiştir. Bu farkın ankastre deney numunesinin sarsma masası üzerindeki bağlantısının "ideal ankastre" olamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 10 - Modellerin serbest titreşim frekansları (Hz)

Durumlar		Birinci Mod	İkinci Mod	Üçüncü Mod
Ankastre	DeneySEL	3.47	11.93	20.75
	Nümerik	4.04	12.97	21.74
Yalıtımlı	DeneySEL	0.60	5.27	13.27
	Nümerik	0.56	5.80	13.38

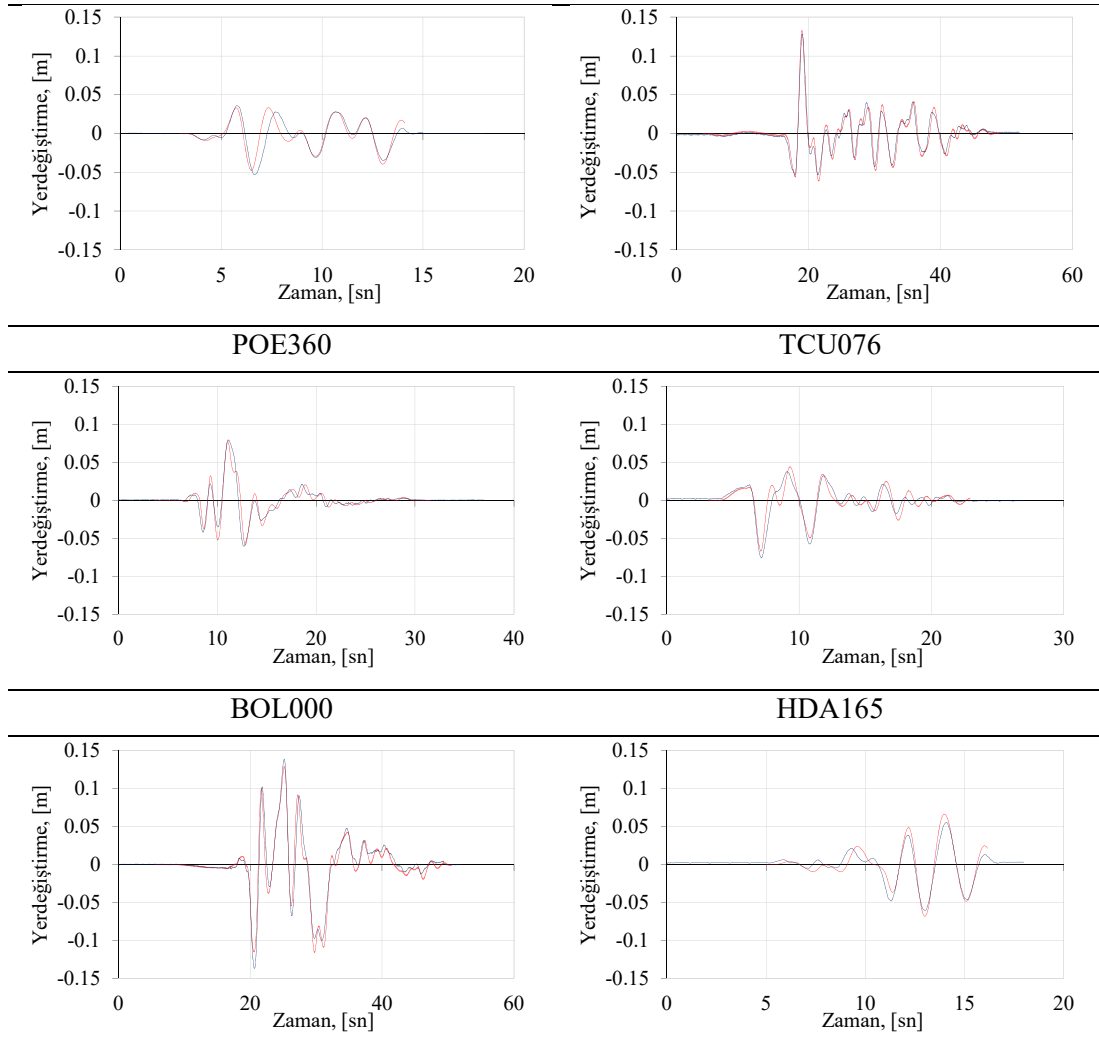
### 5.3. Sismik Yalıtımlı Analitik Modelin Zaman Tanım Alanındaki Analizleri

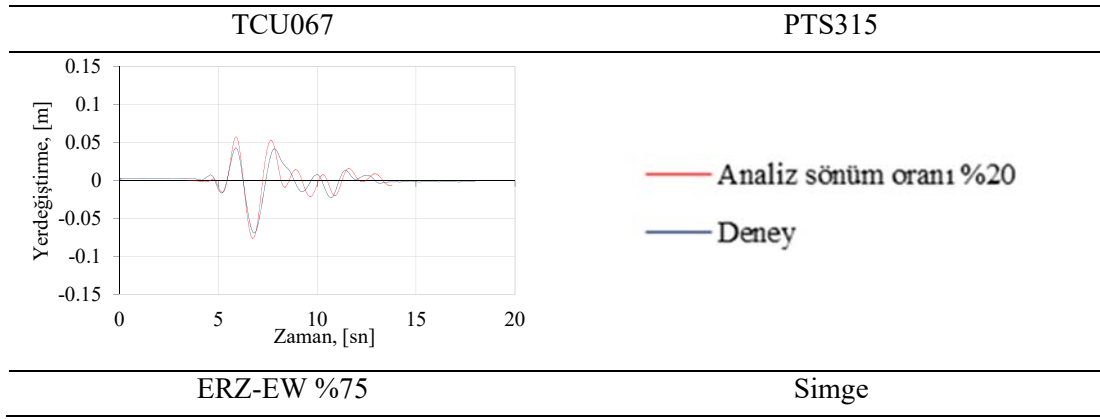
Sönümün etkisini ortaya koymak üzere; POE360 depremi için, kritik sönüm oranının ( $\xi$ ) %8 ve %20 değerleri için analizleri (NTHA) yapılmıştır. Kritik sönüm oranının %20 değerinde deneysel ve analitik sonuçların örtüştüğü görülmüştür, Şekil 11. Bu oranın, enerji dengesi yöntemi ile ulaşılan sönüm değeri ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 11 - POE360 depremi için sönüm oranlarının analizlerdeki (NTHA) etkisi.

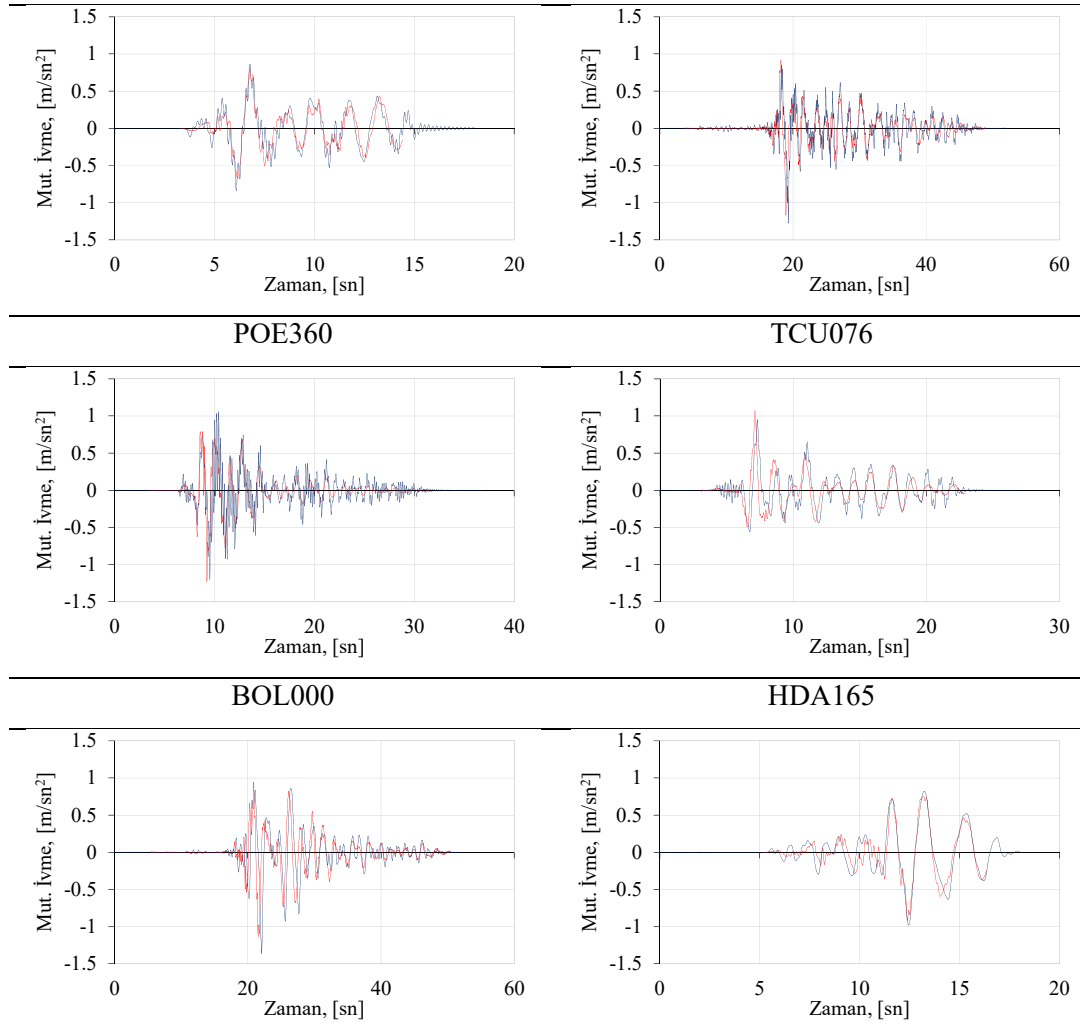
Bu sonuca dayanılarak, tüm depremler için zaman tanım alanındaki analizler (NTHA) kritik sönüm oranının %20 değeri kullanılarak icra edilmiştir. Deneysel ve analitik olarak elde edilen yalıtım katı yerdeğiştirme geçmişlerine Şekil 12 'de yer verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, uygulanan 7 farklı deprem için deneysel ve analitik sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir.



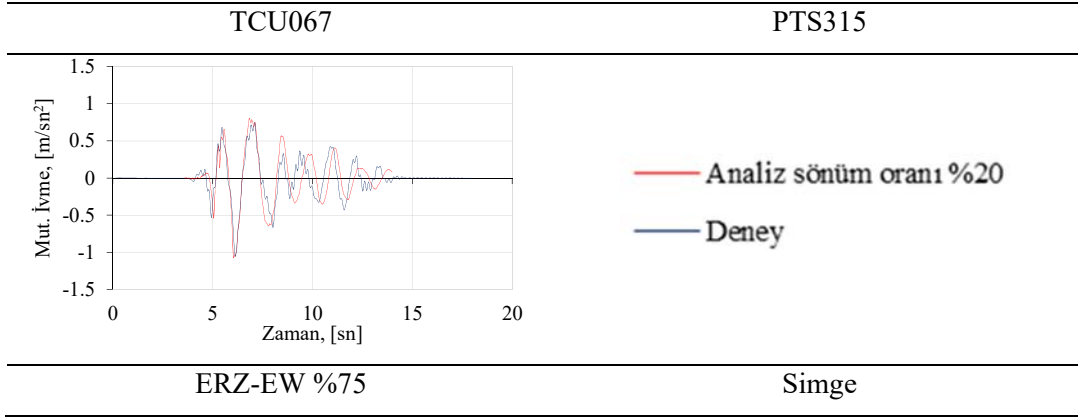


Şekil 12 Yalıtım katı yerdeğiştirme geçmişlerinin karşılaştırılması.

Hareket doğrultusunda, deneysel ve analitik olarak elde edilen yalıtım katının ivme geçmişlerinin karşılaştırılmaları da Şekil 13’ de verilmiştir. İvme geçmişlerinin de uyumlu olduğu görülmektedir.

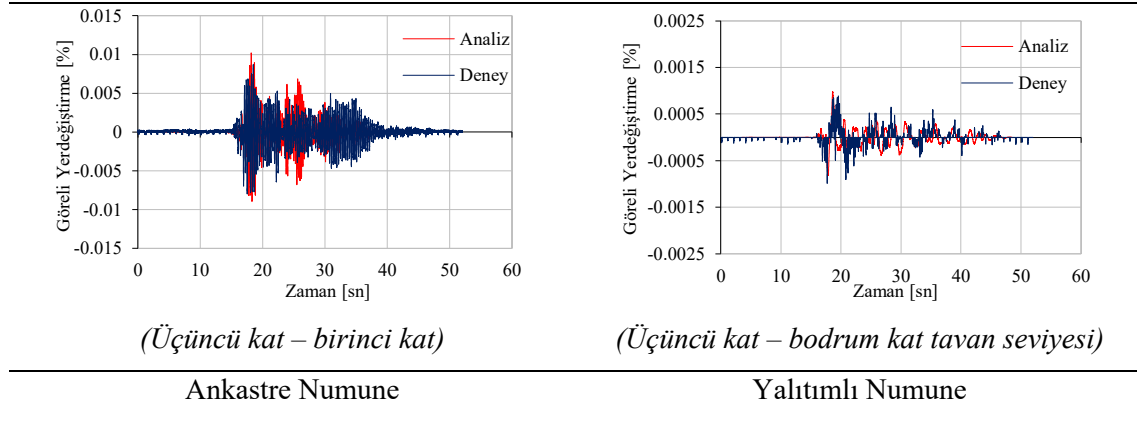






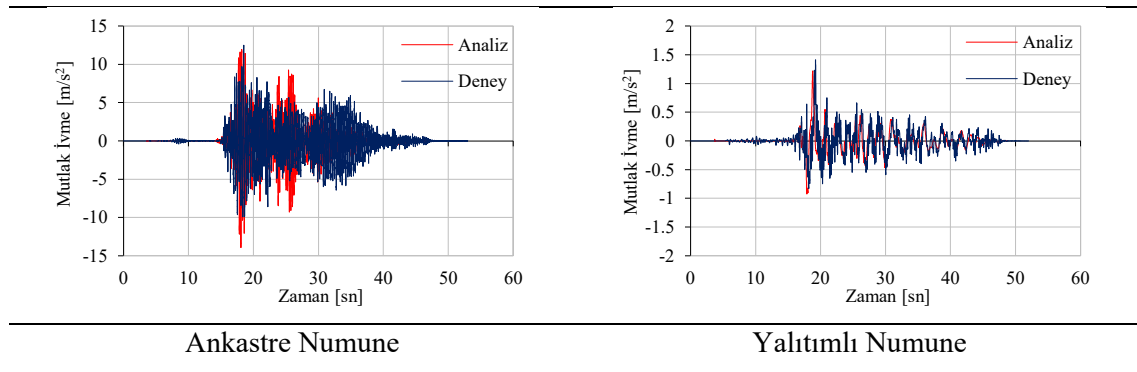
Şekil 13 - Yalıtım katı ivme geçmişlerinin karşılaştırılması.

TCU076 depremi için ankastre ve yalıtımlı modellere ait görel kat öteleme geçmişlerinin analitik ve deneysel sonuçlarına ait karşılaştırmalar, Şekil 14 'de sunulmuştur. Analitik ve deneysel sonuçların yeterli uyum içerisinde oldukları görülmektedir.



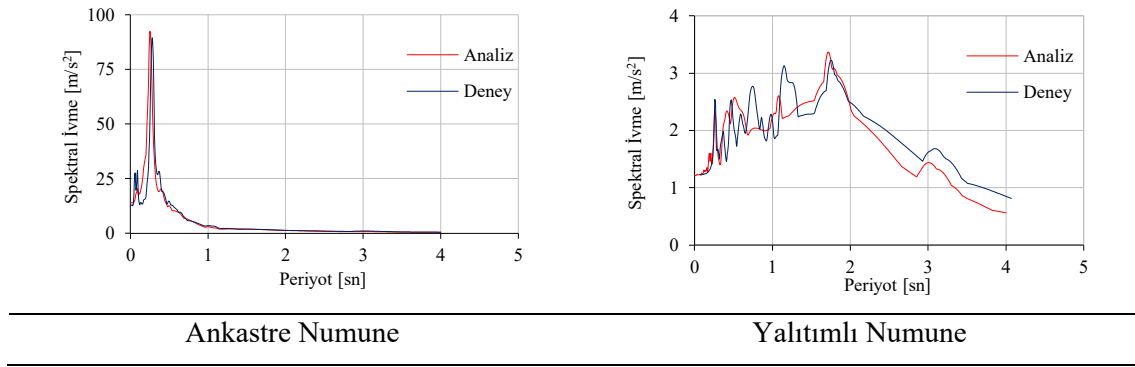
Şekil 14 - TCU076 depremi için görelî kat öteleme karşılaştırmaları.

TCU076 depremi için ankastre ve yalıtımlı modellerin tepe katı mutlak ivme geçmişlerine ait karşılaştırmalara Şekil 15' de yer verilmiştir. Şekilden yalıtımlı numune için daha uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 15 - TCU076 depremi için tepe katı mutlak ivme karşılaştırmaları.

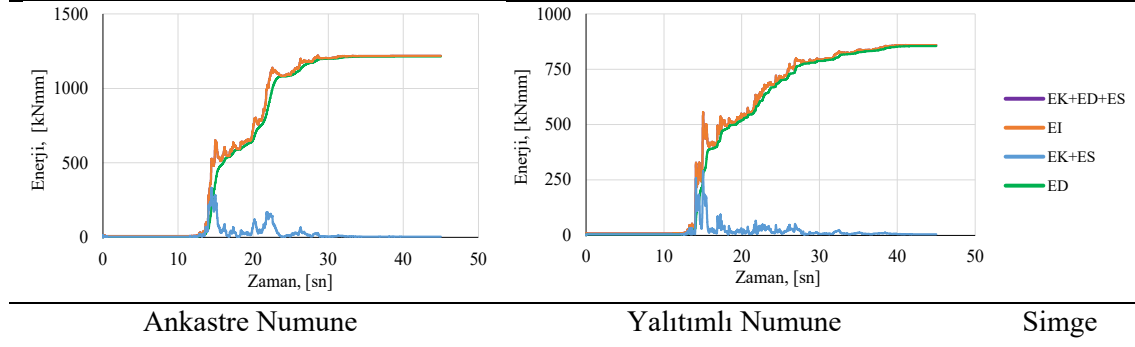
TCU076 depremi için ankastre ve yalıtımlı modellerin tepe katı spektral ivmelerinin karşılaştırılması Şekil 16’ da yapılmıştır. Analitik ve deneysel sonuçların birbirleriyle örtüşükleri görülmektedir.



Şekil 16 - TCU076 depremi için tepe katı spektral ivme karşılaştırmaları.

#### 5.4. Enerji Dengesi

Enerji denge denklemi ankastre ve yalıtımlı modeller için uygulanmıştır. Enerji denklemlerinde sayısal olarak elde edilen yerdeğiştirmeler ve ivmelerden yararlanılmıştır. TCU076 depreminde, ankastre ve sismik yalıtımlı modeller için oluşturulan enerji denge grafikleri Şekil 17 ’de sunulmaktadır.



Şekil 17 - TCU076 depremi için analitik enerji denge grafikleri.

Ankastre ve sismik yalıtımlı modellerde; kinetik enerji ( $E_K$ ), sönüm enerjisi ( $E_D$ ), şekildeğiştirme enerjisi ( $E_S$ ) bileşenlerinin toplamının, binaya giren enerji miktarına ( $E_I$ ), eşit olduğu gösterilmiştir. Ankastre ve sismik yalıtımlı modellerdeki kritik sönüm oranları sırasıyla, %3 ve %20 olarak kabul edilmiştir.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, az katlı binalara uygulanabilecek çapraz yay gruplarından oluşan yeni sismik yalıtım sisteminin etkinliği araştırılmıştır. Gerçekleştirilen bir dizi deneysel ve analitik çalışmadan elde edilen bilgilerin değerlendirilmesini takiben aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1- Ankastre ve sismik yalıtımlı numunelerin sarsma masası deneyleri ve analitik hesapları; sismik yalıtım katının, üst katlarda oluşan ivmeleri çok önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Sismik yalıtımlı sistemde tepe katı ivmeleri %70 kadar küçülmüştür.

- 2- Sismik yalıtımlı numunenin zemin kat taban kesme kuvveti, ankastre numuneye göre çok küçük olup, aralarındaki oran 1/7 düzeyindedir.
- 3- Sismik yalıtımlı numune ile ankastre numune için gerçekleşen en büyük tepe katı yerdeğiştirmeleri sırasıyla, 85 mm ve 24 mm'dir. Sismik yalıtımlı numunenin 1.doğal titreşim periyodu 1.67 sn. iken ankastre numunede bu büyüklük 0.29 sn. olmuştur. Titreşim periyodunun uzamasının doğal sonucu olarak, sismik yalıtımlı numunede tepe yerdeğiştirmesi istemi 3.54 kat artmıştır. Sismik yalıtımlı numunede yerdeğiştirme isteminin çok büyük bölümü yalıtım katında toplandığından, üst katlarda görelî kat ötelemeleri de çok küçük kalmıştır.
- 4- Sismik yalıtımlı sistemin yalıtım katındaki eşdeğer sönüm oranı %18-20 aralığındadır. Yalıtım katındaki görelî yüksek sönümün sebebi kolonların iki ucundaki mafsallarda ortaya çıkan sürtünmedir.
- 5- Sismik yalıtımlı sistemde üst katlarda, görelî kat ötelenmeleri önemli ölçüde azalmaktadır. Sismik yalıtım katındaki en büyük görelî kat ötelenme oranı %16 düzeyinde ortaya çıkmıştır. Bu değer, çeşitli tasarım depremleri için önerilen yerdeğiştirme taleplerini karşılayacak düzeydedir.
- 6- Önerilen yeni sismik yalıtım sistemi ile önemli yerdeğiştirme talepleri ve ikinci mertebeye etkilerinin karşılanabileceği ispatlanmıştır.
- 7- Deneyler sırasında herhangi bir *merkeze gelme* sorunu yaşanmamıştır.
- 8- Yay kutularının yerdeğiştirme kapasitesi aşıldığında, yalıtım katı kendi *göçme emniyet mekanizmasını* oluşturabilmektedir.

Başka bir araştırma projesi ile tam ölçekli ve önerilen sismik yalıtım katına sahip betonarme prototipin sarsma masası deneylerinin yapılması planlanmaktadır. Bu çalışmada, önerilen yalıtım katı için daha uygun mühendislik detaylarının oluşturulma fırsatı da elde edilmiş olacaktır. Tamamlanan çalışmada elde edilen sonuçlar ve yazarların mühendislik pratiğine dayanarak, planlanan çalışmada uygun sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir.

### **Teşekkür**

Çalışmanın deneysel bölümü İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarındaki ARI-1 sarsma masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma, 36997 nolu İTÜ BAP Projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar, çalışmaya katkı sağlayan tüm kuruluş ve kişilere teşekkürlerini sunarlar.

### **Kaynaklar**

1. Makris, N., Chang, S., 2000, "Effect of Viscous, Viscoplastic and Friction Damping on the Response of Seismic Isolated Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 85-107.
2. Yamada, K., Kobari, T., 2001, "Fundamental Dynamics and Control Strategies for Aseismic Structural Control", *International Journal of Solids and Structures*, 38 (34-35), pp.6079-6121.
3. Cheng, F.Y., Jiang, H., Lou, K., 2008, *Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 8-0-8493-8532-2.
4. Chen, W., Scawthorn, C., *Earthquake Engineering Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.

5. Kelly, J.M., 1986, "Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(3), 202-216.
6. Martel, R. R., 1929, "The Effects of Earthquake on Buildings with a Flexible First Storey", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 19(3), 167-178.
7. Bednarski, E. J., 1935, Discussion of Paper No. 1906, "Flexible First Story Construction for Earthquake Resistance", *Transactions A.S.C.E.*, 100,657-660.
8. Green, N.B., 1935, "Flexible First Storey Construction for Earthquake Resistance", *Transactions ASCE*, 100, Paper No. 1906, 644-674.
9. Jacobsen, L.S., 1938, "Effects of a Flexible First Story in a Building Located on Vibrating Ground", *S. Timoshenko, 60th Anniversary Vol.*, Macmillan Co., New York.
10. Fintel, M. and Khan, R.F., 1969, "Shock Absorbing Soft Story Concept for Multistory Earthquake Structures", *Journal of the American Concrete Institute*, 66-29,318-390.
11. Chopra, A.K., Clough, D.P. and Clough, R.W., 1973, "Earthquake Resistance of Buildings with a Soft First Storey", *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1, 347-355.
12. Arnold, C., 1984, "Soft First Stories: Truths & Myths", 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 5,943-950.
13. Todorovska, M. I., 1999, "Base Isolation by a Soft First Story with Inclined Columns", *Journal of Engineering Mechanics*, 124(4), 448-457.
14. Comartin, C.D., 2009, "Supplemental Vertical Support as a Means for Seismic Retrofit of Buildings", *Seismic Risk Assessment and Retrofitting with Special Emphasis on Existing Low Rise Structures* Editors: İlki, A., Karadogan, F., Pala, S., Yuksel, E., Chapter 16, pp. 329-342, Springer.
15. Huffmann,G., 1985, "Full Base Isolation for Earthquake Protection by Helical Springs and Viscodampers" *Nuclear Engineering and Design*, Volume 84, Issue 3,331-338.
16. Kelly, J.M.,1986, "Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(3),202-216.
17. Naeim, F., Kelly, J.M., 1999, *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*, Wiley, New York, ISBN: 0-471-14921-7.
18. Warn, P., Ryan, K.L., 2012, "A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs", *Buildings*, 2, pp. 300-325.
19. Dezfuli, F.H., Alam, M.S., 2014, "Sensitivity Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators Based on Experimental Tests and Finite Element Simulations", *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, 1025-1043.
20. Tsai C.S., Chiang T.C., Chen B.J., Lin S.B., 2003, "An Advanced Analytical Model for High Damping Rubber Bearings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32:1373-1387.
21. Tan R.Y., Huang M.C., 2000, "System Identification of a Bridge with Lead Rubber Bearings", *Computers and Structures*, 74, 267-280.
22. Komodromos, P., 2000, "Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures", *Advances in Earthquake Engineering Series*, WIT Press, Southampton, UK.
23. Fenz, D.M., Constantinou, M.C. (2006), "Behavior of the Double Concave Friction Pendulum Bearing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 1403-1424.

24. Calabrese A., 2013, “Analytical, Numerical and Experimental Study of a Novel Low-cost Base Isolation System”, Ph.D Thesis Submitted to University of Naples, “Federico II”, 227 Pages.
25. Doudoumis, I.N., Papadopoulos, P., Papaliangas, T., “A Low-cost Base Isolation System on Artificial Soil Layers with Low Shearing Resistance”, 12 th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 661, 2002.
26. Karayel V., Yuksel E., 2013, “A New Seismic Base Isolation System Using Spring Tube Bracings”, International Conference on Earthquake Engineering, May 29-31, Paper No: 222, Skopje, Macedonia.
27. Yavaş, Ş.M., 2020 “Çapraz Yay Gruplarını Kullanan Sismik Yalıtım Sistemi Etkinliğinin Uygulamada Yaygın Olarak Kullanılan Diğer Sistemler İle Karşılaştırılması”, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Afet Yönetim Enstitüsü, İstanbul.
28. Medeot R., 2012 Re-centering Capability of Seismic Isolation Systems: A controversial matter moving scarcely towards its settlement. 15th Word Conference on Earthquake Engineering, Lisbon.
29. Kelly JM, Beucke KE.,1983 A Friction Damped Base Isolation System with Fail-Safe Characteristics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics 11*: 33-56.
30. Ohari M, Minami T, Osawa Y., 1988 Earthquake Response Analyses of Base Isolation Systems with and without Fail-Safe Mechanism. Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol 5, Tokyo-Kyoto, Japan.
31. Doluyurt H., 2017 “Çapraz Yay Gruplarını Kullanan Sismik İzolasyon Sisteminin İyileştirilmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
32. Karayel V., 2016 “Çapraz Yay Gruplarını Kullanan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sistemi”, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
33. Wilson, E. L., Habibullah, A., 1987, “Static and Dynamic Analysis of Multi-Story Buildings Including P-Delta Effects”, *Earthquake Spectra*, 3(2), 289-298.
34. Karayel, V., Yuksel, E., Gokce, T., Sahin, F., 2017, “Spring Tube Braces for Seismic Isolation of Buildings”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16:219-231.
35. Noor, F.A., Boswell, L.F., 1992, “Small Scale Modeling of Concrete Structures”, Elsevier Science Publisher Ltd.
36. PEER NGA Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center: NGA database, ([http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database/](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/)).
37. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007.
38. Akiyama H., “Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings”, University of Tokyo Press, 1985. ISBN 0-86008-377-2.
39. SAP2000n, Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, CSI, Berkeley, California, USA.



## Mevcut Betonarme Binaların Deprem Risklerinin Hızlı Tayinine Yönelik Bir Yaklaşım

Ercan YÜKSEL<sup>1</sup>, Mustafa ALTINELLER<sup>2</sup>, Varol KARAYEL<sup>3</sup>, Fatih ŞAHİN<sup>4</sup>

### ÖZET

*Az katlı betonarme binaların deprem risklerinin hızlı tayinine yönelik yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Binanın sadece kritik katı ya da katları için yapılan hızlı hesapta, önemli bazı yapısal özellikler kullanılmaktadır. Tasarım spektral ivme büyüklükleri yardımıyla binanın iki ana doğrultusundaki taban kesme kuvveti istemleri elde edilmekte, tek serbestlik dereceli sistem yer değiştirmelerine geçilmekte sonra da kritik kat görelî ötelenmelerine ulaşılmaktadır. Kritik katta; i. görelî kat ötelenmesi, ii. düşey taşıyıcı elemanlardaki aksenal gerilme düzeyi, iii. kesme kuvvetinin düşey taşıyıcı elemanlara yatay rijitlikleriyle orantılı dağıtılmasıyla belirlenen iç kuvvet etki/kapasite oranları risk değerlendirmesinde dikkate alınmaktadır. Tüm işlemler bir Excel hesap tablosunda otomatik işlem serisi olarak programlanmıştır. Farklı taşıyıcı sistem özelliklerine sahip binalarda, önerilen yaklaşımın sonuçları ile doğrusal ve doğrusal olmayan üç boyutlu hesap modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak uyumlu oldukları gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Mevcut betonarme bina, deprem riski, hızlı değerlendirme yöntemi.

### ABSTRACT

#### **An Approach to Rapid Seismic Risk Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings**

*A new approach has been developed for the rapid seismic risk assessment of low-rise reinforced concrete buildings. Some important structural properties are utilized in the calculation performed for only the critical story. By using the design spectral accelerations, base shear demands in the two main directions of the building are attained, single degree of freedom system displacements are calculated, and then it is reached to the relative displacements of the critical story. On the critical story; i. relative story drift, ii. The axial stress intensity in the lateral load-bearing elements, iii. Internal force demand/capacity ratios in the lateral load-bearing elements are considered in the risk assessment. All of the operations are programmed in an Excel spreadsheet.*

---

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - yukselerc@itu.edu.tr

2 Altineller Müh. ve Taah. Ltd. Şti., İstanbul - proje@altinellerltd.com

3 İF Müh. ve Müş. Ltd. Şti., İstanbul - ifmuh@ifmuhendislik.com.tr

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - sahinmehm@itu.edu.tr

*In the buildings with diverse structural properties, the results of the proposed approach were compared with the results obtained using the linear and nonlinear three-dimensional structural models and they were shown to be compatible.*

**Keywords:** Existing reinforced concrete building, seismic risk, rapid assessment method.

## 1. AMAÇ

Betonarme binalarda deprem performansının belirlenmesi için 2018 Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [1] ve Riskli Yapılar Tespit Yönetmeliğinde [2] tanımlanmış farklı düzeylerde “ayrıntılı analiz yöntemleri” bulunmaktadır. Bu yöntemlerin yanında; “bina deprem riskinin” daha az zaman ve kaynak kullanarak yaklaşık olarak belirlenmesi konusu, 1999 Depremlerinden bu yana güncelliğini koruyan bir araştırma ve uygulama alanı olmuştur. Mevcut betonarme binaların deprem güvenliklerinin belirlenmesi için ülkemizde farklı çalışmalar yapılmıştır [3-6].

Kamu ve özel sektör kuruluşları ile belediyeler tarafından, birim zamanda daha çok sayıdaki binada daha az emek, zaman ve bütçe harçayarak deprem riskinin gerçekçi olarak belirlenmesi talep edilebilmektedir.

Deprem riski tayin edilecek binanın taşıyıcı sistem projeleri ya da oluşturulacak taşıyıcı sistem rölevellerinden yararlanılarak, deprem etkisindeki davranışını temsil eden *kritik katı* üzerinde deterministik bir yaklaşımla uygulanabilecek bir “*hızlı değerlendirme yaklaşımı*” geliştirilmesi amaçlanmıştır [7].

Bina deprem riskinin tayininde kullanılan temel büyüklüklerin belirlenmesi konusunda önerilen yaklaşımın başarısının irdelenmesi için, seçilen üç farklı betonarme binada ayrıntılı hesap modeli oluşturularak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar yapmak bu bildirinin kapsamını oluşturmaktadır.

## 2. HIZLI DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMININ ve EXCEL YAZILIMININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Önerilen yaklaşım, incelenen binanın “*kritik katında*” yaklaşık iç kuvvet ve yerdeğiştirme hesapları yapmakta; Riskli Yapılar Yönetmeliğinde [2] tanımlanan sınır değerlere göre “*kritik kat için*” karşılaştırmalar gerçekleştirerek *can güvenliği bakımından* binanın *sismik risk durumunu* belirlemektedir. Önerilen yaklaşımın Riskli Yapılar Yönetmeliğinde [2] tanımlanan hesap yönteminden farkı, incelenen taşıyıcı sisteme ait hesap modelini oluşturmadan sadece “*kritik kat*” düşey taşıyıcı elemanlarındaki iç kuvvet ve görelî ötelenmelerin yaklaşık yollar ile belirlenerek, değerlendirilmede kullanılmasıdır.

Çalışılacak binanın bulunduğu bölgenin depremselliği Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [1] kapsamındaki deprem tehlike haritaları kullanılarak belirlenmektedir. Zemin özellikleri bina dokümanlarından, mevcut değilse sahadan veya dolaylı yollardan temin edilmektedir.

Önerilen yaklaşım, deprem etkisindeki davranışı birinci titreşim modu tarafından kontrol edilen az katlı (10 kata kadar) çerçeve ve perde-çerçeve türü taşıyıcı sistemlere sahip betonarme binalar için geliştirilmiştir.

Bina kritik katı için yapılan hesaplarda aşağıdaki “*temel büyüklükler*” belirlenmekte ve sınır değerler ile karşılaştırılmaktadır:

- i. görelî kat ötelenmesi,
- ii. düşey taşıyıcı elemanlardaki eksenel gerilme düzeyi,



- iii. kritik kata etkiyen kesme kuvvetinin düşey taşıyıcı elemanlara dağıtılmasıyla oluşan etki/kapasite oranları,
- iv. yardımcı bilgi olarak; binanın yapım yılı ve proje detayları dikkate alınarak seçilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı ( $R$ ) kullanılarak eşdeğer deprem yükünün ( $F=cW$ ) belirlenmesi ve düşey elemanlar tarafından taşınabilirliğinin kontrolü,

Donatı akma dayanımı; *bina yaşı*, *bilgi toplama düzeyi* ve *sınırlı düzeydeki donatı korozyonunun etkisini* temsil etmek üzere 0.86 katsayısı ile çarpılarak kullanılmaktadır. Orta düzeydeki korozyon durumunda çarpan 0.75 olmaktadır.

Beton dayanımı için proje değerinin alınması durumunda, projedeki karakteristik dayanım 1.4 katsayısına bölünerek kullanılmaktadır. Deneysel çalışma mevcutsa; örnek sayısı sınırlı olduğunda gerçekleşen en küçük dayanım, örnek sayısı fazla ise istatistik hesaplama belirlenen basınç dayanımı esas alınmaktadır.

Geliştirilen “*hızlı değerlendirme yaklaşımının*” farklı binalarda uygulanması için bir *Excel Hesap Tablosu* oluşturulmuştur. Her bina için bağımsız bir tablo düzenlenmektedir. Hesap tablosunda yeşil renk ile işaret edilen hücrelere bina bilgileri kullanıcı tarafından girilmektedir. Bu bilgiler arasında binanın coğrafi konumu, kat sayısı, kat alanları, kolon ve perde sayısı, kritik ve diğer kat yükseklikleri, her iki doğrultudaki yatay yük taşıyıcı sistem tipleri, kontrole esas beton basınç ve çekme dayanımları, kolon boyuna ve enine donatılarının karakteristik dayanımları, donatıların korozyon durumu, kolonlarda sargı donatısı sıklaştırması olup olmadığı, perdelerde uç bölgesi teşkil edilip edilmediği ve yerel zemin sınıfı bilgileri yer almaktadır.

Oluşturulan Excel hesap tablosunun “*Kontrol*” sayfasında, kritik kattaki her düşey taşıyıcı eleman (kolon, perde ve eşdeğer birleşik perde) için bir satır açılmaktadır. Düşey taşıyıcı elemanlar için isim, boyut, düşey yük etki alanı, konum rijitlik düzeltme çarpanı, eğilme rijitlik çarpanı, binanın iki ana doğrultusu için boyuna ve enine donatı alanları ile aralıkları girilmektedir.

Bina deprem riskinin tanımlanması için 100 tam puan üzerinden bir puanlama sistemi geliştirilmiştir [7]. Puanlama sisteminde dikkate alınan ölçütler aşağıda sıralanmıştır:

- Yerel zemin sınıfı
- (Kritik kat görelî ötelenme istemi) / (Kolon ve perdeler için  $(\delta/h_k)$  sınır değeri)
- Ortalama aksenal gerilme oranı ( $G+nQ$ ) ( $\leq 0.65$ )
- (Yetersiz kolon ve perdelerin taşıdığı kesme kuvvetleri toplamı) / (Kat kesme kuvveti)
- (Sünek davranış için gereken kolon kesme kapasitesi + perde kesme kapasitesi) / (Kat kesme kuvveti ( $R$  ile hesaplanan)) ( $V_p / V_e$ )
- (Gevrek kırılma ihtimali olan kolon ve perde elemanların taşıdığı kesme kuvvetleri toplamı) / (Kat kesme kuvveti) ( $V_{e_{gevrek}} / V_{e_{kat}}$ )
- Taşıyıcı sistemi değerlendiren mühendisin puanı

Binanın bu ölçütlerden aldığı puanlar öngörülen ağırlık katsayıları ile birleştirilerek “*bina toplam puanı*” elde edilmekte ve %25 lik dilimlere göre “*bina risk sınıfı*” tanımlanmaktadır.

### 3. HIZLI DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMININ HESAP ADIMLARI

Geliştirilen hızlı değerlendirme yaklaşımının önemli hesap adımları aşağıda sıralanmıştır:

- a) Binanın iki ana doğrultusundaki etkin titreşim periyotlarının tahmin edilmesinde TBDY-2018 [1] de verilen  $T = C_t H_N^{3/4}$  bağıntısı kullanılmıştır. Bağıntıdaki  $C_t$  katsayısı *görece*

zayıf betonarme çerçevelerde 0.11, betonarme çerçevelerde 0.10, görece zayıf perdeli çerçeve sistemlerde 0.08, perde-çerçeve taşıyıcı sistemlerde (az perdeli) 0.07, kuvvetli perde çerçeve taşıyıcı sistemlerde 0.05 ve perdelerin etkin olduğu taşıyıcı sistemlerde 0.05 olarak alınmaktadır.  $H_N$  bina toplam yüksekliğini göstermektedir. Bağıntı ile hesaplanan sonuç 1.25 katsayısı ile büyütülerek, Riskli Yapılar Yönetmeliğinin [2] tanımladığı *çatlamış kesit rijitlikleri* kullanılarak elde edilen *hakim titreşim periyotlarına* ulaşılmaktadır.

- b) Türkiye Deprem Tehlike Haritası kullanılarak, binanın koordinatlarına ve yerel zemin özelliklerine göre elastik ivme spektrumu elde edilmektedir. Bina hakim titreşim periyotlarına karşı gelen elastik spektral ivme büyüklükleri ( $S_a$ ) belirlenmektedir.
- c) Titreşime katılan bina kütlesi ( $m$ ) hesaplanmaktadır. Kütle hesabı,  $G$  özağırlık,  $Q$  hareketli yük ve  $n$  hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan “ $G+nQ$ ” yüküne bağlı olarak yapılmaktadır.
- d) Titreşime katılan bina kütlesi ( $m$ ) ile iki ana doğrultuda hesaplanan elastik spektral ivme büyüklükleri ( $S_a$ ) çarpılarak elastik taban kesme kuvvetlerine ( $F$ ) geçilmektedir.
- e) Bina tepe yatay yerdeğiştirmesi ( $\Delta_{tepe}$ ) ile kritik kat yatay yerdeğiştirmesi ( $\delta_{kritik\ kat}$ ) tek serbestlik dereceli sistem benzeşimiyle ATC40 [8] ve FEMA440 [9] a uygun olarak aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır. (4) ve (5) nolu bağıntılarda kullanılan  $\alpha_m$  ve  $\phi$  çarpanları için uygun aralıklar tanımlanmıştır.  $n_{kat}$  bina kat sayısını göstermektedir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K^*}} \quad (1)$$

$$F = S_a \times m = K^* \times S_d \quad (2)$$

$$S_d = F / K^* \quad (3)$$

$$\Delta_{tepe} = S_d \times \alpha_m \quad (4)$$

$$\delta_{kritik\ kat} = \frac{\Delta_{tepe}}{n_{kat}} \times \phi \quad (5)$$

- f) Kritik kat için hesaplanan kat kesme kuvveti, düşey taşıyıcı elemanlar (kolonlar, perdeler ve eşdeğer bütünleşik perdeler) arasında paylaştırılarak *eleman kesme kuvvetlerine* geçilmektedir. Paylaşım işlemi, çerçeve ve perdelerin yaklaşık yatay rijitlikleri esas alınmaktadır. Kolon ve perdelerde *çatlamış kesit rijitlikleri* kullanılmaktadır. L, T ve U kesitli perdelerin *eğilme ve kayma kapasiteleri*, eşdeğer genişlikli dikdörtgen kesitlere benzetilerek hesaplanmaktadır.
- g) Kolon alt ve üst uç görelî bağlantı rijitlikleri katsayılar ile temsil edilmektedir. Seçilen katsayıların doğrulanmasına yönelik olarak gerçekleştirilen sayısal çalışmalardan, yeter güvenlikte sonuç üretilebildiği görülmüştür.
- h) Kritik katta gerçekleştirilen kontrol hesaplarına *plandaki burulma etkisi* de dahil edilmiştir. Düşey taşıyıcı elemanların yatay rijitlikleri dikkate alınarak *kat rijitlik merkezi* hesaplanmaktadır. Kütle merkezi ile kat rijitlik merkezi arasındaki mesafeden hareketle kata etkileyen *burulma momenti* hesaplanmaktadır. Burulma momenti düşey taşıyıcı

elemanlara yatay rijitlikleri oranında dağıtılmaktadır. Burulmadan oluşan eleman kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetinden oluşan kesme kuvvetleri ile toplanarak hesaba devam edilmektedir.

- i) “ $G+nQ$ ” yüklemesinden dolayı *deprem hesabında kullanılacak bina düşey ağırlığı* hesaplanmaktadır. Bu ağırlık, düşey taşıyıcı elemanlara *yaklaşık yük etki alanlarıyla* orantılı olarak dağıtılmaktadır. Hesaplanan eksenel kuvvetler, eleman enkesit alanına bölünerek *eleman basınç gerilmelerine* geçilmektedir. Kritik katta yer alan tüm düşey taşıyıcı elemanlar için hesaplanan basınç gerilmeleri toplamı düşey taşıyıcı eleman sayısına bölünerek ulaşılan sayı, 0.65 sınır değeriyle karşılaştırılmaktadır. 0.65 sınırının aşılması durumunda, kritik katın herhangi bir düşey taşıyıcı elemanında *etki/kapasite sınır değeri* aşıldığında, başka bir kontrole gerek kalmadan binanın riskli olduğu (*Eksenel Basınç Kırılması Riski*) sonucuna varılmaktadır.
- j) Eksenel basınca maruz dikdörtgen kesitli ve simetrik donatılı betonarme kolon elemanlarda *eğilme momenti taşıma kapasiteleri* ( $M_{Px}, M_{Py}$ ) hazır formüller kullanılarak hesaplanmaktadır.
- k) Kolon elemanların her iki ucunun plastikleşmesi durumunda oluşacak kesme kuvvetleri, iki ana doğrultu için  $V_{Px} = 2 \times M_{Px} / h_k$  ve  $V_{Py} = 2 \times M_{Py} / h_k$  formülleri ile hesaplanmaktadır. Burada  $h_k$  kritik kat yüksekliğini göstermektedir.
- l) Kolon ve perdelerin kesme kuvveti taşıma kapasiteleri ( $V_r$ ) hesaplanarak  $V_{Px}$  ve  $V_{Py}$  büyüklükleri ile karşılaştırılmaktadır.
- m) Düşey taşıyıcı elemanlarda deprem etkisinde oluşacak eğilme momentleri, daha önce belirlenen kesme kuvvetlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Burada, kolonlar için sabit 1.20 katsayısı kullanılırken, perdeler için perde-çerçeve kesme kuvveti oranına bağlı olarak değişen  $\phi$  katsayısı kullanılmaktadır.
- n) Kolon ve perdelerde *etki/kapasite oranları* ( $m_x, m_y$ ) hesaplanmaktadır.
- o) Kritik kattaki kolon ve perdelerde, ( $G+nQ \pm E/2$ ) yüklemesinden elde edilen  $V_e$  ile ( $G+nQ \pm E$ ) yüklemesinden elde edilen kesme kuvvetlerinin ( $m_x, m_y$ )’e bölünmesiyle belirlenen  $V_e$  büyüklüklerinden küçüğü kullanılarak,  $V_e/V_r$  oranları hesaplanmaktadır.  $E$  deprem yükleme durumunu,  $V_r$  eleman kesme kuvveti taşıma kapasitesini göstermektedir.
- p) Kolon ve perdelerde Riskli Yapılar Yönetmeliğine [2] uygun olarak eleman sınıflandırması (A, B, C) yapılmaktadır.
- q) Kolon ve perdelerde ( $m_{sınır}$ ) ve  $(\delta/h)_{sınır}$  sınır değerlerinin tayini için gerekli olan büyüklükler hesaplanmaktadır. Bunlar, kolonlar için sargı donatısı hacimsel yüzdesi  $A_{sh} / (s \times b_k)$ , perdeler için  $V_e / (b_w \times d \times f_{ctm})$  değerleridir.
- r) ( $m_{sınır}$ ) ve  $(\delta/h)_{sınır}$  sınır değerleri, Riskli Yapılar Yönetmeliğinde [2] verilen tablolardan seçilmektedir. Ara değerler lineer interpolasyon ile belirlenmektedir. Riskli Yapılar Yönetmeliğinde [2] yer alan sınır değer tablolarında; kolonlarda, sargı donatısının hacimsel yüzdesi  $A_{sh} / (s \times b_k)$  ve basınç gerilmesi  $N / (A_c \times f_{ck})$  esas alınırken görelî yerdeğiştirme istemi dikkate alınmamıştır. Pratik tecrübelerden hareketle, görelî yerdeğiştirme isteminin sınır değerlerin altında kaldığı binalarda etki/kapasite sınır değerlerinin bir miktar artırılabilceği öngörülmüştür. Riskli Yapılar Yönetmeliğinden [2] alınan sınır değerlerin bir miktar büyütülmesi için, 1.0-1.50 aralığındaki  $\omega$  çarpanı tanımlanmıştır. Bu durumun kullanılabilmesi için, kritik kattaki ortalama eksenel gerilme düzeyinin  $(N / (A_c \times f_{ck}) \leq 0.40)$  olması şartı öngörülmüştür.

- s) Binanın her iki doğrultusu için, kolon ve perdelerde hesaplanan *etki/kapasite oranları* ile sınır değerler karşılaştırarak yetersiz kolon ve perdeler tespit edilmektedir. Yetersiz düşey taşıyıcı elemanların taşıdığı kesme kuvvetleri toplamının ilgili doğrultudaki kat kesme kuvvetine oranı hesaplanmakta ve Riskli Yapılar Yönetmeliğinde [2] verilen sınırlar ile karşılaştırılmaktadır.
- t) Bina risk durumunun belirlenmesi için, farklı ölçütlerden alınan puanlar öngörülen ağırlık katsayıları ile birleştirilerek “*bina toplam puanı*” elde edilmektedir. Dört risk sınıfı (kırmızı, turuncu, sarı ve yeşil) tanımlanmıştır, Şekil 1. Sınıfların puan aralıkları; 1. Derece Riskli Bina (0-25 puan), 2. Derece Riskli Bina (26-50), 3. Derece Riskli Bina (51-75) ve Güvenli Bina (76-100) olarak düzenlenmiştir.

Yapısal Güvenlik Tanımı	Puan	Renk
<b>1. Derece Riskli Bina</b> (2018 Deprem Yönetmeliğine göre can güvenliği performans hedefi sağlanmıyor. En kısa vadede eyleme geçilmelidir.) Binanın acilen boşaltılması ya da kullanımı zaruri ise yerinde yapılacak ayrıntılı inceleme sonucuna göre, tüm taşıyıcı sistemi ilgilendiren kapsamlı ve büyük ölçekli güçlendirme çalışması gerekmektedir.	0-25	Kırmızı
<b>2. Derece Riskli Bina</b> (2018 Deprem Yönetmeliğine göre can güvenliği performans hedefi sağlanmıyor. Kısa-orta vadede eyleme geçilmelidir.) Can Güvenliği Performans Hedefinin sağlanabilmesi için, yerinde yapılacak ayrıntılı inceleme sonucuna göre büyük ölçekli güçlendirme çalışması (yeterli sayıda perde ilavesi ve/veya kolon mantolanması) yapılması gerekmektedir.	26-50	Turuncu
<b>3. Derece Riskli Bina</b> (Uygulanan hızlı değerlendirme yöntemi sonucuna göre can güvenliği performans hedefi sağlanmıyor. Ancak ayrıntılı inceleme yapıldığında can güvenliği performans hedefi sağlanabilir. Uygulanan hızlı değerlendirme yöntemi sonucunda güçlendirme önerisi yapılamayan binalar için aşağıdaki iki aşamalı yol izlenecektir. 1-Binanın kesin performans düzeyinin belirlenebilmesi için, yerinde yapılacak ayrıntılı inceleme sonucuna dayalı performans analizi gerçekleştirilecektir. 2-İlk aşama sonucunda yetersizlik durumu söz konusu ise, orta ölçekli güçlendirme çalışması (sınırlı sayıda perde ilavesi ve/veya kolon mantolanması) yapılması gerekmektedir.	51-75	Sarı
<b>Güvenli Bina</b> (2018 Deprem Yönetmeliğine göre can güvenliği performans hedefi sağlanıyor.) Yapısal elemanlarda sınırlı hasar oluşabilir, toptan veya bölgesel göçme riski yoktur.	76-100	Yeşil

Şekil 1 - Önerilen Hızlı Değerlendirme Yaklaşımında Kullanılan Puanlama Sistemi

#### 4. GELİŞTİRİLEN YAKLAŞIMIN DOĞRULANMASINA YÖNELİK ÖRNEK BİNA İNCELEMELERİ

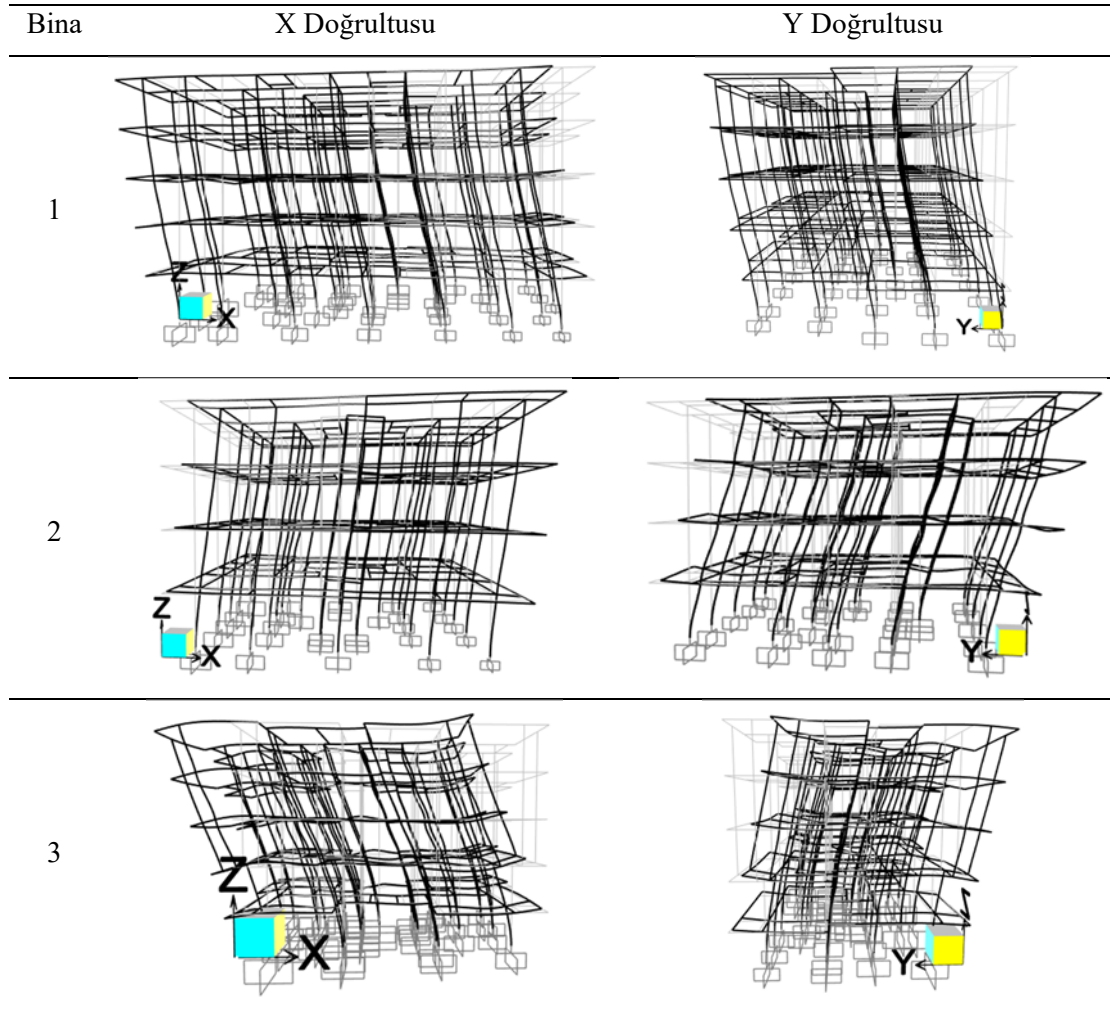
Geliştirilen *hızlı değerlendirme yaklaşımının* doğrulanmasına yönelik çalışmalar iki ana grupta toplanmıştır:

Birinci gruptaki çalışmalar; İstanbul’da farklı yıllarda inşa edilmiş olan ve tasarım projeleri bulunan üç betonarme bina üzerinde gerçekleştirilmiştir [7]. Üç boyutlu doğrusal analiz sonuçları ile önerilen yaklaşımın “*kritik kat*” için ürettiği iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu makalede, birinci grupta yer alan çalışmalar sunulmaktadır.

İkinci grupta ise farklı özelliklere sahip betonarme binalar için 2018 Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) [1] tanımlanmış doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda; i) Üç katlı mevcut betonarme bina, geliştirilen hızlı değerlendirme yaklaşımı ile değerlendirildiğinde “76.5” puan olarak “*Güvenli Bina*” sınıfına girmiştir. TBDY-2018 e [1] göre uygulanan doğrusal elastik hesap

yönteminde “Kontrollü Hasar (KH)” performans seviyesi sağlanamazken, yığılı plastik mafsallı kabulü ile 11 adet deprem kaydı ile zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde “Kontrollü Hasar (KH)” performans seviyesi sağlanmıştır, [10], ii) 30 Ekim 2020 Sisam Depreminde İzmir Bayraklı’da toptan göçen binalardan beşi üzerinde uygulanan hızlı değerlendirme yaklaşımında tüm binaların “0” puan aldığı ve “1. Derece Riskli Bina” sınıfına girdikleri tespit edilmiştir. Bu binalar için, bölgedeki AFAD istasyonlarından alınan ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizlerde de “Göçme Durumu” elde edilmiştir [11].

Birinci grupta yer alan çalışmalarda; İstanbul’da bulunan üç adet binanın üç boyutlu doğrusal hesap modelleri oluşturulmuş, çatlama kesit rijitlikleri esas alınarak *serbest titreşim analizleri*, *eşdeğer deprem yükü yöntemi* ve *mod birleştirme yöntemi* ile deprem hesapları yapılarak “kesin sonuçlar” elde edilmiştir, Şekil 2.

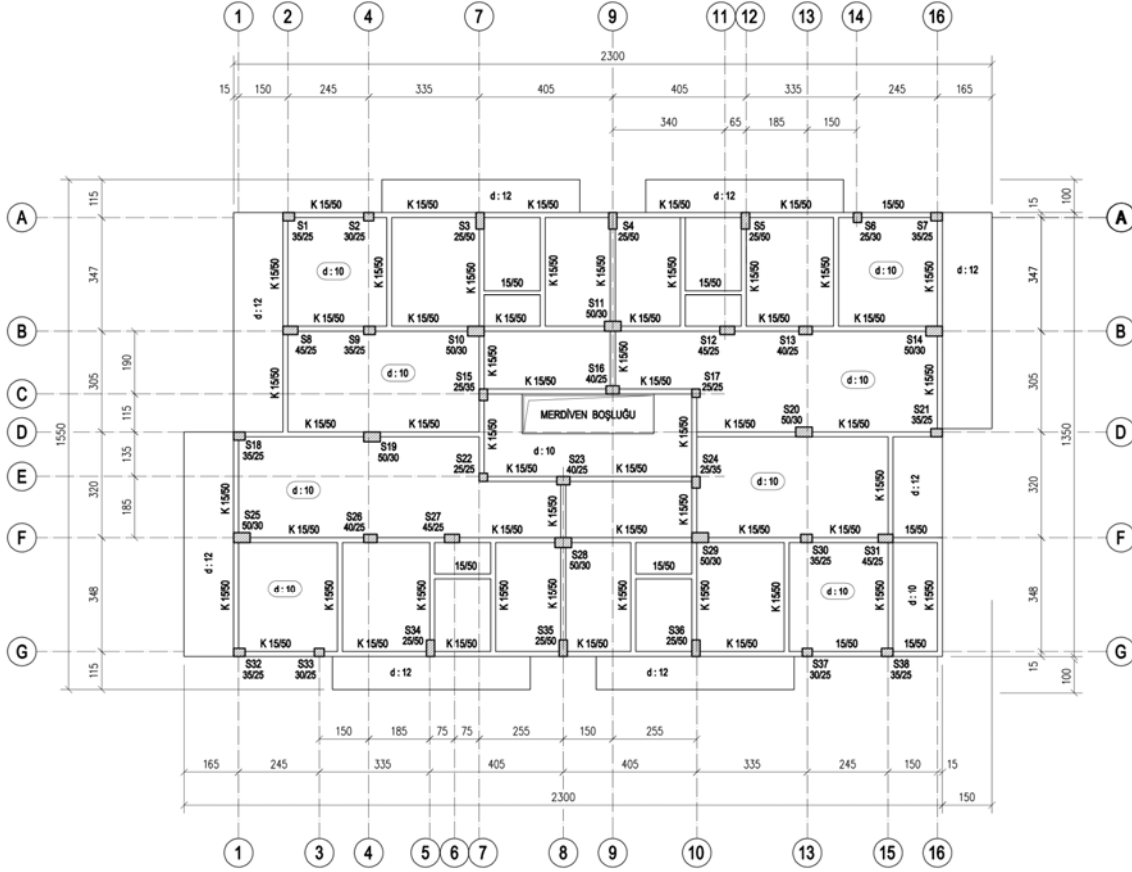


Şekil 2 - İncelenen Binaların Üç Boyutlu Hesap Modelleri ve Etkin Titreşim Modları

Önerilen hızlı değerlendirme yaklaşımı Excel yazılımı yardımıyla bu binalara uygulanmış ve elde edilen sonuçlar “kesin sonuçlar” ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan büyüklükler arasında her iki doğrultudaki hakim serbest titreşim periyotları, taban kesme kuvvetleri, bina tepe yerdeğiştirmesi, kritik kat göreceli yerdeğiştirmeleri, kolon ve perde iç kuvvetleri bulunmaktadır.

#### 4.1. Bina-1 (Maltepe-Küçükyalı, çerçeve taşıyıcı sistem)

1972 yılında inşa edilmiş, her iki doğrultuda çerçeve taşıyıcı sisteme sahip betonarme bina 1 bodrum kat + zemin kat + 3 normal kat olmak üzere toplam 5 katlıdır, Şekil 3. Bodrum kat tümüyle toprak üstünde olduğundan *kritik kat* 1. bodrum kat olarak seçilmiştir.

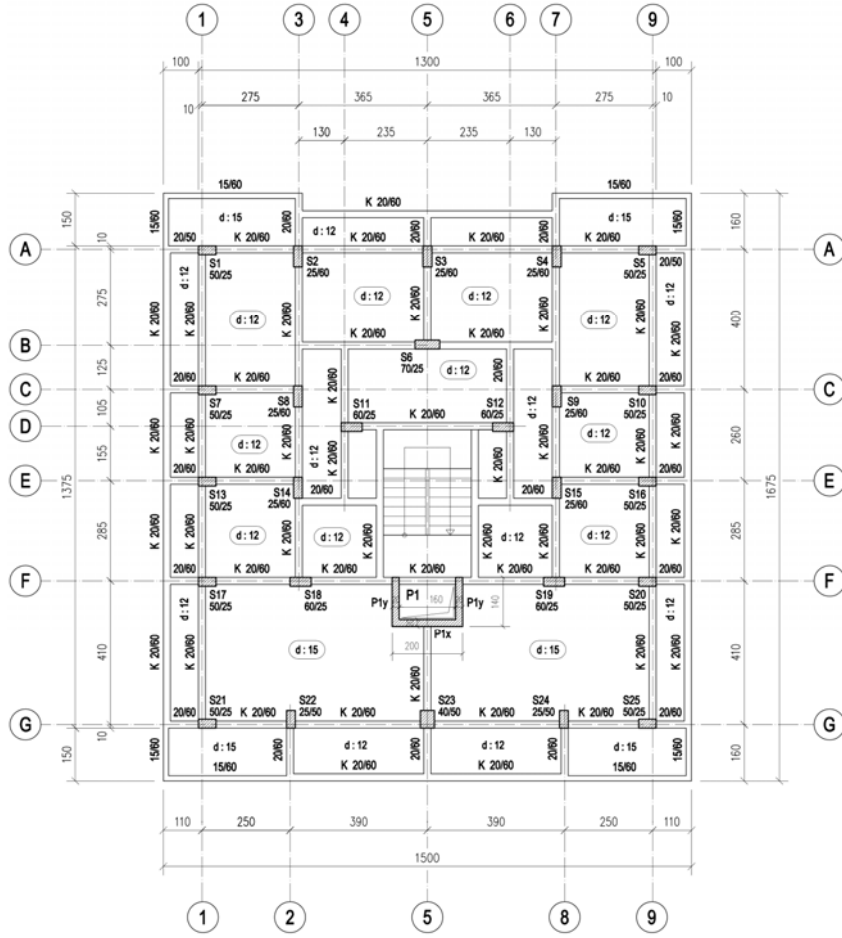


Şekil 3 - Bina-1 Bodrum Kat Tavanı Kalıp Planı

Kolonların yerleşim şekli ve oluşturulan çerçeve durumlarına bağlı olarak, taşıyıcı sistemin iki doğrultudaki yatay rijitliği farklıdır. Bu durum hakim titreşim periyodlarına yansımıştır. Beton basınç dayanımı 8 MPa olarak belirlenmiştir. Kolonlarda kullanılan donatı çeliği S220 olup, karşı gelen karakteristik akma dayanımı öngörülen 0.87 katsayısı kullanılarak 191 MPa olarak alınmıştır. Düşey taşıyıcı elemanlarda enine donatı sıklaştırması yoktur. Etriye çapı 8 mm, aralıkları da projeye uygun olarak 20 cm olarak göz önüne alınmıştır. Yerel zemin sınıfı olarak, binanın bulunduğu bölgeye ait önceki bilgilerden ZC seçimi yapılmıştır.

#### 4.2 Bina-2 (Bostancı-Çatalçeşme, perde-çerçeve taşıyıcı sistem)

İki doğrultuda asansör perdesi ve çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 1984 yılında inşa edilmiş betonarme bina, 1 Bodrum kat + zemin kat + 3 normal kat olmak üzere toplam 5 katlıdır, Şekil 4. Binanın bodrum katının büyük bölümü simetrisi de sağlanmış olarak toprak altında bulunduğu rijit bodrum kat olarak kabul edilmiştir. Titreşime katılan kat sayısı 4 ve *kritik kat* olarak zemin kat dikkate alınmıştır.



Şekil 4 - Bina-2 Zemin Kat Tavanı Kalıp Planı

Beton basınç dayanımı olarak 10 MPa değeri kullanılmıştır. Bina kolon ve perdelerinde kullanılan donatı çeliği S220 olup, karşı gelen karakteristik dayanım öngörülen 0.87 katsayısı kullanılarak 191 MPa olarak alınmıştır. Düşey taşıyıcı elemanlarda enine donatı sıklaştırması olmayıp; etriye çapı 8 mm, etriye aralıkları da projeye uygun olarak 20 cm olarak hesaba katılmıştır. Asansör perdesinin uçlarında 8 mm çaplı sargı donatısı bulunmaktadır. Yerel zemin sınıfı olarak, binanın bulunduğu bölgeye ait önceki bilgilerden ZC seçimi yapılmıştır.

#### 4.3. Bina-3 (Kadıköy-Acıbadem, perde çerçeve taşıyıcı sistem)

İki doğrultuda perde ve çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 1988 yılında inşa edilmiş betonarme bina, 2 Bodrum kat + zemin kat + 3 normal kat olmak üzere toplam 6 katlıdır, Şekil 5.

Binanın 2. bodrum katı bütünüyle toprak altında bulunduğu için rijit bodrum kat olarak kabul edilmiştir. Titreşime katılan kat sayısı 5 olarak alınmıştır. Beton basınç dayanımı olarak 12 MPa değeri kullanılmıştır. Kolon ve perdelerde kullanılan donatı çeliği S220 olup, karşı gelen karakteristik dayanım öngörülen 0.87 katsayısı kullanılarak 191 MPa olarak alınmıştır. Etriye çapı, kolonlarda 8 mm iken perdelerde ve perde tipi kolonlarda 10 mm dir. Kolonlarda enine donatı sıklaştırması olmayıp, etriye aralıkları projedekine uygun olarak 20 cm alınmıştır. Asansör perdesinin uçlarında 8 mm çaplı sargı donatısı mevcuttur. Yerel zemin sınıfı olarak binanın bulunduğu bölgeye ait önceki bilgilerden ZC seçimi yapılmıştır.





**Tablo 1 - Etkin Titreşim Periyodu Karşılaştırması**

Örnek Bina-	Üç Boyutlu Analiz		Önerilen Yaklaşım	
	$T_x$	$T_y$	$T_x$	$T_y$
	[s]	[s]	[s]	[s]
1	0.94	1.13	0.92	1.01
2	0.52	0.61	0.62	0.62
3	0.63	0.56	0.63	0.63

2. Önerilen yaklaşımla tahmin edilen taban kesme kuvvetleri ile üç boyutlu kesin çözüm sonuçları karşılaştırıldığında (Tablo 2); en büyük farklar *Örnek Bina-1* de %8.8, *Örnek Bina-2* de %18 ve *Örnek Bina-3* de %10.0 olarak elde edilmiştir.

**Tablo 2 - Taban Kesme Kuvveti Karşılaştırması**

Örnek Bina-	Üç Boyutlu Analiz		Önerilen Yaklaşım	
	$V_x$	$V_y$	$V_x$	$V_y$
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
1	6757	5711	6821	6213
2	7426	5984	6090	6090
3	5687	6451	6264	6264

3. Önerilen yaklaşımla tahmin edilen tepe yerdeğiştirmeleri üç boyutlu kesin çözüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında (Tablo 3); *Örnek Bina-1* de farklar %2.2 ve %2.4 düzeyinde gerçekleşmiştir. Fark oranları *Örnek Bina-2* de %15.3 ve %8.1; *Örnek Bina-3* de ise %3.6 ve %6.2 düzeyindedir.

**Tablo 3 - Tepe Yerdeğiştirmesi Karşılaştırması**

Örnek Bina-	Üç Boyutlu Analiz		Önerilen Yaklaşım	
	$(\delta_x)_{tepe}$	$(\delta_y)_{tepe}$	$(\delta_x)_{tepe}$	$(\delta_y)_{tepe}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	124.64	150.60	127.40	154.20
2	73.70	78.60	85.00	85.00
3	80.00	72.60	77.10	77.10

4. Önerilen yaklaşımla elde edilen *kritik kat görelî yerdeğiştirmeleri* üç boyutlu kesin çözüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında (Tablo 4); farkların *Örnek Bina-1* de %9.0 ve %8.2; *Örnek Bina-2* de %8.3 ve %3.7, *Örnek Bina-3* de %3.8 ve %17.4 olduğu görülmüştür.

**Tablo 4 - Kritik Kat Yerdeğiştirme Karşılaştırması**

Örnek Bina-	Üç Boyutlu Analiz		Önerilen Yaklaşım	
	$(\delta_x)_{\text{kritik kat}}$	$(\delta_y)_{\text{kritik kat}}$	$(\delta_x)_{\text{kritik kat}}$	$(\delta_y)_{\text{kritik kat}}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	23.40	28.46	25.50	30.80
2	15.70	16.40	17.00	17.00
3	7.42	6.56	7.70	7.70

5. Örnek Bina-1 in kritik katında kolon kesme kuvveti ve eğilme momenti tahminleri kesin çözüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında (Tablo 5); ortalama göreceli farklar kesme kuvveti için %18, eğilme momenti için de %14 mertebesinde olmuştur.

**Tablo 5 - Örnek Bina-1 in Kritik Katında İç Kuvvet Karşılaştırması**

	SAP2000 MODAL ANALİZ				ÖNERİLEN YÖNTEM				RÖLATİF FARK ORANLARI			
	$V_{ex}$	$V_{ey}$	$M_{ex}$	$M_{ey}$	$V_{ex}$	$V_{ey}$	$M_{ex}$	$M_{ey}$	$V_{ex}$	$V_{ey}$	$M_{ex}$	$M_{ey}$
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[oran]	[oran]	[oran]	[oran]
S1	124.0	92.1	202.8	139.8	91.3	68.2	148.0	110.6	0.263	0.259	0.270	0.209
S2	110.3	56.4	156.7	99.5	82.2	58.5	133.1	94.8	0.255	0.037	0.150	0.048
S3	113.0	300.3	168.6	588.2	95.1	390.0	154.1	631.8	0.158	0.299	0.086	0.074
S4	111.8	300.8	167.6	587.4	95.1	390.0	154.1	631.8	0.149	0.297	0.080	0.076
S5	115.0	280.9	170.4	568.5	95.1	390.0	154.1	631.8	0.173	0.388	0.096	0.111
S6	84.5	69.1	116.1	131.2	57.1	84.2	92.4	136.5	0.324	0.219	0.204	0.040
S7	114.6	91.3	194.4	138.1	91.3	68.2	148.0	110.6	0.203	0.253	0.239	0.199
S8	212.2	124.4	382.9	185.2	194.1	125.4	314.5	203.1	0.085	0.007	0.179	0.097
S9	164.5	64.7	238.5	115.1	130.5	68.2	211.4	110.6	0.207	0.055	0.114	0.039
S10	342.8	238.7	622.9	353.7	456.5	240.7	739.6	389.9	0.332	0.008	0.187	0.102
S11	351.9	237.0	630.8	351.7	456.5	240.7	739.6	389.9	0.297	0.015	0.172	0.109
S12	268.5	75.6	432.6	140.4	277.3	87.7	449.3	142.2	0.033	0.161	0.039	0.012
S13	213.2	71.7	326.4	128.7	277.3	87.7	449.3	142.2	0.301	0.224	0.376	0.104
S14	274.6	209.9	562.9	326.2	319.6	240.7	517.7	389.9	0.164	0.147	0.080	0.195
S15	77.2	194.1	116.1	284.3	66.6	191.1	107.9	309.6	0.137	0.015	0.071	0.089
S16	191.2	112.9	306.7	166.0	194.8	78.0	315.6	126.4	0.019	0.309	0.029	0.239
S17	65.9	73.8	92.6	106.6	47.6	48.7	77.0	79.0	0.279	0.340	0.168	0.259
S18	113.8	104.7	193.2	151.2	91.3	97.5	148.0	157.9	0.197	0.069	0.234	0.045
S19	315.3	178.2	597.9	300.2	319.6	168.5	517.7	272.9	0.013	0.055	0.134	0.091
S20	319.0	99.6	601.1	227.8	319.6	168.5	517.7	272.9	0.002	0.692	0.139	0.198
S21	117.6	104.5	196.6	149.9	91.3	97.5	148.0	157.9	0.223	0.067	0.247	0.054
S22	66.1	74.1	92.6	107.0	47.6	48.7	77.0	79.0	0.280	0.342	0.168	0.262
S23	190.6	112.0	306.0	165.3	194.8	78.0	315.6	126.4	0.022	0.304	0.031	0.236
S24	77.8	191.2	116.6	281.0	66.6	191.1	107.9	309.6	0.144	0.001	0.075	0.102
S25	267.8	217.2	555.2	335.6	319.6	240.7	517.7	389.9	0.193	0.108	0.067	0.162
S26	207.6	113.6	320.8	167.1	194.8	78.0	315.6	126.4	0.062	0.314	0.016	0.244
S27	267.2	88.5	430.4	152.5	277.3	87.7	449.3	142.2	0.038	0.008	0.044	0.068
S28	349.9	236.2	627.4	351.2	456.5	240.7	739.6	389.9	0.305	0.019	0.179	0.110
S29	347.0	235.4	624.8	349.9	456.5	240.7	739.6	389.9	0.316	0.023	0.184	0.114
S30	165.4	63.3	238.8	113.1	130.5	68.2	211.4	110.6	0.211	0.078	0.115	0.022
S31	224.4	124.4	392.6	183.8	194.1	125.4	314.5	203.1	0.135	0.008	0.199	0.105
S32	119.1	93.9	197.4	141.5	91.3	68.2	148.0	110.6	0.233	0.273	0.250	0.218
S33	109.4	54.9	155.3	98.2	82.2	58.5	133.1	94.8	0.249	0.066	0.143	0.035
S34	111.6	289.2	166.7	578.8	95.1	390.0	154.1	631.8	0.148	0.349	0.075	0.092
S35	112.2	299.9	167.1	587.1	95.1	390.0	154.1	631.8	0.152	0.300	0.078	0.076
S36	113.3	297.2	168.1	583.5	95.1	390.0	154.1	631.8	0.160	0.312	0.084	0.083
S37	110.2	55.2	156.0	97.8	82.2	58.5	133.1	94.8	0.255	0.060	0.147	0.031
S38	119.6	89.2	197.8	136.3	91.3	68.2	148.0	110.6	0.236	0.235	0.252	0.189
	6760.0	5716.0	11391.3	9669.2	6820.7	6212.8	11049.5	10064.7	0.183	0.177	0.142	0.119
	<b>6760.0</b>	<b>5716.0</b>	<b>11391.3</b>	<b>9669.2</b>	<b>6820.7</b>	<b>6212.8</b>	<b>11049.5</b>	<b>10064.7</b>				

6. *Örnek Bina-2* de, binanın yatay yükler etkisindeki davranışında etkili olan perdede oluşan kesme kuvveti ve eğilme momentlerinde gerçekleşen göreceli farkların en büyüğü %9 olmuştur, Tablo 6. Toplam kesme kuvvetine göre göreceli farklar; X doğrultusundaki deprem için, o doğrultudaki kolonlarda %13.3, perdede %2.9, dik doğrultudaki kolonlarda %3.9 olmuştur. Y doğrultusundaki deprem için; bu oranlar sırasıyla %21.1, %3.5 ve %3.5 olarak elde edilmiştir.

**Tablo 6 - Örnek Bina-2 nin Kritik Katında İç Kuvvet Karşılaştırması**

	SAP2000 MODAL ANALİZ				ÖNERİLEN YÖNTEM						RÖLATİF FARK ORANLARI			
					BURULMASIZ KESME KUVVETLERİ		BURULMALI KESME KUVVETLERİ		MOMENTLER					
	VeX	VeY	MeX	MeY	VeX	VeY	VeX	VeY	MeX	MeY	VeX	VeY	MeX	MeY
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[oran]	[oran]	[oran]	[oran]	
S1	254.3	59.4	484.6	91.7	79.3	38.9	177.5	38.9	303.6	66.5	0.302	0.345	0.373	0.274
S2	136.2	225.5	205.5	456.6	34.0	268.9	76.1	268.9	130.1	459.8	0.441	0.192	0.367	0.007
S3	121.0	225.0	190.7	456.0	34.0	268.9	76.1	268.9	130.1	459.8	0.371	0.195	0.318	0.008
S4	136.2	225.5	205.5	456.6	34.0	268.9	76.1	268.9	130.1	459.8	0.441	0.192	0.367	0.007
S5	254.3	59.4	484.6	91.7	79.3	38.9	177.5	38.9	303.6	66.5	0.302	0.345	0.373	0.274
S6	468.7	98.5	979.4	142.5	310.8	77.8	429.5	77.8	734.5	133.0	0.084	0.210	0.250	0.066
S7	196.0	74.5	364.5	105.7	79.3	55.6	109.6	55.6	187.4	95.0	0.441	0.254	0.486	0.101
S8	101.1	315.5	150.8	537.2	34.0	384.1	47.0	384.1	80.3	656.8	0.535	0.218	0.468	0.223
S9	101.1	315.5	150.8	537.2	34.0	384.1	47.0	384.1	80.3	656.8	0.535	0.218	0.468	0.223
S10	196.0	74.5	364.5	105.7	79.3	55.6	109.6	55.6	187.4	95.0	0.441	0.254	0.486	0.101
S11	265.4	81.4	529.6	119.5	195.7	66.7	271.6	66.7	464.5	114.0	0.023	0.181	0.123	0.046
S12	265.4	81.4	529.6	119.5	195.7	66.7	271.6	66.7	464.5	114.0	0.023	0.181	0.123	0.046
S13	160.0	73.6	288.6	104.9	79.3	55.6	109.2	55.6	186.8	95.0	0.317	0.245	0.353	0.094
S14	81.0	315.0	118.1	536.9	34.0	384.1	46.8	384.1	80.0	656.8	0.422	0.219	0.322	0.223
S15	81.0	315.0	118.1	536.9	34.0	384.1	46.8	384.1	80.0	656.8	0.422	0.219	0.322	0.223
S16	160.0	73.6	288.6	104.9	79.3	55.6	109.2	55.6	186.8	95.0	0.317	0.245	0.353	0.094
S17	128.9	75.3	212.7	106.4	79.3	55.6	70.4	55.6	120.5	95.0	0.453	0.262	0.434	0.107
S18	231.2	82.1	373.2	119.9	195.7	66.7	173.9	66.7	297.4	114.0	0.248	0.188	0.203	0.049
S19	231.2	82.1	373.2	119.9	195.7	66.7	173.9	66.7	297.4	114.0	0.248	0.188	0.203	0.049
S20	128.9	75.3	212.7	106.4	79.3	55.6	70.4	55.6	120.5	95.0	0.453	0.262	0.434	0.107
S21	56.8	57.4	80.7	89.9	79.3	38.9	-6.3	38.9	10.7	66.5	0.890	0.323	0.867	0.260
S22	36.2	82.6	38.0	221.8	28.3	155.6	-2.2	155.6	3.8	266.1	0.938	0.883	0.899	0.200
S23	74.8	112.2	96.7	335.3	116.0	249.0	-9.2	249.0	15.7	425.7	0.877	1.219	0.838	0.270
S24	36.2	82.6	38.0	221.8	28.3	155.6	-2.2	155.6	3.8	266.1	0.938	0.883	0.899	0.200
S25	56.8	57.4	80.7	89.9	79.3	38.9	-6.3	38.9	10.7	66.5	0.890	0.323	0.867	0.260
P1X	3282.0	0.0	14173.0	0.0	3796.9	0.0	3450.3	0.0	14258.2	0.0	0.051	*	0.006	*
P1Y	0.0	1295.0	0.0	4572.0	0.0	1178.6	0.0	1178.6	0.0	4870.6	*	0.090	*	0.065
P2Y	0.0	1295.0	0.0	4572.0	0.0	1178.6	0.0	1178.6	0.0	4870.6	*	0.090	*	0.065
	3958.6	3320.3	6959.6	5914.7	2297.2	3736.9	2643.8	3736.9	4610.6	6390.0				
	3282.0	2590.0	14173.0	9144.0	3796.9	2357.2	3450.3	2357.2	14258.2	9741.2				
	7240.6	5910.3	21132.6	15058.7	6094.1	6094.1	6094.1	6094.1	18868.8	16131.2				

7. *Örnek Bina-3* de, binanın yatay yükler etkisindeki davranışında etkili olan çekirdek perdede oluşan kesme kuvveti ve eğilme momentlerinde gerçekleşen göreceli farkların en büyüğü %11.4 olmuştur, Tablo 7. Toplam kesme kuvvetine göre göreceli farklar; X doğrultusundaki deprem için, o doğrultudaki kolonlarda %17.9, perdede %11.5, dik doğrultudaki kolonlarda %1.7 olarak gerçekleşmiştir. Y doğrultusundaki deprem için; bu oranlar sırasıyla %12.8, %11.3 ve %1.3 olarak ortaya çıkmıştır.
8. *Örnek Bina-1* “12” puan olarak “1. Derece Riskli Bina”; *Örnek Bina-2* “64.5” puan olarak “3. Derece Riskli Bina” ve *Örnek Bina-3* “82” puan olarak “Güvenli Bina” sınıfına girmiştir.
9. Üç boyutlu ayrıntılı analiz verileriyle uyumlu aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:
- a. *Örnek Bina-1* de göreceli kat ötelenmesi kontrolü sağlamamaktadır. Tüm kolonlarda eğilme kapasiteleri aşılmaktadır.

- b. *Örnek Bina-2* de görelî kat ötelenmesi kontrolü sağlanırken, eğilme kapasitesi aşılın kolonların oranı bir doğrultuda %0.0, diğér doğrultuda %6 olmuştur.
- c. *Örnek Bina-3* de görelî kat ötelenmesi kontrolü sağlanmakta ve eğilme kapasitesi aşılın kolonların oranı bir doğrultuda %29, diğér doğrultuda %30 olmuştur.

**Tablo 7 - Örnek Bina-3 ün Kritik Katında İç Kuvvet Karşılaştırması**

	SAP2000 ANALİZ				ÖNERİLEN YÖNTEM				RÖLATİF FARK ORANLARI			
	KESME KUVVETLERİ		MOMENTLER		KESME KUVVETLERİ		MOMENTLER					
	VeX	VeY	M <sub>ex</sub>	M <sub>ey</sub>	VeX	VeY	M <sub>ex</sub>	M <sub>ey</sub>	V <sub>ex</sub>	V <sub>ey</sub>	M <sub>ex</sub>	M <sub>ey</sub>
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[oran]	[oran]	[oran]	[oran]	
S1	154.9	87.9	367.8	279.6	305.7	167.1	621.3	299.9	0.974	0.901	0.689	0.073
S2	79.8	46.9	110.7	190.2	77.3	118.3	157.1	212.4	0.031	1.523	0.419	0.117
S3	79.9	71.3	110.8	244.7	77.3	118.3	157.1	212.4	0.032	0.660	0.418	0.132
S4	157.3	136.9	369.8	385.3	305.7	167.1	621.3	299.9	0.943	0.220	0.680	0.222
S5	15.9	132.7	39.2	246.2	31.3	98.6	63.6	177.0	0.965	0.257	0.623	0.281
S6	24.9	136.9	47.1	259.0	31.3	98.6	63.6	177.0	0.256	0.280	0.353	0.317
S8	103.2	114.4	134.9	250.2	77.3	169.0	157.1	303.4	0.251	0.477	0.165	0.213
S10	93.8	143.6	126.8	301.9	77.3	169.0	157.1	303.4	0.175	0.177	0.239	0.005
S12	165.2	59.7	336.0	88.4	216.5	42.3	439.9	75.8	0.311	0.292	0.309	0.142
S13	171.3	56.4	259.4	80.8	179.0	35.2	363.7	63.2	0.045	0.375	0.402	0.217
S14	150.7	33.0	242.1	62.4	179.0	35.2	363.7	63.2	0.188	0.067	0.502	0.013
S15	152.9	83.0	243.9	107.6	179.0	35.2	363.7	63.2	0.171	0.576	0.491	0.413
S16	169.8	67.3	258.2	95.9	179.0	35.2	363.7	63.2	0.054	0.477	0.409	0.341
S17	164.5	77.7	335.5	114.1	216.5	42.3	439.9	75.8	0.316	0.456	0.311	0.335
S18	164.9	102.6	441.9	295.7	305.7	167.1	621.3	299.9	0.854	0.628	0.406	0.014
S21	164.0	151.8	441.0	394.4	305.7	167.1	621.3	299.9	0.864	0.101	0.409	0.240
P1	44.8	550.1	62.8	1965.0	10.8	640.7	22.0	2779.3	0.758	0.165	0.650	0.414
P2	45.6	684.6	63.6	2263.8	10.8	640.7	22.0	2779.3	0.763	0.064	0.654	0.228
S7-P	371.0	33.0	941.6	43.1	274.9	6.3	1350.1	11.2	0.259	0.810	0.434	0.739
S9-P	35.8	525.8	49.6	1022.6	7.6	281.7	15.5	1221.9	0.787	0.464	0.687	0.195
S11-P	375.4	42.7	945.0	55.8	274.9	6.3	1350.1	11.2	0.268	0.853	0.429	0.799
S19-P	73.9	320.1	105.1	959.7	14.9	281.7	30.3	1221.9	0.798	0.120	0.711	0.273
S20-P	73.7	371.3	104.9	1070.7	14.9	281.7	30.3	1221.9	0.798	0.241	0.711	0.141
P3X	2651.3	0.0	8071.0	0.0	2911.7	0.0	7150.4	0.0	0.098	*	0.114	*
P3Y	0.0	1195.3	0.0	3767.4	0.0	1229.6	0.0	3555.8	*	0.029	*	0.056
P3Y	0.0	1228.6	0.0	3854.1	0.0	1229.6	0.0	3555.8	*	0.001	*	0.077
	2012.8	1502.0	3865.2	3396.4	2743.4	1665.5	5575.5	2989.4				
	3671.4	4951.4	10343.6	15002.2	3520.5	4598.4	9970.6	16358.5				
	5684.2	6453.4	14208.8	18398.6	6263.9	6263.9	15546.1	19348.0				

## 6. SONUÇLAR

Mevcut betonarme binaların deprem risklerinin belirlenmesi için, sadece “binanın kritik katında” yapılan yaklaşık hesaplara dayanan bir hızlı değerlendirme yaklaşımının geliştirildiği bu çalışmada, aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1- Mevcut deprem riskinin belirlenmesi için; görelî kat ötelenmesi, düşey taşıyıcı elemanlardaki eksenel gerilme düzeyi, düşey taşıyıcı elemanlarda iç kuvvet etki/kapasite oranları ve diğér bazı ölçütler dikkate alınarak; puanlama, genel değerlendirme ve sınıflandırma yapılmaktadır.
- 2- Değerlendirmede yardımcı bilgi olarak, binanın yapım yılı ve proje detaylarına uygun olarak seçilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı (*R*) kullanılarak hesaplanan eşdeğer deprem yükünün düşey taşıyıcı elemanlar tarafından taşınabilirliği de irdelenmektedir.
- 3- Önerilen yaklaşım kullanılarak; taşıyıcı sistem özellikleri farklı üç binanın deprem riski, üç boyutlu ayrıntılı doğrusal analiz sonuçları ile uyumlu olarak elde edilmiştir.

- 4- Taşıyıcı sistemin bütünü için hesap modeli oluşturmadan sadece *kritik katın* değerlendirilmesi esasına dayanan “*hızlı değerlendirme yaklaşımının*” başarısı, taşıyıcı sistem özelliklerinin yeter doğrulukta tanımlanabilmesine bağlıdır. Gerçekçi taşıyıcı sistem planlarına ulaşılması ve malzeme özelliklerinin tanımlanması, yaklaşımın başarı oranını artırmaktadır.
- 5- Farklı binalardan elde edilecek tecrübelerle dayalı olarak, “*hızlı değerlendirme yaklaşımı*” ve Excel Hesap Tablosuna ilave özellikler katılması esnekliği bulunmaktadır.

### Kaynaklar

1. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (TBDY-2018), Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar.
2. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar, 2019, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
3. Tezcan, S.S., Gürsoy, M. ve Kaya, E. (2002) “Depremde Can Kaybını Önleme Projesinin Tek Sorumlusu Devlettir”, Dünya İnşaat Dergisi, 2002-07, 107-111.
4. Sucuoğlu, H., Gür, T and Günay, M.S., (2004). “Performance-based Seismic Rehabilitation of Damaged Reinforced Concrete Building”, Journal of Structural Engineering, ASCE 130, 10, 1475-1486.
5. Bal, İ.E., Tezcan, S.S. ve Gülay, F.G. (2007) “Betonarme Binaların Göçme Riskinin Belirlenmesi İçin P25 Hızlı Değerlendirme Yöntemi”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 661-673.
6. İlki, A., Cömert, M., Demir, C., Orakcal, K., Ulugtekin, D., Tapan, M. And Kumbasar, N. (2014) “Performance-based Rapid Seismic Assessment Method (PERA) for Reinforced Concrete Frame Buildings”, Advances in Structural Engineering, 17 (3), 439-459.
7. Altıneller Müh. ve Taah. Ltd. Şti. ve İF Müh. Ltd. Şti., “Türkiye İş Bankası Bina Stoğunda Bulunan Bazı Betonarme Hizmet Binalarının Mevcut Deprem Risklerinin Hızlı Değerlendirme Yaklaşımıyla Belirlenmesi İçin Geliştirilen Yöntem Hakkında Teknik Rapor”, 2020.
8. ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Vol.1. Applied Technology Council. 555 Twin Dolphin Drive. Suite 550 Redwood City, California 94065.
9. FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Applied Technology Council (ATC-55 Project) 201 Redwood Shores Parkway, Suite 240 Redwood City, California 94065.
10. Gökçe, T., Karayel, V., Çalım, F., Rifai, Ş., Şahin, F., Yüksel, E., “Betonarme Binaların Mevcut Deprem Performansının Belirlenmesi İçin TBDY-2018’ de Önerilen Doğrusal Hesap Yönteminin Uygulanması Üzerine Bir İrdeleme”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, *Değerlendirmede*.
11. Yüksel, E., “30 Ekim 2020 Sisam Depreminde İzmir’de Toptan Göçen Betonarme Binaların Analizi ve Mevcut Konut Stoku İçin Bir Öneri”, İzmir Deprem Çalıştayı, IZDEP’22, 31 Ekim 2022, İzmir.



# GFRP Donatı ile Güçlendirilmiş Betonarme Döşemelerin Zımbalama Dayanımının Makine Öğrenmesi ile Belirlenmesi

Gamze DOĞAN<sup>1</sup>, Musa Hakan ARSLAN<sup>2</sup>

## ÖZET

Kirişsiz döşemelerde kolon yakın çevresinde meydana gelebilecek olan zımbalama kaynaklı kesme hasarının önlenmesi oldukça önemli bir konudur. Literatürde kirişsiz döşemelerin zımbalama dayanımının artırılması amacıyla Fiber Takviyeli Donatı (FRP) kullanılarak çeşitli deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kolon şekli ve boyutu, zımbalama çevresi, döşemenin faydalı yüksekliği, kullanılan FRP'nin mekanik özellikleri ve miktarı ve betonun basınç dayanımı gibi oldukça farklı parametrelerin sonuç üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) donatı ile üretilen 63 adet zımbalamadan hasar görmüş döşeme deney verisi toplanmıştır. Toplanan verilerde parametreler düzenlenmiş ve makine öğrenmesi algoritmalarından Aşırı Gradyan Artırma (Extreme Gradient Boosting-XGBoost) algoritması kullanılarak döşemelerin zımbalama dayanımlarına yönelik tahmin modeli geliştirilmiştir. Verilerdeki her bir parametrenin etkisi ile makine öğrenme algoritmasının sonuca yakınsama performansının test edildiği çalışmada ayrıca ACI 440 ve literatürdeki diğer yaklaşımların zımbalama dayanımını ne ölçüde tahmin ettiği yorumlanarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan  $R^2$ , MAE ve RMSE başarı metriklerine göre GFRP donatı ile güçlendirilmiş döşemelerde zımbalama dayanım tahmini XGBoost algoritması kullanılarak %85,46; 83,13 ve 123,62 oranında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) Donatı, Betonarme Döşeme, Zımbalama Dayanımı, Makine Öğrenmesi.

## ABSTRACT

### **Determining Puncing Shear Strength of RC Slabs with GFRP Reinforcement by Machine Learning**

It is a very important issue to prevent shear damage caused by punching, which may occur in the immediate vicinity of the column in non-beamed slabs. In the literature, various experiments have been carried out using FRP (Fiber Reinforced Polymers) in order to increase the punching

---

1 Konya Teknik Üniversitesi, Konya - gdogan@ktun.edu.tr

2 Konya Teknik Üniversitesi, Konya - mharslan@ktun.edu.tr

strength of beamless slabs. In experimental studies, it has been observed that quite different parameters such as column shape and size, punching circumference, useful height of the slab, mechanical properties, and amount of FRP used, and compressive strength of concrete influence the result. In this study, 63 experimental data for slabs damaged by punches produced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) reinforcement were collected. The parameters were arranged in the collected data and create a prediction model to determined punching shear strength of the slabs was developed by using the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm, one of the machine learning algorithms. In the study, in which the effect of each parameter in the data and the convergence performance of the machine learning algorithm were tested, it was also interpreted and compared to what extent ACI 440 and other approaches in the literature predict the punching strength. According to the  $R^2$ , MAE and RMSE metrics used in the study, the punching strength estimation for slabs reinforced with GFRP reinforcement was 85.46%; 83.13 and 123.62 were obtained by using the XGBoost algorithm.

**Keywords:** Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), RC slab, punching shear strength, machine learning.

## 1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün en önemli problemlerinden biri donatı çeliğinin korozyona uğramasıdır [1,2]. Bu durum betonarme yapılarda zaman alıcı ve yüksek maliyetli bakım, onarım ve güçlendirme işlemleri uygulanmasını gerektirmekte ve bu tür yapıların kullanılabilirlik sürelerinin kısılmasına neden olmaktadır. Betonarme yapılarda ortaya çıkan bu tür problemlerden dolayı, polimer lifli donatıların (FRP) yapılarda kullanılması alternatif bir çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde FRP donatılar inşaat sektöründe; hafiflik, yüksek dayanım, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliğinin olmaması gibi avantajlarından dolayı kullanılmaya başlanmıştır. FRP donatısı, çelik donatıya göre daha yüksek çekme dayanımlı bir malzeme olmasının yanında daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Betonarme yapılarda döşeme sistemi olarak sıklıkla tercih edilen kirişsiz döşemelerde de düşük pas payının da etkisiyle zamana bağlı sebeplerden dolayı betonarme donatısında kapasite kaybı meydana gelmektedir. Bununla beraber kirişsiz döşeme sistemlerinin uygulamalarında en büyük sorunu özellikle alt katlarda bulunan kolonların etrafında oluşabilecek gevrek ve ani bir kırılma mekanizması olan zımbalama etkisidir. Literatürde bu şekilde göçmüş çok sayıda betonarme bina rapor edilmiştir [3, 4].

## 2. AMAÇ

Yapılan çalışmada Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) donatılarla güçlendirilmiş döşemelerde zımbalama dayanımları araştırılmış ve bu dayanımın belirlenmesinde makine öğrenmesi algoritması (Machine Learning-ML) kullanılarak pratik bir tahmin yapılmıştır. ML algoritmalarından ise literatürde en güncel uygulanan Aşırı Gradyan Artırma (Extreme Gradient Boosting-XGBoost) model seçilmiştir. Çalışmada ayrıca ACI 440.1R-15 [5] ve literatürdeki diğer yaklaşımların zımbalama dayanımını ne ölçüde tahmin ettiği de yorumlanarak karşılaştırılmıştır.

## 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Veri Tabanının Elde Edilmesi

Betonarme döşemelerin kesme hasarına karşı zafiyetini giderebilmek için çok farklı yöntemler olmakla beraber günümüzde bunların en popüler olanları FRP bar uygulaması ile kesme kapasitesinin artırılmasıdır. Kirişsiz döşemelerde zımbalama dayanımının hesaplanmasında



döşeme içinde FRP donatı olması durumunda hesabın nasıl yapılacağına ilişkin literatürde sınırlı sayıda yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar ACI-440.1R-15 [5], CSA S806 [6], BS 8110 [7], JSCE [8] gibi yönetmelikler ve farklı araştırmacıların [9-14] geliştirdiği denklemlerdir.

Kesitin zımbalama dayanımı ( $P_{pr}$ ) kesite gelen tasarım zımbalama kuvvetinden ( $P_{pd}$ ) az ise bu durumda kesitte zımbalama dayanımını artırıcı donatılara ihtiyaç vardır. FRP kompozit donatılar bu anlamda kesitin dayanımına önemli katkıda bulunmaktadır. Literatürde sıklıkla tercih edilen kompozit donatı ile imal edilmiş döşemelerin zımbalama dayanımı bağıntıları Doğan ve Arslan [15] çalışmasında ilgili denklemler ile Tablo 1’de verilmiştir. Kompozit döşemelerin zımbalama dayanımı için geliştirilen denklemlerin ve yönetmeliklerdeki yaklaşımların temelde döşeme içinde kullanılan kompozit donatının elastisite modülüne ( $E_f$ ) ve kompozit donatının alanca yüzde oranına ( $\rho_{ho}$  %) bağlı olduğu görülmektedir. Tablo 1’deki denklemler incelendiğinde; bazı çalışmalarda verilen [7, 9, 13] denklemlerin oldukça yakın olduğu görülmektedir. El-Ghandour ve ark. [10] haricinde tüm denklemlerde kompozit yüzdesel oranı  $\rho_{ho}$  bulunmaktadır. Verilen tüm denklemlerde döşeme kalınlığı  $d$ , zımbalama çevresi  $b_o$ , beton basınç dayanımı  $f_c$ , kompozit elastisite modülü  $E_f$  ve kompozit yüzdesel oranı  $\rho_{ho}$  olarak belirtilmiştir. Döşemelerdeki zımbalama dayanımın tahminine yönelik denklemlerin hepsinde FRP donatı elastisite modülü ile beton elastisite modülünün oranı olan  $n$  katsayısının da kullanıldığı görülmektedir.

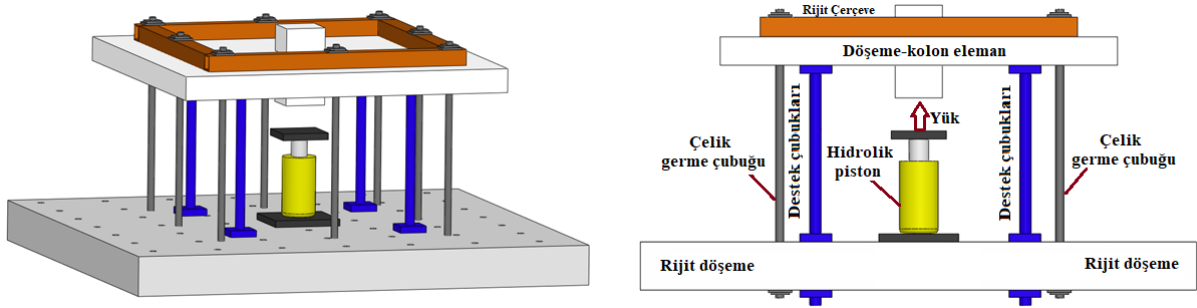
**Tablo 1 - Zımbalama Dayanımı İçin Önerilen Denklemler [15]**

Kaynak	Formül	Açıklama
ACI440 [5]	$P = \frac{4}{5} \sqrt{f_c} b_o c$ $c = kd$ $k = \sqrt{2\rho_{ho}n_f + (\rho_{ho}n_f)^2 - \rho_{fho}n_f}$	$b_o$ = döşemeler ve temeller için kritik kesit çevresi $c$ = çatlamış kesit eksen deriliği $\rho_{ho}$ = FRP donatı oranı $n_f$ = modüler oran ( $E_f/E_s$ )
BS8110 [7]	$P = 0.79 \left[ 100\rho_{ho}(1.8) \frac{E_f}{E_s} \right]^{1/3} \left[ \frac{400}{d} \right]^{1/4} \left[ \frac{f_c}{25} \right]^{1/3} b_o d$	
El-Ghandour ve ark. [10]	$P = 0.33 \sqrt{f_c} \left[ \frac{E_f}{E_s} \right]^{1/3} b_o d$	$b_o = 4(c + d)$
Matthys and Taerwe, [9]	$P = 1.36 \frac{\left[ 100\rho_{ho} \frac{E_f}{E_s} f_c \right]^{1/3}}{d^{1/4}} b_o d$	$b_o = 4(c + 3d)$ $f_c = 28$ günlük silindirik numunelerinin ortalama beton basınç dayanımı
Ospina ve ark. [13]	$P = 2.77 (\rho_{ho} f_c)^{1/3} \left[ \frac{E_f}{E_s} \right]^{1/2} b_o d$	$b_o = 4(c + 3d)$
Zaghloul [14]	$P = 0.007 (\rho_{ho} f_c E_f)^{1/3} b_o d$	$b_o = 4(c + d)$

Bu bildiriye ilgili formüllerin sonuçlarının irdelenmesi amacıyla literatürden bir çok araştırmacının test sonuçlarına erişilmiş ve parametrelere göre test sonuçları derlenmiştir. Çalışmada toplam 63 adet birbirinden farklı döşeme deneyi verileri [10, 13, 16-27] ilgili kaynaklardan erişilerek derlenmiştir. Veri setin için seçilen parametreler ve parametrelerin değişim aralıkları Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 1’de deneylerde kullanılan yükleme düzeneği ve numune şematik olarak gösterilmiştir.

**Tablo 2** - Veri tabanında bulunan zımbalama kesme tasarım parametrelerinin dağılımı

Parametreler	Birim	Veri aralığı
Kolon tipi	----	Kare-Dikdörtgen
Kolon alanı ( $A_p$ )	( $\text{mm}^2$ )	6400 ~202500
Kritik kesit boyutu ( $b_o$ )	(mm)	676~2936
Faydalı yükseklik ( $d$ )	(mm)	82~284
Beton basınç dayanımı ( $f_c$ )	(MPa)	26~118
FRP Elastisite modülü ( $E_f$ )	(GPa)	28.4~68
FRP Donatı oranı ( $\rho_{ho}$ )	%	0.18~3.78

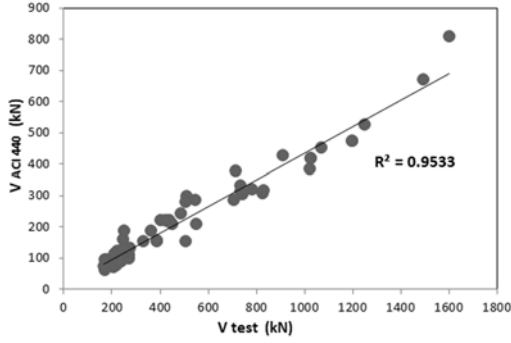


**Şekil 1** - Deney yükleme düzeneği ve numune şematik görüntüsü

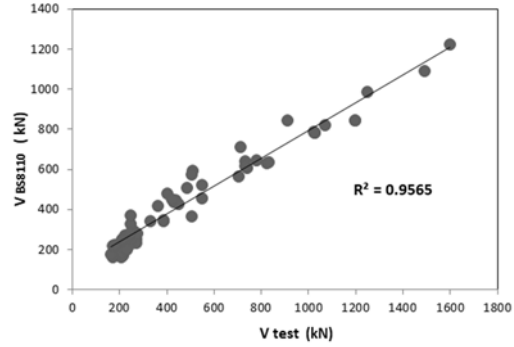
**Tablo 3** - Mevcut denklemlerden hesaplanan  $V_{\text{test}}$  değerleri için  $R^2$  değeri (%)

Kaynak	$R^2$ (%)
ACI440 [5]	95.33
BS8110 [7]	95.65
El-Ghandour ve ark. [10]	88.12
Matthys and Taerwe, [9]	95.65
Ospina ve ark. 2003 [13]	96.92
Zaghloul 2003 [14]	97.12
Average	94.79

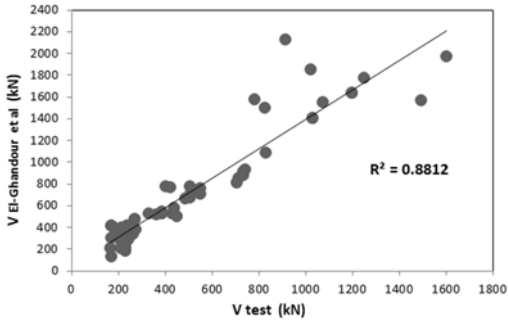
Döşemelerde zımbalama dayanımının ( $V_{test}$ ) belirlenmesi ile ilgili Tablo 1’de verilen literatürdeki yaklaşımların derlendiği denklemler ile dayanım hesapları yapılmış ve elde edilen değerler deneysel çalışmadan gelen dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde Tablo 1’de yer alan yaklaşımların GFRP katkılı betonarme döşemelerin zımbalama dayanımının belirlenmesinde deneysel verilerle ne kadar yakınsadığı sonucuna bakılarak bu çalışmadan elde edilen yöntem ile kıyaslanmıştır. Deneysel  $V_{test}$  ve denklemlerden bulunan  $V_{test}$  değerleri korelasyon değeri olan “ $R^2$  score” üzerinden kıyas edilmiş ve literatürdeki yaklaşımın tahmin başarısı oranı Tablo 3’te verilmiştir. Her bir çalışma için  $R^2$  grafikleri ise Şekil 2-Şekil 7’de gösterilmiştir.



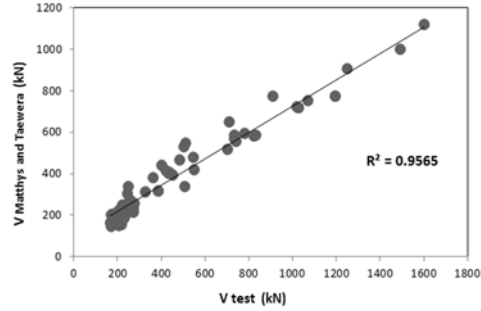
Şekil 2 - GFRP ile İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (ACI 440 [5] ile kıyaslama)



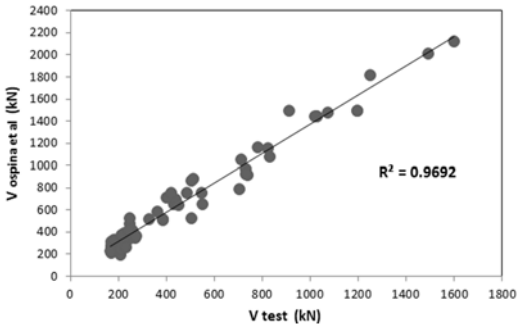
Şekil 3 - GFRP ile İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (BS 8110 [7] ile kıyaslama)



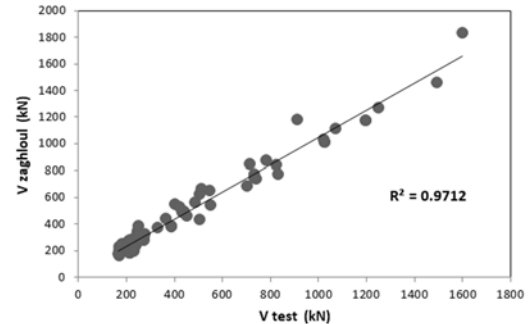
Şekil 4 - GFRP İle İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (El-Ghandour ve ark. [10] ile kıyaslama)



Şekil 5 - GFRP ile İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (Mattys ve Taerwe [9] ile kıyaslama)



Şekil 6 - GFRP ile İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (Ospina ve ark. [13] ile kıyaslama)



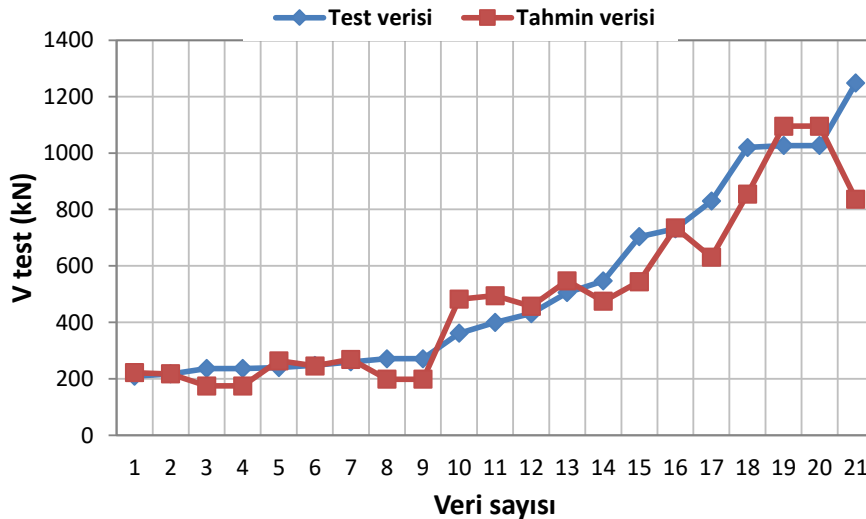
Şekil 7 - GFRP ile İmal Edilmiş Döşemelerde  $R^2$  değerleri (Zaghloul [14] ile kıyaslama)

### 3.2. Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi (ML) insan fizyolojisinde mümkün olan eğitim, öğrenme ve bilgi aktarım süreçlerinin geliştirilen algoritmalar sayesinde makineler üzerinde gerçekleştirilmesi olarak tanımlanır. Bu işlem için veriler aracılığıyla bir eğitim modeli oluşturulup sistemin karar verme niteliği geliştirilir. Böylelikle bir öğrenme sağlanarak daha sonra sisteme benzer veriler sunulduğu zaman başarılı tahmin ya da başarılı bir kategorizasyon yapması beklenmektedir. Bu çalışmada veriler üzerinden tahmin geliştirme üzerinde durulacağı için ML regresyon algoritmalarından Aşırı gradyan artırma (Extreme gradient boosting -XGBoost) modeli kullanılmıştır. XGBoost modeli 2016 yılında Chen ve Guestrin [28] tarafından geliştirilen gradient boosting algoritmasının gelişmiş bir modelidir. Algoritmanın en önemli özelliği verilerde aşırı öğrenme oluşturmayacak şekilde yüksek tahmin gücü ile diğer popüler algoritmalarından 10 kat daha hızlı çalışması gösterilmektedir. Modelin çalışma mantığı ağaç tabanlı algoritmalarda ilk adımda bir tahmin yaparak diğer adımlardaki sonucu iyileştirmeye yöneliktir.

### 3.3. Analitik Çalışma Prosedürü

Bu çalışmada döşemelerin zımbalama dayanım ( $V_{test}$ ) değerinin tahmini için zımbalamadan hasar görmüş döşeme deney verileri üzerinde XGBoost modeli kullanılmıştır. Algoritmanın kodlama işlemi Python 3.7 [29] programında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak gerekli kütüphanelerden Numpy ve Pandas kütüphaneleri veriyi işlemek üzere Python ortamına yüklenmiştir. Veri seti eğitim ve test seti olarak iki parçaya ayrılmaktadır.. Tüm verilerin yaklaşık 2/3 lük bir kısmı eğitim seti olarak 1/3 ü ise test seti olarak “rastgele” ayrılmıştır. GFRP donatı kullanılan toplam 63 verinin 42 adedi eğitim, 21 adeti test seti olarak rastgele ayrılmıştır. Veriler üzerinde eğitim ve tahmin yapabilmek için Sci-Kit Learn (sklearn) kütüphanesi kullanılmıştır. Sklearn kütüphanesinin fit fonksiyonu ile veriler eğitilmiş, predict fonksiyonu ile tahminde bulunulmuştur. Eğitilmiş olan modelin test performansını değerlendirmek için “r2\_score, mean absolute error, root mean square error” metrikleri kullanılmıştır. Tahmin başarısı için “Numpy” dizisi olan gerçek veriler ile “predict” fonksiyonun çalıştığı modelden elde edilen tahmin verileri karşılaştırılmış ve modelin ne kadar başarılı tahmin yaptığı bu metrikler ile sınanmıştır.



Şekil 8 - XGBoost modeli grafiği

GFRP donatılar ile güçlendirilmiş döşemelerde zımbalama deneylerine ait literatürden elde edilen deneysel verilerden zımbalama dayanım değerleri tahmini üzerine XGBoost algoritmasının

kullanıldığı bu çalışmada  $R^2$ , MAE ve RMSE başarı metriklerine göre sırasıyla %85,46; 83,13 ve 123,62 değerleri elde edilmiştir. Verilere ait sonuçlar Şekil 8’de gösterilmiştir. Grafiklerde test verisi olarak kullanılan gerçek deneysel veriler ile tahmin verileri korelasyonu gösterilmiştir.

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada GFRP donatılar ile imal edilmiş betonarme döşemelerin zımbalama dayanımlarının belirlenmesinde makine öğrenmesi algoritmalarında literatürde oldukça yeni olan XGBoost modeli kullanılmıştır. Bu bağlamda 63 adet kirişsiz döşeme deney verisi toplanmıştır. Deneysel verilerin dağılımı incelendiği zaman El-Ghandour et al. [10] yaklaşımının verdiği sonuçların özellikle zımbalama dayanımı 800-1000 kN arasında olan numunelerde yakınsama problemi olduğu görülmektedir. Yaklaşımlar incelendiği zaman sadece El-Ghandour et al. [10] yaklaşımının boyuna donatı oranından ( $\rho_{ho}$ ) bağımsız olması dikkat çekmektedir. Kolon ebatlarının artması ile hasar göreceği yüzey daha da büyüyeceği için zımbalama kesme gerilmesi seviyesi de azalacaktır. Benzer şekilde döşeme kalınlığının artması da aynı etkiye sahiptir. Ayrıca kompozit miktarının belirli bir üst limit değerinden sonra (%3) artık kapasiteye fazla bir katkısının olmayacağı da yine deneylerde gözlemlenmiştir. Bu durumda amprik bağıntılar içinde bulunmamaktadır. Bu özetlenen durumlardan anlaşıldığı üzere; davranışın sadece matematiksel formüllerden ibaret olamayacağı da görülmektedir. Literatürde önerilen modellerin deneysel sonuçlara yakınsama kapasitelerinin sınırlı olması bu parametrelere bağlıdır.

Az sayıda eğitim verisi olmasına karşın XGBoost modeli uygulamada başarılı olmuştur. Bu sonuca göre; araştırmacılar için GFRP donatı kullanılan döşemelerde kolon ve döşeme kesitine ait bilgiler, kullanılan malzeme olarak betonla ilgili bilgiler ve donatı oranı gibi parametrelerin bilinmesi halinde deneysel bir çalışmaya ihtiyaç duyulmaksızın XGBoost algoritması kullanılarak  $V_{test}$  (kN) değeri yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir. Deneysel veri setinin ilerleyen çalışmalarda daha da zenginleştirilmesi önerilen yöntemin başarısına ve etkinliğine olumlu katkı sağlayacaktır.

Makine öğrenmesinde ilgili giriş parametrelerinin sonucuna etkisini gösteren katsayı değerlerini elde etmek mümkündür. Bu çalışma için ileride daha kapsamlı bir veri seti ile geliştirilecek algoritma neticesinde her parametrenin etki yüzdesine göre döşeme zımbalama dayanımının hesabı için yeni bir denklem önerilebilecektir.

Bu çalışmada dikkate alınan kirişsiz döşemelerin davranışının yapı mühendisliğinde önemli bir çalışma alanı olması nedeniyle bu konuda gelecekte özellikle döşemelerin enerji yutma kapasiteleri ve deplasman sünekliklerini de içeren modellerin yapılması önemli sonuçlar verecektir.

#### Kaynaklar

1. Ikehata S., Ishiguro H., Nakano T., Nakamura H., 2020, “Experimental evaluation of punching shear capacity of reinforced concrete slabs with horizon tal crack due to compression rebar corrosion” Structural Concrete. 2020;21:890–904.
2. Said M.E., Hussein A., Hassan A., (2016), “Monitoring the corro-sion process of reinforced concrete flat slab-column connec-tion. CSCE, Resilient Infrastructure”, MAT-708.1-9.
3. Gardner N.J., Huh J., and Chung L., 2002, “Lessons from Sampoong Department Store Collapse”, Cement and Concrete Composites, 24(2), pp.523- 529.

4. Mitchell D., Tinawi R. And Redwood R.G., 1990, “Damage to Buildings Due to the 1989 Loma Prieta Earthquake – A Canadian Code Perspective”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5), pp. 813-834.
5. ACI 440.1R-15, 2015, “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars”, ACI Committee 440.
6. Canadian Standards Association (CSA). Design and construction of building structures with fibre reinforced polymers. CAN/CSA S806– 12. Rexdale, ON (2012). Canada.
7. British Standards Institution, U. (BS 8110), (1997), *Structural Use of Concrete. Part I: Code of Practice for Design and Construction*.
8. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials. *Concrete Engineering*, Series 23, A. Machida, ed. (1997). Tokyo, Japan.
9. Matthys S., Taerwe L., 2000, “Concrete slabs reinforced with FRP grids. II: punching resistance”, *Journal of Composites for Construction* 4 (2000) 154–161.
10. El-Ghandour, A.W., Pilakoutas, K., Waldron, P. (2003) Punching shear behavior of fiber reinforced polymers reinforced concrete flat slabs: experimental study, *Journal of Composites for Construction*, 7 (3), pp. 258-265.
11. Zaghoul A.E., Razaqpur A.G., 2003, “Punching shear behavior of CFRP reinforced concrete flat plates”, in: D. Bruno, G. Spadea, 132 I.M. Metwally R.N. Swamy (Eds.), *Proceedings of the international conference on, composites in construction*, 2003, pp.1–726.
12. El-Gamal, E.F. El-Salakawy, B. Benmokrane, 2005, A New Punching Shear Equation for Two-Way Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars by S., SP-230—50.
13. Ospina C.E., Alexander S.D.B., Cheng J.J.R., 2003, “Punching of twoway slabs with fiber-reinforced polymer reinforcing bars or grids”, *ACI Structural Journal* 100 (2003) 589–598.
14. Zaghoul, A.: Punching Behavior of Cfrp Reinforced Concrete Flat Plate. In: *Proceeding of the International Conference Composites in Construction*, Cosenza, Italy, (2003).
15. Dogan G., Arslan M.H., 2022, Determination of Punching Shear Capacity of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars Using Machine Learning, *Arabian Journal for Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06679-8>.
16. El-Ghandour, A.W.; Pilakoutas, K.; Waldron, P.: New approach for punching shear capacity prediction of fiber reinforced polymer reinforced concrete flat slabs. *ACI J. SP 188–13*, 135–144 (1999).
17. Matthys S., Taerwe L., 2000, “Concrete slabs reinforced with FRP grids. II: punching resistance”, *Journal of Composites for Construction* 4 (2000) 154–161.
18. Hussein A., Rashid I., 2004, “Two-way concrete slabs reinforced with GFRP bars”, *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, Alberta, 2004.
19. Lee, J.H.; Yoon, Y.S.; Mitchell, D.: Improving punching shear behavior of glass fiberreinforced polymer reinforced slabs. *ACI Struct. J.* 106(4), 427–434 (2009).
20. Zhang Q., Marzouk H., Hussein A., 2005, “Preliminary study of highstrength concrete two-way slabs reinforced with GFRP bars”, in: *Proceedings of the 33rd CSCE Annual Conference: General Conference and International History, Symposium*, 2005, pp. 1– 10.

21. El-Gamal, E.F. El-Salakawy, B. Benmokrane, 2005, A New Punching Shear Equation for Two-Way Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars by S., SP-230—50.
22. Ramzy Z., Mahmoud Z., Salma T., 2007, “Punching behavior and strength of two-way concrete slab reinforced with glass-fiber reinforced polymer (GFRP) rebars”, in: Structural Composites for Infrastructures Applications Conference, Hurghada, Egypt.
23. Nguyen-Minh, L. and Rovnak, M. (2012), “Punching Shear Resistance of Interior Gfrp Reinforced Slab-Column Connections”, *J. Compos. Constr.*, 17 (1), 2-13.
24. Hassan, M., Ahmed, E. Benmokrane, B. (2013), “Punching-shear strength of normal and high-strength two-way concrete slabs reinforced with gfrp bars”, *J. Compos. Constr.*, 17(6), 04013003.
25. Dulude, C., Ahmed, E., Benmokrane, B. 2010b. Punching Shear Strength of Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars. Proceedings of the 2nd International Structural Specialty Conference (ISSC-02), CSCE, Winnipeg, MB, Canada, 9-12 June, 10 p.
26. Bouguerra K., Ahmed E.A., El-Gamal S., Benmokrane B., 2011, “Testing of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars”, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3956–3965.
27. Gouda A., El-Salakawy E., 2016, “Punching Shear Strength of GFRP-RC Interior Slab–Column Connections Subjected to Moment Transfer”, *Journal of Composites for Construction*, 20(1).
28. Chen, T., & Guestrin, C., 2016, Xgboost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785-794).
29. Python Programming, Van Rossum, G. & Drake Jr, F.L., 1995. Python reference manual, Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.





# Sismik İzolasyonlu Binalardaki Rafların En Üst Kat Yerdeğiştirmelerinin Sentetik Pulslar ile Değerlendirilmesi

Zafer KANBİR<sup>1</sup>, Z. Metehan KARSLIOğLU<sup>2</sup>, Onur ÇEVİK<sup>3</sup>, Cenk ALHAN<sup>4</sup>

## ÖZET

*Titreşime duyarlı cihazların korunması açısından sismik izolasyonlu binaların performansı değerlendirilirken genelde kat ivme tepkileri dikkate alınsa da, bu cihazların üzerlerine yerleştirildikleri raf sistemlerinin yapısal bütünlüğüne ilişkin kat yerdeğiştirmesi tepkilerini incelemek de önemlidir. Uzun periyotlu pulslar içeren yakın-fay yer hareketlerine karşı hassas olan sismik izolasyonlu binaların analizlerinde puls modelleri sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan Agrawal ve He (2002) puls modelinin yakın-fay kayıtlarını sismik izolasyonlu binalardaki rafların en üst kat yerdeğiştirmeleri açısından temsil etme başarısının incelenmesi amacıyla, sismik izolasyonlu bir bina ve içindeki rafın zaman tanım alanındaki analizleri tarihsel bir deprem kaydı ve onun sentetik karşılığı etkisinde yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Sismik izolasyon, yer hareketi puls modeli, raf yerdeğiştirmesi, titreşime duyarlı cihazlar.

## ABSTRACT

### *Evaluation of the Top Floor Displacements of Racks in Seismically Isolated Buildings by Synthetic Pulses*

*Although floor acceleration responses are generally taken into account when evaluating the performance of seismically isolated buildings for the protection of vibration sensitive devices, it is also important to examine the rack floor displacement responses related to the structural integrity of the rack systems on which these devices are placed. Pulse models are frequently used in the analyses of seismically isolated buildings that are particularly sensitive to the near-fault ground motions with long-period pulses. In this study, in order to examine the success of the widely used Agrawal and He (2002) pulse model in representing the near-fault records in terms*

---

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul - zafer.kanbir@iuc.edu.tr

2 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul - zmetehans@gmail.com

3 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul - onurcevik04@hotmail.com

4 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul - cenkalan@iuc.edu.tr

*top-floor displacements of racks in seismically isolated buildings, time history analyses of a seismically isolated building with a rack inside are conducted under a historical earthquake record and its synthetic counterpart and the results are compared.*

**Keywords:** *Seismic isolation, ground motion pulse model, rack displacement, vibration-sensitive equipment.*

## **GİRİŞ**

Geleneksel yapı teknolojisinde binalar ankastre mesnetlerle zemine sabitlenmektedir. Bu durum yer kabuğunda deprem nedeniyle oluşan titreşimlerin olduğu gibi üst yapıya geğmesine neden olmaktadır. Sismik izolasyon tekniği, yatayda sağladığı esneklik sayesinde yerdeğiştirmelerin izolasyon katı seviyesinde toplanmasını sağlayarak üst yapının deprem titreŐimlerinden yalıtılmasını sağlar [1]. Sismik izolasyon tekniği konusunda elde edilen deneyimin zamanla artması ve maliyetlerin azalmasıyla, bu teknik git gide daha popöler hale gelmekte ve sismik izolasyonlu yapı sayısı artmaktadır. Mevcut sismik izolasyonlu binaların maruz kaldığı depremlerde gösterdikleri performans ise bu tür yapıların avantajlarının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır [2]. Bu teknik, binaların doğal titreşim periyodunu uzatmak ve sönümlenen enerjiyi arttırmak suretiyle kat ivmeleri ve görelî kat ötelemelerini azalttığı için titreşime duyarlı cihazların korunması açısından da etkili yöntemlerden biridir. Özellikle uzak fay depremlerinin etkisindeki binalarda bulunan titreşime duyarlı cihazların korunmasında sismik izolasyon çok etkili iken, yapılan bazı çalışmalarda, yakın-fay depremlerinin etkisinde bulunan sismik izolasyonlu binalardaki titreşime duyarlı cihazların korunmasının görece zor olduğu ortaya koyulmuştur [3]. Bu nedenle, sismik izolasyonlu yapılar ve bunların içerisinde bulunan titreşime duyarlı cihazların deprem etkisi altındaki davranışları incelenirken yakın-fay etkilerinin dikkate alınması önem arz etmektedir.

Bir depremde fay düzlemine yakın bölgelerde kaydedilen ve uzun periyotlu hız pulsları içeren kayıtlar yakın-fay deprem kayıtları olarak tanımlanmaktadır [4]. Yapısı gereği doğal titreşim periyotları uzun olan ve bu nedenle yakın-fay deprem kayıtlarına karşı daha hassas olan yüksek yapılar, asma köprüler ve sismik izolasyonlu binalar gibi yapıların deprem etkisi altındaki davranışları incelenirken kullanılmak üzere çok sayıda yakın-fay deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle geniş kapsamlı parametrik çalışmalar, çeşitli özelliklerde çok daha fazla sayıda yakın-fay deprem kaydının kullanılmasını gerektirmektedir. Ancak tarihi depremlerde kaydedilmiş yakın-fay deprem kayıtlarının sayısı bu ihtiyacı karşılamakta yeterli değildir. Yakın-fay deprem kayıtlarında öne çıkan uzun periyotlu hız pulslarının zaman tanım alanındaki eşlenik puls modelleriyle simüle edilebilir olmaları sayesinde [5], bu ihtiyacın karşılanması için çeşitli araştırmacılar tarafından sentetik puls modelleri geliştirilmiştir [6-8]. Bunlar arasında yer alan, kolay kullanımı ve etkin analitik yapısıyla öne çıkan Agrawal ve He [7] puls modeli yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Titreşime duyarlı cihazların korunması açısından sismik izolasyonlu binaların performansı değerlendirilirken genelde kat ivme tepkileri dikkate alınsa da, bu cihazların güvenliği açısından üzerlerine yerleŐtirildikleri raf sistemlerinin yapısal bütünlüğünün de korunması gerekmektedir. Söz konusu rafların yapısal güvenliği yerdeğiştirme tepkileri ile doğrudan ilişkili olduğundan, bu tür raf sistemlerinin kat yer değiştirmelerin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu tür çalışmalarda, tarihi yakın-fay deprem kayıtlarını temsilen puls modelleri kullanılarak oluşturulacak sentetik yer hareketi kayıtlarının kullanılabilmesi, bu sentetik kayıtların tarihi deprem kayıtlarını ne kadar iyi temsil edebildiğine bağlıdır.

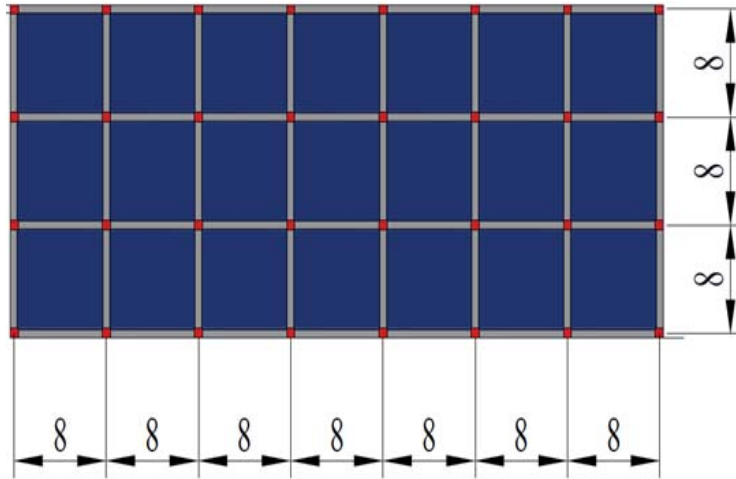
## AMAC

Bu çalışmada, Agrawal ve He [7] puls modeli kullanılarak oluşturulan sentetik yer hareketi kayıtlarının yakın-fay deprem kayıtlarını sismik izolasyonlu binalardaki rafların en üst kat yerdeğiştirmeleri açısından temsil etme başarısı incelenmiştir. Bu amaçla, doğrusal sismik izolasyon sistemine sahip betonarme örnek bir bina ve içindeki rafın zaman tanım alanındaki analizleri, tarihsel bir deprem kaydı ile onun sentetik karşılığı olan ve yaygın kullanılan puls modellerinden Agrawal ve He [7] puls modeli kullanılarak üretilen yer hareketi kaydı etkisinde yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen, rafların en üst kat yerdeğiştirmesi tepkileri karşılaştırılarak Agrawal ve He [7] puls modelinin bu bağlamdaki başarısının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

## MALZEME VE YÖNTEM

### Yapısal Model

Çalışmada kullanılan betonarme bina üst yapısı 4 katlı ve her iki doğrultuda simetrik bir kat planına sahiptir. Taşıyıcı sistemi kolon ve kirişlerle teşkil edilmiş moment aktaran çerçevelerden oluşmaktadır. Kat planı mevcut bir çalışmadaki [9] örnek bir binaya benzer olup betonarme çekirdek perdeleri ve rijit bodrum perdeleri kaldırılarak taşıyıcı sistemde sismik izolasyona uyum için bazı değişiklikler yapılmıştır. Kat yükseklikleri 3.5 m olan binanın kolon en kesit boyutları 70×70 cm, kiriş genişlik ve yükseklikleri ise sırasıyla 60 cm ve 75 cm'dir. Sismik izolasyonlu binalarda üstyapıya gelen deprem etkilerinin azaltılması ve böylece üstyapının doğrusal sınırlarda kalması hedeflendiğinden üstyapı taşıyıcı elemanlarının doğrusal davranış göstermesi beklenir [10]. Bu doğrultuda, ele alınan sismik izolasyonlu binanın üstyapı modeli elastik çubuk elemanlarla oluşturulmuştur. Beton malzeme sınıfı C35 olarak seçilmiş olup beton elastisite modülü,  $E=33227$  MPa olarak ele alınmıştır. Kat döşemelerinin etkisi her katta oluşturulan rijit diyaframlarla dikkate alınmış ve kat kütlelerinin döşeme seviyesinde toplandığı kabul edilmiştir. Binanın X yönünde 7, Y yönünde ise 3 açıklığı bulunmakta olup tüm açıklıkları 8 m'dir. Yalıtım katı ile birlikte binanın toplam sismik kütlesi  $M=5621$  ton'dur. Binanın tipik kat planı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Binanın tipik kat planı (ölçü birimi metredir).

Binanın izolasyon sistemi her kolonun altında bir adet olmak üzere toplam 32 adet doğrusal izolatör ve tüm izolatörlerin bir arada hareket etmesini sağlayan rijit bir yalıtım düzleminde oluşmaktadır. İzolasyon sistemi, sismik izolatörlerin efektif periyodu  $T_{eff}=3.0$  saniye, efektif

viskoz sönüm oranı ise  $\beta_{eff} = 0.15$  olacak şekilde tasarlanmıştır [11]. İzolatörlerin efektif rijitlik ( $K_{eff}$ ) ve efektif viskoz sönüm katsayısı ( $C_{eff}$ ) gibi diğer parametreleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \quad (1)$$

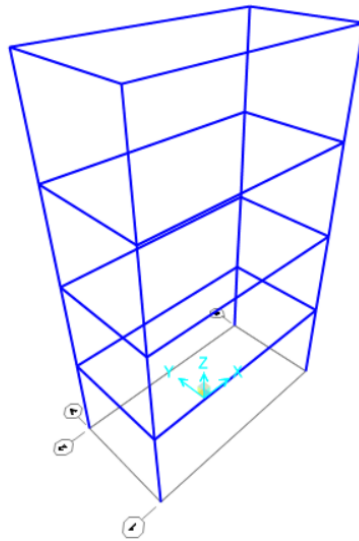
$$\omega_{eff} = \frac{2\pi}{T_{eff}} \quad (2)$$

$$C_{eff} = 2\beta_{eff} M \omega_{eff} \quad (3)$$

Bu çalışmada, sismik izolasyonlu binalardaki rafların en üst kat yerdeğiştirme tepkilerinin incelenmesi amacıyla kullanılan raf modelinin boyutları; X ve Y yönlerinde sırasıyla 1.2 m ve 0.6 m, yüksekliği ise 2.0 m'dir. Sismik izolasyonlu binalarda bilgisayar veya veri sistemlerini yerleştirmek için kullanılan bir veri kabini temsil eden 4 katlı raf modelinin taban ankastre durumdaki hâkim serbest titreşim periyodu 0.1 saniyedir. Bu periyot değerini yakalayacak şekilde malzeme özellikleri tanımlanmış olan ve uygulanan deprem yükleri altında elastik davranış gösterdiği kabul edilen rafın taşıyıcı sistemi elastik çubuk elemanlarla oluşturulmuş olup bu elemanlar birbirlerine düğüm noktalarında rijit olarak bağlanmışlardır. Raf, çalışmada ele alınan 4 katlı sismik izolasyonlu binanın dördüncü kat döşemesine, kat kütle merkezinde ankastre şekilde sabitlenmiş olarak modellenmiştir. Raf modelinin üç boyutlu görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir.

### Sentetik Puls Modeli

Yakın-fay deprem kayıtlarının yapılar üzerindeki etkilerinin ele alınacağı kapsamlı çalışmalarda farklı fay mesafeleri ve deprem büyüklükleri açısından sınıflandırmak üzere çok sayıda yakın-fay deprem kaydına ihtiyaç duyulması nedeniyle çeşitli araştırmacılar



Şekil 2 - Raf modelinin 3 boyutlu görünüşü.

tarafından tarihi yakın-fay yer hareketlerinin özelliklerini simüle edecek ve tarihi deprem kayıtlarını temsilen kullanılacak analitik puls modelleri önerilmiştir. Bunlar arasında yer alan ve yaygın şekilde kullanılan Agrawal ve He [7] puls modeli, yakın-fay yer hareketlerinde görülen uzun periyotlu hız pulslarının modellenmesi için sönümlenen sinüzoidler kullanılarak kapalı formulu bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Bu puls modelinin, tarihi yakın-fay yer hareketlerini temsilen kullanılacağı yapılan bazı çalışmalarda gösterilmiştir [12,13]. Bu puls modeli için üretilen hız ve ivme fonksiyonları sırasıyla Eşitlik 4 ve 5’de verilmiştir [7].

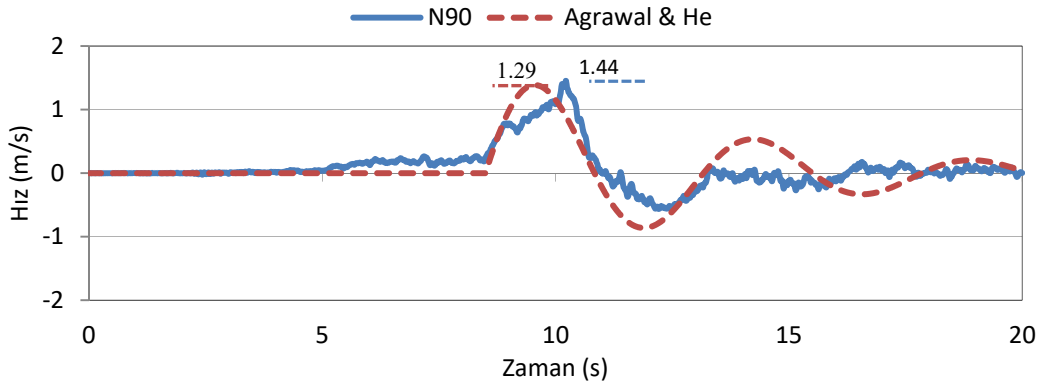
$$\dot{u}_g(t) = se^{\alpha t} \sin(\beta t), \quad \alpha = -\zeta_p \omega_p, \quad \beta = \omega_p \sqrt{1 - \zeta_p^2} \quad (4)$$

$$\ddot{u}_g(t) = se^{\alpha t} [\alpha \sin(\beta t) + \beta \cos(\beta t)] \quad (5)$$

Burada;  $t$  zaman,  $s$  sinüzoidin başlangıç genliği,  $\zeta_p$  sinüzoidin sönüm faktörü ve  $\omega_p$  sinüzoidin açısal frekansdır.

### Analizler

Yukarıda tanımlanan sismik izolasyonlu bina ile rafın 3 boyutlu modeli Sap2000 [14] programında oluşturulmuş ve  $X$  doğrultusunda zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, uzun periyotlu ve büyük genlikli hız pulsları içeren tarihi yakın-fay deprem kayıtlarını temsilen 1992 Landers Depremi’nin Lucerne Valley istasyonunda kaydedilmiş olan N90 kaydı [15] kullanılmıştır. Agrawal ve He [7], N90 kaydı için ürettikleri sentetik puls için gerekli başlangıç genliği  $s$  değerlerini 174 cm/s, puls periyodu  $T_p$  değerlerini ise 4.62 s olarak dikkate almışlardır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen eşdeğer yer hareketi kaydı ile tarihi N90 kaydının hız-zaman grafikleri Şekil 3’de gösterilmiştir. Kayıt genelinde bazı tutarsızlıklar olsa da Agrawal ve He puls modeli ile üretilen sentetik yer hareketi kaydının orijinal kaydı ana puls civarında yakaladığı ve özellikle pik değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. N90 kaydının pik hızı 1.44 m/s iken Agrawal ve He puls modeli ile üretilen sentetik yer hareketi kaydının pik hızı 1.29 m/s’dir ve aradaki fark yaklaşık % 10’dur.

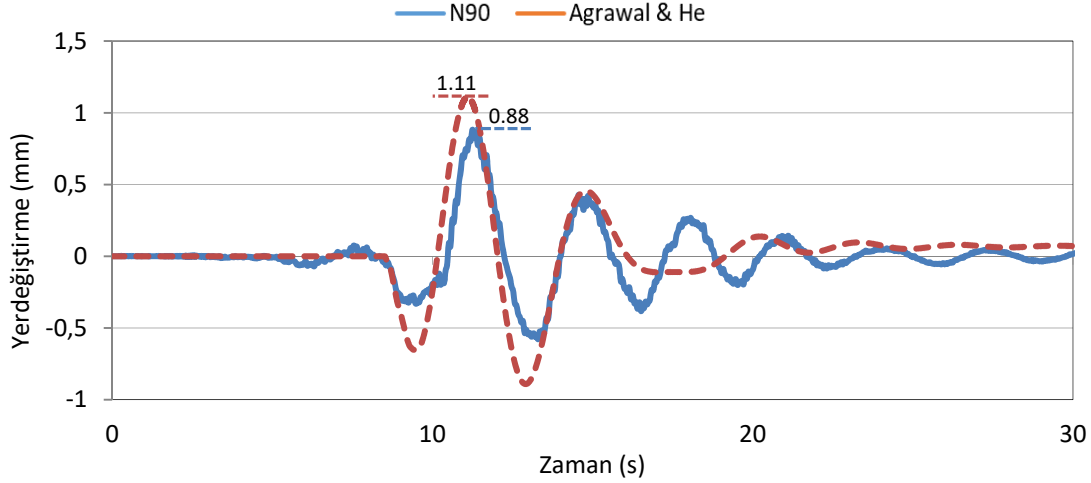


Şekil 3 - Tarihi N90 kaydı ve eşlenik yer hareketi kaydının hız-zaman grafikleri.

Her iki yer hareketi kaydı etkisinde rafın en üst katında elde edilen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri Şekil 4’te sunulmuştur. Agrawal ve He puls modeli kullanılarak oluşturulan sentetik yer hareketi kaydının genel davranışı özellikle ana puls civarında başarılı şekilde yakaladığı ancak ana pulsun dışında her iki sonuç arasında uyumsuzlukların olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, pik değerlerin de birbirinden farklı olduğu, N90 kaydı etkisinde en büyük

yerdeğiştirmenin 0.88 mm olarak elde edilmesine rağmen Agrawal ve He puls modeli ile üretilen sentetik yer hareketi kaydı etkisinde bu değerin yaklaşık % 26

farkla 1.11 mm olarak tespit edildiği anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, rafların en üst kat yerdeğiştirme tepkisi sonuçlarındaki farkın, her iki yer hareketinin hız serilerindeki pik değerler arasındaki farktan fazla olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4 - Rafın en üst kat yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi.

## SONUÇ

Sismik izolasyonlu binalardaki rafların en üst kat yerdeğiştirmeleri açısından Agrawal ve He [7] puls modeli kullanılarak oluşturulan sentetik yer hareketi kayıtlarının yakın-fay deprem kayıtlarını temsil etme başarısının incelenmesi amacıyla sismik izolasyonlu bir bina ve bu binanın dördüncü katında yer alan raf sisteminin 3 boyutlu modeli SAP2000 [14] programında oluşturulmuş ve N90 tarihsel deprem kaydı ile onun sentetik karşılığı etkisinde zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde, sismik izolasyonlu binalardaki rafların yerdeğiştirmeleri açısından puls modellerinin genel trendin belirlenmesinde faydalı olabileceği ancak stratejik öneme sahip ve titreşime duyarlı cihazların yer aldığı binaların analizi için tarihi deprem kayıtlarının tercih edilmesinin isabetli olacağı değerlendirilmektedir. Daha fazla yer hareketi kaydı ve daha farklı sismik izolasyon sistemine sahip binalar kullanılarak yapılmakta olan çalışmaların daha genel sonuçlar elde etmek için faydalı olacağı düşünölmektedir.

## Semboller

- $C_{eff}$  : Efektif sönüm katsayısı  
 $e$  : Euler sayısı (doğal logaritmanın tabanı)  
 $E$  : Betonun elastisite modöü  
 $K_{eff}$  : Efektif rijitlik  
 $M$  : Kütle  
 $s$  : Sinüzoidin başlangıç genliği  
 $t$  : Zaman

- $T_{eff}$  : Efektif periyot  
 $T_p$  : Puls periyodu  
 $\dot{u}_g(t)$  : Puls modelinin hız fonksiyonu  
 $\ddot{u}_g(t)$  : Puls modelinin ivme fonksiyonu  
 $\beta_{eff}$  : Efektif sönüm oranı  
 $\omega_{eff}$  : Efektif açısal doğal frekans  
 $\omega_p$  : Sinüzoidin açısal frekansı  
 $\zeta_p$  : Sinüzoidin sönüm faktörü

### Kaynaklar

1. Naeim, F., Kelly, J.M., Design of seismic isolated structures: from theory to practice, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-14921-7, New York, 1999.
2. Giarlelis, C., Koufalis, D., and Repapis, C, Seismic Isolation: An Effective Technique for the Seismic Retrofitting of a Reinforced Concrete Building. Structural Engineering International, 30(1), 2020, pp 43-52.
3. Alhan, C. and Öncü-Davas, S., Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes. Engineering Structures, 116, 2016, pp 83-94.
4. Bertero, V.V., Mahin, S.A. and Herrera, R.A., Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, Earthquake engineering & structural dynamics, 6(1), 1978, pp 31-42.
5. Somerville, P.G., “Engineering characterization of near fault ground motions”, Planning and Engineering for Performance in Earthquakes (2005 NZSEE), Taupo, New Zealand, 2005.
6. Makris, N., Rigidity–plasticity–viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 26(5), 1997, pp 571-591.
7. Agrawal, A.K. and He, W.L., “A closed form approximation of near fault ground motion pulses for flexible structures”, 15th ASCE Proceeding of Engineering Mechanics Conference, New York, USA, 2002.
8. Mukhopadhyay, S. and Gupta, V.K., Directivity pulses in near-fault ground motions—II: Estimation of pulse parameters. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50, 2013, pp 38-52.
9. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), Eğitim Elkitabı Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri Kısım-I: Genel Konular, 1. baskı, Ankara, Türkiye, 2018.
10. Matsagar V.A. and Jangid RS., Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures. Engineering Structures, 26, 2004, pp 1735-1749.

11. Kanbir Z. , evik O., Karşlıoğlu Z. M. , Alhan C., “Comparison of historical near-field ground motions and synthetically generated pulse models in terms of acceleration response of racks in seismically isolated buildings” 14th INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING, İstanbul, Türkiye, 6 - 08 Eylül 2021, ss.936-940.
12. Wang, Y., McFarland, D.M., Vakakis, A.F. and Bergman, L.A., , “Efficacy of a nonlinear base isolation system subjected to near-field earthquake motions”, International Conference on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research, Harbin, People’s Republic of China, 2002.
13. He, W.L. and Agrawal, A.K., An analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of smart protective systems, Journal of structural engineering (ASCE), 134 (7), 2008, pp 1177-1188.
14. Computers and Structures Inc. Integrated software for structural analysis and design, SAP 2000, Version 21.0, CSI, Berkeley, CA, 2019.
15. COSMOS (2013) Strong-Motion Virtual Data Center <http://db.cosmos-eq.org>



## Betonarme Kiriş Kesme Dayanımına GFRP Katkısının Değerlendirilmesi

Kadir ŞENGÜN<sup>1</sup>, Güray ARSLAN<sup>2</sup>

### ÖZET

Son yirmi yılda, FRP ile güçlendirilen elemanların davranışlarının anlaşılmasında ve FRP'nin dayanıma olan katkısının hesaplanmasında önemli gelişme kaydedilmiştir. Ancak, FRP'nin kesme dayanımına katkısı için literatürde önerilen bağıntıların tahminlerinde önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürdeki tahminler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Değerlendirilmede temel parametreler; kirişlerde enine donatı bulunması, kesit şekli ve GFRP ile güçlendirme yöntemi (U ve sadece iki yan yüzeyinde) kabul edilmiştir. Değerlendirme sonucu, bağıntılar her iki güçlendirme şeklinde enine donatısız kirişlerde enine donatılı kirişlere göre daha güvenilir tahminlerde bulunmuştur. Ayrıca, her iki güçlendirme yönteminde T kesitli kirişlerde dikdörtgen kesitli kirişlere göre bağıntıların daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Lif takviyeli polimer; Kesme dayanımı; Güçlendirme

### ABSTRACT

#### **Evaluation of GFRP contribution to the shear strength of reinforced concrete beams**

In the last two decades, significant progress has been made in understanding the behavior of FRP-strengthened specimens and calculating the FRP contribution to strength. However, there are significant differences in the estimates of the relations proposed in the literature for the FRP contribution to shear strength. In this study, the predictions obtained using the relations in the literature and the experimental results were compared and evaluated. The main parameters examined are the presence of transverse reinforcement, the cross-section shape and the GFRP strengthening configurations (U-wrapping and side-bonding). As a result of the evaluation, the relations gave more reliable predictions for beams without transverse reinforcement in both strengthening configurations than for beams with transverse reinforcement. In addition, it has been seen that the relations give more reliable results in T-section beams than rectangular section beams in both strengthening methods.

**Keywords:** Fiber reinforced polymer; Shear strength; Strengthening

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - kkadirsengun@gmail.com

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - aguray@yildiz.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Dayanımı yetersiz yapıların hizmet sürelerinde çok fazla aksamaya neden olmadan, hızlı ve güvenilir şekilde güçlendirilmesi inşaat mühendisliğinin önemli çalışma alanlarından biridir. Lif takviyeli polimer (FRP) yüksek mukavemetli, korozyona dayanıklı, uygulaması diğer yöntemlere göre kolay olan bir kompozit malzemedir. Son 20 yılda FRP'nin yapıların ve yapı elemanlarının güçlendirilmesi uygulamalarında kullanımı yaygınlaştıkça yapılan araştırmaların sayısında artış gözlenmiştir. Deneysel [1-27] ve analitik [28-37] çalışmalar ile güçlendirilen elemanların davranışlarının anlaşılmasında ve FRP'nin dayanıma olan katkısının hesaplanmasında önemli gelişme kaydedilmiştir. Enine donatılı kirişlerde, dayanıma FRP'nin katkısının enine donatısız elemanlara göre daha az olduğu, enine donatı ile FRP arasında bir etkileşim olabileceği ve bu durumun kesme dayanımı hesabında dikkate alınması gerektiğini ifade edilmiştir [12,25-27]. Kar & Biswal [38]; Lima & Barros [39], Pellegrino & Vasic [40] ve Kotynia et al. [41] tarafından yapılan çalışmalarda, FRP'nin kesme dayanımına katkısının hesabı için önerilen bağıntıların tahminleri istatistiksel olarak incelenmiştir.

Lif takviyeli polimerler ile güçlendirilen kirişlerin dayanım artışlarının değerlendirildiği çalışmalarda, genellikle karbon lif takviyeli polimer (CFRP) üzerine odaklanılmış olup, cam lif takviyeli polimer (GFRP) ile gerçekleştirilen çalışmaların sayısı sınırlıdır. Ayrıca FRP'nin kesme dayanımına katkısının hesabı için önerilen bağıntılar çoğunlukla CFRP ile güçlendirilen elemanların sonuçları kullanılarak çıkarılmıştır. Önerilen bu bağıntıların özellikle GFRP ile kesmede güçlendirilen elemanlarda ne kadar doğru sonuçlar verdiği incelenmelidir. Bu çalışmada, dikdörtgen ve T kesitli kirişlerde GFRP kullanılarak kesmede iki farklı şekilde (U ve sadece iki yan yüzeyinde) güçlendirme uygulanan literatürdeki deneysel sonuçlar alınmış, FRP'nin kesme dayanımına katkısı tahminleri (Mofidi & Chaallal (2011) [36], Chen & Teng (2003) [28-29] ve Sengun & Arslan (2022) [56], ACI 440.2R (2017) [57], Fib-TG 9.3 (2001) [58], CNR-DT200 (2004) [59], CSA-S806 (2002) [60] ve CNR DT-200 R1/2013 [61]) ile karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

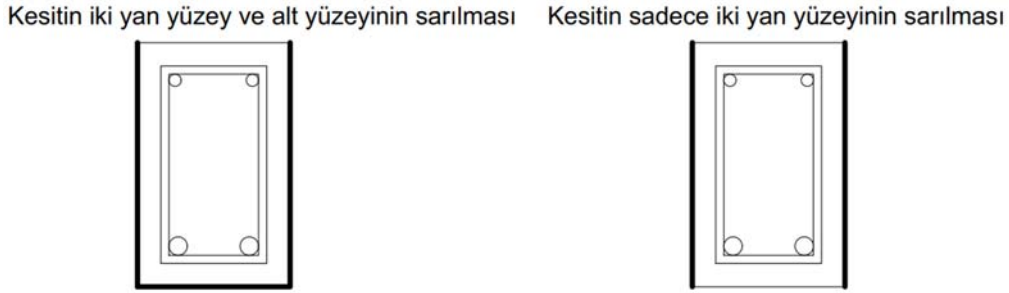
## 2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

GFRP ile güçlendirilip üç /dört noktalı eğilme deneyi ile yükleme uygulanmış ve kesme kırılmasıyla güç tükenmesi oluşmuş kirişlerin özellikleri (Şekil 1) literatürden (Panda et al. [42], Panda et al. [43], Panda et al. [44], Sundarraja et al. [45], Baggio et al. [46], Saafan [47], Panigrahi et al. [48], A.H. Al-Shalif et al. [49], Berset [50], Al-Sulaimani et al. [51], Chajes et al. [52], Annaiah [53], Deniaud et al. [54], Oller et al. [55]) alınmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Dikdörtgen ve T kesitli kirişlerde güçlendirme kesitin iki yan yüzey ve alt yüzeyi saracak şekilde (U-şeklinde) ve sadece iki yan yüzeyinde (Şekil 2) uygulanmıştır. Literatürden toplanmış olan ve GFRP ile güçlendirilmiş olan kirişlerin daha detaylı özellikleri, incelenen her iki güçlendirme durumu için Tablo 1'de verilmiştir. İstatistiksel olarak değerlendirme yapmak amacıyla, GFRP'nin kesme dayanımına deneysel katkısı ( $V_{f,exp}$ ), GFRP ile güçlendirilmiş elemanların kesme dayanımından kontrol (referans) elemanlarının kesme dayanımının çıkartılmasıyla bulunmuştur. GFRP'nin kesme dayanımına katkısının tahmini için literatürde önerilen bağıntılar ( $V_{f,pre}$ ) kullanılmıştır. Her bir kiriş için deneysel GFRP katkısının tahmin edilen GFRP katkısına oranı hesaplanmıştır ( $V_{f,exp}/V_{f,pre}$ ). Hesaplanan  $V_{f,exp}/V_{f,pre}$  değerlerinin ortalama (MV), standart sapma (STD) ve varyasyon katsayısı (COV) değerleri incelenen tüm bağıntılar için hesaplanmıştır. Varyasyon katsayısı, verilerin ne kadar homojen dağıldıklarını gösteren bir değişkendir. Varyasyon katsayısı (COV) değeri küçüldükçe incelenen bağıntıların doğrulukları artmaktadır. Ortalama değer (MV) birden büyük olması ise, sonuçların konservatif olduğunu ifade etmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda [12,25-27], enine donatısız kirişlerde FRP'nin kesme dayanımına katkısının enine donatılı kirişlerden daha fazla olduğu genellikle ifade edilmiştir. Enine donatılı ve enine donatısız GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerde GFRP'nin kesme dayanımına katkısı belirlenerek, bağıntıların tahminleri karşılaştırılmış ve tahminlere enine donatısının etkisi değerlendirilmiştir. Betonarme kesitin şekli FRP'nin uygulama şeklini dolayısıyla güçlendirmeden alınacak olan verimi de etkilemektedir. T kesitli kirişlerde kesitin tüm kenarlarının FRP ile sarılması döşeme yüzünden mümkün olmamaktadır. Bu yüzden genellikle T kesitli kirişlerde U şeklinde ve iki yan yüzeyin sarılmasıyla güçlendirme uygulanmaktadır. Kesit şeklinin bağıntıların tahminlerine etkisi de değerlendirilmiştir.



Şekil 1 - Kirişlerin özelliklerindeki dağılım



Şekil 2 - Kirişlerin güçlendirme şekilleri

Tablo 1 - GFRP ile güçlendirilen elemanların detayları

Parametre	U şeklinde	Sadece yan yüzeyleri sarılan
Etriyeli/etriyesiz kiriş sayısı	17/8	17/10
Kesit şekli dikdörtgen / T	6/19	8/19
Kiriş genişliği ( $b_w$ , mm) en az/en fazla	64/150	100/150
Etkili derinlik ( $d$ , mm) en az/en fazla	150/535	85/225
Enine donatı yüzdesi ( $\rho_{sw}$ , %) en az/en fazla	0.090/0.754	0.090/0.754
Kesmede kullanılan FRP yüzdesi ( $\rho_f$ , %) en az/en fazla	0.044/8.400	0.242/4.000
FRP elastisite modülü ( $E_f$ , GPa) en az/en fazla	8/76	13/76
FRP çekme dayanımı ( $f_f$ , MPa) en az/en fazla	106/3400	160/3400
Beton basınç mukavemeti ( $f_c$ ) (MPa)	12.40/69.93	29.11/69.93

### 3. KESME BAĞINTILARI TAHMİNLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada dikkate alınan bağıntıların belirli sınır şartlarını sağlanması durumunda geçerli olması ifade edildiğinden, Tablo 2-5'teki bağıntıların tahminlerinin karşılaştırılmasında verilen kiriş sayıları farklılık göstermektedir. CNR DT-200 R1/2013 [61] yönetmeliği, CNR-DT200 (2004) [59] yönetmeliğinin güncel hali olmasına rağmen kesitin sadece kenarlarının sarılmasıyla uygulanan güçlendirme şekli için herhangi bir bağıntı içermemektedir. Bu yüzden CNR DT-200 R1/2013 için kesitin sadece yan yüzeylerinin sarılmasıyla uygulanan güçlendirme için değerlendirme yapılamamıştır. Her iki yönetmeliğin performansı (CNR-DT200 (2004) [59] ve CNR DT-200 R1/2013 [61]) kesitin U şeklinde güçlendirilen elemanlar için incelenmiştir. Bağıntıların tahminlerine enine donatının ve kesit şeklinin etkisi her iki güçlendirme şekli için Tablo 2-5'de verilen MV, STD ve COV değerleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Mofidi & Chaallal (2011), CNR-DT200 (2004) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntıları MV değerleri birden küçük oldukları için U şeklinde uygulanan güçlendirmede konservatif olmayan sonuçlar vermişlerdir. İncelenen diğer bağıntılar MV değerleri birden büyük oldukları için konservatif sonuçlar vermişlerdir. Hesaplanan COV değerleri incelendiğinde Chen & Teng (2003a,b) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntıları U şeklinde uygulanan güçlendirme için diğer bağıntılardan daha güvenilir sonuçlar vermişlerdir. Kesitin sadece yan yüzeylerinin sarılmasıyla uygulanan güçlendirme yönteminde ACI 440.2R (2017) kullanılarak hesaplanan kiriş sayısı diğer incelenen bağıntılara göre azdır. Bunun nedeni ACI 440.2R (2017) kullanarak GFRP'nin kesme dayanımına katkısının hesabında kiriş yüksekliği ve güçlendirme şekline bağlı verilen "k<sub>2</sub>" değişkeninin negatif olarak hesaplanması ve bu yüzden bu kirişlerin değerlendirilmeye alınamamasıdır. Kiriş yan yüzeylerinde güçlendirme uygulanması durumu için bulunan tahminler incelendiğinde, CNR-DT200 (2004) ve CSA-S806 (2002) bağıntıları hariç incelenen tüm bağıntıların ortalama değerleri (MV) birden küçük oldukları için konservatif olmayan sonuçlar vermiştir. Enine donatı içeren ve GFRP ile sadece kesitin yan yüzeylerinin sarılmasıyla güçlendirilen kirişler için Chen & Teng (2003a,b) tarafından önerilen bağıntı deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, ortalama değerinin bire en yakın ve en düşük COV değerine sahip olduğundan diğer bağıntılardan daha iyi tahminde bulunduğu görülmüştür (Tablo 2).

**Tablo 2 - GFRP ile güçlendirilen enine donatılı kirişler**

Bağıntılar	U-şeklinde uygulanan güçlendirme				Kirişin iki yan yüzüne uygulanan güçlendirme			
	Kiriş sayısı	MV	STD	COV	Kiriş sayısı	MV	STD	COV
ACI 440.2R [57]	13	1.451	1.076	0.741	5	0.938	0.893	0.952
Fib-TG 9.3 [58]	17	1.216	0.737	0.606	17	0.849	0.488	0.575
Mofidi & Chaallal [36]	17	0.903	0.532	0.589	17	0.936	0.473	0.505
Chen & Teng [28-29]	17	1.611	0.811	0.503	17	0.989	0.464	0.469
CNR-DT200 [59]	17	0.847	0.503	0.594	17	1.105	0.952	0.862
CNR DT-200 R1 [61]	17	1.057	0.589	0.557	-	-	-	-
CSA-S806 [60]	17	1.754	1.358	0.774	17	3.121	2.432	0.779
Sengun & Arslan [56]	17	0.650	0.303	0.467	17	0.487	0.285	0.585

GFRP ile güçlendirilen ve enine donatısız betonarme kirişlerde hesaplanan bağıntı tahminleri her iki güçlendirme şekli için Tablo 3'te verilmiştir. ACI 440.2R (2017), Mofidi & Chaallal (2011) ve CNR-DT200 (2004) bağıntıları hariç incelenen diğer bağıntılarda MV değerleri birden büyük oldukları için kesitin U şeklinde güçlendirmesinde konservatif sonuçlar vermişlerdir. CNR-DT200 (2004) bağıntısının enine donatısız ve GFRP ile kesitin U şeklinde güçlendirmesinde en düşük COV değerine sahip olduğundan diğer bağıntılara göre daha iyi tahminde bulunduğu görülmüştür. Mofidi & Chaallal (2011) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntıları hariç diğer bağıntılar kesitin sadece iki yan yüzeylerinin sarılmasıyla uygulanan güçlendirme şekli için MV değerlerinin birden büyük oldukları görüldüğünden konservatif sonuç verdiği belirtilebilir. Mofidi & Chaallal (2011), Chen & Teng (2003a,b) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntıları diğer bağıntılardan daha düşük COV değerlerine sahip oldukları için enine donatısız ve kesitin iki yan yüzeyinin sarılmasıyla uygulanan güçlendirme yöntemi için daha doğru bağıntı tahminleri vermişlerdir. Tablo 2-3'teki değerler birlikte değerlendirildiğinde her iki güçlendirme yönteminde enine donatısız elemanlarda incelenen bağıntılar için hesaplanan COV değerlerinin, enine donatılı elemanlardan düşük olduğu tespit edilmiştir. İncelenen bağıntıların, GFRP ile güçlendirilen enine donatısız elemanlarda daha iyi tahminde bulunduğu; enine donatılı elemanlarda daha güvenilir bağıntıların çıkarılabilmesi için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

**Tablo 3 - Enine donatısız GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişler**

Bağıntılar	U-şeklinde uygulanan güçlendirme				Kirişin iki yan yüzüne uygulanan güçlendirme			
	Kiriş sayısı	MV	STD	COV	Kiriş sayısı	MV	STD	COV
ACI 440.2R [57]	4	0.906	0.550	0.607	2	2.802	2.262	0.807
Fib-TG 9.3 [58]	8	1.387	0.538	0.388	10	1.249	0.632	0.506
Mofidi & Chaallal [36]	8	0.727	0.255	0.351	10	0.714	0.240	0.337
Chen & Teng [28-29]	8	1.718	0.586	0.341	10	1.642	0.482	0.294
CNR-DT200 [59]	8	0.820	0.187	0.228	10	1.833	1.094	0.597
CNR DT-200 R1 [61]	8	1.269	0.614	0.483	-	-	-	-
CSA-S806 [60]	8	1.813	1.254	0.691	10	4.157	4.014	0.966
Sengun & Arslan [56]	8	1.049	0.295	0.281	10	0.754	0.235	0.312

U şeklinde güçlendirilen kirişlerde, kesit şeklinin dikdörtgen ve T şeklinde olmasının etkisi Tablo 4'te değerlendirilmiştir. Sengun & Arslan (2022) tarafından önerilen bağıntı hariç diğer bağıntıların tahminleri dikdörtgen kesitli kirişler için konservatif sonuçlar vermiştir. T kesitli kirişlerde ise, Mofidi & Chaallal (2011), CNR-DT200 (2004) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntılarının tahminleri hariç diğer bağıntıların tahminleri konservatif sonuçlar vermişlerdir. Hesaplanan COV değerleri değerlendirildiğinde, dikdörtgen kesitli kirişler için CNR DT-200 R1/2013; T kesitli kirişler için CNR-DT200 (2004) bağıntıları en doğru tahminleri vermişlerdir. T kesitli ve kesitin U şeklinde güçlendirildiği kirişlerde, bağıntıların tahminleri (CNR DT-200

R1/2013 hariç) karşılaştırıldığında, dikdörtgen kesitli elemanlardan daha düşük COV değeri bulunmuş, incelenen bağıntıların T kesitli kirişlerde daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak literatürdeki deneysel kiriş verisi artışı ile bu gözlemin doğruluğu tekrar gözden geçirilmelidir.

**Tablo 4 - U şeklinde güçlendirilen kirişlerde kesit şeklinin etkisi**

Bağıntılar	Dikdörtgen kesitli kirişler				T kesitli kirişler			
	Kiriş sayısı	MV	STD	COV	Kiriş sayısı	MV	STD	COV
ACI 440.2R [57]	6	1.573	1.406	0.894	11	1.186	0.724	0.610
Fib-TG 9.3 [58]	6	1.242	0.893	0.719	19	1.280	0.619	0.483
Mofidi & Chaallal [36]	6	1.010	0.802	0.794	19	0.795	0.310	0.389
Chen & Teng [28-29]	6	1.289	0.907	0.703	19	1.757	0.661	0.376
CNR-DT200 [59]	6	1.093	0.721	0.660	19	0.758	0.257	0.339
CNR DT-200 R1 [61]	6	1.480	0.725	0.490	19	1.013	0.517	0.510
CSA-S806 [60]	6	1.487	1.468	0.987	19	1.863	1.272	0.683
Sengun & Arslan [56]	6	0.648	0.343	0.529	19	0.819	0.351	0.429

Kesitin iki yan yüzeyinin GFRP ile sarılmasıyla güçlendirilen elemanlarda kesit şeklinin bağıntı tahminlerine etkisi Tablo 5'te verilen değerler kullanılarak değerlendirilmiştir. ACI 440.2R (2017), Chen & Teng (2003a,b), CNR-DT200 (2004) ve CSA-S806 (2002) bağıntıları, dikdörtgen kesitli kirişler için konservatif sonuçlar verirken diğer bağıntılar konservatif olmayan sonuçlar vermiştir. Mofidi & Chaallal (2011) ve CNR-DT200 (2004) bağıntıları diğer bağıntılara göre daha düşük COV değerlerine sahip oldukları için dikdörtgen kesitli ve kesitin sadece yan yüzeylerinin GFRP ile sarıldığı elemanlarda daha doğru tahminde bulunduğu görülmüştür. T kesitli kirişlerde Mofidi & Chaallal (2011) ve Sengun & Arslan (2022) hariç tüm bağıntıların tahminleri konservatif sonuçlar vermişlerdir. T kesitli ve GFRP ile kesitin sadece yan yüzeylerinin sarıldığı kirişlerde Chen & Teng (2003a,b) tahminlerinin daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. U şeklinde güçlendirme uygulanan kirişlerde olduğu gibi, sadece iki yan yüzeyin sarılmasıyla güçlendirilen elemanlarda T kesitli kirişlerde incelenen bağıntılar, genellikle dikdörtgen kesitli elemanlara göre daha doğru tahminde bulunmuştur.

Sengun & Arslan (2022) hariç diğer bağıntılar, dikdörtgen kesitli kirişlerde kesitin sadece iki yan kenarın sarılmasıyla uygulanan güçlendirme yönteminde diğer güçlendirme yöntemine göre daha düşük COV değerlerine sahiptir. Dikdörtgen kesitli ve GFRP ile sadece iki yan yüzeyin sarıldığı elemanlarda incelenen bağıntıların, dikdörtgen kesitli ve GFRP ile iki yan yüzeyin ve alt yüzeyin sarıldığı elemanlara göre daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat T kesitli kirişlerde incelenen bağıntılarla her iki güçlendirme şekli için bağıntı tahminlerinde (genellikle yakın COV değerleri hesaplandığından) belirgin bir fark görülmemiştir. Yani T kesitli kirişlerde uygulanan güçlendirme şekli incelenen bağıntıların doğruluklarını çok fazla etkilemezken bu fark dikdörtgen kesitli kirişlerde daha belirgin olmaktadır.

**Tablo 5 - İki yan yüzün sarılmasıyla güçlendirilen kirişlerde kesit şeklinin etkisi**

Bağıntılar	Dikdörtgen kesitli kirişler				T kesitli kirişler			
	Kiriş sayısı	MV	STD	COV	Kiriş sayısı	MV	STD	COV
ACI 440.2R [57]	6	1.716	1.466	0.854	-	-	-	-
Fib-TG 9.3 [58]	8	0.655	0.433	0.661	19	1.141	0.567	0.497
Mofidi & Chaallal [36]	8	0.583	0.334	0.572	19	0.968	0.394	0.407
Chen & Teng[28-29]	8	1.145	0.758	0.662	19	1.267	0.479	0.378
CNR-DT200 [59]	8	2.232	1.340	0.600	19	1.013	0.654	0.646
CNR DT-200 R1 [61]	-	-	-	-	-	-	-	-
CSA-S806 [60]	8	1.054	0.703	0.667	19	4.536	3.115	0.687
Sengun & Arslan [56]	8	0.458	0.346	0.754	19	0.639	0.261	0.408

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

GFRP ile güçlendirilen kirişler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak, FRP'nin kesme dayanımına katkısının hesabı için önerilen bağıntıların tahminleri üzerinde enine donatı ve kesit şeklinin etkisi istatistiksel olarak incelenmiştir. Çalışmada bulunan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Chen & Teng (2003a,b) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntıları enine donatılı ve GFRP ile U şeklinde sarılmasıyla uygulanan güçlendirme için; Chen & Teng (2003a,b) enine donatılı ve GFRP ile sadece kesitin yan yüzeylerinin sarılmasıyla güçlendirilen kirişler için diğer bağıntılardan daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Enine donatısız ve GFRP ile U şeklinde sarılmayla uygulanan güçlendirmede CNR-DT200 (2004) tahmini; enine donatısız ve GFRP ile sadece kesitin yan yüzeylerinin sarılmasıyla güçlendirmede ise Mofidi & Chaallal (2011), Chen & Teng (2003a,b) ve Sengun & Arslan (2022) bağıntılarının daha iyi tahminler yaptığı bulunmuştur.
- İncelenen bağıntılar, her iki güçlendirme şeklinde, enine donatısız kirişlerde enine donatılı kirişlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.
- İncelenen bağıntılar, her iki güçlendirme yönteminde, T kesitli kirişlerde dikdörtgen kesitli kirişlere göre genellikle daha güvenilir sonuçlar verdiği bulunmuştur.
- Dikdörtgen kesitli elemanlarda, her iki güçlendirme şekli için incelenen bağıntıların tahminleri çok fazla değişirken; T kesitli elemanlarda her iki güçlendirme şekli arasında önemli bir fark gözlenmemiştir.

Enine donatının bulunması, kesit ve GFRP uygulanma şeklinin bağıntıların doğruluklarını etkilediği; bu etkilerin de dikkate alındığı daha güvenilir bağıntıların türetilmesi için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

### **Kaynaklar**

1. Kim, G., Sim, J., & Oh, H. (2008). Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1261-1270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.021>
2. Bencardino, F., Spadea, G., & Swamy, R. N. (2007). The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 21(11), 1997-2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.056>
3. Benzeguir, Z. E. A., El-Saikaly, G., & Chaallal, O. (2018). Influence of size on the behavior of RC T-beams strengthened in shear with externally bonded CFRP.
4. Carolin, A., & Täljsten, B. (2005). Experimental Study of Strengthening for Increased Shear Bearing Capacity. *Journal of Composites for Construction*, 9(6), 488-496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:6\(488\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:6(488))
5. Haddad, R. H., & Marji, C. S. (2019). Composite Strips with U-Shaped CFRP Wrap Anchor Systems for Strengthening Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Civil Engineering*, 17(11), 1799-1811. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00447-w>
6. Teng, J. G., Chen, G. M., Chen, J. F., Rosenboom, O. A., & Lam, L. (2009). Behavior of RC Beams Shear Strengthened with Bonded or Unbonded FRP Wraps. *Journal of Composites for Construction*, 13(5), 394-404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000040)
7. Li, W., & Leung, C. K. Y. (2016). Shear Span–Depth Ratio Effect on Behavior of RC Beam Shear Strengthened with Full-Wrapping FRP Strip. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015067. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000627](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000627)
8. Jayaprakash, J., Abdul Samad, A. A., Anvar Abbasovich, A., & Abang Ali, A. A. (2008). Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1148-1165. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.008>
9. Galal, K., & Mofidi, A. (2010). Shear Strengthening of RC T-Beams Using Mechanically Anchored Unbonded Dry Carbon Fiber Sheets. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(1), 31-39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000067)
10. Sundarraja, M. C., & Rajamohan, S. (2009). Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips – An experimental study. *Construction and Building Materials*, 23(2), 856-864. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.008>
11. Dong, J., Wang, Q., & Guan, Z. (2013). Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural–shear strengthening by FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 604-612. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.02.018>
12. Khalifa, A., Belarbi, A., & Nanni, A. (2000). Shear performance of RC members strengthened with externally bonded FRP wraps. *New Zealand*, 9.
13. Benzeguir, Z. E. A., El-Saikaly, G., & Chaallal, O. (2020). Size Effect of RC T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP L-Shaped Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 24(4), 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001045)
14. Li, A., Diagona, C., & Delmas, Y. (2002). Shear strengthening effect by bonded composite fabrics on RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 33(3), 225-239. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00003-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00003-3)



15. Mostofinejad, D., & Tabatabaei Kashani, A. (2013). Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1704-1713. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.081>
16. Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., & Saleh, K. R. (1999). Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates. *ACI Structural Journal-American Concrete Institute*, 96(5), 865-874.
17. Nanda, R. P., & Behera, B. (2020). Experimental Study of Shear-Deficient RC Beam Wrapped with GFRP. *International Journal of Civil Engineering*, 18(6), 655-664. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00498-4>
18. Van Cao, V., & Pham, S. Q. (2019). Comparison of CFRP and GFRP Wraps on Reducing Seismic Damage of Deficient Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Civil Engineering*, 17(11), 1667-1681. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00429-y>
19. Guadagnini, M., Pilakoutas, K., & Waldron, P. (2006). Shear Resistance of FRP RC Beams: Experimental Study. *Journal of Composites for Construction*, 10(6), 464-473. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:6\(464\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:6(464))
20. Hawileh, R. A., Rasheed, H. A., Abdalla, J. A., & Al-Tamimi, A. K. (2014). Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. *Materials & Design*, 53, 972-982. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.087>
21. Keskin, R. S. O., Arslan, G., & Sengun, K. (2017). Influence of CFRP on the shear strength of RC and SFRC beams. *Construction and Building Materials*, 153, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.170>
22. Sengun, K., & Arslan, G. (2022). Parameters affecting the behaviour of RC beams strengthened in shear and flexure with various FRP systems. *Structures*, 40, 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.024>
23. Sengun, K., & Arslan, G. (2017). Influence of CFRP on the strength of retrofitted RC beams without stirrups. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35(1), 77-85.24.
24. Keskin, R. S. O., Sengun, K., & Arslan, G. (2017). RETROFITTING SFRC BEAMS BY USING CFRP. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, (1), 310-315.
25. Bousselham, A., & Chaallal, O. (2008). Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded FRP. *Journal of Composites for Construction*, 12(5), 499-512. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(499\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(499))
26. Bousselham, A., & Chaallal, O. (2006). Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 37(1), 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.05.012>
27. Bousselham, A., & Chaallal, O. (2006). Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-an experimental study. *ACI structural Journal*, 103(3), 339.
28. Chen, J. F., & Teng, J. G. (2003a). Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials*, 17(1), 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00091-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00091-0)

29. Chen, J. F., & Teng, J. G. (2003b). Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture. *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 615-625. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:5\(615\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:5(615))
30. Triantafillou, T. C., & Antonopoulos, C. P. (2000). Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP. *Journal of Composites for Construction*, 4(4), 198-205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2000\)4:4\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:4(198))
31. Cao, S. Y., Chen, J. F., Teng, J. G., Hao, Z., & Chen, J. (2005). Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps. *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 417-428. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2005\)9:5\(417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:5(417))
32. Adhikary, B. B., Mutsuyoshi, H., & Ashraf, M. (2003). EFFECTIVE SHEAR STRENGTHENING OF CONCRETE BEAMS USING FRP SHEETS WITH BONDED ANCHORAGE. *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, 457-466. [https://doi.org/10.1142/9789812704863\\_0042](https://doi.org/10.1142/9789812704863_0042)
33. Ianniruberto, U., & Imbimbo, M. (2004). Role of Fiber Reinforced Plastic Sheets in Shear Response of Reinforced Concrete Beams: Experimental and Analytical Results. *Journal of Composites for Construction*, 8(5), 415-424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:5\(415\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:5(415))
34. Mostofinejad, D., Tabatabaei Kashani, A., & Hosseini, A. (2016). Design model for shear capacity of RC beams strengthened with two-side CFRP wraps based on effective FRP strain concept. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(2), 161-179. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1021382>
35. Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., & M.I., A. A. (1998). Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members. *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 195-202. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195))
36. Mofidi, A., & Chaallal, O. (2011). Shear Strengthening of RC Beams with EB FRP: Influencing Factors and Conceptual Debonding Model. *Journal of Composites for Construction*, 15(1), 62-74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000153](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000153)
37. Al-Rousan, R. (2020). Predicting the Optimum Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened With CFRP Composites. *Procedia Manufacturing*, 44, 631-638.
38. Kar, S., & Biswal, K. C. (2020). Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams by Using Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Data Analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 4203–4234. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04412-x>
39. Lima, J. L., & Barros, J. A. (2011). Reliability analysis of shear strengthening externally bonded FRP models. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 164(1), 43-56. <https://doi.org/10.1680/stbu.9.00042>
40. Pellegrino, C., & Vasic, M. (2013). Assessment of design procedures for the use of externally bonded FRP composites in shear strengthening of reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 727-741. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.039>
41. Kotynia, R., Oller, E., Marí, A., & Kaszubska, M. (2021). Efficiency of shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP materials – State-of-the-art in the experimental tests. *Composite Structures*, 18.

42. Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2013). Effect of transverse steel on the performance of RC T-beams strengthened in shear zone with GFRP sheet. *Construction and Building Materials*, 41, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.098>
43. Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2011). Shear strengthening of RC T-beams with externally side bonded GFRP sheet. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(13), 1139-1154. <https://doi.org/10.1177/0731684411417202>
44. Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K., & Barai, S. V. (2013). Shear strengthening effect by bonded GFRP strips and transverse steel on RC T-beams. *Structural Engineering and Mechanics*, 47(1), 75–98. <https://doi.org/10.12989/SEM.2013.47.1.075>
45. Sundararaja, M. C., Rajamohan, S., & Bhaskar, D. (2008). Shear Strengthening of RC Beams Using GFRP Vertical Strips—An Experimental Study. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(14), 1477-1495. <https://doi.org/10.1177/0731684407081772>
46. Baggio, D., Soudki, K., & Noël, M. (2014). Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. *Construction and Building Materials*, 66, 634-644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.097>
47. Saafan, M. A. A. (2006). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using GFRP Wraps. *Acta Polytechnica*, 46(1). <https://doi.org/10.14311/800>
48. Panigrahi, S. K., Deb, A., & Bhattacharyya, S. K. (2016). Modes of failure in shear deficient RC T-beams strengthened with FRP. *Journal of Composites for Construction*, 20(1), 04015029.
49. A.H. AL-Shalif, S., Akin, A., Aksoylu, C., & Hakan Arslan, M. (2022). Strengthening of shear-critical reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored GFRP fabrics applications. *Structures*, 44, 809–827. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.044>
50. Berset J. Strengthening of reinforced concrete beams with FRP. *Composites* 1992.
51. Al-Sulaimani GJ, Sharif A, Basunbul IA, Baluch MH, Ghaleb BN. Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. *ACI Struct J* 1994;91:458–64.
52. Chajes MJ, Januszka TF, Mertz DR, Thomson Jr TA, Finch Jr WW. Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics. *ACI Struct J* 1995;92:295–303.
53. Annaiah R. Shear performance of RC beams strengthened in situ with composites; 2020.
54. Deniaud C, Cheng JJR. Reinforced concrete T-beams strengthened in shear with fiber reinforced polymer sheets. *J Compos Constr* 2003;7:302–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:4\(302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:4(302)).
55. Oller, E., Kotynia, R., & Mari, A. (2021). Assessment of the existing models to evaluate the shear strength contribution of externally bonded frp shear reinforcements. *Composite Structures*, 266, 113641. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113641>
56. Sengun, K., & Arslan, G. (2022). Investigation of the parameters affecting the behavior of RC beams strengthened with FRP. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0854-9> (In press).
57. American Concrete Institute. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)*. Farmington Hill, Mich., USA; 2017.
58. Fédération internationale du béton, 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Task Group 9.3, Bulletin No. 14, Lausanne, Switzerland.

59. CNR-Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures (CNR-DT 200/ 2004). Rome, Italy
60. CAN/CSA. (2002). "Design and construction of building components with fiber-reinforced polymer." S806-02, Canadian Standards Association, Rexdale, Canada.
61. CNR-DT 200 R1/2013. 2013. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction (CNR), Rome.

## Orta Yükseklikteki Bina Sınıfı İçin Uzak ve Yakın Deprem Davranışlarının Sayısal Ortamda İncelenmesi

Ahmet Berkay MOSTURA<sup>1</sup>, Kemal, BEYEN<sup>2</sup>

### ÖZET

Deprem ve azaltılacak insan kaynaklı deprem zararları, sismik olarak aktif olan Türkiye coğrafyasında depreme güvenli yapılaşma ve sağlıklı toplumsal yaşam için deprem ilişkili ortak alanlarda disiplinler arası azami ortak çalışmaların yapılması gereken bir olgudur. Günümüzün gelişen teknolojilerinin sunduğu yüksek hassaslıkta canlı yapısal izleme, veri saklama ve mühendislik analiz imkanları yakın ve uzak saha kaynaklı deprem kayıtlarının senaryo çalışmaları çerçevesinde benzeşim denekleri olarak sayısal yapı testlerinin yürütülmesine imkân vermektedir. Yapı girdi ve çıktı değerlerinin bina nümerik modeli üzerinden hesaplanmasıyla yapının tepkilerinin uzak ve yakın saha kaynaklı deprem guruplarına gösterdiği davranış büyüklüklerinin benzerliği veya farklılıkları frekans tanım alanında bir dizi istatistiki kıyaslamalarla, yapı tanı algoritmalarının sonuçlarıyla ve sonlu eleman analizlerinin simülasyonları üzerinden tartışılmıştır. Deprem kayıtlarının fazlalığı sonucunda analizlerin farklarının araştırılması ve bu araştırmalar sonucunda gerekli olan yapı tanıma analizlerinin yapılması gerekmektedir. Analizler, taşıyıcı elemanların yeterliğinin kontrolü için kritik bir önem oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Frekans, Transfer Fonksiyonu, Girdi Çıktı İlişkisi, Yapısal Davranış, Benzeşim

### ABSTRACT

#### **Analysis of Near and Far Field Earthquake Responses for the Midrise Buildings**

In seismic active regions of Türkiye, earthquake and human caused earthquake damage to be reduced are main phenomenon that require maximum interdisciplinary joint work in earthquake-related disciplines for aseismic design-construction and healthy social life. The high-precision live structural health monitoring network, data storage and structural analysis opportunities offered by today's developing technologies allow the engineers for adopting different methods of the computational dynamics and executing numerical structure tests. Structures as simulation

---

1 Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli - mosturaberkey@gmail.com

2 Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli - kbeyen@kocaeli.edu.tr

*subjects may be tested within the framework of scenario studies of earthquake data recorded at near and far stations.*

*Under the earthquake inputs recorded at far and near field, the structural earthquake responses were calculated over the numerical model. Similarity or differences of the behaviors are comparatively discussed in this study. A series of statistical evaluations and comparisons in the frequency domain are summarized in discussion part over the results of the finite element simulations and the outcomes of the different algorithms of the structural identification studies.*

**Keywords:** *Frequency, Transfer Function, Input Output Relations, Structural Behaviour, Simulation*

## GİRİŞ

Depremler, Dünya tektonik aktivitesinin bir sonucu olarak yapılarda önemli hasar riskleri üretirler. Yer yapısı içinde yayılan deprem dalgalarının yer ile irtibatlı bütün mühendislik yapılarıyla etkileşimi bir güvenlik problemidir. İnsanların güvenli yapı inşaatı için belirli önlemler alması gerekmektedir. Ülkemizde 1947 yönetmeliğiyle bilimsel çalışmalar başlamış ve gelişmektedir. Analiz yaklaşımları, hesaplama teknolojilerinin sunduğu imkânlar çerçevesinde yönetmeliklerde sağlama kriterleriyle güncellenmektedir.

Günümüzün elektronik ve bilgisayar teknoloji gelişmelerinin desteğinde yapı üzeri gözlem faaliyetleri yapı sağlığı ve davranış verileri kullanılarak anlık durum değerlendirmesinin yapılmasını mümkün kılmıştır. Bu elektronik izleme imkânı büyük veri setleriyle analiz ve tekrar-üretim (benzeşim) çalışmalarıyla sanal laboratuvar denemelerinin önünü açmıştır. Yapı izlemelerinde yapısal noktalara serilmiş ivmeölçer ağlarıyla elde edilen yapısal davranış kayıtları yapı tanılama ve hasar tanılama çalışmalarında kullanılan temel verilerdir. Bu tür çalışmalar literatürde birçok çalışmada görülmektedir (M. Çelebi 1993, K. Beyen 2015, E. Şafak 2003, P. Block 2006, C. Simpson 1993).

Depremlerin oluşumu kırılma mekanizması, deprem kaynağı, dalga yayılım şartları ve yerel zemin katmanlarının ve yüzey formunun etkileriyle kendine özgün deprem verileri oluşturur (KBeyen ilgili makaleleri refere et). Hesaplama teknolojilerinin gelişmesiyle deprem setlerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelirken deprem kayıtlarının depolandığı veri arşivlerinin bazı merkezlerde oluşmasına ihtiyaç göstermiştir. Yurt içinden AFAD denetiminde ‘Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS)’ ve yurtdışındaki sayısız merkezlerden PEER/Berkeley örnek olarak arşivlerini paylaşan merkezlerdir. Dünya’da kaydedilmiş yakın alan kaynaklı depremlerin oluşturduğu arşivde en fazla yakın saha istasyonlarıyla kayıt alınmış deprem Tayvan’da 21 Eylül 1999’da gerçekleşen Chi-Chi depremidir. 7.6 moment büyüklüğü olan ana şoktan sonra 6.5-6.8 moment büyüklükleri arası üç ve altı büyüklüğünün üstünde toplam altı tane artçılılarıyla binalarda oluşan etkileri çok geniş bir coğrafyada hissedilmiştir. Yakın alan kaynaklı moment büyüklüğü 7 ve üstü olan 1999 öncesi Dünyanın toplam 12 civarı olan deprem kayıt sayısına deprem merkezinden çizilecek 20 Km çaplı daire içinde bulunan 65 istasyon ile önemli katkı sağlamıştır. Kocaeli depreminin yakın alan istasyon kayıtlarıyla Dünyanın yakın alan kaynaklı kayıt sayısı yükselmiş ve yeni bir çalışma oluşturmuştur. 1999 Chi chi/Tayvan depremiyle, 1995 Kobe/Japonya depreminin 10 katı ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin %50 fazlası sismik moment cinsinden enerji ortaya çıkmıştır (1). Ülkemizde 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi ve 23 Ekim 2011 Van Depreminde elde edilen kayıtlarla yakın saha kaynaklı deprem çalışmalarının örnekleri çoğalmaya başlamıştır (2, 3).

Son on yıl için baktığımız zaman ülkemiz adına önemli iki deprem karşımıza çıkmakta ve bu depremler için belirli uzak ve yakın kayıtlar elde edilmektedir. Bu depremler sırasıyla 24 Ocak 2020 Elazığ Depremi ve 30 Ekim 2020 İzmir Depreimidir. İzmir Depremi için alınan kayıt sayısı 167 iken, Elazığ Depremi için elde edilen kayıt sayısı 243 olmaktadır.

Önceki yıllarda alınan kayıt sayısı örneğin büyük acılara ve kayıplara sebep olan Kocaeli Depreminde izleme 22 tane yakın saha kayıt istasyonu ile yürütülürken 1999 sonrası deprem gerçeği ve algısı değişmiş ve istasyon ağı büyük sıçrama gerçekleştirmiştir.

Veri sayılarının artması bir çalışma konusu olarak yakın ve uzak deprem kuvvetlerinin çok hasar örneği olan orta ölçekli yapılarda gösterdiği davranış değişikliklerinin sistematığına bir göz atmayı zaruri hale getirmiştir.

### **Kinematik Parametrelerin Denkleştirilmesi:**

Deprem yükleri binalara X, Y ve Z eksenleri üzerinden kinematik etkiler oluşturmaktadır. Bu etkiler sırasıyla ivme, hız, yer değiştirme, eğim ve moment etkileridir. Dayanımına göre tasarımlar doğrultusunda moment etkileri önem arz ederken, performansa dayalı tasarımlar için ise ivme, hız ve yer değiştirme önemli parametreler olmaktadır. Bu sonuçlar doğrultusunda binanın plastik mafsallaşma sonucunda performansa dayalı tasarım sonuçlarının büyük ölçüde bina için en gerekli parametreleri oluşturduğu analitik ve gözlemlerle anlam yüklenmiş ampirik sonuçlar göstermektedir.

Analitik ve ampirik sonuçları bire bir ilişki içinde frekans ortamında transfer fonksiyonlarıyla değerlendirmek ve gözlenen hata dağılımına katlar arası veya veri imkanı varsa kat içinde bakarak taşıyıcı duvar, duvar yükleri, basitleştirilmiş alansal yayılı yükler ve hasarlı eleman rijitliği için kullanılan plastik mafsalları gibi koşullar düzeltiler. Güncelleme sonucunda benzeme ölçütü olmadan tutarlılığı değerlendirmek zordur. Güncellenen modelin sonuçlarının zaman ve frekans tanım alanında deneysel sonuçlarla mukayesesini teorik olarak açıklamak gerekirse eğer aşağıdaki eşitlik gereklidir (2).

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Eş. (1)'de gösterilen denklemler dahilinde binanın kendi oluşturduğu parametreler olan [M], [C] ve [K] parametreleri sırasıyla; kütle, sönüm ve rijitliği tanımlamaktadır. Bu tanımlamalar dahilinde kinematik parametreler olan  $\{\ddot{X}\}$ ,  $\{\dot{X}\}$  ve  $\{X\}$  değerler ise sırasıyla; hız, ivme ve yer değiştirme değerlerini temsil etmektedir.

### **Transfer Fonksiyonları ve Elde Edilme Yöntemleri:**

Depremlerin yapılara olan etkileri kütle, sönüm ve rijitlik parametrelerinin değişkenlikleriyle alakalı olmasından dolayı her yapının depreme tepkisi farklıdır. Yapı girdi kuvvet zaman hikayeleri (input) kullanılarak yapı tepkilerinin hesaplanması ve hatta davranış simülasyonu günümüz mühendisliğinde inceleme, anlama ve tasarlamaya önemli katkı vermiştir. Diğer bir cephede titreşim sinyalleriyle çalışmalar gelişen sensor teknolojileriyle yeni ve farklı disiplinlerde uygulama alanları açmıştır. İnşaat mühendisliği içinde titreşim verileriyle yapı özelliklerini tanımlama, hasar tespiti ve durum değerlendirmesi uygulamaları teorik mekaniğin klasik sonlu eleman analizleri içindeki ilerlemesiyle özellikle inşaat + elektronik mühendisliği ortamı kaçınılmaz olarak oluşmuştur. Bu çalışmada izlenen veya varsayımsal sonuçlarla elde edilen titreşim sinyalleri veri işleme algoritmalarıyla işlenerek sonlu eleman (nümerik) analiz sonuçları diğer bir açıdan örneğin transfer fonksiyonlarıyla test edilecektir. Transfer fonksiyonlarının hesabı için birçok yöntem mevcut olmakla beraber temel anlamda girdi ve çıktı çiftlerinin sebep olduğu davranış değerlerinin işlenerek oranlanması ile çözülmektedir. İşleme/analiz çok değişik metodlar ile çalışılabilmektedir. Bu çalışmada durum-uzay (state-space) yöntemi kullanılmıştır. durum-uzay çözümü için yapının (hareket) davranış denklemlerine Laplace Dönüşümü uygulanırsa;

$$m*s^2*X(t) + c*s*X(t) + k*X(t) = P(t) \quad (2)$$

$$X(s) = P(s) / (m*s^2 + c*s + k) \quad (3)$$

$$G(s) = X(s) / P(s) \quad (4)$$

$$G(s) = 1 / (m*s^2 + c*s + k) \quad (5)$$

Eş. (4) transfer fonksiyonun girdi ve çıktı değerlerinin oranı ile bulunması sonucunda elde edilirken, Eş. (5) ise durum-uzay yöntemi ile transfer fonksiyonlarının elde edilmesini göstermektedir (3). Bu çalışmada frekans tanım alanında çıktı ve girdi değerlerinin oranları elde edilerek transfer fonksiyonları elde edilecektir.

### **Frekans Tanım Alanında Analiz:**

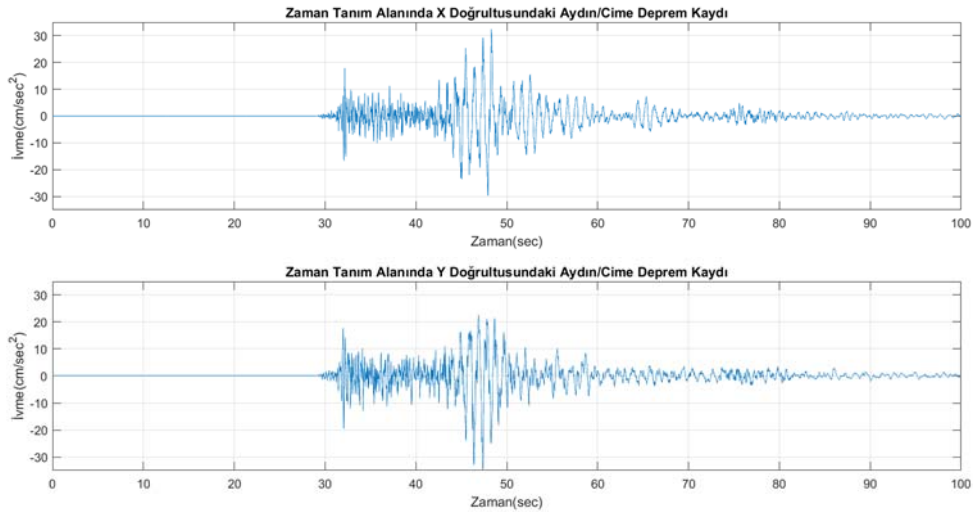
Zaman tanımındaki yer değiştirme etkileri olan  $X(t)$ , sonsuz bir periyot içinde etkimesi olduğu kabul edilerek zaman tanım alanında frekans tanım alanına Fourier Dönüşümü uygulanarak frekans içeriği bilgisine ulaşılabilir.

$$X(\omega) = \mathcal{F}[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

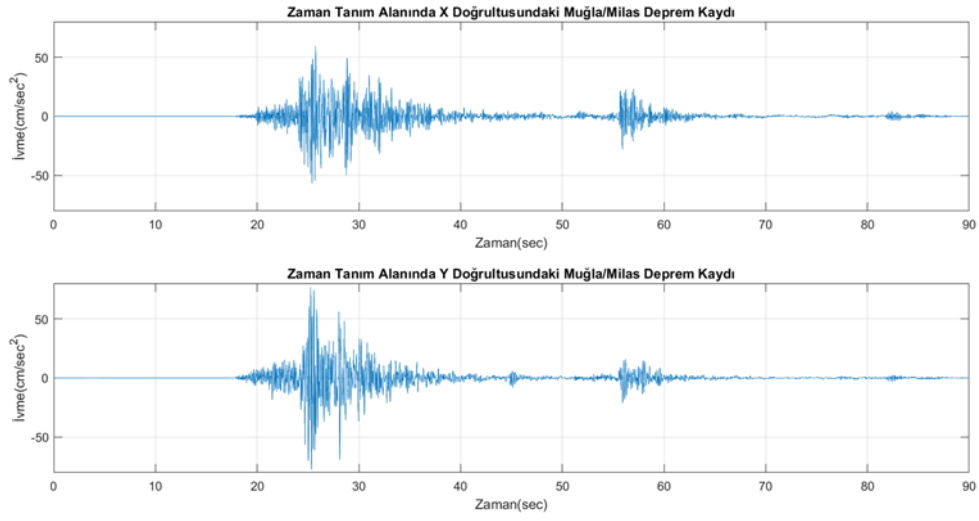
Belirli araştırmalar sonucunda yapıda rijitlik zayıflaması, kütle kaybı veya sönümlerin büyümesiyle sonuçlanan lineer elastik davranışlardan uzaklaşan bozulmaların sonuçlarını barındıran titreşim sinyalleri bir çeşit zaman – frekans ilişkisine bağlı dinamik karakteristiklerin eşleştirmelerinin yapıldığı algoritmalar zorunlu hale geldiği anlaşılmıştır (4). Bu araştırmaların öncüleri olarak Sohn (2003) ve Doebling (1996) ele alınabilir.

### **Kullanılacak Olan Yol ve Örneklem Değerlerin Kontrol Edilmesi:**

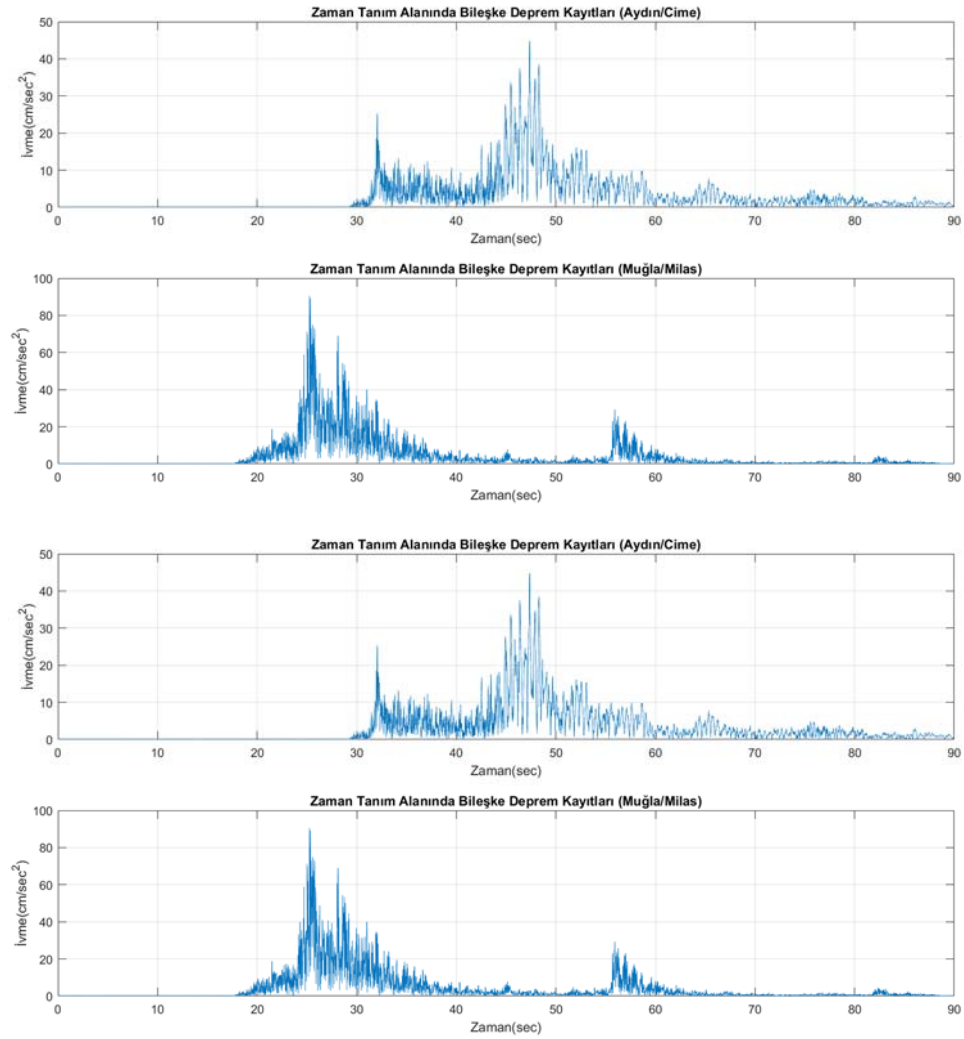
TADAS değer verileri yardımıyla birlikte 20 Temmuz 2017 Bodrum Depremi esas alınarak yirmi kilometre yarıçaplı dairesel alan içerisindeki Muğla Milas Deprem Kayıtları yakın kayıt verileri olarak referans kabul edilirken, yirmi ve elli kilometre yarıçaplı dairesel alanın arasındaki alansal bölge arasında kalan Aydın Çine Deprem Kayıtları uzak kayıt verileri olarak referans kabul edilmiştir.



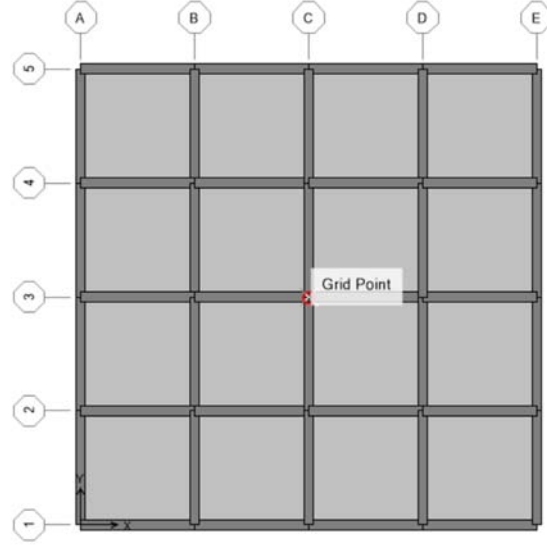




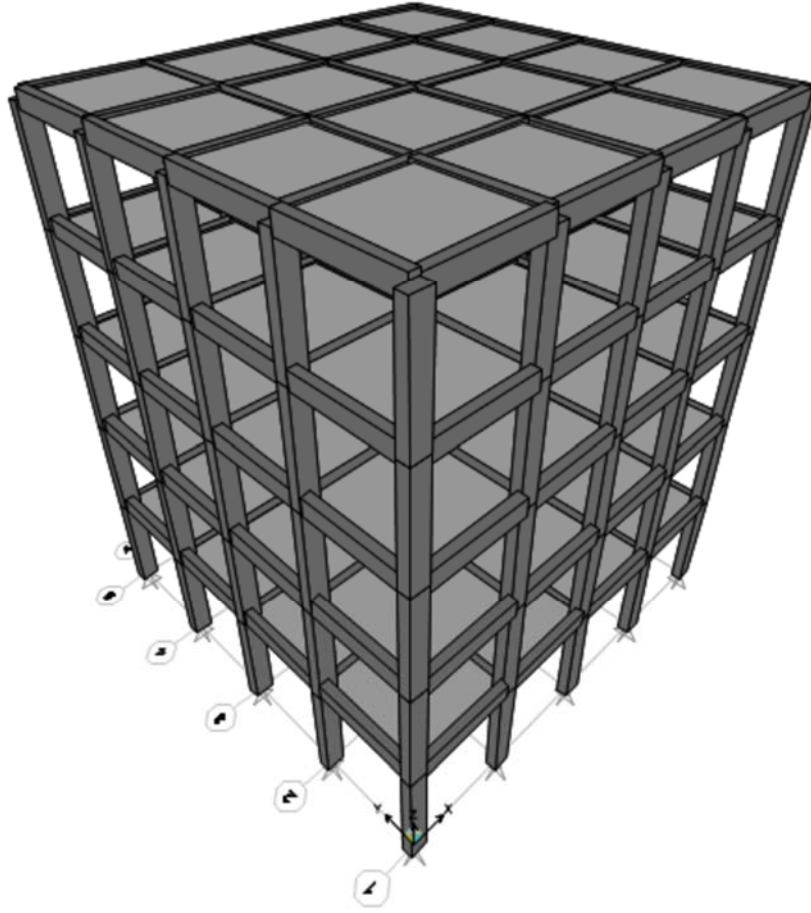
Şekil 1 - Zaman Tanım Alanında Girdi Değerlerin Grafikleri



Şekil 2 - Zaman Tanım Alanında Depremlerin Bileşke Grafiği



**Şekil 3 - Değerlerin Alınacağı Yapı Noktası**



**Şekil 4 - Yapının Üç Boyutlu Gösterimi**

Deprem kayıtlarının tek bir noktaya etkisinin ölçülmesi adına geometrik ortalama alınarak bileşke ivme-zaman grafiği elde edilmek istenilmiştir.

$$Q(a) = \sqrt{[X(a)]^2 + [Y(a)]^2} \quad (7)$$

Ek. 7'deki bileşke ivme sonucunda 45 dereceye etki eden ivme değeri bulunmuş olup bu sonuçlar dahilinde etkilerin farklılıkları incelenmiştir.

Bu değerleri simetrik bir yapı olarak SAP2000'de tasarlayarak, düzensizliklerin oluşturulmadığı, bunun amacı olarak binanın etkilenmesinden ziyade deprem kayıtlarının farklılıklarının araştırılması amaçlanmıştır.

Yapıdaki değerler Şekil 3'deki Grid Noktasından alınması hesap edilmiş olup; birinci, üçüncü ve beşinci katlardaki değerler hesaplarda karşılaştırmalarda kullanılmıştır. Bununla birlikte yapıdaki oluşacak olan mod değerlerinin kat değerleri olan beşi geçmemesi gerekmektedir. Bunun için kütle katılım oranı ve otokorelasyon kontrolü gerekmektedir. Öncelik olarak kütle katılım oranı incelendiğinde:

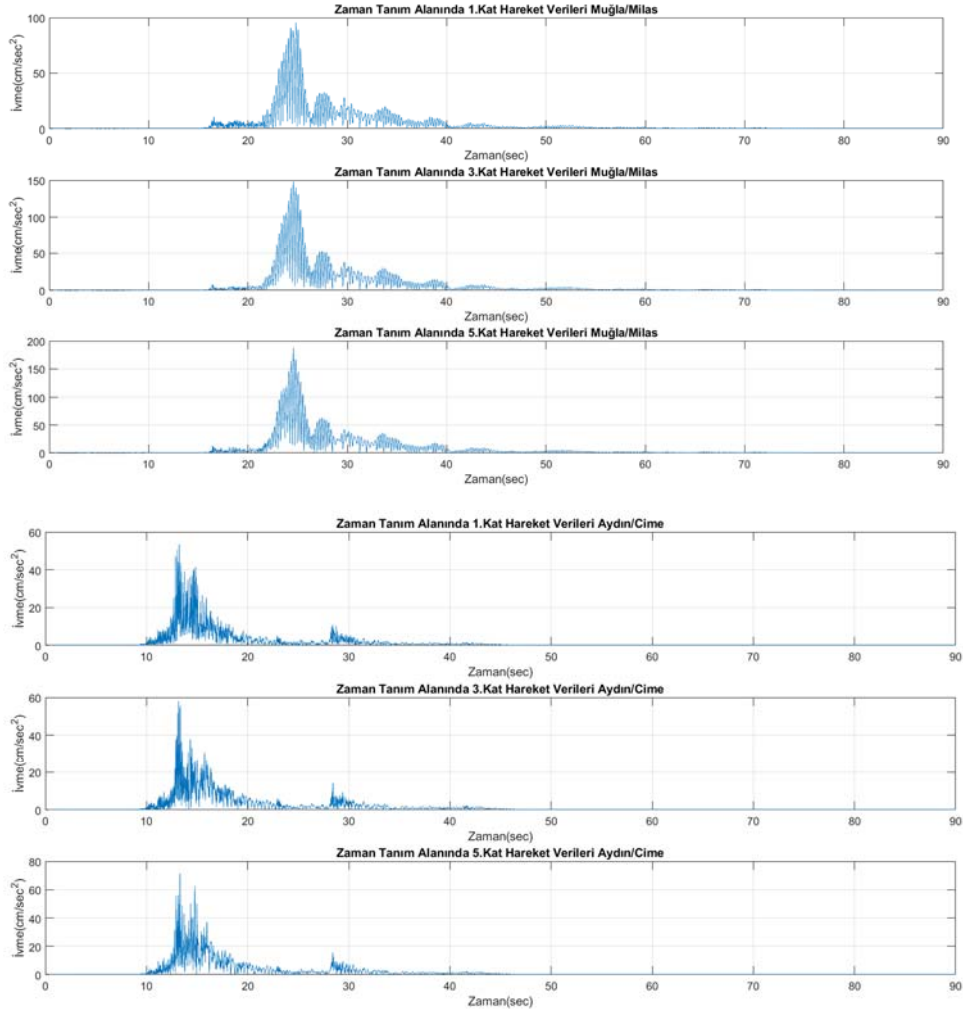
OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless
MODAL	Mode	1	0.687258	0	0.97	0
MODAL	Mode	4	0.199668	0	0.02803	1.583E-20
MODAL	Mode	7	0.11063	0	0.00297	1.903E-19
MODAL	Mode	9	0.079485	4.827E-20	0.0005912	2.475E-16
MODAL	Mode	11	0.06631	2.715E-19	0.0001003	6.452E-16
MODAL	Mode	10	0.074077	0.004848	2.129E-19	1.422E-15
MODAL	Mode	2	0.499293	0	0	0
MODAL	Mode	3	0.464532	0.96	0	0
MODAL	Mode	5	0.145646	1.531E-20	0	5.256E-17
MODAL	Mode	6	0.137661	0.03801	0	1.268E-16
MODAL	Mode	8	0.079817	2.581E-19	0	8.084E-16
MODAL	Mode	12	0.055689	9.375E-19	0	2.255E-15

Şekil 5 - Kütle Katılım Oranları

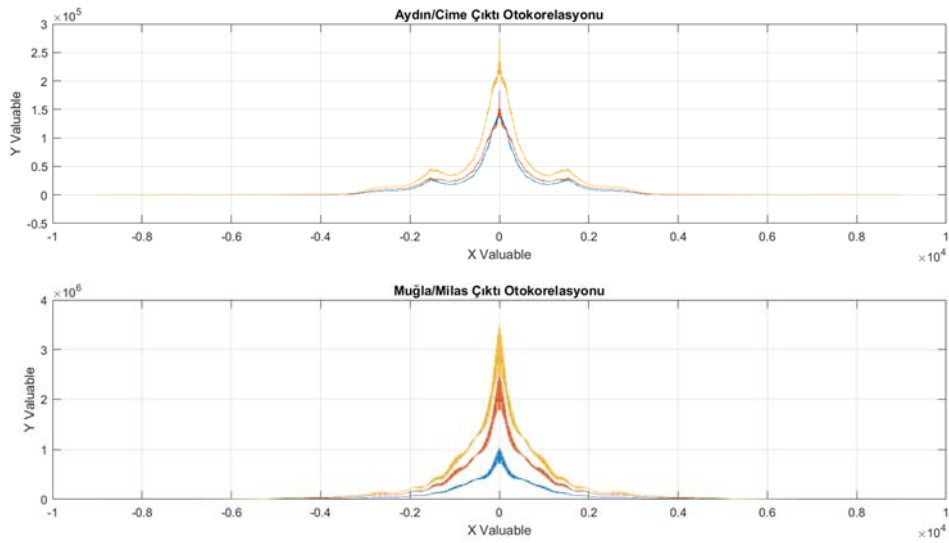
Türkiye Deprem Yönetmeliğinde 4.8.1.2'ye göre katılım oranı olarak %95 olmaktadır. Mavi olarak belirtilen değerler X ve Y yönü için etkiyen kütle katılım oranları olmaktadır. Bu şartın sağlandığı şekillerde görülmektedir. 0'a yakınsayan ve 0 olan modal değerler etkilenmeyeceği görülmüş olup beş modunda yapıda etkisinin olduğu görülmüştür. Otokorelasyon yöntemi için ise çıktı bilgilerin oluşturulması gerekmektedir, ileriki adımlarda bu yöntemin doğruluğu araştırılacaktır.

#### Analiz:

Yapıya etki ettirilen veri setleri girdi (input) setleri olmaktadır. Bunun sonucunda bina belirli varsayımsal lineer davranışlar göstermiştir. Bu davranışlar sonucunda binaya etkiyen 45 derecelik açının oluşturduğu deprem etkileri sonucunda oluşan ivme-zaman grafikleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6 - Zaman Tanım Alanında Depremlerin Çıktı Grafikleri

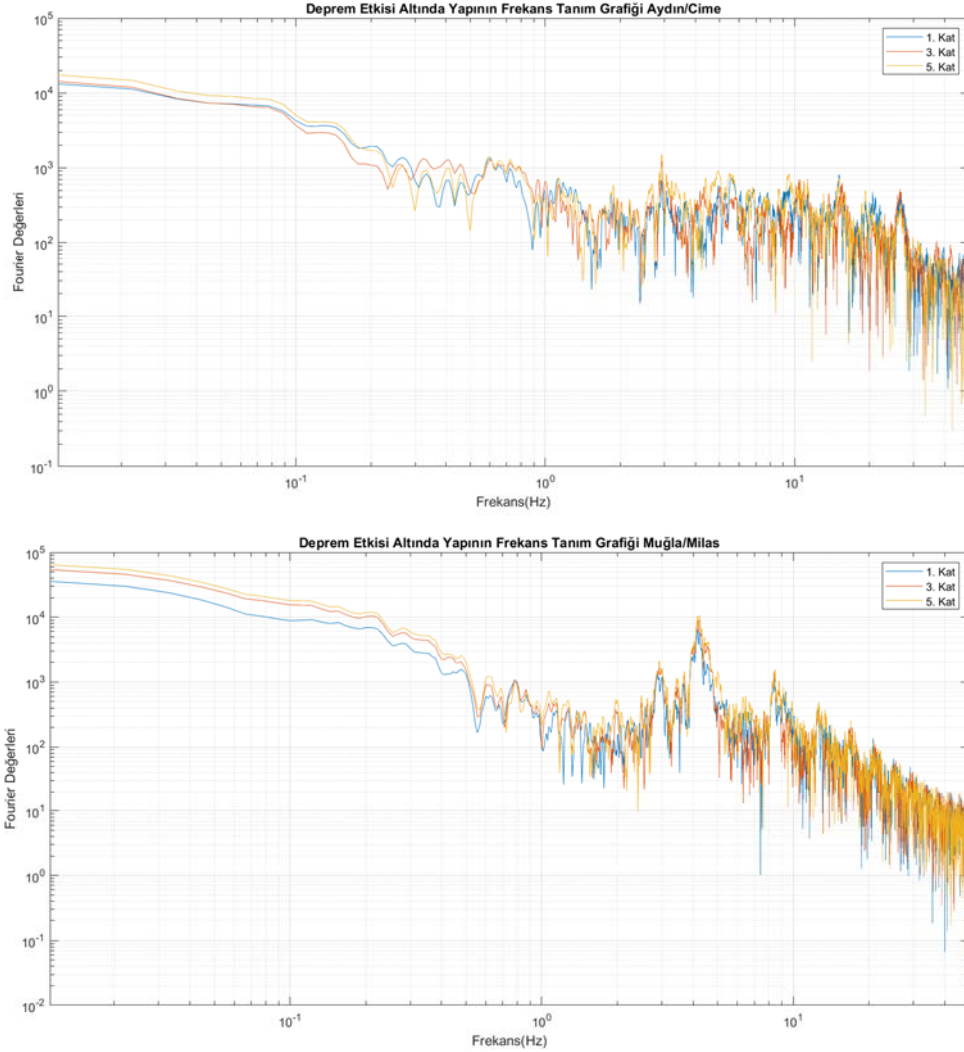


Şekil 7 - Çıktıların Otokorelasyon Grafikleri

Bu grafiklerden görüldüğü üzere kat yüksekliği arttıkça deprem etkilerinin arttığı, deprem kayıtlarının ise farklı zaman aralıklarında etki ettiği görülmektedir. Modal analizdeki modların kontrolü adına otokorelasyon yapıldığında Şekil 4'teki grafik oluşmaktadır.

Şekil 7'deki grafiklerin gösterdiği üzere pik değerlerde herhangi bir kayma(shift) gerçekleşmediği bunun sonucunda çıktı değerlerin oluşturacağı mod değerlerinin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

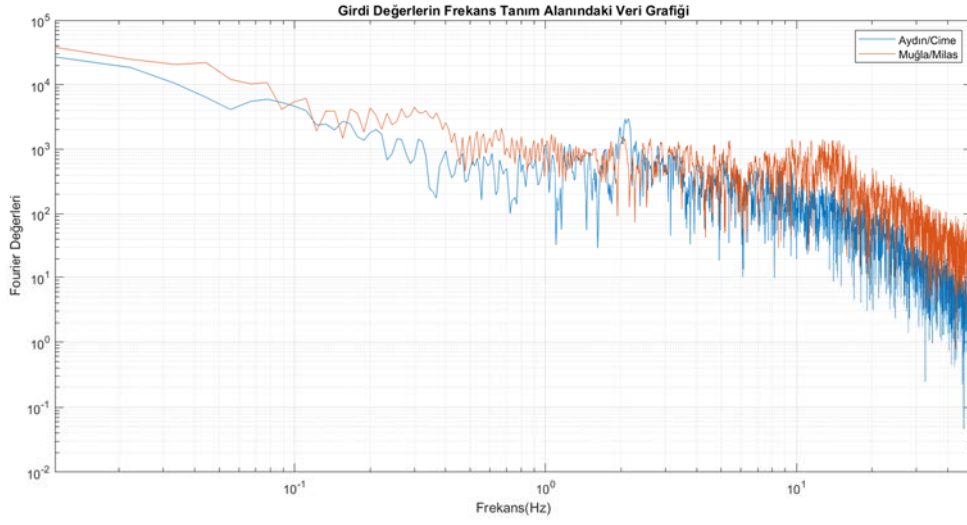
Çıktı değerlerin zaman tanım alanındaki veri değerleri için Fourier Dönüşümü uygulanıp faz açısı değerleri haricindeki sonuçlar tanımlandığında oluşan grafik Şekil 8'de belirtilmiştir.



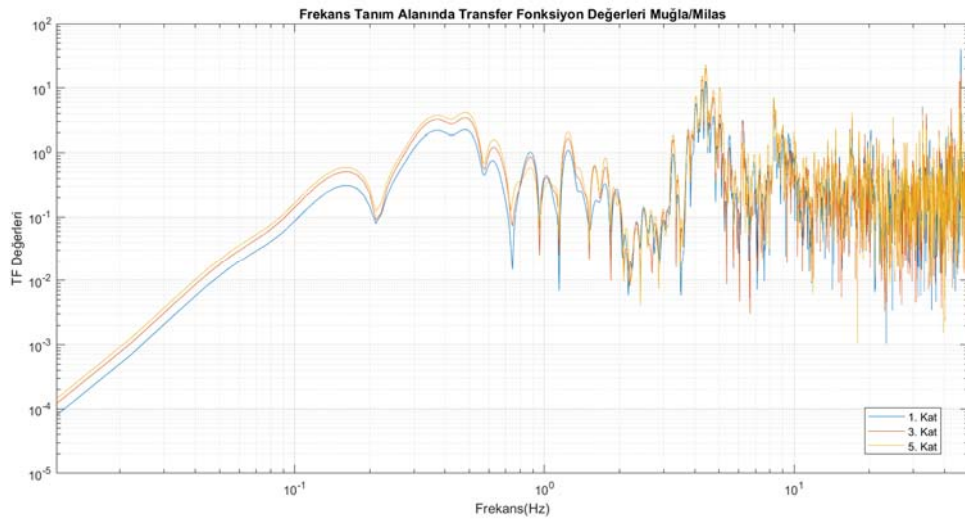
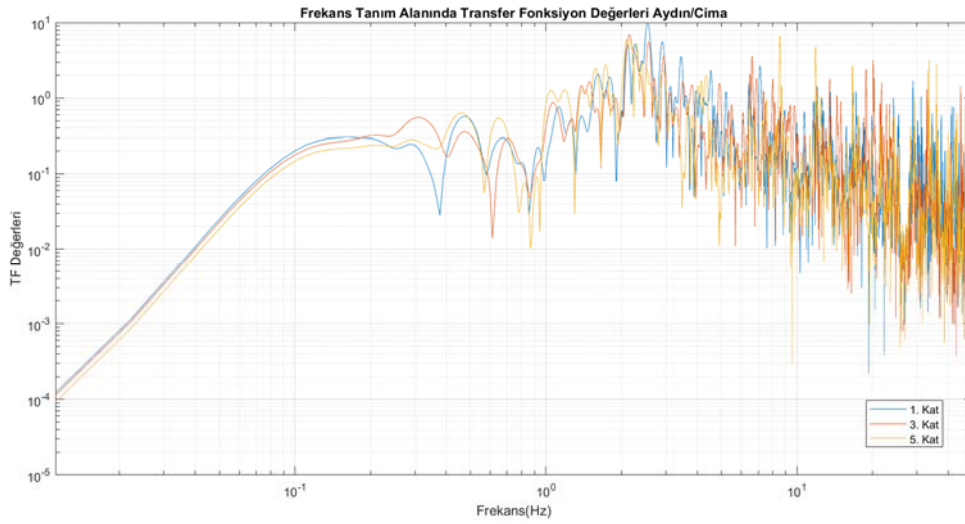
Şekil 8 - Çıktı Değerlerin Frekans Tanım Alanındaki Grafiği

Görüldüğü üzere deprem verilerinin farklılıkları yapının davranışında oluşturduğu farklılıklar Şekil 8 içerisinde net bir şekilde görülmüştür. Düşük frekans değerlerinde Aydın kaydında kat davranışlarının birbirine yakınsamış olduğu, görülen yakınsama davranışının benzerinin ise Milas kayıtlarında yüksek frekans değerlerinde görülmesi, binaların deprem dalgalarını yansıtarken farklı karakteristik kat davranışlarına ulaştığı görülmüştür.

Girdi değerlerindeki frekans tanım alanında tanımlanması gerekmektedir. Şekil 9'da girdi değerlerinin oluşturduğu grafiği göstermektedir.



Şekil 9 - Girdi Değerlerin Frekans Tanım Alanındaki Grafiği



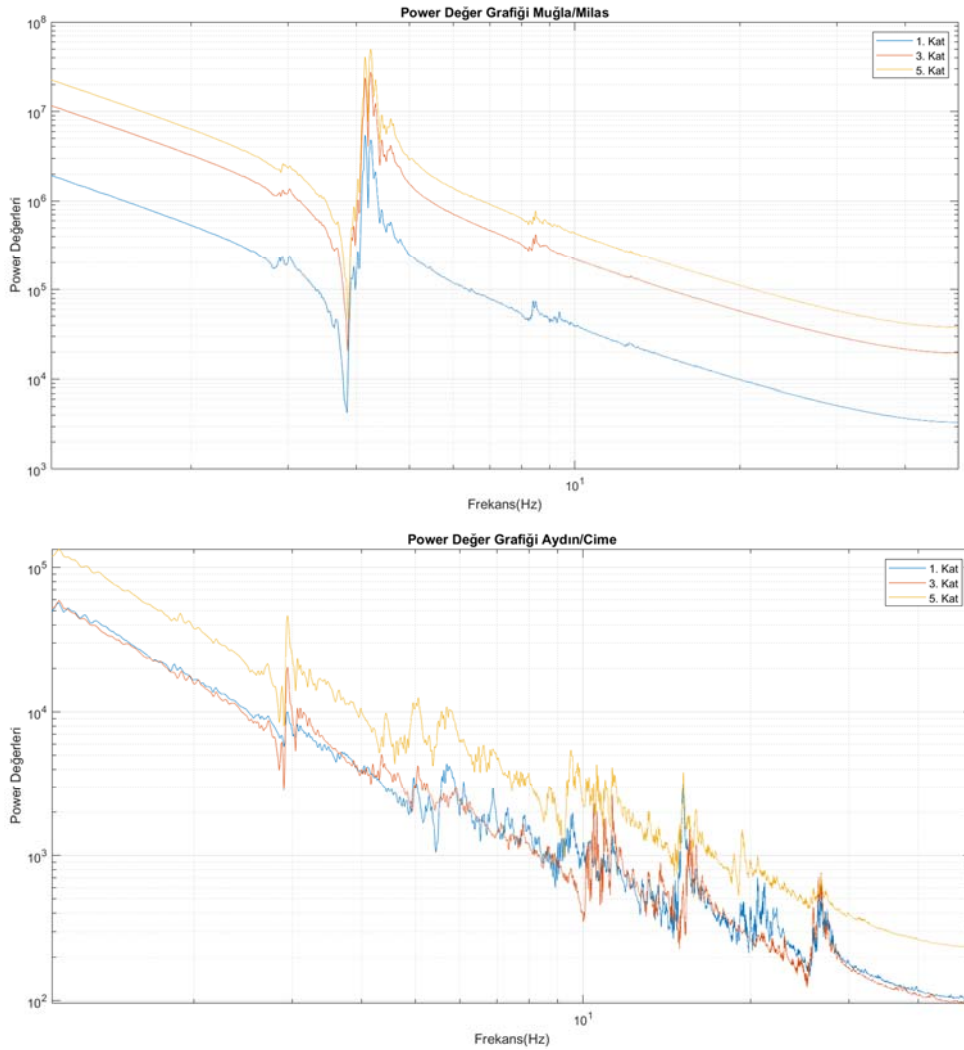
Şekil 10 - Kayıtların Transfer Fonksiyonu

Girdi değerlerin binaya oluşturduğu etkilerin değer aralığının benzerlik göstermesi, bunun dışında ise binanın karakteristik yapısının oluşturduğu etki farkları belirli frekans değerlerinde anlaşılmaktadır. Muğla/Milas kaydındaki 5-10 Hertz arasındaki oluşan değer pikinin girdi değerinde görülmediği, Aydın/Cime kaydında ise oluşan pik farkının Muğla/Milasa nazaran daha az bir şekilde olduğu görülmüştür. Basit olarak binanın karakteristik değerlerinin depremi yansıtması, depremlerle birlikte binanın mekanik çalışma gösterdiğinin bir kanıtı olmaktadır.

Transfer fonksiyonlarının verileri grafiksel olarak gösterimi Şekil 10'da gösterilmektedir. Eldeki verilerin sağlıklı bir görüntü halde olması adına Butterworth Filtresi ile filtre edilmiştir.

Elimizdeki grafikler sonucunda belirli noktalarda farklılıklar olmakta, dikkat çeken detay olarak Aydın/Cima transfer fonksiyon (TF) grafiklerinde katların belli noktalarda standart hareketleri bozduğu bazı noktalarda birinci katın farklı frekans değerlerinde standart olan stabil kinematik verilere ulaşmadığı, farklı bir hareket şemasına sahip olduğu görülmüştür. Muğla/Milas transfer fonksiyonu (TF) grafiklerinde ise bu tarz bir aykırılık görünümünün Aydın/Cima transfer fonksiyon (TF) grafiğinde görülmediği anlaşılmaktadır.

Transfer fonksiyon grafikleri bize aslında binanın oluşturduğu hareket şemasını sağlasa da modal noktaları net olarak görülmemesinden ötürü, güç değerlerinin elde edilip grafik haline getirilmesi önem arz etmektedir. Aşağıda Şekil 11'de güç değerlerinin grafikleri verilmektedir.



Şekil 11 - Güç Değer Grafiği

Güç analizi sonucunda Muğla/Milas kaydında baskın modun görüntüsü sonucunda diğer modal görüntülerinin görünmediği fakat aynı durumun Aydın/Cime kaydında olmadığı görülmüştür. Grafikler ışığında uzak ve yakın deprem kayıtları arasındaki net olan görüntü farkını güç noktaların oluşturduğu görülmektedir.

## **SONUÇ VE DEĞERLENDİRME**

Düzenli ve stabil bir binanın zeminden gelen depremi büyüterek kendi yapısal elemanlar içerisinde yansıttığı, bu sebepten ötürü deprem kayıtlarının farklılıklarıyla beraber binanın yapısal karakterinin, binanın yapısal analizinde büyük önem arz ettiği görülmektedir.

Deprem kayıtlarının uzaklığın artması mümkün olan etkileri azaltmakta fakat binanın tekil taşıyıcı elemanlarının diğer taşıyıcı elemanlara kıyasla farklı deplasman, hız ve ivme değerlerine ulaştığı bunun sonucunda farklı modal görüntülerinin olduğu görülmektedir. Nitekim bu modal görüntülerin baskınlığının güç grafiklerinde bariz olarak görüldüğü, Muğla Deprem Kaydının çıktı değerlerinin modal görüntülerinin bariz olarak görüldüğü fakat Aydın/Cimede bu modal görüntülerinin net görülmediği anlaşılmıştır.

Transfer fonksiyonların katlara göre davranış bakımından farklılık göstermesi belirli noktalarda birinci katın TF değerlerinin üçüncü ve beşinci katı geçtiği, bazı noktalarda ise birinci katın diğer katlara göre farklı bir hareket şeması çizdiği görülmüştür.

Binanın yapısı ve eleman dizilimlerin değişmesi sonucunda farklı deprem kayıtlarının yapıya olan etkisinin farklılaştığı bu sebepten ötürü, deprem kayıtlarının farklılaşıp analiz edilmesinin büyük önem taşıdığı görülmektedir.

Yapıların kinematik farklılıkları sonucunda elemanların farklı şekilde ivme değerleri kazandığı bu değerler için ise gerekli önlemlerin alınması gerektiği, yapıların lineer davranış varsayımında bile farklı deformasyonlara sahip olduğu bu deformasyonların lineer olmayan alandaki etkilerinde incelenmesi gerektiği görülmüştür.

Katlar arasındaki farklılıklar genel anlamda yüksek kattaki salınım ve hareket değerlerinin daha yüksek olduğu fakat bazı noktalarda belirli kat noktalarının bu salınımlara denk veya yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür.

## **Kaynaklar**

1. Present day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, Journal of Geophysical Research Vol. 116, Kuo-En Ching, Kaj M. Johnson, 2011
2. Titreşim verisiyle güncellenmiş sonlu eleman modeliyle hasar simülasyonu, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Kemal Beyen, 2011
3. Modal analysis of structure, Jimin He, Zhi-Fang Fu, 2001
4. İzmir hasar tanılama çalışmalarında ve sismoloji konferansı, Kemal Beyen, 2015.
5. Seismic responses of two adjacent buildings I and II, Mehmet Çelebi, 1993
6. Effect of baseline corrections on response spectra for two recordings of the 1999 Chi- Chi, USGS, D.M Boore, 1999
7. Structural dynamics of earthquake engineering theory and application using MATHEMATICA and MATLAB, S. Rajasekaran, 2009



## Taban Yalıtımlı Bir Binanın Deprem Davranışının Zaman-Frekans Ortamında Araştırılması

Ahmet ÖZENİR<sup>1</sup>, Kemal BEYEN<sup>2</sup>

### ÖZET

*Bu çalışmada sismik taban yalıtımlı bir yapıda katlara yerleştirilmiş ivme ölçerler tarafından 1994 Northridge depreminde elde edilen ivme kayıtları kullanılarak yapı davranışı Zaman-Frekans analizi yaklaşımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada zaman-frekans ortamında sürekli dalgacık dönüşümü yöntemi kullanılarak yapının dinamik özelliklerinin zaman içerisindeki değişimleri gözlenmiştir. Buna göre, sismik taban yalıtımının etkisi ile kuvvetli yer hareketinin önemli miktarda enerji içeriğine sahip yüksek frekanslı bileşenlerinin üst yapıya aktarımının belirgin bir şekilde azaldığı anlık olarak izlenmiştir. Pasif kontrol sistemi olan taban yalıtımlı yapı deprem etkisini, üst yapı davranışını ve aldığı kuvvetlerin değişimlerini Zaman-Frekans boyutunda göstermesi açısından etkin bir yöntemdir.*

**Anahtar Kelimeler:** Zaman-Frekans Analizi, Taban Yalıtımı, Dalgacık Dönüşümü, Yapı Sağlığı ve İzleme

### ABSTRACT

#### **Seismic Performance of a Base Isolated Structure in Time-Frequency Domain**

*In this study, dynamic characteristics of the structure and earthquake response characteristics of the seismic base isolation are evaluated in Time-Frequency domain. Structure story responses and earthquake data set were recorded by the accelerometer network during the 1994 Northridge earthquake. Time-frequency domain continuous wavelet transform is used to monitor the variations of structural frequencies in time. In accordance with the efficiency of the base isolation, reduction of significant energy transmission to upper structure in the higher frequency range is traced instantaneously. The seismic base isolation performance of the observed structure can be identified and dynamic behavior of the passive structural vibration control also can be traced absolutely in the time-frequency domain. It has been observed that the time-frequency analysis is a very efficient method in terms of showing the variations of the earthquake effect and the behavior kinematics and operational forces in the superstructure in time-frequency domain.*

---

1 Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - ozenir.ahmet@gmail.com

2 Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - kbeyen@kocaeli.edu.tr

**Keywords:** Time-Frequency Domain Analysis, Base Isolation, Wavelet Transform, Structural Health Monitoring.

## 1. GİRİŞ

Sinyaller birbirinden farklı kaynaklar tarafından oluşturulan bilgi taşıyıcılar olarak tanımlanabilir [1]. Sinyaller gerek doğadan direkt olarak elde edilmiş gerekse insan eliyle yapay olarak üretilmiş olsun bir alıcı aracılığıyla zamana bağlı ölçülmesinden dolayı çoğunlukla zaman ortamında tanımlanmaktadır.

Sinyaller genel olarak farklı alt sinyal bileşenlerinden oluşmaktadır. Bunlar periyodik ve periyodik olmayan kısım, gürültü, anlık sıçrama ve anomaliler olarak tanımlanabilir. Bu nedenle incelenen sinyalde bu bileşenler ayrıştırılarak problemin tipine bağlı olarak ilgili yapısal kısım ve buna ait özellikler belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun için çalışma yapılan ortamın sinyal içeriğini ne ölçüde yansıttığı ve bu ortamın anlaşılabilirliği önemli olmaktadır. Bu nedenle, sinyaller kayıt altına alındığı ortam yerine ihtiyaca en uygun ortama dönüştürülerek bu ortamda işlenmektedirler. Sonuç olarak, aynı sinyale farklı bir açıdan bakılarak sinyal içeriğinde aranılan bilgiye daha net bir şekilde ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Zaman ortamında kaydedilen sinyallerden genlik, faz, enerji, süre gibi bazı temel bilgiler elde edilebilirken, uygulanan Fourier dönüşümü ile frekans ortamında kompleks sinyal farklı genlik ve farklı frekans yapılarında harmonik dalga formlarının bileşenlerinden oluşturulabilir. Ayrıştırılmış harmonik sinyallerin frekans içeriğine bağlı olarak farklı ortamlardaki yayılım ve azalım özellikleri belirlenebilir. Ancak, gözlenen gerçek fizik yasalarına uymayan ayrıştırılmış-sonsuz enerjiye sahip basit harmonik zaman fonksiyonlarının bir süre sonra sönümlenmesi bu dönüşüm içinde gerçekleşmemektedir. Dahası, sinyale ait Fourier spektrumu incelendiğinde ayrıştırılmış harmonik sinyallerin frekans, genlik ve faz bilgileri elde edilirken, bu bilgilerin kayıt zamanı süresince anlık durumuna ait değişim bilgileri de elde edilememektedir.

Fourier analizi basit algoritması ve uyarlanabilir yazılım kolaylığı gibi birçok avantajından dolayı lineer-duragan(stasyonier)-ercodik(ergodic) fizik şartlarında izlenen kayıtların analizi ve işlenmesi için oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Yukarıda belirtilen özelliklerle matematiksel avantajlarına rağmen bazı fiziksel uygulamalarda sınırlamaları bulunmaktadır [2]. Yöntemin matematiksel yönü belirli durumlarda sinyal özelliklerini doğru olarak sağlasa da fiziksel gerçekliğini bozabilmektedir.

Gerçek sinyallerin çok büyük bir kısmı durağan olmayan özelliktedir. Zaman-Frekans analizi yöntemleri, özellikle mekanik titreşim sonucu elde edilen durağan olmayan sinyallerin dinamik karakteristiklerini zamana bağlı olarak dikkate almaktadırlar. Zaman-Frekans spektrumları durağan olmayan sinyallerin analizi için yaygın olarak kullanılan adaptif yöntemlere göre de daha fazla ve doğru bilgi sağlamaktadır [2-7].

## 2. ANALİTİK ( KOMPLEKS) SİNYAL

Sinyaller doğada gerçek formda bulunmasına rağmen, matematiksel olarak kompleks formda tanımlamak sinyalin özellikle faz içeriğini ve bununla beraber frekans içeriğini elde etmek açısından avantajlı bir yaklaşım olmaktadır [8]. Buna göre gerçek bileşeni  $s_r(t)$ , sanal bileşeni  $s_i(t)$  olan bir kompleks sinyal,  $x(t)$  aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$x(t) = s_r + js_i = A(t) e^{j\psi(t)} \quad (2.1)$$

Bu ifadeden anlık genlik,

$$A(t) = \pm|X(t)| = \pm\sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} = e^{\text{Re}[\ln X(t)]} \quad (2.2)$$

ve anlık faz,

$$\psi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} = \text{Im}[\ln X(t)] \quad (2.3)$$

Anlık fazın zamanda birinci türevi anlık açısal frekans olarak ifade edilmektedir.

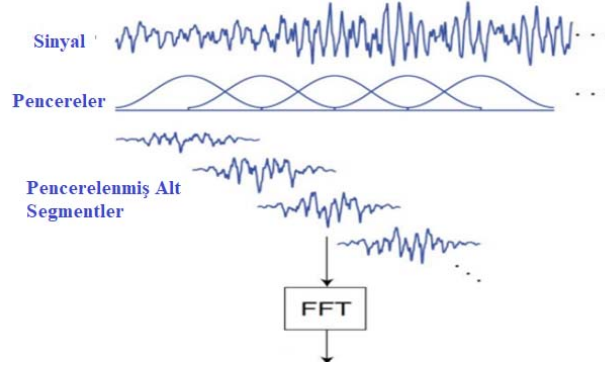
$$\omega(t) = \dot{\psi}(t) \quad (2.4)$$

Bir sinyalin her bir zaman anında bir anlık faz değeri bulunmaktadır.

### 3. ZAMAN-FREKANS ANALİZİ YÖNTEMLERİ

#### 3.1. Kısa Zaman Pencereli Fourier Dönüşümü

Kısa zaman pencereli Fourier dönüşümü ile bir sinyal pencereleme tekniği ile alt parçalara ayrılarak her parçaya Fourier dönüşümü uygulanmasıyla spektral özellikleri belirlenmektedir. Her bir zaman aralığı için hesaplanan spektrum ile sinyalin frekans içeriğinin zaman içerisindeki değişimi gözlenebilir.



Şekil 3.1 - Kısa Zaman Pencereli Fourier Dönüşümü [9]

Bu yöntem ile bir sinyalin  $t$  anındaki özelliklerini belirlemek için, sinyalin bu andaki kısmı belirginleştirilirken bu anın dışındaki kısımlar bastırılmaktadır. Bu işlem sayesinde sinyalin bir pencere fonksiyonu  $h(t)$  ile  $t$  anında merkezlenerek çarpılması ile dönüştürülmüş sinyal edilir.

$$s_t = s(\tau) + h(\tau - t) \quad (3.1)$$

Buna göre Fourier dönüşümü,

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S_t(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.2)$$

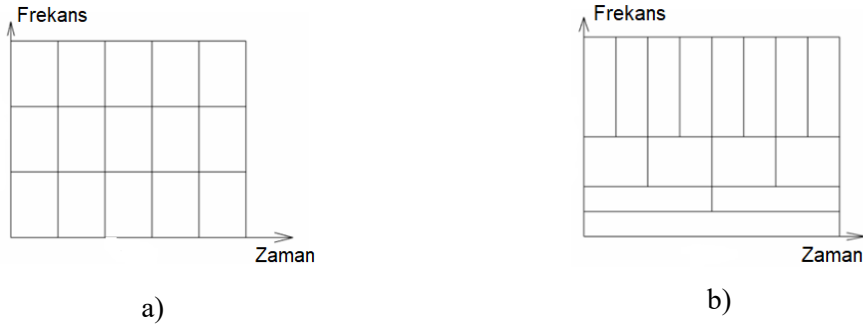
$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3.3)$$

Sinyalin  $t$  anı için enerji yoğunluk spektrumu ise,

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (3.4)$$

ifadesi ile elde edilebilir. Bu ifade ile her bir zaman anı için farklı bir spektrum elde edilerek, tüm bu spektrumların birleştirilmesi ile zaman-frekans dağılımı,  $P_{sp}$  bulunur. Söz konusu dağılıma “Spektrogram” adı verilmektedir.

Kısa Zaman Pencere Fourier Dönüşümü yönteminde bazı potansiyel problemler bulunmaktadır [6]. Bu yöntemde farklı frekans içerikleri için sabit zaman ve frekans çözünürlüğü kullanılmaktadır. Bu durum, zaman ya da frekans ortamında çözünürlüğün kaybedilmesine sebep olmaktadır. Kullanılan pencere fonksiyonundan dolayı elde edilen enerji içeriği salt orijinal sinyale ait olmayıp, pencere fonksiyonundan dolayı yapay bir içeriği de bünyesinde barındırmaktadır. Bir diğer durum ise sızıntı oluşumudur. Pencere fonksiyonu uygulanmış bir sinyalin spektrumu tek bir frekansı baskın olarak ortaya çıkarmayıp, pencere fonksiyonun frekans genişliği boyunca yayılı bir frekans spektrumu elde edilmesine neden olmaktadır. Kısa Zaman Pencere Fourier dönüşümünde, pencere fonksiyonunun genişliği önemli bir parametre olup, analiz sonucunda hangi frekansların tespit edileceğini kontrol etmektedir. Bu nedenle, pencere fonksiyonun zaman ortamındaki genişliğinin sinyal içeriğindeki en büyük baskın periyodu süresinden daha fazla olması önerilen bir yaklaşımdır. Bu durumun sağlanamaması durumunda, elde edilen sinyalin frekans içeriği gerçek durumu temsil etmeyebilir. Uzun periyotlu titreşim özelliklerine sahip sistemlerde bu durum zaman ortamında çözünürlüğünün kaybedilmesine sebep olabilmektedir.



Şekil 3.2 - Zaman-Frekans Çözünürlükleri, a) Kısa Zaman Pencere Fourier Dönüşümü, b) Sürekli Dalgacık Dönüşümü [9]

### 3.2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü zaman ortamında aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır [10].

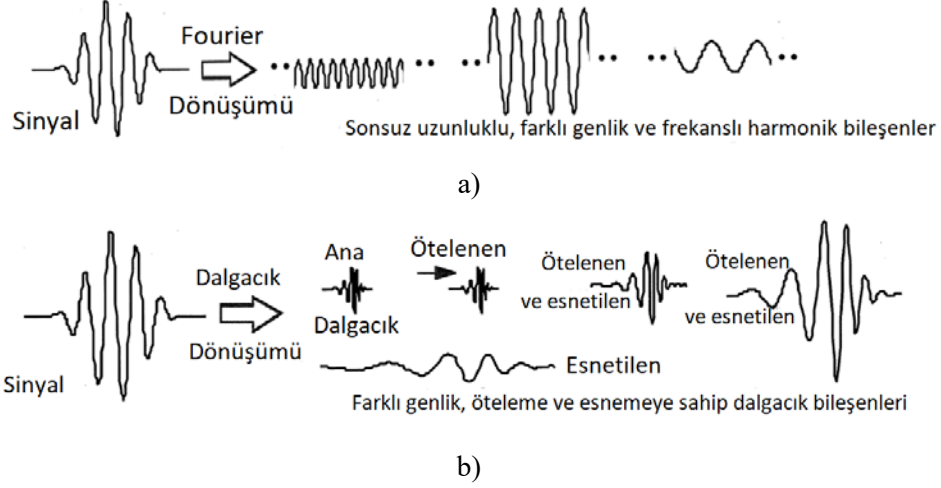
$$W_g(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3.5)$$

Bu ifade sinyal ile dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu işlemidir. Buna göre, sinyal ile dalgacık fonksiyonu genliği her bir ölçek parametresi “a” için, her bir zaman adımında terim terime skaler olarak çarpılarak toplanır ve ilgili zaman adımı için sonuç değeri elde edilir. Bu işlem sinyal uzunluğu boyunca her bir zaman adımı için yapılarak ilgili ölçek parametresi için her bir zaman adımına karşı gelen dalgacık katsayıları elde edilir. Ölçek parametresi yenilenerek sinyalin tüm frekans spektrumu için yukarıdaki işlem yapılarak dalgacık katsayılarından oluşan matris elde edilir. Zaman ortamında tanımlanan bu işlem frekans ortamında da yapılabilmektedir.

$$W_g(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) G^* (a\omega) e^{i\omega b} d\omega \quad (3.6)$$

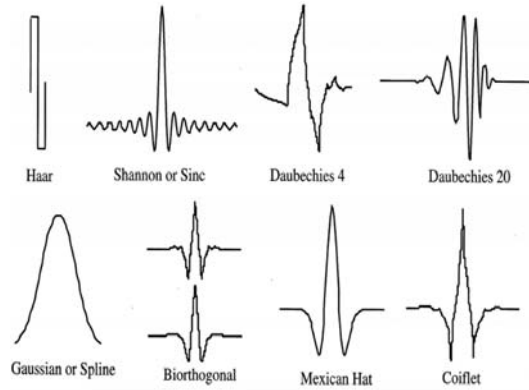
Dalgacık dönüşümü yöntemini daha pratik bir şekilde anlatmak gerekirse Fourier dönüşümü ile bir benzeşim yapılabilir [6]. Fourier dönüşümü ile periyodik bir sinyal sonsuz uzunluğa sahip

farklı genlik ve frekans özelliklerine sahip harmonik bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Dalgacık dönüşümünde ise, periyodik veya periyodik olmayan bir sinyalin sınırlı uzunluktaki ana dalgacık ile bu dalgacığın zaman içerisinde ötelenen ve ölçeklenerek esnetilen bileşenlerinin toplamı olduğu söylenebilir.



**Şekil 3.3 - Dalgacık ve Fourier Dönüşümü Benzeşimi, a) Fourier Dönüşümü, b) Dalgacık Dönüşümü [11]**

Dalgacık dönüşümü yöntemindeki en önemli adımlardan biri uygun dalgacık fonksiyonunun belirlenmesidir. Sinyal özellikleri, yapılacak çalışmanın amacına bağlı olarak farklı dalgacık fonksiyonları kullanılabilir. Seçilen dalgacık fonksiyonu analitik yapıda ise dalgacık dönüşümü sonrasında sinyale ait genlik ve faz bilgileri edilebilir. Bu nedenle sinyalin anlık frekans ve faz özelliklerinin belirlenmesinde en uygun dalgacık fonksiyonlarıdır. Bu yapıdaki dalgacık fonksiyonlarının Fourier dönüşümü sonrasında negatif frekans bileşenlerinin genliği sıfır olmaktadır. Bu tip dalgacık fonksiyonlarına örnek olarak Analitik Morlet, Bump ve Moarse dalgacık fonksiyonları verilebilir.



**Şekil 3.4 - Örnek Dalgacık Fonksiyonları [10]**

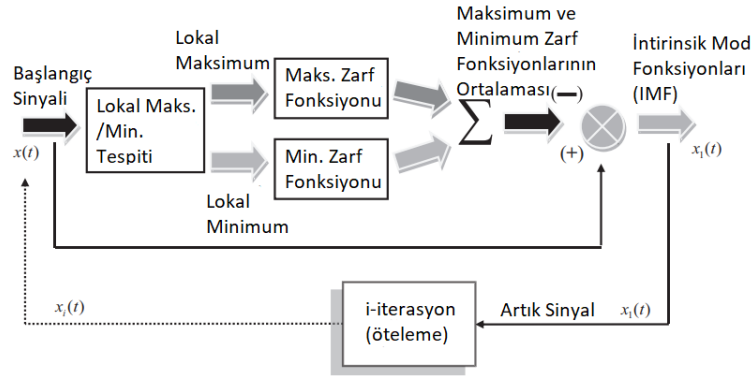
### 3.3. Hilbert ve Hilbert-Huang Dönüşümü

Hilbert dönüşümü, Fourier ve Laplace dönüşümleri gibi bir integral dönüşümü olup, adını matematiksel fizik alanında ilk defa tanımlayan David Hilbert den almakta olan özel bir integral denklemdir [12].

$$H[x(t)] = \tilde{x}(t) = \pi^{-1} \int \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3.7)$$

Hilbert Dönüşümünün anlaşılması ve uygulanması hakkında fiziksel tanımı yukarıda verilen integral dönüşümünden daha basit bir anlatım sunmaktadır. Fiziksel olarak Hilbert dönüşümü, spektral bileşenlerin genlikleri sabit kalırken, fazların  $\frac{\pi}{2}$  kadar ötelendiği özel bir lineer filtreye eşdeğer olarak görülebilir. Hilbert dönüşümü ile tek komponentli sinyallerin analizi gerçekleştirilmektedir.

Hilbert-Huang Dönüşümü (HHT), Huang vd. [13] tarafından geliştirilen ampirik bir zaman-frekans analizi yöntemi olup, özellikle durağan olmayan ve doğrusal olmayan sinyallerin çözülmesinde kullanılmaktadır. Yöntem esas itibarı ile Ampirik Mod Ayırıştırma (EMD) ve Hilbert Spektral Analizi (HSA) olarak iki temel kısımdan oluşmaktadır. Ampirik Mod Ayırıştırma ile harmonik veya periyodik olmayan alt sinyallerden oluşan bir sinyalin, intrinsik mod fonksiyonlarının (IMF) toplamından meydana geldiği kabul edilmektedir. Ampirik Mod Ayırıştırma (EMD) ile çok komponentli bir sinyal tek komponentli intrinsik mod fonksiyonlarına ayrılmaktadır. Her bir intrinsik mod fonksiyonuna Hilbert dönüşümü uygulanarak, bu tek komponentli alt sinyallerin anlık faz, frekans bilgileri elde edilmektedir. Yöntemin işlem adımları Şekil (3.5) de sunulmaktadır.



Şekil 3.5 - Ampirik Mod Ayırıştırma Yöntemi (EMD) Akış Diyagramı [12]

Ampirik Mod Ayırıştırma yöntemi için ilk olarak ana sinyalin ortalaması,  $m_1(t)$  hesaplanarak tüm sinyalden  $X(t)$  çıkartılır ve aday IMF fonksiyonu için gerekli kabul şartlarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir.

$$h_1(t) = X(t) - m_1(t) \quad (3.8)$$

Bu aşamadan sonra,  $h_1(t)$  fonksiyonun maksimum ve minimum zarf fonksiyonları belirlenerek bunların ortalaması  $m_{11}$  elde edilerek,  $h_1(t)$  fonksiyonundan çıkartılır.

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (3.9)$$

Bu adıma öteleme işlemi adı verilir ve kalan artık fonksiyon sabit (monotonik) bir fonksiyon olana veya fonksiyon sıfır temel eksenine kadar "k" defa devam edilir.

$$h_{1k}(t) = h_{k-1}(t) - m_{1k}(t) \quad (3.10)$$

$$c_1(t) = h_{1k} \quad (3.11)$$

Elde edilen  $h_{1k}(t)$  fonksiyonu birinci IMF fonksiyonu  $c_1(t)$ , olarak adlandırılır ve sinyal muhteviyatındaki yüksek frekans içeriğini barındırmaktadır. Sinyal içeriği  $X(t)$  den  $c_1$  fonksiyonu çıkartılarak daha düşük frekans içeriğine sahip kalan artık kısım  $r_1$  fonksiyonu oluşturulur. Bu prosedüre tüm  $r_i(t)$  fonksiyonları elde edilinceye kadar devam edilir.

$$r_1(t) = X(t) - c_1(t) \quad (3.12)$$

$$r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t), \quad i=1,2,3,4,\dots,n \quad (3.13)$$

Ayrıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, orijinal sinyal “n” adet IMF fonksiyonu ile kalan son artık fonksiyonun toplamından meydana gelmektedir.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) - r_n(t) \quad (3.14)$$

Elde edilen her bir IMF fonksiyonuna Hilbert Spektral Analizi uygulanarak sinyalin zamana bağlı anlık frekans, genlik ve faz özellikleri belirlenir. Hilbert Spektral Analizi ile  $c_i(t)$  sinyali ve bu sinyalin Hilbert dönüşümü  $H[c_i(t)]$  ile kompleks yapıdaki analitik sinyal,  $Z_i(t)$  elde edilir.

$$Z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = \alpha_i(t) e^{j\psi_i(t)} \quad (3.15)$$

Buradan zamana bağlı genlik  $a(t)$ , faz  $\psi(t)$  ve anlık frekans  $\omega(t)$  aşağıdaki ifadeler ile belirlenebilir.

$$\alpha_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H[c_i^2(t)]} \quad (3.16)$$

$$\psi_i(t) = \arctan \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \quad (3.17)$$

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Hilbert dönüşümünün “n” sayıdaki IMF fonksiyonuna uygulanması ile orijinal sinyal  $X(t)$ , genlik ve anlık frekansın fonksiyonu olarak aşağıdaki formda yazılabilir,

$$X(t) = \Re \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (3.19)$$

Verilen bu ifadenin Fourier dönüşümünden elde edilen zamandan bağımsız sabit genlik ve faz durumundan farklı olduğu görülmektedir. Bu yaklaşım zaman-frekans ortamında Hilbert Spektrumu ile temsil edilmektedir.

$$H(\omega, t) = \sum_{i=1}^n \widetilde{H}_i(\omega, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \quad (3.21)$$

Bu ifade de yer alan  $\widetilde{H}_i(\omega, t)$ , Hilbert Spektrumunun  $i$ 'inci bileşenini göstermektedir. Hilbert Spektrumunun karesi enerji yoğunluğunu vermektedir.

#### 4. SÜREKLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ YÖNTEMİYLE YAPI ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Dalgacık Dönüşümü Yöntemi özellikle 90'lı yılların son on yılından itibaren farklı araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. Özellikle Carmona vd. [14], [15] tarafından önerilen yaklaşıma göre

bir sinyale ait dalgacık katsayıları, her bir zaman adımında o sinyal içeriğinde bulunan yüksek enerjili baskın frekanslarda en büyük değere sahip olmaktadır. Söz konusu dalgacık katsayıları sinyal uzunluğu boyunca zaman-frekans düzleminde o sinyale ait sırt (ridge) eğrisini oluşturmaktadır. Sırt Eğrisini oluşturan dalgacık katsayılarının zaman eksenini boyunca oluşturduğu eğri ise İskelet Eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Bu eğriyi oluşturan dalgacık katsayıları kompleks yapıda olup, gerçek ve sanal bileşenler ilgili mod frekansına ait analitik sinyalin gerçek bileşeni ile onun Hilbert dönüşümüdür. Elde edilen bu alt sinyaller kullanılarak zaman ya da frekans analizi yöntemleri ile sinyale ait modal genlik, faz, anlık frekans, sönüm gibi özellikler belirlenebilmektedir. Aynı zamanda, bu alt sinyallerden tersine dönüşüm yapılarak esas sinyale ulaşılması da mümkündür. Bu yöntem kullanılarak yapılmış çalışmalar [16], [17], [18] referans olarak belirtilebilmektedir. Yöntemin en önemli avantajı, yapısal tepkiye ait baskın alt sinyal bileşenleri tespit edildikten sonra hem zaman hem de frekans esaslı temel yöntemlerin kullanılabilmesine imkan sağlamasıdır.

Sırt eğrisi, Analitik sinyal tanımından aşağıdaki ifade ile açıklanabilir [14].

$$\alpha(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j\psi(t)} \quad (4.1)$$

Sinyal ve dalgacık fonksiyonlarının genliğindeki değişimin faz değişiminden daha yavaş olduğu asimptotik sinyaller olduğu kabul edilirse,

$$\bar{\psi}_{a,b}(t) = \psi_x(t) - \psi_g(t - b)/a \quad (4.2)$$

Bu ifade de yer alan  $\psi_x$  ve  $\psi_g$  sinyal ve dalgacık fonksiyonunun anlık fazını göstermektedir. Sırt eğrisi fonksiyonu  $a=r(b)$  eğrisine eşit olup  $t_s(a,b)=b$  şartını sağlayan noktalardan meydana gelmektedir. Buna göre sırt eğrisi fonksiyonu aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır.

$$r(b) = \frac{\psi_g(0)}{\psi_x(b)} \quad (4.3)$$

Dalgacık dönüşümünde sırt eğrisi değerleri ile sınırlı değerler olarak tanımlanan iskelet eğrisi ise,

$$(W_g x)_{(r(b),t)} = C(t)a(t) \quad (4.4)$$

$C(t)$  fonksiyonu dalgacık fonksiyonu ve sinyale bağlı olarak oluşturulan düzeltme fonksiyonudur. Sırt eğrisi fonksiyonunun elde edilmesi için en temel yaklaşım dalgacık katsayılarının lokal maksimumlarının bulunmasıdır. Bunun dışında farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş yöntemlerde bulunmaktadır [19]

Sırt eğrisi fonksiyonu ve iskelet eğrisi her bir mod için elde edilebilir. Elde edilen iskelet eğrileri, her bir mod için toplam tepki fonksiyonu ile Hilbert dönüşümünü oluşturmaktadır. Buradan her bir mod için modal frekans ve sönüm özellikleri elde edilebilmektedir.

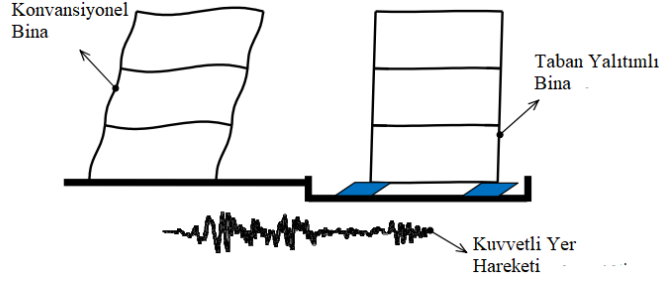
Bu çalışmada dalgacık dönüşümünde Genelleştirilmiş Morse Dalgacığı kullanılmıştır. Morse dalgacığı analitik bir dalgacık olup, yapısında bulunan iki parametre ile farklı analitik dalgacıklar elde edilebilmektedir. Frekans ortamında Morse dalgacığı aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır [20].

$$\psi_{p,\gamma}(\omega) = U(\omega)\alpha_{p,\gamma}\omega^{\frac{p^2}{\gamma}} e^{-\omega^\gamma} \quad (4.5)$$



## 5. TABAN YALITIMLI BİNALARIN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Taban yalıtımı, deprem etkisi altında yapı taşıyıcı sistemi, yapısal olmayan elamanlar ve bina muhteviyatında oluşacak hasar ve kayıpların azaltılmasında etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde temel yaklaşım yapının yalıtım birimi olarak adlandırılan esnek elemanlar ile zeminden yalıtılarak yüksek frekans içerikli sismik dalgalar tarafından yapıya aktarılabacak mekanik enerjinin azaltılmasına dayanmaktadır. Yapıya aktarılan enerjinin azaltılması, yapıda oluşacak ivme, hız ve yer değiştirme tepkisi ile yapıda oluşacak hasarın azalmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.1 - Konvansiyonel ve Taban Yalıtımlı Binada oluşan Şekil değiştirmeler [21]

Pratik uygulamalarda yalıtımlı yapıların analitik olarak modellenmesinde iki temel yaklaşım kullanılmaktadır [22]. Doğrusal davranışa sahip modellerde yalıtım birimleri doğrusal bir yay ile viskoz sönümden meydana gelmektedir. Yalıtım biriminin kuvvet-yer değiştirme ilişkisinde eğrinin eğimi etkin rijitlik olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal olmayan modelde ise sistemde akma öncesi ve sonrası davranışı temsil eden iki adet doğrusal yay bulunmakta olup, plastik şekil değiştirme bölgesinde sönüm "Coulomb sönüm" yaklaşımı ile dikkate alınmaktadır. İki doğrulu kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinde ilk eğri yalıtım biriminin elastik şekil değiştirme ile ilişkili başlangıç rijitliği, akma sonrasındaki plastik şekil değiştirmelerin elde edilmesinde ise akma sonrası rijitliği kullanılmaktadır.

Doğrusal yalıtım sistemlerinde, sönüm oranının sınırlı bir düzeyde olduğu veya sönüm oranının yüksek olmasına rağmen yüksek mod etkilerinin azaltılması amacıyla ilave viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı durumlarda yüksek mod ivmelerinin oluşumu sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bu nedenle, sistemin toplam tepkisi büyük oranda ilk mod davranışından oluşmaktadır. Yüksek sönüm oranlarına ulaşıldığı durumlarda ise modal katılımlar ve mod şekilleri değişim göstererek sistemin çözümlenmesinde kullanılan basitleştirmeler geçersiz olmaya başlamaktadır.

Doğrusal olmayan yalıtım sistemlerinde, yalıtım birimlerinde akma sonrası davranış arttıkça sistemde yüksek mod tepkisinin katılımı artmaktadır. Yüksek mod etkinliğinin artmasıyla, sistemin ilk moduna kıyasla üst yapı atalet kuvvetleri artış göstermektedir. Sistemin izolasyon seviyesindeki toplam taban kesme kuvvetleri değeri büyük oranda ilk moda yakın bir değerde sabit kalırken sistemin farklı katlarındaki kat ivmeleri ve kesme kuvvetleri artmaktadır.

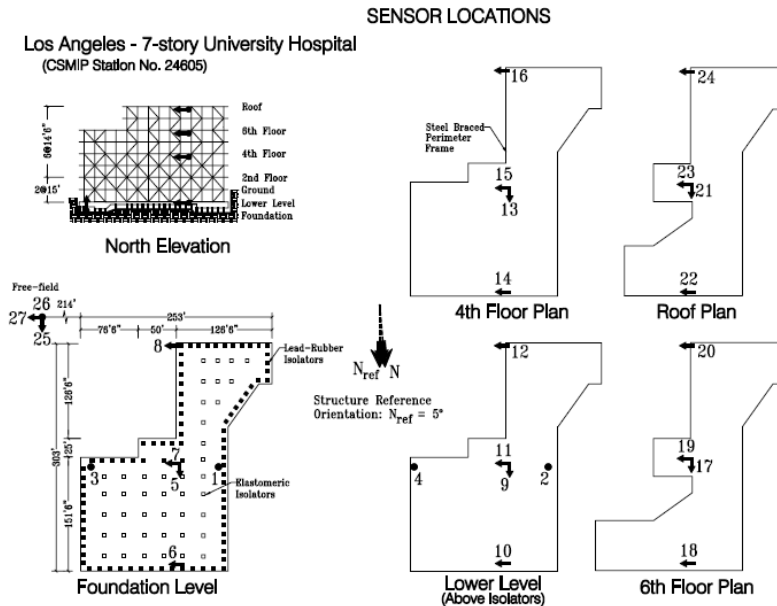
Doğrusal elastik bir yapının doğrusal olmayan yalıtım birimleri ile toplam tepkisi modal tepkilerin toplamı olarak elde edilebilir. Ancak bu durumda modal tepkiler klasik sönüm modeline sahip doğrusal sistemlerden farklı olarak birbirlerine bağlı olmaktadır. Bu duruma pratik bir çözüm üretmek için özellikle sisteme ait taban kesme kuvveti ve yer değiştirme isteminin oldukça tutarlı olarak elde edildiği sistemin eşdeğer doğrusal özelliklere sahip etkin rijitlik, etkin periyot ve etkin sönüm ile temsil edildiği yaklaşım yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan modlar, sınırlı sönüm oranına sahip doğrusal yalıtım birimlerinde olduğu gibi klasik sönüm modeline uyan ve diklik koşulunu sağlayan özelliktedirler. Bu modlar, kuvvet-yer değiştirme çevriminde en büyük tepki durumunda olduğundan yalıtım biriminin akma sonrası fazına ait olup maksimum

tepki durumunu yansıtmaktadır. Sistemin akma sonrası fazına ait modlardan elastik faza geçişlerde sistemde bulunan enerji modlara yeniden dağıtılmaktadır. Buna göre yüksek enerjili ilk moddan düşük enerjili yüksek modlara enerji transfer edilmektedir. Gerçekleştirilen zaman-frekans analizleri ile bu enerji geçişleri ile spektral değişimler gözlenmeye çalışılmaktadır.

## 6. ZAMAN-FREKANS ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE TABAN YALITIMLI ÖRNEK BİR YAPININ DEĞERLENDİRİLMESİ

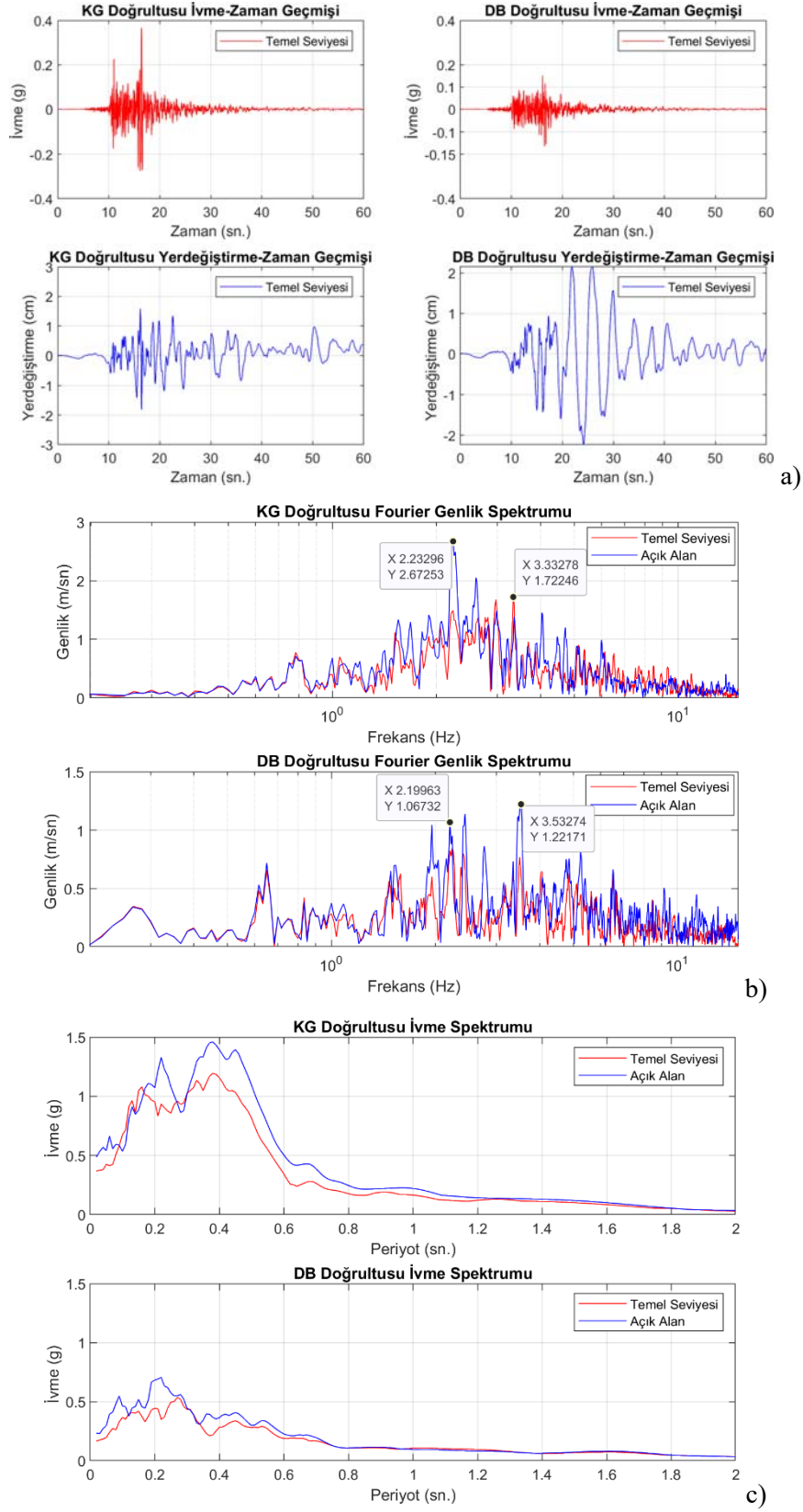
Bu çalışma kapsamının konusu olan yapı Los Angeles da bulunan yedi katlı Üniversite Hastanesi binasıdır. Yapı dünyadaki ilk taban yalıtımlı hastane yapısı olup toplam 275 yatak kapasitesine sahiptir. Yapı 1991 yılında kullanıma açılmıştır. Yapıya ait temel bilgiler ve 1994 Northridge depremi kayıtları CSMIP [23] veri bankasından elde edilmiştir.

Yapı bir adet bodrum kat olmak üzere toplam sekiz kattan oluşmaktadır. Yapı taşıyıcı sistemi moment aktaran çerçeveler ile yapı kenar akslarında bulunan merkezi çaprazlı çerçevelerden meydana gelmektedir. Yapı kat döşemeleri kompozit döşeme sistemidir. Yapının temel sistemi tekil ve sürekli temel kirişlerinden oluşmaktadır. Yapı hem plan hem de düşey düzlemde düzensiz bir yapıya sahiptir. Yapının plan boyutları 92.4 m ve 77.1 m olup inşaat alanı 35000 m<sup>2</sup> dir. Yapının merkezi çaprazlı çerçevelerin bulunduğu kenar akslarında toplam 68 adet kurşun çekirdekli kauçuk mesnet, düşey yük taşıyan iç aks kolonlarında ise 81 adet elastomer mesnet bulunmaktadır. Yalıtım birimleri en büyük yer değiştirme istemi 26.04 cm olacak şekilde tasarlanmıştır [24]. Yapıya 1991 yılında toplam 24 adet, açık alanda ise 3 adet ivme ölçer sensör yerleştirilmiştir. Cihazların yerleşimi ve kat planları Şekil (6.1) de gösterilmektedir.

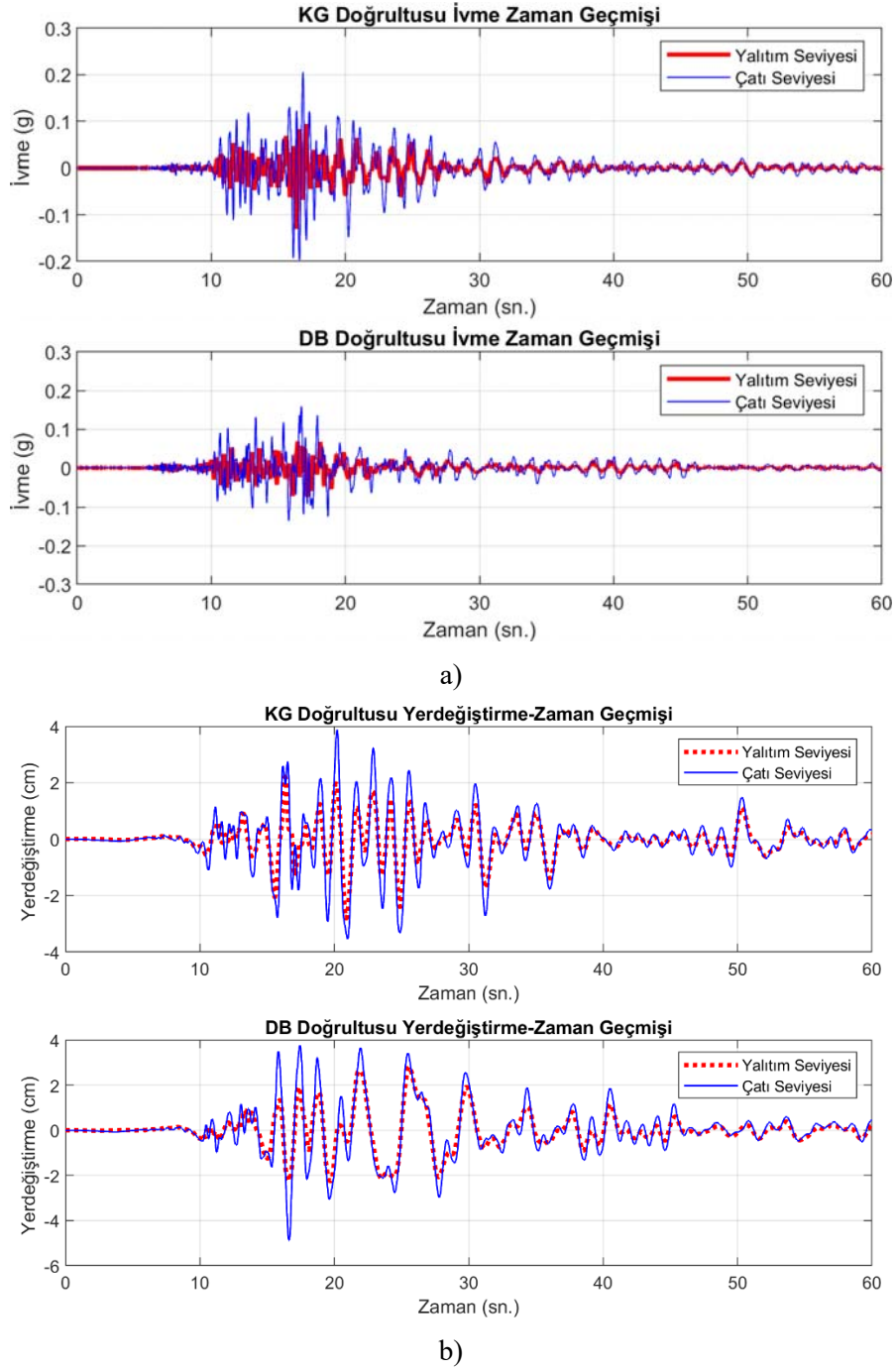


Şekil 6.1 - Yapı Kat Planları ve ivme ölçer yerleşimleri [24]

Yapıya ait yer hareketleri incelendiğinde bu yapının temel seviyesinde ve serbest saha da bulunan istasyonların kullanılması ile tepki geçmişleri ve spektrumları elde edilmiştir (Şekil 6.2). Kuzey-güney doğrultusunda en büyük yer ivmesinin yaklaşık 0.5g, ivme spektrumunun hız duyarlı bölgesinde spektral ivme değerleri 1.5g mertebesine ulaşmaktadır. Şekil (6.2) incelendiğinde yer hareketinin yüksek enerjili frekans bileşenleri 0.6-3.5 Hz aralığında bulunmaktadır. Bu durum yer hareketinin orta katlı konvansiyonel yapıların doğal frekansları ile aynı aralıkta bulunmasından dolayı yıkıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



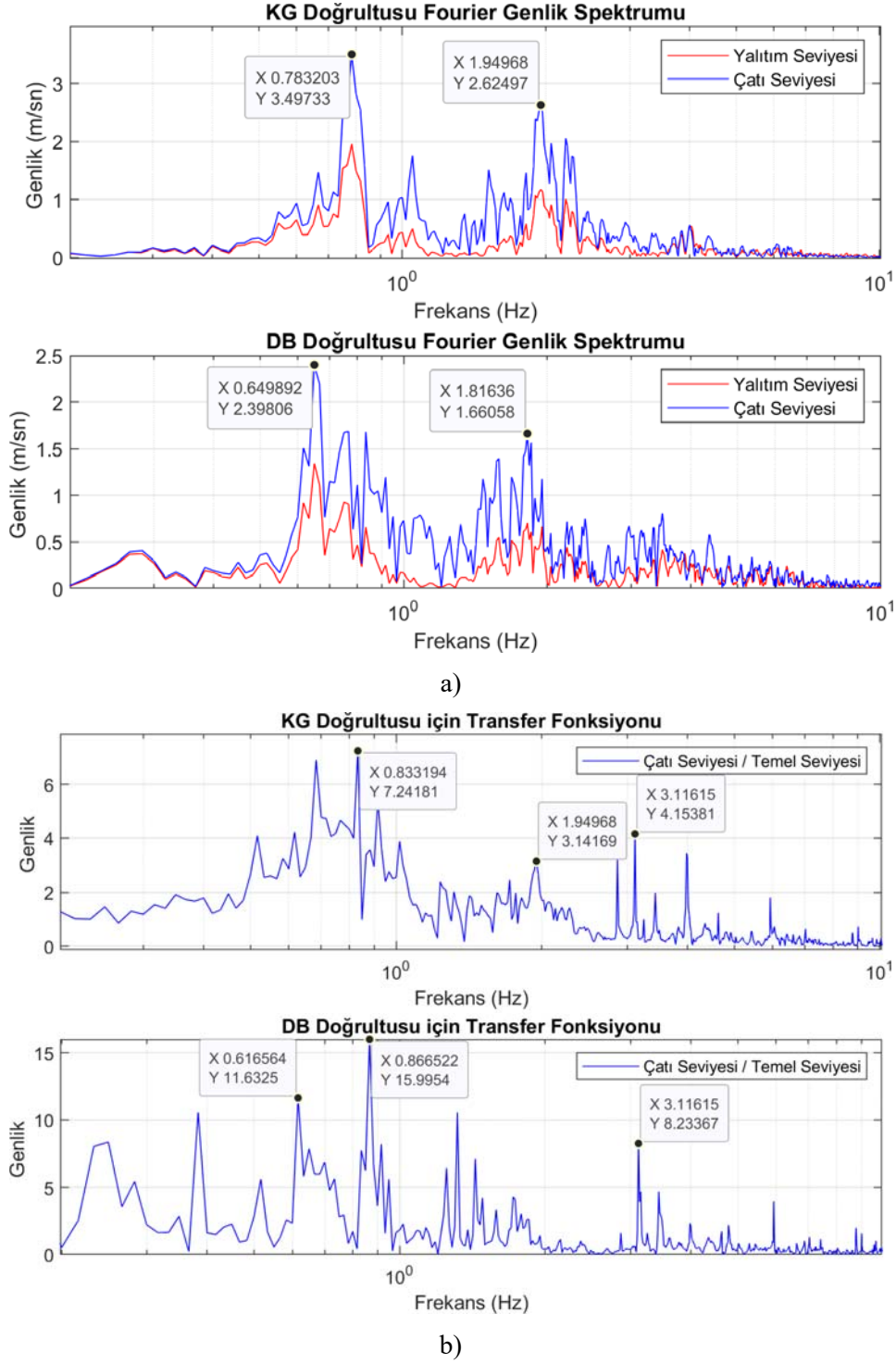
Şekil 6.2 - Yer Hareketi Özellikleri, a) İvme-Zaman ve Yer değiştirme-Zaman Geçmişi, b) Fourier Spektrumu, c) İvme Tepki Spektrumu



Şekil 6.3 - Yapı Tepki Geçmişleri a) İvme-Zaman Geçmişi, b) Yerdeğiştirme-Zaman Geçmişi,

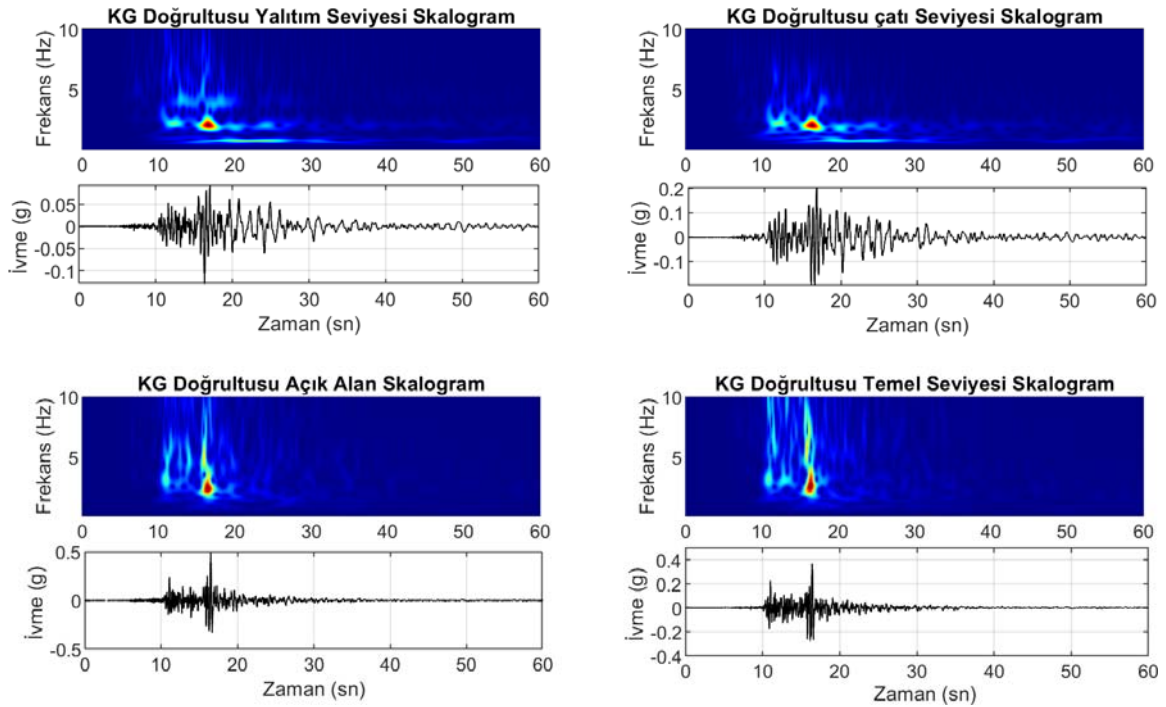
Yapının çatı ve izolasyon katına ait Fourier spektrumları incelendiğinde yapının doğu-batı yönlü istasyonlarında baskın frekansların 0.65-1.8 Hz aralığında, kuzey-güney doğrultusunda ise 0.75-2Hz aralığında olduğu görülmektedir Şekil (6.4). Her iki doğrultu içinde Fourier Spektrumunda baskın pik noktaların belirgin olmadığı bunun yerine frekans eksenini boyunca yayılı bir dağılım olduğu görülmektedir. Bu nedenle yapının hakim frekanslarının belirgin bir şekilde tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Diğer taraftan yapının izolasyon ve çatı katına ait kayıtlar ile temel seviyesindeki kayıtlar frekans ortamında karşılaştırılarak transfer fonksiyonları elde edilmiştir.

Bu grafiklerden de görüleceği üzere çok sayıda pik tepki noktası bulunmakta ve buna göre yüksek dereceli, düşük doğrulama oranlı ve sistem özelliklerinin yeterli tutarlılıkta temsil edilemediği bir sistem modeli elde edilmesine neden olmaktadır.



Şekil 6.4 - Farklı İstasyonlar için Tepki Spektrumları, a) Yapı Fourier Spektrumları, b) Çatı ve Temel Seviyesi için Transfer Fonksiyonları

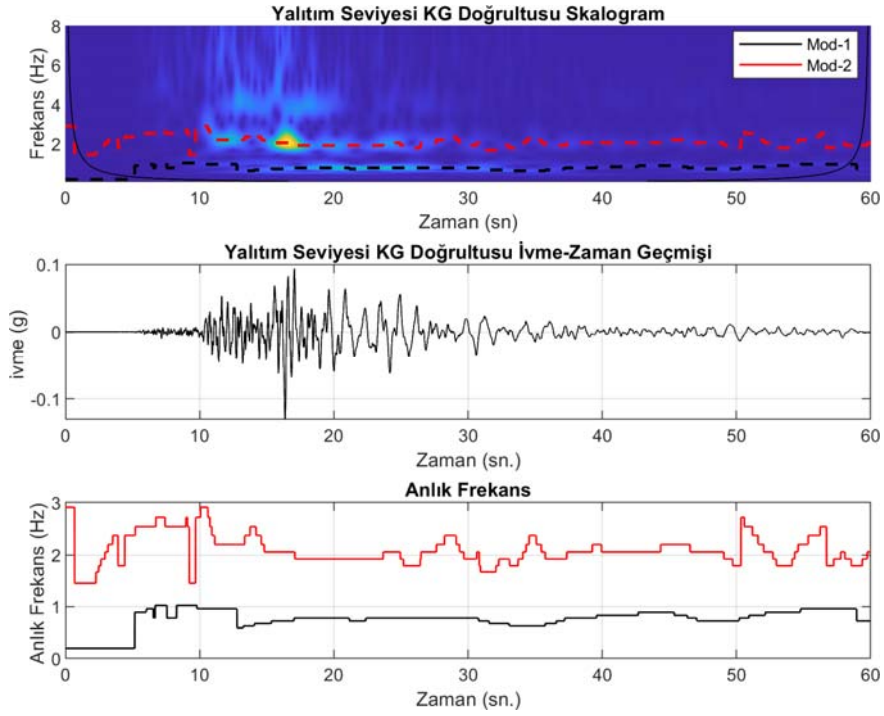
Yapının serbest alan, temel, izolasyon ve çatı seviyesindeki kayıtları için sürekli dalgacık dönüşümü uygulanarak dalgacık enerji yoğunluğu grafikleri Şekil (6.5)'de sunulmuştur. Yer hareketinin yüksek enerjili bölümü kaydın 10-20sn arasında ve 0.5-10 Hz frekans aralığında bulunmaktadır. İzolasyon katına ait sonuçlar incelendiğinde, yapıya ait baskın modların zaman içerisinde oldukça iyi bir şekilde farklı frekans aralıklarına ayrıştırıldığı görülmektedir. Bu durum taban yalıtımlı yapının dar bir zaman aralığında ve oldukça geniş bir frekans içeriğine sahip yüksek enerjili yer hareketi girdisini başarılı bir şekilde filtreleyerek yüksek frekanslı muhteviyatın bastırıldığı söylenebilir. Yapının çatı seviyesine ulaşıldığında ise yüksek frekans etkisinin daha da azaldığı, buna rağmen yapısal modlara ait olduğu görülen frekans bantlarında girişimler olduğu görülmektedir ve bu durumun ilk mod davranışının dışındaki üst yapı özelliklerine bağlı modlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Ayrıca, yapıda elde edilen bu olumlu davranışın izolasyon döşemesi seviyesindeki 2.5cm gibi oldukça sınırlı bir yer değiştirme istemi altında sistemin neredeyse başlangıç rijitliği altında oluşması ise bir diğer olumlu durumu oluşturmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçların S.Nagarajaiah ve S. Xiaohong'un çalışmasında [24] paylaşılanlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.



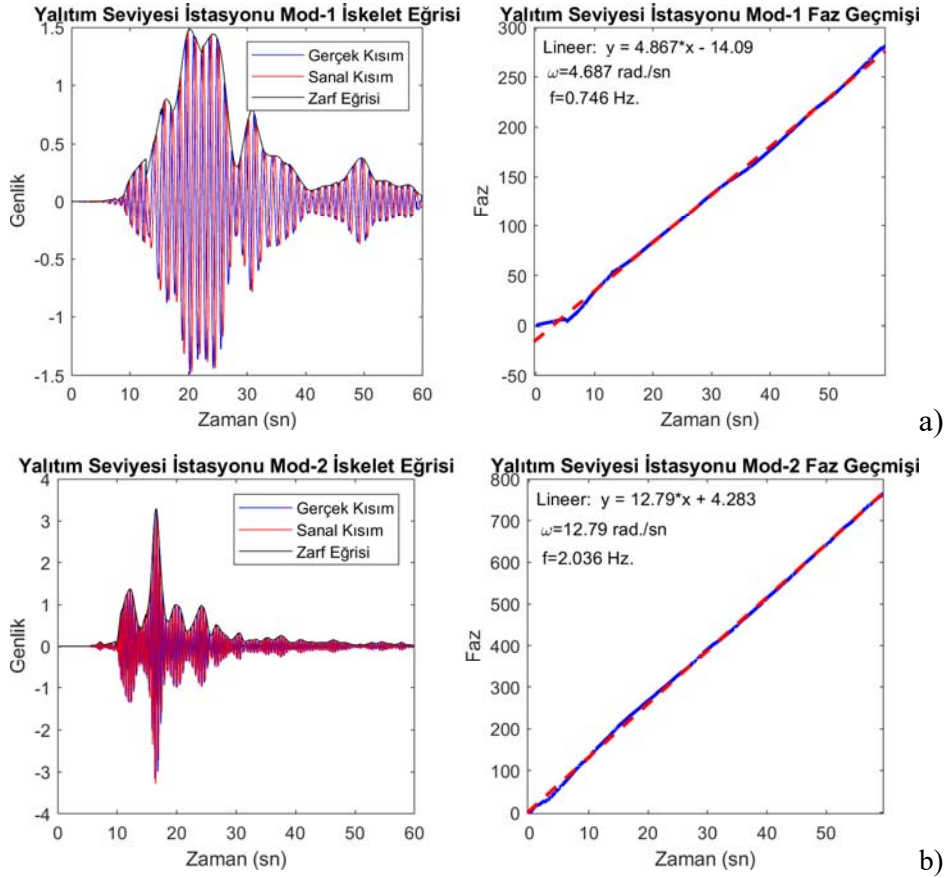
Şekil 6.5 - Farklı İstasyonlar için Sürekli Dalgacık Dönüşümü Skalogramları

Yapının ilk iki modu için tespit edilen en yüksek genliğe sahip kompleks özellikteki dalgacık katsayıları ile sırt eğrisi elde edilmiştir. Söz konusu sırt eğrisini oluşturan kompleks dalgacık katsayıları gerçek ve sanal bileşenlerine ayrılarak iskelet eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca, sanal kısım ile gerçek kısım zamana bağlı olarak oranlanarak faz fonksiyonu oluşturulmuştur Şekil (6.7). Faz fonksiyonun eğiminden anlık frekanslar hesaplanarak, Şekil (6.5) de hesaplanan anlık frekanslar ile karşılaştırılmış ve anlık sıçramaların dışında genel trendin uyumlu olduğu görülmüştür.

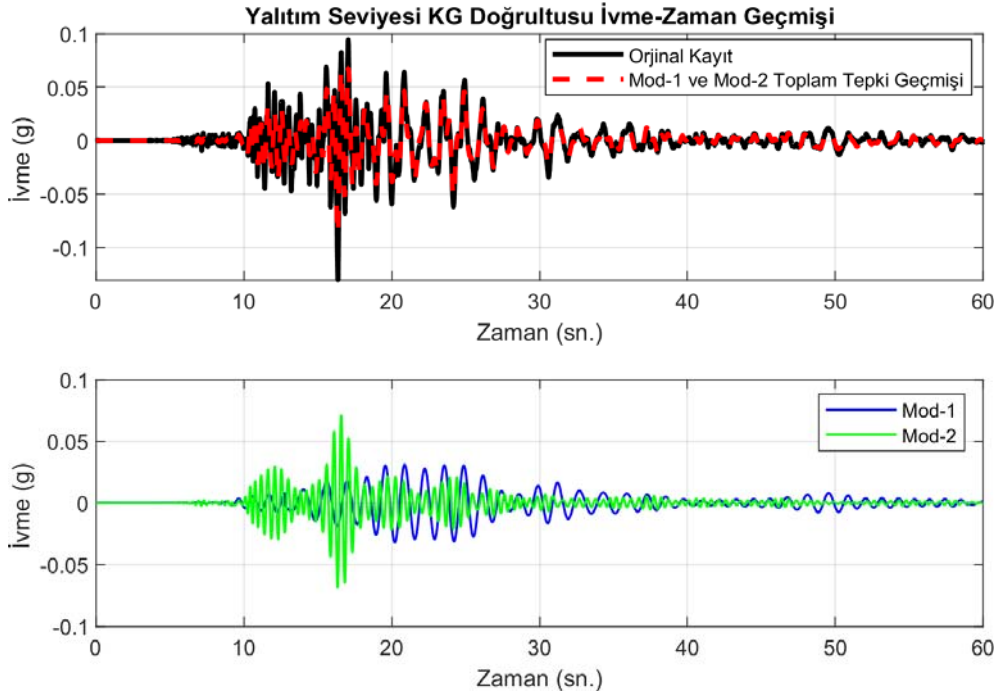
Her iki mod için tespit edilen en yüksek genlikli dalgacık katsayılarına ters dönüşüm uygulanarak esas sinyalin içerisinde bu iki moda ait toplam tepki geçmişi elde edilmiştir. Anlık genlik ve faz özellikleri zamanla yavaş olarak değişen bu iki modun zaman geçmişleri süperpoze edilerek esas sinyal ile karşılaştırılmış ve esas sinyali oldukça iyi bir şekilde temsil ettiği görülmüştür Şekil (6.8).



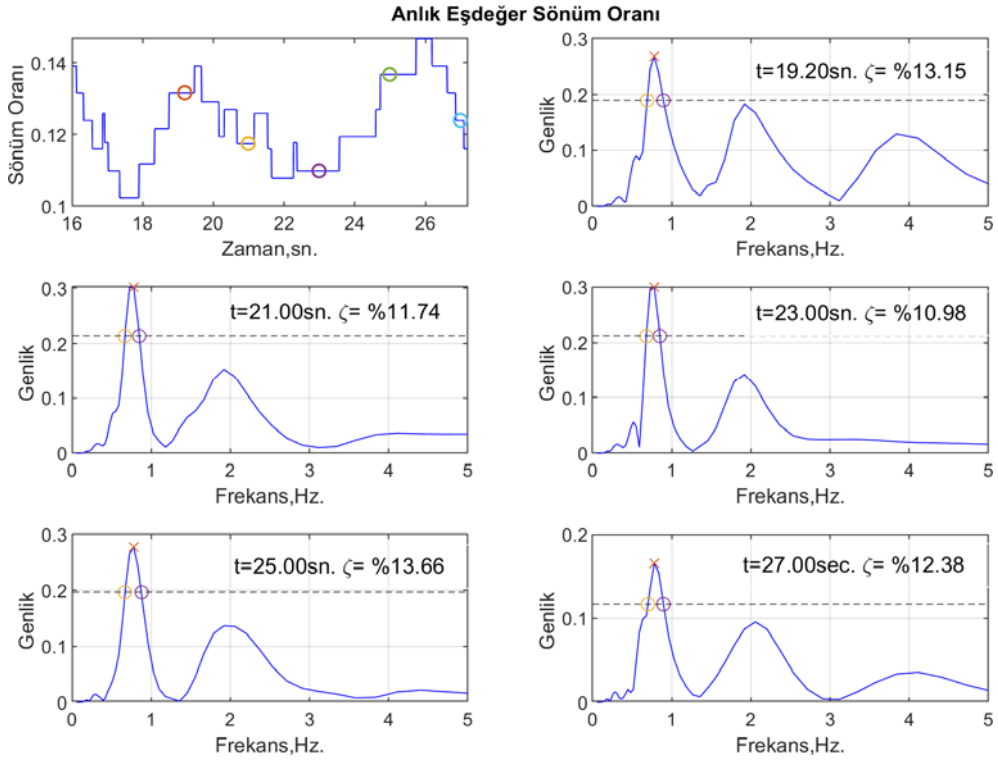
Şekil 6.6 - İzolasyon Katı için Anlık Frekansın Elde Edilmesi



Şekil 6.7 - İzolasyon Katı için dalgacık iskelet eğrileri ve faz fonksiyonları, a) Mod-1, b) Mod-2



Şekil 6.8 - İzolasyon Katı için Girdi Sinyalinin Yeniden Oluşturulması, a) orijinal girdi sinyali ile ilk iki mod için yeniden oluşturulan sinyalin karşılaştırılması, b) ilk iki mod için tepki fonksiyonları



Şekil 6.9 - Yarı-güç spektrum bant genişliği metodu ile birinci mod için anlık sönüm oranı değişimi



Çalışma konusu kayıtların hem kuvvetli yer hareketi altında toplam yapı tepkisini içermesi hem de zaman-frekans analizi yaklaşımında anlık spektrumlar elde edilebilmesi nedeniyle eşdeğer sönüm oranının belirlenmesinde yarı-güç spektrum bant genişliği metodu [25], [26] kullanılmıştır. Yapı tepkisine ait kayıtların dalgacık dönüşümü sonucunda elde edilen matris her bir zaman adımı için frekans tepki fonksiyonunu oluşturmaktadır. Buna göre izolasyon döşemesine ait kaydın yapının en büyük tepki geçmişine sahip 16-27sn aralığı için %10-14 aralığında değişen eşdeğer sönüm oranı hesaplanmıştır (Şekil 6.9). Yapının yalıtım modunu temsil eden ilk modun sönüm oranını elde edebilmek amacıyla yalıtım seviyesindeki kayıtlar kullanılmıştır.

## 7. SONUÇLAR

Ülkemizde kullanımı son yıllarda artan ve depremin yapılar üzerindeki olumsuz etkisinin azaltılmasında etkin bir yöntem olarak kullanıldığı taban yalıtımlı sistemlerin kuvvetli yer hareketi etkisinde durağan olmayan özellikteki davranışı dalgacık dönüşümü yöntemi ile incelenmiştir. Söz konusu yöntem ile yapıdan alınan gerçek kayıtlar altında toplam yapı tepkisinden hakim modlara ait tepki geçmişleri belirlenmiş ve buradan sisteme ait anlık frekans ve sönüm özellikleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda, kuvvetli yer hareketinin içeriği de değerlendirilmiş olup, taban yalıtımı ve üst yapı özellikleri ile girdi özelliklerinin değişimi anlık olarak yapının farklı konumlarına bağlı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada olduğu gibi özellikleri zaman ile değişen durağan olmayan tipteki sinyallere zaman-frekans penceresinden bakılması, oldukça karmaşık olan sistem davranışını daha basit bir formda sunduğu ve yapı davranışını daha iyi anlattığı görülmüştür. Bununla birlikte bu örnekte olduğu gibi, taban yalıtımının yıkıcı büyüklükteki deprem etkilerinden dolayı oluşacak zararların azaltılması noktasında etkin bir yöntem olduğu kaydedilmiş gerçek veriler üzerinden görülmüştür.

### Semboller

$X(t)$ : Zaman ortamında tanımlanan sinyal

$X(\omega)$ : Frekans ortamında tanımlanan sinyal

$A(t)$ : Anlık Genlik

$\psi(t)$ : Anlık Faz

$z(t)$ : Analitik Sinyal

$\omega(t)$ : Anlık Açısız Frekans

$f(t)$ : Anlık Frekans

$P_{SP}$  : Sinyalin Güç Yoğunluk Fonksiyonu

$W_g(a, b)$ : Dalgacık Katsayıları Matrisi

$a$ : Ana dalgacığın esnetilmesini sağlayan ölçek parametresi

$b$ : Ana dalgacığın Zamanda kaydırılmasını sağlayan zaman parametresi

$g(t)$ : Zamana Bağlı Dalgacık Fonksiyonu

$H[x(t)]$  : Gerçek bir sinyalin Hilbert Dönüşümü

$\psi_{p,\gamma}(\omega)$ : Morse Dalgacığı

$U(\omega)$ : Morse Dalgacığı birim step fonksiyonu

$\alpha_{p,\gamma}$ : Morse Dalgacığı Normalizasyon Katsayısı

$P^2$  : Morse Dalgacığı Zaman-Bant Genişliği Kontrol Değişkeni

$\gamma$ : Morse Dalgacığı Simetri Kontrol Değişkeni

### **Kaynaklar**

1. P.Flandrin, Explorations in Time-Frequency Analysis, Cambridge University Press, 2018.
2. Beyen K., Damage Identification of a Historical Masonry Structure in T-F Domain, Teknik Dergi,2021, 10577-10610.
3. Beyen K., Hasar Tanılama Analizlerinde Frekans-Zaman Çözümlemesi, 5.th International Earthquake Symposium, Kocaeli, Cilt 1,ss 595-599, 2015.
4. Beyen K., Fatih Camii'nin Zaman ve Frekans Ortamında Çevresel ve Deprem Tepki Analizleri, 6.Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, 2-04 Kasım 2017, cilt 1, ss 1-12.
5. Beyen K., Yapı Tanılama Çalışmalarında Fourier Dönüşümü ve Yeni Nesil Dönüşümler, IESKO 2019, Kocaeli, Türkiye, 25-27 Eylül 2019,ss 640-650.
6. Sak F.Ö., Beyen K., Hasar Tanılama İstatistik Değerlendirme Yönlendirme Yöntemlerinin Zaman-Frekans Ortamında İrdelenmesi, 5.IECESS, Ankara, Türkiye, 8-11 Ekim 2019, ss 1-12.
7. Sak F.Ö., Beyen K., Damage Identification Analysis of the Structures in Time-Frequency Domain with Wavelet Transform Method, Teknik Dergi, cilt 30, ss.8835-8860,2019.
8. T.Kijewski, A.Kareem, Efficacy of Hilbert and Wavelet Transforms for Time-Frequency Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1037-1049, October 2006.
9. M.Misiti, Y.Misiti, G.Oppenheim, J.M.Poggi, Wavelet Toolbox, R2020a, Mathworks.
10. L. Cohen, Time-Frequency Analysis, ISBN 0-13-594532-1, Prentice-Hall PTR,1995.
11. D.L.Fugal, Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing an in-depth Practical Approach for the Non-Mathematician, Space and Signals Technical Publishing, 2009.
12. M.Feldman, Hilbert Transform in Vibration Analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 25 (2011), 735-802.
13. Norden E.Huang, Z.Shen, S.R.Long, M.C.Wu, H.H.Shih, Q.Zheng, N.C.Yen, C.C.Tung, H.H.Liu, The empirical mode decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary time analysis, Proc.R.Soc. London, Ser.A. 454.
14. R.A. Carmona, W.L.Hwang, B. Torresani, Characterization of Signals by the Ridges of Their Wavelet Transforms, IEEE Transactions of Signal Processing 45 (10), 2586-2590, 1997.
15. R.A. Carmona, W.L.Hwang, B. Torresani, Multiridge Detection and Time-Frequency Reconstruction, IEEE Transactions of Signal Processing 47 (2), 480-491, 1999.
16. M.Ruzzene, A.Fasana, L.Garibaldi, B.Piombo, Natural Frequencies and Damping Identification Using Wavelet Transform: Application to Real Data, Mechanical Systems and Signal Processing, 11(2), 207-218, 1997.

17. W.J. Staszewski, Identification of Non-Linear Systems Using Multi-Scale Ridges and Skeletons of the Wavelet Transform, *Journal of Sound and Vibration*, 214 (4), 639-658, 1998.
18. T. Kijewski, A. Kareem, Wavelet Transforms for System Identification in Civil Engineering, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18 (2003), 339-355.
19. W.J. Staszewski, Identification of Damping in MDOF Systems Using Time-Scale Decomposition, *Journal of Sound and Vibration*, 203 (2), 283-305, 1997.
20. Lily, J.M., S.C.Olhede, Generalized Morse Wavelets as a Superfamily of Analytic Wavelets, *IEEE Transactions of Signal Processing*, 60 (11), 6036-6041, 2012.
21. N.D.Dao, Seismic Response of a Full-scale 5-story Steel Frame Building Isolated by Triple Pendulum Bearings under 3D Excitations, Phd Thesis, University of Nevada,Reno, 2012.
22. R.I. Skinner, T.E. Kelly, B.(W.H.) Robinson, *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*, Robinsn Seismic Ltd &Holmes Consulting Group, 2011, 387p.
23. <https://www.strongmotioncenter.org/index.html>, Erişim tarihi 05.02.2002.
24. S.Nagarajaiah, S. Xiaohong, Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake, *Journal of Structural Engineering*, 1177-1186, October 2000.
25. A.K.Chopra, *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Fifth Edition,Pearson Education Limited,2020, 994p.
26. Clough, R. W., and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, Mc Graw- Hill Kogakusha Ltd.,Tokyo 1975, 634 p.



# İki Boyutlu Doğrusal Olmayan Analizlere Dayalı Topoğrafyanın Deprem Yer Büyütmelerine Etkisi ve Hasar Gözlemleri

Kemal BEYEN<sup>1</sup>

## ÖZET

*Aktif kuşaklar üzerinde bulunan şehirler vadi, yamaç, tepe, dağ etekleri ve kanal gibi değişik yüzey coğrafyalarında konumlanmıştır. Yayılan deprem dalgaları genlik, geliş açısı frekans muhteviyatı ve kanal, kama ve odaklanma gibi öngörülemeyen topoğrafik etkiler altında değişirler. Bütün bu faktörlerin zemin büyütmelerine olan etkisi parametrik anlamda incelenerek farklı yüzey eğimi olan yapıların kuvvetli ve zayıf deprem kuvvetleriyle doğrusal olan ve olmayan zemin davranış şartlarında ürettiği tepkiler değişen frekans ve geliş açıları için karşılaştırılmıştır. İki-boyutlu doğrusal / doğrusal olmayan ortam davranış sonuçları yönetmeliklere konulacak parametrik değerler olarak sunulmuştur. Yüzey düzensizliğine bağlı olarak, tepki girişimleri kompleks büyüme ve küçültmeler üretmektedir. Genel olarak, girdi seviyesine göre kret civarında 2.5-3.0 katı büyütmeler gerçekleşmektedir. Artan geliş açısına bağlı olarak ise topoğrafik ivmeler azalmaktadır. Gelen ve kırılarak dönen dalgaların girişimiyle yamaçlarda değişen yüzey tepki genlikleri izlenmektedir. Çalışmanın sonuçları deprem senaryo üretiminden afet yönetimine, alan planlamadan mühendislik uygulamalarına uzanan bir kullanım imkânı sunmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Topoğrafik etki, doğrusal olmayan, iki-boyutlu etki, saha büyütmesi

## ABSTRACT

### **Two Dimensional Nonlinear Analysis of Topographical Site Effects On Earthquake Ground Response and Field Observations**

*Cities on active fault regions are located in different surface geographies such as valleys, slopes, hills, foothills, skirts and channels. Propagated seismic waves vary in amplitude, angle of incidence, frequency content, and under unpredictable topographic effects such as channel, wedge, and focus. The effects of all these factors on soil amplification were analyzed parametrically. Site responses produced by the earth structures with different surface slopes under strong and weak seismic forces in cases of linear and non-linear ground behavior conditions were compared for varying frequencies and angles of incidence. Two-dimensional linear/nonlinear amplifications of the site responses are plotted for varying parametric values.*

---

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - kbeyen@kocaeli.edu.tr

*Such presentation might be suitable for future regulations. Depending upon the type of irregularity, interaction of waves produces complex patterns of amplification and deamplification. In general, the amplification near crest of a ridge is found to be of the order of about 2.5-3.0 times the average base acceleration. The topographic acceleration decreases with the increasing incidence angle. Interference between the incident waves and diffracted waves causes differential ground motion along the slope of the topography. The results of the study offer a usage opportunity ranging from earthquake scenario production to disaster management, from site planning to engineering applications.*

**Keywords:** *Topographic effects, Nonlinearity, Two-dimensional effect, Site amplification*

## **GİRİŞ**

Günümüzde depremi ağır hasarlarla yaşayan şehirlerimiz yeni gelişme alanlarında sağlıklı ve depreme dayanıklı yapılaşma arayışı içindedir. Mevcutların dönüşümü rant hesaplarından uzak bilimin sunduğu bilgilerin ışığında yerel özelliklerin oluşturduğu şartlar çalışılarak sağlıklı yapı dönüşümü bir diğer tamamlayan çözüm olacaktır. Son olan 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 depremlerinden sonra Adapazarı ve Düzce ağır bedeller ödeyerek yaşadığı deprem sonrasında yeni yerleşim ve gelişim alanları araştırma ve deprem riskini yeniden değerlendirme çalışmalarında benzer sorunlarla yüzleşti [1]. Şehirlerin gelişme ve imar şartlarını deprem öncesi belirlemek ve doğru çalışılmış ve sonuç olarak doğru seçilmiş yeni alanların kullanıma açılması şehirlerin deprem hasar potansiyelini azaltacaktır. Yerel topoğrafya ve zemin yapısının modellenmesi ve üreteceği tepkilerin hesaplanması olası büyük depremlere göre analizlerinin yapılması ve sonuçların şehir planlama çalışmalarında kullanılması alan bazlı hataların sıfırlanmasında çok önemlidir. Yapılaşma alanlarında yeni projelere çalışma sahasının dinamik davranış büyüklüklerinin yerel yönetim tarafından bilgi olarak sunulması sahaya özel doğru bilgilerle tasarımı özendirirken yeni bilgilerle üretilmiş mühendislik yapılarının hasar riskini minimize edecektir.

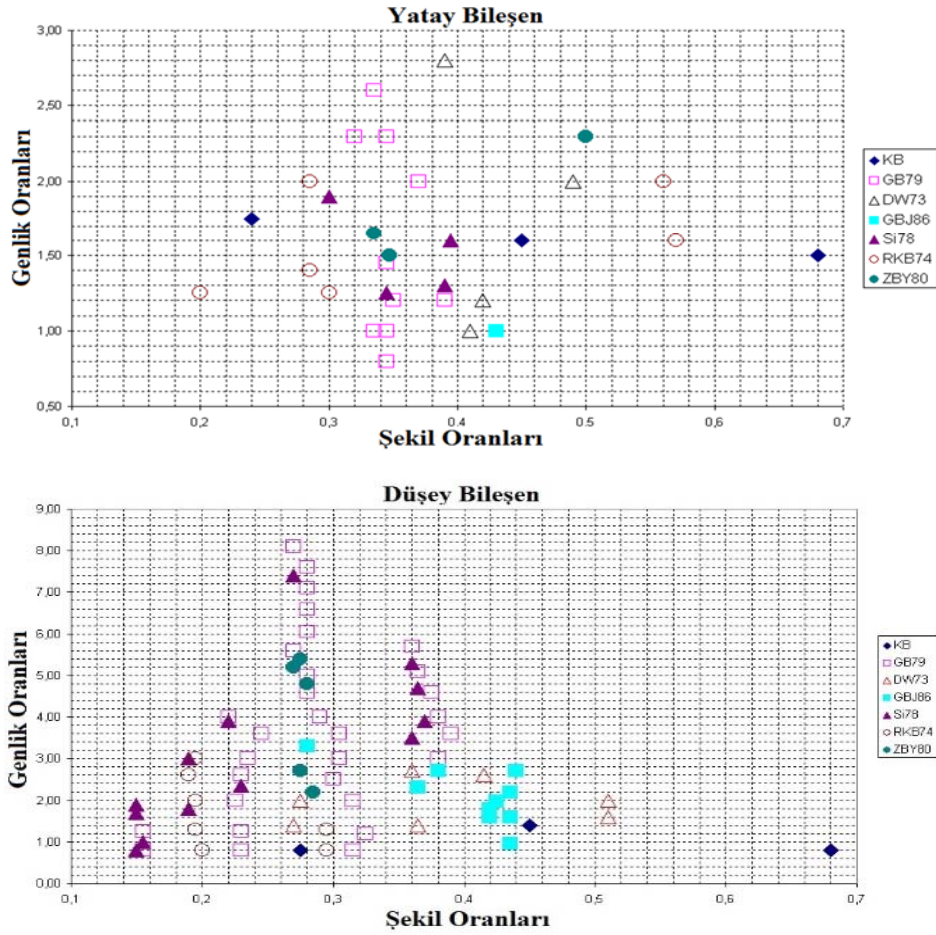
Şehirlerin kurulduğu coğrafyaların ve gelişim alanları vadi, yamaç ve tepelere yayılmasının getirdiği yerel zemin risklerinin yanı sıra topoğrafyanın sunduğu kanal, kama odaklanmaları, vadi baseni, yamaç, tepe, tepe-tepe ve benzeri yoğunlaşma etkilerinin neden olacağı büyütmeler nümerik benzeşim analizleri yapılmadan tahmin edilemeyecek gerçekler olup deprem kaynağı, yayılım ortamı, geliş açısı, deprem enerjisinin büyüklüğü, süresi ve frekans içeriğiyle değişim gösterebilir. Topoğrafik etkilerin yerel tepkileri artırdığı yapılan değişik nümerik modellerle parametrik olarak detaylı çalışılmış, [2, 3], topoğrafik etkilerin deprem hasar riskini ağırlaştırıcı etkisi incelenmiştir. Sonuçların uygulanması yapısal hasarın azalmasına, toplumsal psikolojimizin yükselmesine katkı vereceği gibi, deprem öncesi, anında ve sonrasında yapılacak müdahale ve afet yönetimine ciddi altlık oluşturacak temel bilgiler sağlayacaktır.

Dünyada da benzer şekilde tepe, dağ veya yamaç yüzey yerleşimlerinde yıkıcı bir depremden sonra tepe tabanından daha büyük seviyede hasar tepe zirvelerinde izlendiği rapor edilmiştir. Şehir ulaşım yolları, yerleşimlerin gaz şebekesi, elektrik ve haberleşme altyapısı topoğrafyanın geometrik özelliklerine bağlı olarak ciddi hasarlar alabilmektedir. Gözlemlere örnek olarak Brambati ved. Çalıştığı Friuli, İtalya, 1976 depremi [4], Siro' nun çalışması Ipinia, İtalya, 1980 depremi [5], Çelebi, M.' nin 1985 Şili depremi [6] sayılabilir. Yüzey şeklinin, jeolojik şartların ve zeminin mühendislik parametrelerinin yer hareketine etkileri, [6, 7] numaralı çalışmalarda detaylarıyla bulunabilir. Teorik olarak kurulan nümerik tepe-kret ve konveks yüzey şekilli modeller üzerinde sismik dalgaların büyüme, konkav yüzey şekillerinin ise azalmasına sebep olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır [8, 9]. Literatürde yapılan saha çalışmalarına bakıldığında, kuvvetli yer hareketinin neden olduğu hasar dağılımlarında görülen ani değişim alanları topoğrafyanın etkisiyle açıklanabilmektedir. Ülkemizde şiddeti büyük olan Erzincan, Dinar, Kocaeli ve Bingöl depremleri sonrası yapılan saha çalışmalarında tepe, yamaç, geçiş bölgeleri, tepe kret noktaları

hasarların yoğunlaştığı alanlar olarak dikkat çekmiştir [10-13]. Ayrıca bu depremlerdeki saha gözlemlerime dayanarak; 1) 1995 Dinar depreminde yamaçta bulunan Santral sokaktaki hasar aşağı ve yukarı kotlardaki paralel sokakların hasarlarının birkaç katı olmasında etkenin topoğrafya olması; 2) 2003 Bingöl depreminde, şehir merkezinin kurulu olduğu büyük teras düzlükleri bölerek geçen Çapakçur ve Gayıt sularının açtığı kanalların her iki yakasında (kret bölgelerinde) yer alan mahallelerdeki hasarların kanyondan geriye düzlüklere doğru uzaklaşıldıkça azalması benzer şekilde topoğrafik etkinin azalmasının işaretleridir; 3) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde deprem merkezinden 100 Km. uzakta İstanbul' un Avcılar bölgesinde sadece yamaç ve zirve (kret) bölgesindeki mahallelerde (Gümüş Pala Mah., Deniz Köşklere Mah. Ambarlı Mah., Firuzköy Mah., Cihangir Mah., ve Avcılar Merkezi) oluşan 274 can kaybı (Aletsel büyüklüğü 3 civarı öncü şoklarda insanlar evleri terk ettikleri için can kaybı az olmuştu) ve büyük yapı hasarları (Hasarsız 940 bina; Yıkık: 28 Bina; Az Hasarlı:1064 Bina; Orta Hasarlı:491 Bina; Ağır Hasarlı: 455 Bina) ve 4) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı merkezinde yer alan Serdivan tepesi hasarları topoğrafik etkiler ile açıklanabilir. Tarihi depremlerde aletsel kayıtlarla topoğrafik etki çalışmalarının ilk örnekleri mevcuttur [14-18]. Mevcut yapı tasarım yönetmelikleri sahada gözlenen topoğrafik büyütme dikkate almamaktadır. Oysa, iki-boyutlu topoğrafik düzensizliklerin tepki analizleri için hesaplama algoritmaları ve bunların uygulama yazılımları doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlarla homojen yarı-sonsuz ortamlar için yürütülebilmektedir. Kullanılan yöntemler arasında, sonlu farklar yöntemi [19-20], sonlu elemanlar yöntemi [21], integral denklem yöntemi [22], sınır elemanlar metodu [23], ve ayrık dalga sayısı yöntemleri [24-25] sayılabilir.

Tepe yapılarında büyütme oranları zirve/tabana büyütme değerleriyle zaman tanım alanında geometrik şekil katsayısı ( $r$ ), yükselti (dağ, tepe vb.) büyüklüğü  $h$  ile yükseltinin taban genişliği oranlanarak ( $h/L$ ) izlenmektedir. Louis [26] zirve taban oranını etkileyen iki hususun; (1) tepede oluşan geniş-bant büyütme gelen dalganın dalga-boyu ( $\lambda$ ) ile tepe yapının taban genişliğiyle ( $L$ ) göreceli değiştiğini; (2) Tepe yapı tabanı ( $L$ )' de büyüme/küçülme dönüşümü küçük frekanslarda küçülmeden başladığı ve bu ilk P dalgasının dışarıya kırılan dalgalarla yaptığı girişim ile açıklanmıştır [25, 27]. Bu yüzden maksimum zirve/tabana spektral oran değeri tepenin taban genişliği ( $L$ )' den daha büyük dalga boylarının ( $\lambda$ ) oluştuğu frekanslarda izlenir ve Louis' in bir çalışmasında [26] açıkladığı gibi artan şekil katsayısı ( $r$ ) ile göreceli olarak bu maksimum değerlere yükselmektedir. Diğer taraftan, büyütmenin gelen P dalga cephesinde S' ye göre düşük olduğunu; Düzlem içi yatay yayılan (P-S<sub>v</sub>) dalgaları, düzlem dışı gelen (S<sub>H</sub>) dalgalarına göre daha fazla büyütme oluşturduğunu; Genlik ve fazın dağın eğimli yüzeyinde (yamaçta) hızlı değişerek büyüyen hareketler ürettiği Louis çalışmasında [26] açıklamıştır. Griffiths ve Bollinger [28] zirve ve tabanda 137 deprem kaydıyla izlediği altı topoğrafik yapıda tepede kaydedilen sismik hareketlerin tabana göre yüksek olduğunu bildirmiştir. Küçük topoğrafik yapılarda zirve/tabana spektral oranın 10 katı aştığı gözlenmiştir [29].

Geçmiş çalışmalarda ve bu çalışmada topoğrafik şekil oranlarının bir fonksiyonu olarak tepki hikayelerinin tepe değerleriyle zirve/tabana oranları alınarak hesaplanan büyütme Şekil 1' de çizdirilmiştir. Dolu ve açık simgeler sırasıyla hesaplanan ve gözlenen depremlerdir. Görüldüğü gibi katman coğrafyasının teorik yaklaşım uygulanarak yürütülen analizlerinde zirve/tabana büyütme farklı depremler için 1.7 ile 3.4 bandında çok geniş dağılım göstermektedir. Büyütmenin yatay bileşende düşeye göre büyük olduğu ve tepenin tabana göre fazla büyüttüğü her deprem için kesin söylenebilir. Dalga boyu ile topoğrafik yapı taban genişliği oranının verdiği frekansa yakın oluşan büyütme frekansı bir tutarlılık göstergesi olarak değerlendirilebilir. Topoğrafyanın üç boyutlu olması, alt katmanların düzensizliği, komşu topoğrafyalarla dalga girişimleri gibi birçok etken farklılıklara sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 1 - Geçmiş ve mevcut çalışmalarda zirve/tabán büyütmeleri. Simgeler: □GB79 = Griffiths ve Bollinger, 1979; △ DW73 = Dawis ve West, 1973; ■ GBJ86 = Griffiths ve Bollinger,1986; ▲ Si78 = Sills, 1978; ○ RKB74 = Rogers vd., 1974; ● ZBY80 = Zhenpeng vd., 1980; (Louis vd.,1988' den üretilmiştir), ◆ KB=Kemal Beyen.

## AMAÇ

Yerel topoğrafya ve zemin yapısının modellenmesi ve üreteceği tepkilerin hesaplanması olası büyük depremlere göre analizlerinin yapılması ve sonuçların şehir planlama çalışmalarında kullanılması alan bazlı hataların sıfırlanmasında çok önemlidir. Topluma yansıyacak fayda güvenli yeni yapı sayısının artmasıyla açıklanabilecektir. Yapılaşma alanlarında yerel yönetimlerin yeni proje çalışma sahalarının dinamik davranış parametrelerinin yanı sıra yerel topoğrafik büyütme de saha bilgisi olarak sunması mühendislik yapılarının hasar riskini minimize edeceği gibi şehircilik açısından alan kullanımlarının planlanmasına da katkı verecektir. Bu amaçlar doğrultusunda farklı topoğrafik yüzey modelleri davranışa etki eden parametrelerin farklı değerleri için iki boyutlu doğrusal olmayan analizlerle çalışıldı. Karakteristik değerleriyle sonuçlar belirli yüzey yapıları için tablo-grafik çizimlerle sunuldu.

## TEORİK TOPOĞRAFİK MODELLERLE ÇALIŞMA

Zemin ortamının davranışını analiz etmek amacıyla zeminin doğrusal olmayan davranışını ve düzlem-birim-şekil-değiştirme ve toplam gerilme yaklaşımını kullanarak iki boyutlu çözümleme



yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Program sonlu eleman uygulaması içinde sonlu farklar yaklaşımıyla çözüm yapmaktadır [3, 30]. Değişik yüzey topoğrafyaları tepe ve yamaç olmak üzere  $45^\circ$ ,  $26.56^\circ$  ve  $14.03^\circ$  eğimlerinde; zemin kütlelerinin ise sonlu farklar elemanının merkezinde yığılı olduğu kabul edilerek yatay ve düşey serbestliğe sahip düzlem içi zorlanan nümerik modeller olarak Şekil 3a ve 3b' de görüldüğü gibi gerçek coğrafyada olabilecek sekiz yüzey yapısı modellendi. Şekil oranı H/L ve eğimlerin oluşturduğu modeller Çizelge 1' de sunulmuştur. Bu çalışmada örnek olarak alınan modellerin sonuçları kuvvetli (doğrusal olmayan davranış modeli) ve zayıf yer hareketi (doğrusal davranış modeli) etkisinde değişen frekans içeriği ve geliş açıları için karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Her bir model 5 saniyelik girdi hareketi altında her bir değişen parametre değerinin tepkiye etkisi 20 saniyelik analiz süresi boyunca ivme, hız ve yer değiştirme cinsinden zaman geçmişleri hesaplandı ve ileri analizler için kullanıldı. Fourier spektral oranları, ivme zaman geçmişlerinin yatay tepe ivmelerinin oranı ve maksimum yatay ivme kontur zarfları parametrelerin etkisinin görülmesi için sunulmuştur.

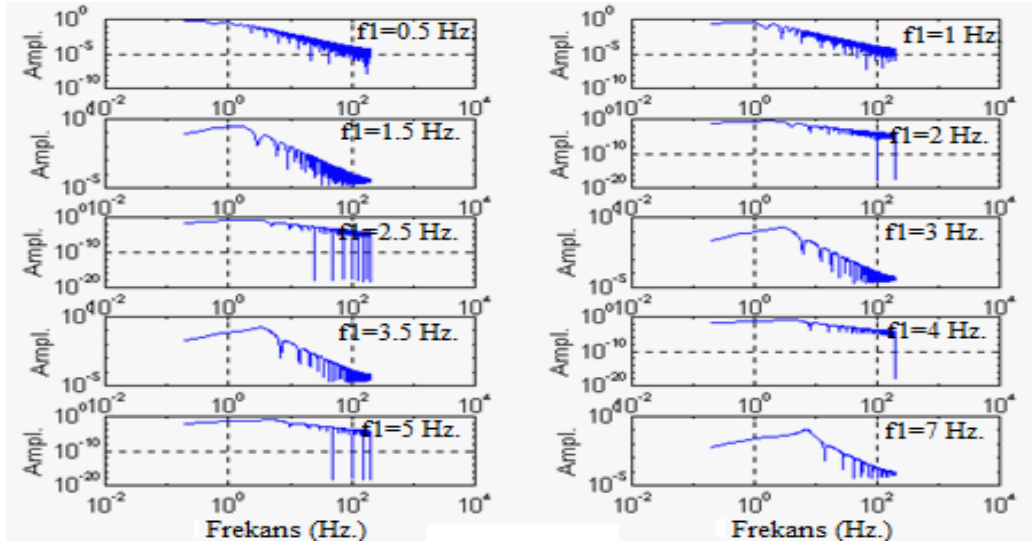
Sonuçlar ait olduğu topoğrafik modeli göstermek için sekiz karakterden oluşan kodla isimlendirildi. Kodlamada, ilk iki karakter model isimlerini D1, D2 gibi, üçüncü karakter depremin kuvvetli, S veya zayıf, W olduğunu, 0' dan 9' a kadar değişen dördüncü karakter on değişik hâkim frekans (0.5, 1., 1.5, 2., 2.5, 3., 3.5, 4., 5. ve 7. Hz.) depremlerin gösterimi için kullanıldı. Beşinci karakter H veya V kullanılarak sırasıyla yatay veya düşey bileşenleri ve etiketin sonuncusu ise 0' dan 5' e kadar değişen rakamları sırasıyla geliş açıları olan  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $75^\circ$  değerlerini ifade etmektedir. Nonliner zemin davranışının modellenmesinde dağ ve tepe formasyonları için, yumuşak kayalarda birim kütle yoğunluğu,  $\rho$   $2200 \text{ kg/m}^3$ , drenajlı kesme mukavemeti  $S_u$   $7.92E5 \text{ Kg/m}^2$ , Kayma dalgası hızı,  $V_s$   $600 \text{ m/sn.}$ , basınç dalgası hızı,  $V_p$   $2500 \text{ m/sn.}$  ve Poisson oranı 0.46 olarak hava ile temasta kalmış kum kayaları için alındı. Yamaç kayaçları için birim kütle yoğunluğu,  $\rho$   $2700 \text{ kg/m}^3$ , kayma dalgası hızı,  $V_s$   $2000 \text{ m/sn.}$ , basınç dalgası hızı  $V_p$   $3500 \text{ m/sn.}$  olarak alındı. Zemin ortamı homojen, izotropik yatay katmanlar kaya üzeri tabakaları olarak oluşturuldu. Geometrik kesitler düzlem zorlanan modeller olarak alınıp düşey ve yatayda 5 metrelik sonlu fark elemanlarıyla yer yapısı 1100 m. ve 150 m. yükseklikler arasında iki boyutlu modellendi. Stabil bir analiz için 0.0025 sn. zaman adımları denemeler sonucu seçilerek simülasyonlar yürütüldü.

**Çizelge 1 - Çalışılan Yüzey Şekillerinin Özellikleri**

MODEL ADI	SOL EGİM AÇISI	SAG EGİM AÇISI	Hsol/Lsol	Hsağ/Lsağ
D1-Tepe	$45^\circ$	$45^\circ$	0.72	0.72
D2-Tepe	$26.56^\circ$	$26.56^\circ$	0.46	0.46
D3-Tepe	$26.56^\circ$	$45^\circ$	0.46	0.72
D4-Tepe	$14.03^\circ$	$14.03^\circ$	0.25	0.25
D5-Tepe	$14.03^\circ$	$45^\circ$	0.25	0.81
D6-Yamaç	$45^\circ$		0.72	
D7-Yamaç	$26.56^\circ$		0.46	
D8-Yamaç	$14.03^\circ$		0.25	

Kuvvetli ve zayıf hipotetik deprem hareketi eksponansiyel azalan sinüs genlikleri 300 mg ile kuvvetli yer hareketi (doğrusal olmayan davranış) ve 5 mg ile zayıf yer hareketi (doğrusal davranış) simülasyonlarda kullanıldı.

$$f(t) = e^{-k.dt} \cdot \text{Sin}(2. \pi. k. dt) \quad (1)$$



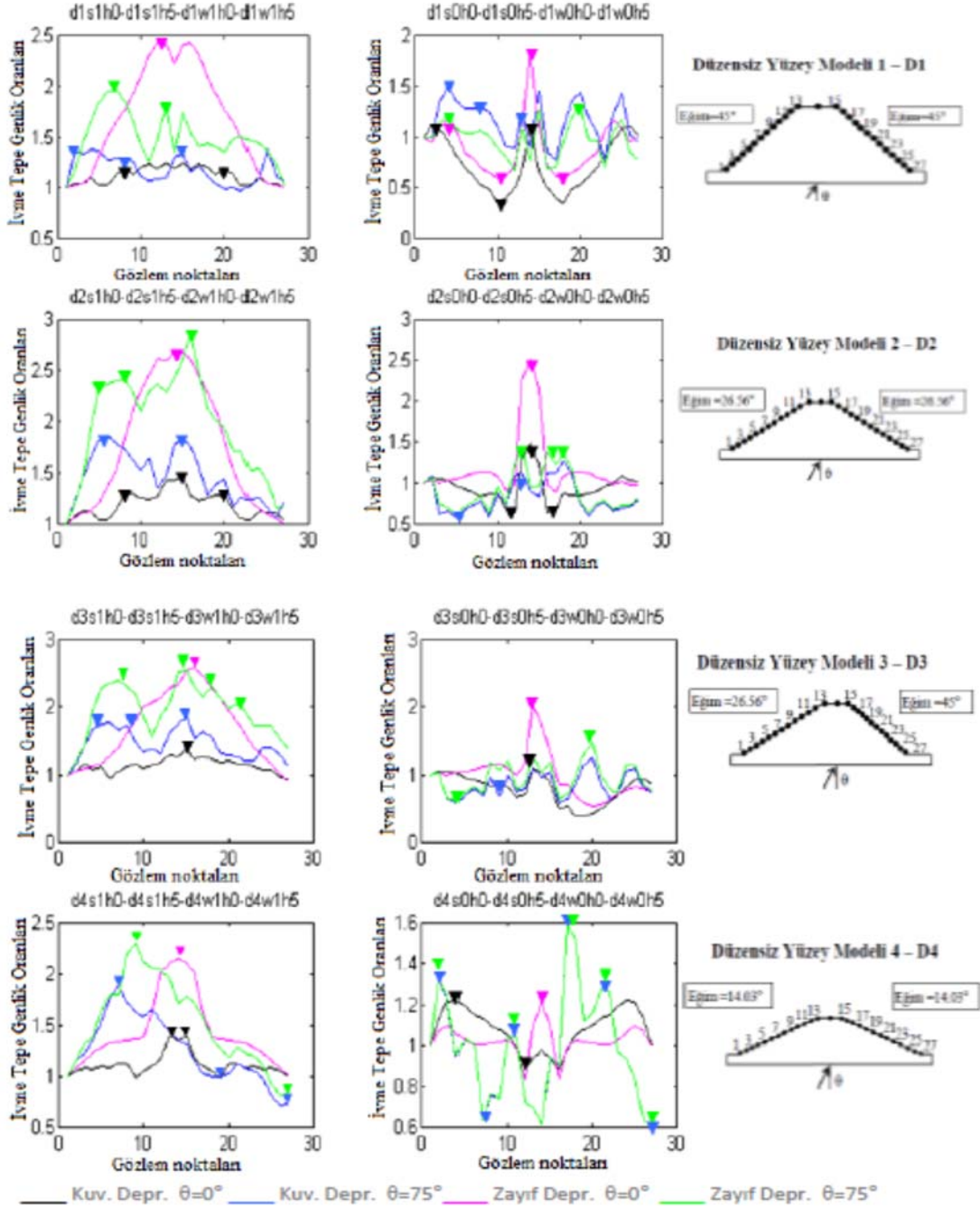
Şekil 2 - Simülasyonlarda kullanılan, farklı hâkim frekans yer hareketi modellerinin FAS spektrumları [2]

## TOPOĞRAFİK BÜYÜTMELER

Çalışma parametrelerinin değişik yüzey eğimleri altında yer yüzeyi tepkileri Şekil 3' de çizilmiştir. Tepe modellerin düşey gelen küçük hâkim frekans (sol kolon) ve yüksek hâkim frekans (sağ kolon) girdi kuvvetleri için yapılan doğrusal analizler maksimum tepkileri genellikle tepe bölgesine yığmıştır. Geliş açılarının büyümesi ise küçük hâkim frekanslı zayıf girdi kuvvetlerinin ürettiği maksimumları eteklere kaydırırken, yüksek hâkim frekanslı zayıf girdi kuvvetlerinin ürettiği büyük azalım katsayılarını yamaçlara kaydırmış ama maksimum büyütmeler yine tepe bölgesinde oluşmuştur. Aynı modellerin aynı şartlarda kuvvetli yer hareketi altında (doğrusal olmayan davranış) 1 ile 1.5 katı arasında büyütmeleri küçük hâkim frekanslı yer hareketinde tepe noktasında verirken, yüksek hâkim frekanslı yer hareketi benzer davranmış ve maksimumlar bütün modellerde tepe de yoğunlaşırken, küçük yamaç eğimiyle D4 farklı davranmıştır. En büyük geliş açısı altında küçük hâkim frekans modellerde yüksek büyütmeye yaparken, büyük hâkim frekans küçük amplifikasyonlar ve azalımlar üretmiştir.

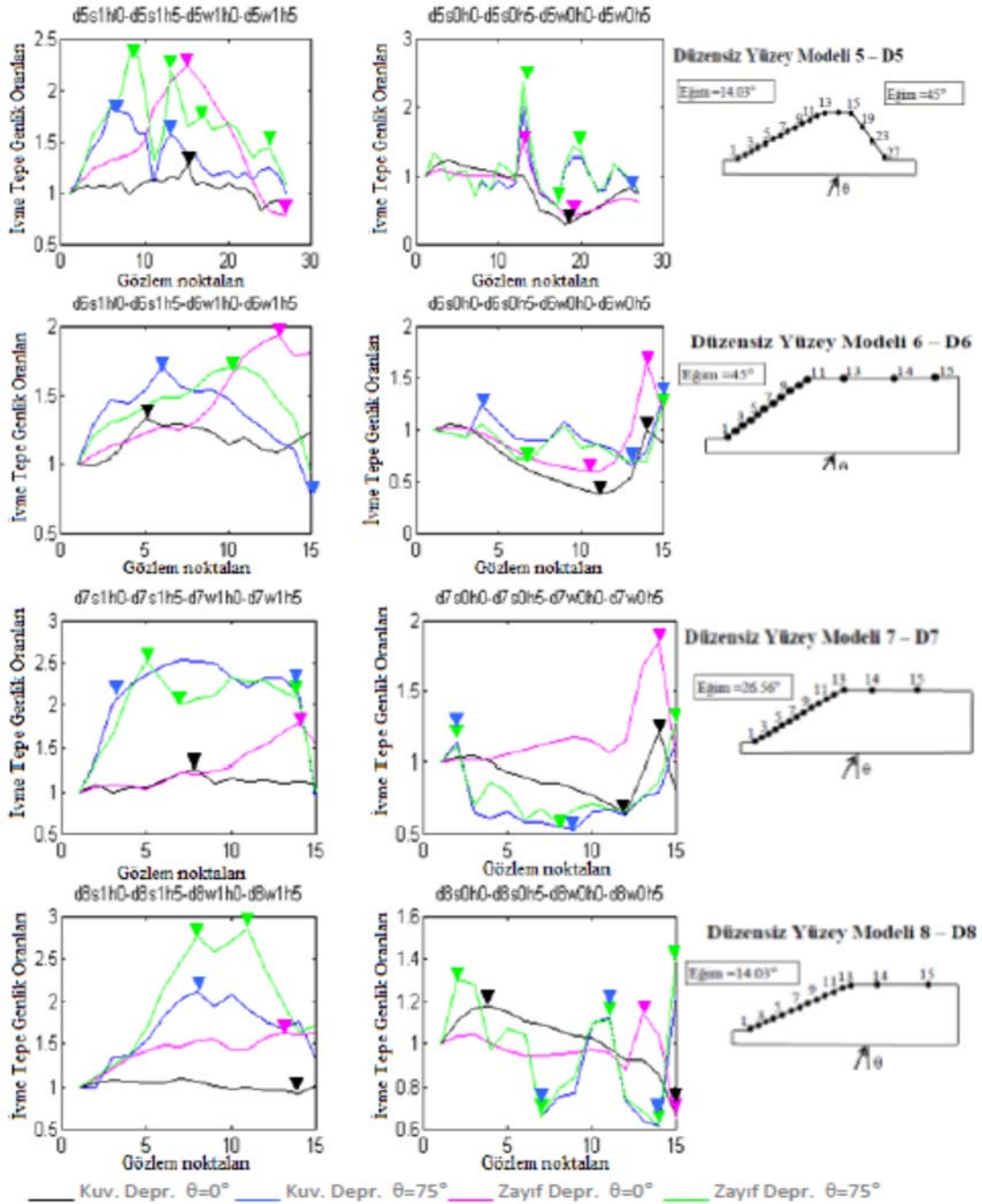
Benzeşim çalışmalarının farklı yüzey yapısı düzensizliklerine örnek modelleri ve üzerindeki gözlem nokta yerlerine uygun maksimum tepe-taban genlik oranları değişik geliş açıları için Şekil 3a ve 3b' de çizdirilmiştir. Saha kullanımına veri sağlayacak büyütmeye oranlarıyla ilgili tartışma ve yorumlar Beyen' in çalışmasında [2] bulunabilir. Özetlenecek olursa; Model D1, doğrusal davranış içinde yer hareketinin frekans yapısına hassaslık göstermiştir. Düşük hâkim frekanslı deprem yüksek hâkim frekanslı depremin yüksek genlik oranlarını aşağıya çekmiştir. Geliş açısının artmasıyla yüksek ve düşük hâkim frekanslı depremlerin büyütmeye oranları arasındaki fark azalmıştır. Doğrusal olmayan analiz ise doğrusal tersine yüksek hâkim frekanslı deprem kuvveti altında büyütmeye oranlarını göreceli olarak artırmıştır. Model D2 doğrusal davranışta bütün deprem girdileri için benzer genlik oranları vermesine rağmen doğrusal olmayan analiz değişken hâkim frekans yapıları yer hareketine farklı büyütmeye oranları vermiştir. Model D3, doğrusal analizlerde, küçük geliş açılı düşük hâkim frekanslı yer hareketi, yüksek frekanslılara oranla daha yüksek büyütmeye oranı vermiştir. Doğrusal olmayan koşullarda, model D3 küçük geliş açıları altında doğrusal sonuçlarla benzerlik gösterirken, 15°'den büyük geliş açılarında düşük büyütmeye oranları vermektedir. Model D4, 45°' den küçük geliş açıları altında düşük hâkim frekanslı yer hareketi, yüksek frekanslılara oranla nispeten yüksek büyütmeye oranını doğrusal analizlerde vermektedir. Doğrusal olmayan analizlerde ise, yüksek büyütmeye oranları yüksek

hâkim frekansa aynıdır. Model D5, doğrusal analizlerde bütün depremler için benzer genlik oranlarını geliş açılara bağlı olarak veriyor. Doğrusal analizde, 30°' e kadar geliş açıları düşük hâkim frekanslı deprem girdisinde benzer oranlardadır. Doğrusal olmayan analizde, yüksek hâkim frekans yapıda fark edilebilen değişik genlik oranları vermektedir. Model D6, doğrusal analizde düşük hâkim frekanslı yer hareketi için yüksek büyütme oranı verirken D6' nın yer hareketi hâkim frekanslara hassas olduğunu tepki farklılıklarından anlıyoruz. 45°'den büyük geliş açılar altında bütün girdi harekete doğrusal olmayan analiz yakın büyütme oranları vermektedir. Model D7, doğrusal ve doğrusal olmayan analizde, yüksek hâkim frekans muhteviyatlı depremler



Şekil 3a - Değişik yüzey şekillerinin yatay ivmelerin taban değerine oranları, büyütme katsayıları

yüksek büyüme oranları vermekle beraber, doğrusal analiz yüksek ve düşük hâkim frekans muhteviyatlı depremlerin tepki genliklerinin oranlarında büyük fark üretmemiştir. Model D8, 45° 'ye kadar ki geliş açılı depremlerde doğrusal analiz yüksek büyüme oranları vermekle beraber düşük hâkim periyodu olan depremler yüksek hâkim periyoda sahip depremlere oranla daha yüksek oranda etkilenmektedir. Doğrusal olmayan analiz ters yönde bir davranış sergiliyor.



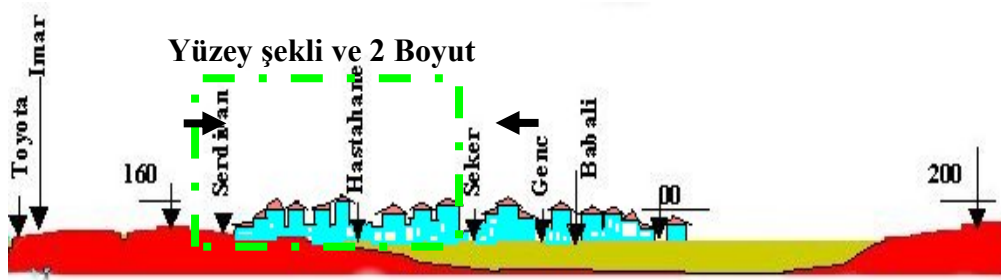
Şekil 3b - Değişik yüzey şekillerinin yatay ivmelerin taban değerine oranları, büyüme katsayıları



**Çizelge 2 - İstasyonlarda kaydedilmiş Kocaeli depremi aletsel büyüklüğü 3.6 üstü artçılarının izleme profil yönü KG yatay bileşenlerinin maksimum değerleri [2]**

TARİH	MAG.	BOYL.	ENL.	DEPR. MERK.	K-G İVME BİLEŞENLERİ (mg)						
					Toyota 1410	İMAR 1415	SERDİVAN 1409	Hastane 1417	Şeker 14303	Genç 16755	Babalı 1411
30-08-99	4	40.79	30.53	Akyazi-Adap.	10	9	12	25			
31-08-99	5.2	40.75	29.92	Izmit	20	24	39	45			50
31-08-99	4.6	40.78	29.96	Izmit		10	15	11			17
01-09-99	3.7	40.81	29.96	Izmit		2	3				4
02-09-99	4	40.73	30.82	Hendek-Adap.	4	8	15				9
05-09-99	4.2	40.69	30.54	Akyazi-Adap.	9	7	7	7			5
09-09-99	3.6	40.68	30.59	Akyazi-Adap.	3	6		10			6
13-09-99	5.8	40.77	30.1	Izmit	51	54	212	71	144	70	90
17-09-99	4.5	40.72	30.1	Sapanca-Adap.	12	78	141	45	73	34	50
19-09-99	4.2	40.64	30.52	Akyazi-Adap.	26	33	41	102	41	30	28
24-09-99	3.8	40,80,	30,29	Adapazarı	22	26	67	9	24	12	10
29-09-99	4.8	40,7	29,34	Yalova	15	14	39		50	32	23

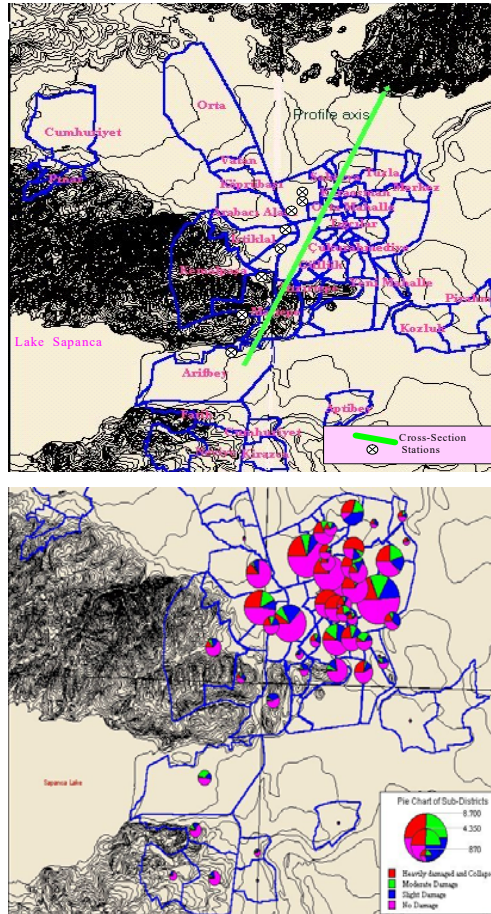
Yamaç başlangıcında yer alan İMAR istasyonu ile kret bölgesinde konumlanmış artçı istasyon SERDİVAN ve hemen Serdivan'ın eteğinde basen çanağı kenarında bulunan HASTANE veya Güney eteğindeki TOYOTA kayıtları mukayese için kullanılmıştır. Şüphesiz deprem merkezine mesafe, yayılım yolu, depremin büyüklüğü ve frekans içeriği gibi faktörlerin etkisini göz önünde bulundurarak Çizelge 2'ye bakarsak, küçük depremlerde, İMAR ile hemen eteğinde yer alan TOYOTA veya basen kenarında yer alan HASTANE zaman tanım alanında yakın deprem büyüklükleri üretirken, ortalama 0.9-1.2 büyütmeye ve ortalama 0.25-0.5 küçültmeleri bazı depremlerde gerçekleşmiştir. SERDİVAN bu istasyonlara göre 1-2.7 arası büyütme yapmıştır. Kuvvetli yer hareketi olabilecek 5.8 aletsel büyüklüğü olan 13 Eylül 1999 depreminde kret civarında bulunan SERDİVANIN 4 katına çıkan büyütme oranları çok dikkat çekicidir. Şekil 7' de profil boyunca kaydedilen ve geoteknik modelden hesaplanan hız zaman hikayelerinin dalga formu, genlik ve periyodik yapı tutarlılığı, örneğin Deprem 1 kaydı olmayan Şeker, Genç ve Babalı istasyon kayıtlarının yerine kullanılabilme fırsatını bize sunmaktadır.



**Şekil 5 - 11 Km. uzunluğunda Sakarya ovasını kesen Güney Kuzey profilin iki boyutlu doğrusal olmayan nümerik Sonlu Farklar Geoteknik Modeli, Güney ucunda yer alan İmar ve Serdivan gibi tepelerin artçı deprem kayıtlarıyla örtüşmektedir [2].**

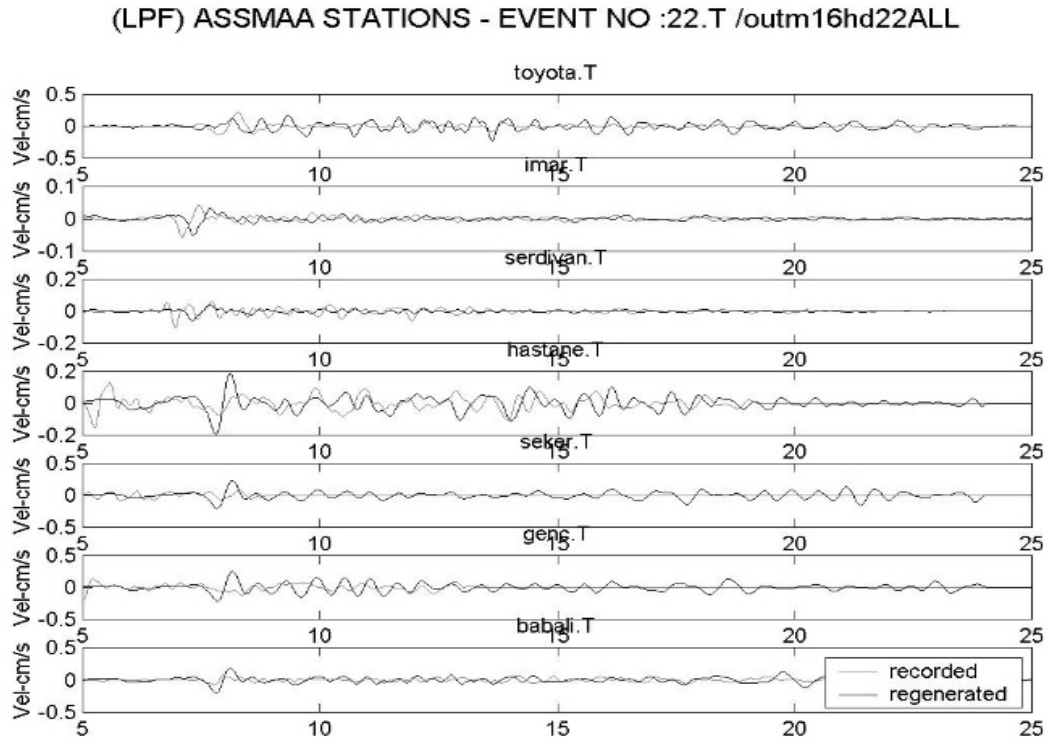
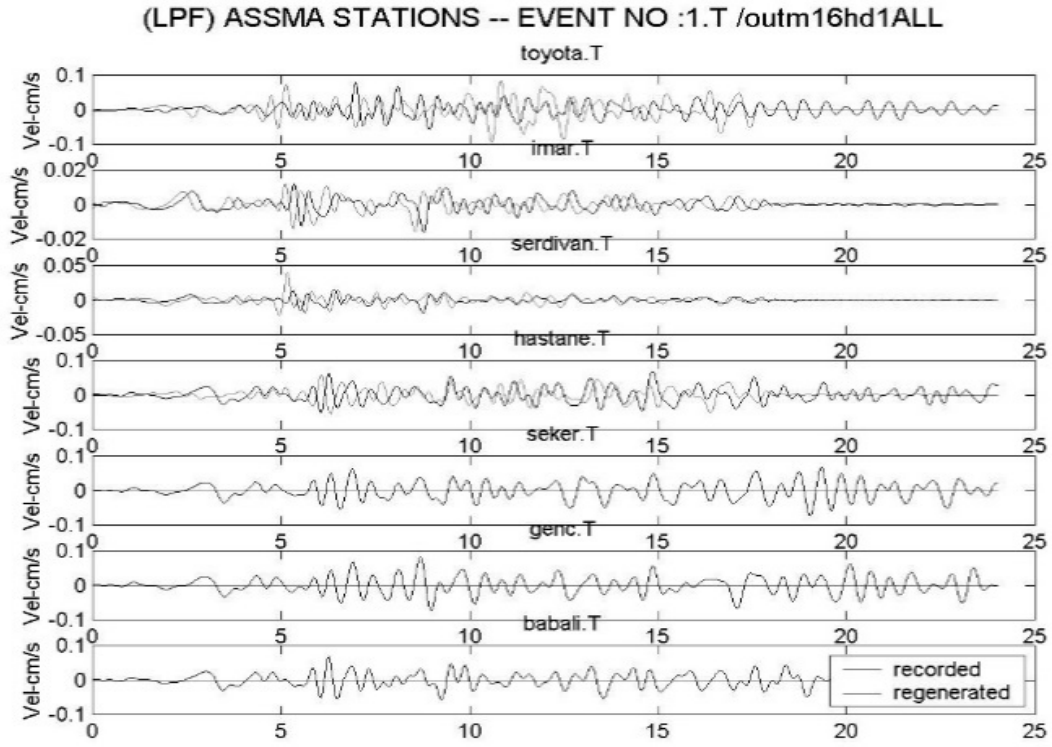
Benzer şekilde İMAR' a göre SERDİVAN'ın büyütme oranlarını Şekil 7' de görüldüğü gibi frekans tanım alanında inceleyecek olursak, 4.5, 4.6, 4.8 ve 5.8 'lik büyük depremlerin 1Hz' in altında 1 katı veya az ortalama amplifikasyonlar yaparken, 2Hz' in üstünde 5 ila 20 katı

büyütmeler İMAR ile göreceli olarak gözlenmiştir. Deprem merkezine yaklaşık aynı mesafede biri yamaç eteğinde diğeri kret civarında olan istasyonların birbirine göre 4.5 ve üstü depremlerde görülen büyütmelerin nedeni topoğrafyadır. 4.2 aletsel büyüklüğe kadar kaydedilen küçük depremler 1 Hz' in altında nispeten büyüme, 1 Hz' in üstünde ise en fazla 2 katı civarı bazı frekanslarda büyüme yaparak, zaman zaman ise küçültmelerle 1 civarında salınması, küçük depremlerde topoğrafik etkinin gelen depremin frekans muhteviyatına kuvvetle bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 6' da görüldüğü gibi, genelde yerel tepkinin frekans içeriği genlik ortalamasından geçen yaklaşık bir değer etrafında kuvvetli salınımlarla frekans eksenini boyunca davranış sergiliyor. Yüksek frekans bölgesinin düşük frekans bölgesine göre daha zengin olması ise topoğrafik etkinin girişim ve kırılımlar altında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu özellikleri SERDİVAN' ın İMAR' a göre göreceli oranlanmasından güçlü olarak Şekil 6, Şekil 7 ve Çizelge 2' de da görüyoruz. Ayrıca, geoteknik model analizleriyle hesaplanan profil üstü istasyonlarının zaman hikayelerinin maksimum genlik oranları Şekil 7' de görüldüğü gibi hesaplanacak olursa benzer büyütmeler elde edilebilmektedir.



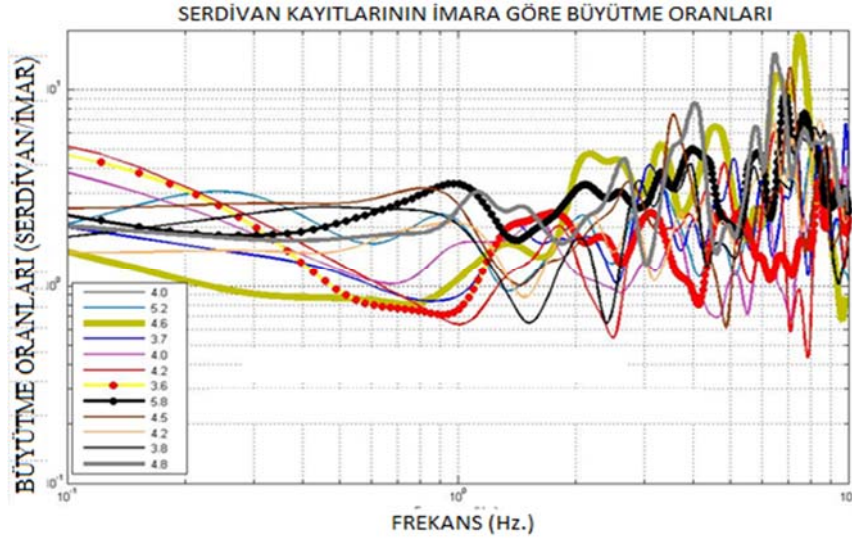
**Şekil 6** - Adapazari yerleşimleri ve yerel topoğrafik haritası, hasarlı bölgelerden geçen K-G profil üzerinde konumlandırılmış 8 ivme ölçer artçı istasyonları [2]' den alıntıdır.

Deprem 1 kayıtları olmayan Şeker, Genç ve Babalı istasyonları için yürütülen simülasyon çalışmalarının öngördüğü sentetik yerel tepkiler kaydedilememiş olan gerçek deprem yerel tepkilerin yerine yüksek güvenilirlikle kullanılabilir. Burada dikkat edilecek detay geoteknik modelin üretebileceği simülasyon frekansıdır. Geoteknik modelin üretebileceği simülasyon frekans eşiği olan 50 Hz' den daha yüksek frekanslar geoteknik modelin hesaplanan kayıtlarından süzdürülerek uzaklaştırılmıştır.



Şekil 7 - Profil boyunca kaydedilen ve geoteknik modelden hesaplanan hız zaman kayıt örneği 1 numaralı (üst) ve 22 numaralı (alt) depremlerin T bileşeni için örnek olarak çizilmiştir.



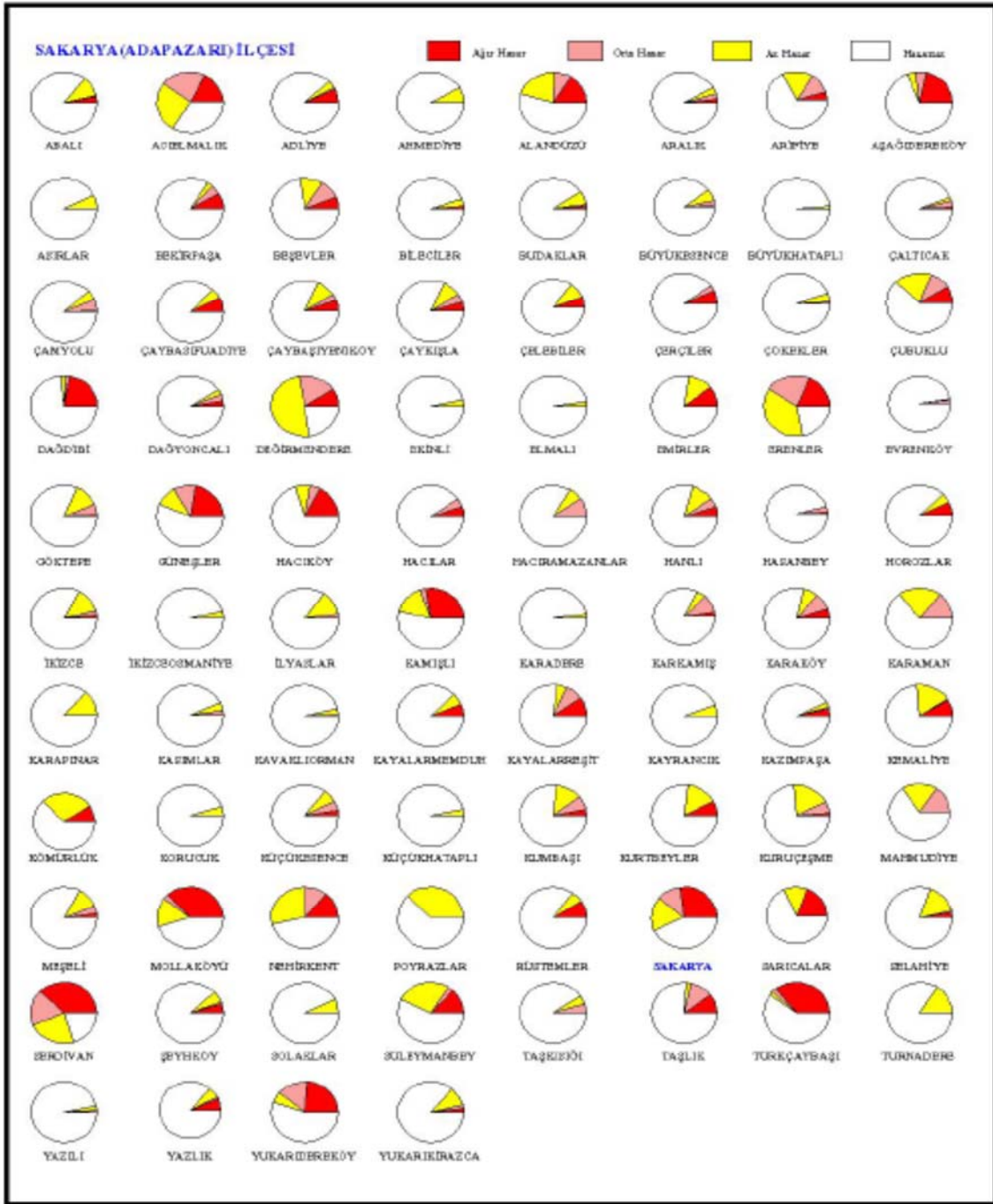


**Şekil 8** - Etek istasyon İMAR' a göre kret bölgesi istasyonu SERDİVAN' ın büyütme oranları kalın çizgiyle gösterilenler 4.5 ve üstü depremler, ince çizgiyle gösterilenler 4.2 aletsel büyüklüğü ve altında gelişen depremlerdir. Kare siyah çizgili 5.8 ile güçlü depremi, kare açık çizgiyle 3.6 ile küçük depremi göstermektedir.

**Çizelge 3** - Parametrik model çalışmasından çarpıcı sonuçlar

Geliş Açısı		@ 0 derece		artan eğimlerde		@ 75 derece	
Yer Hareketi		Amp. Oranı	Amp. bölg	Amp. Oranı	Amp. bölg	Amp. Oranı	Amp. bölg
Zayıf (Lineer)	@ F1	yüks Amp	Tepe-Kret	makslar	eteklere iniyor		
	artan F1	yüks Amp	Tepe-Kret	makslar, diampf ve kompleks patenler	tepede, eğimli yüzeylerde		
Kuvvetli (NonLin)	@ F1	1,0 - 1,5	Tepe-Kret			yük. Amp., en yüksek	kenarlarda @ 75 derece
	artan F1	ort. Amp diampfik., yalnız D4 farklı 1.2, zayıf deampf	Tepe-Kret, kenarlarda, yüzeylerde ve @tepe	küçük büyütme ve diampf	bütün tepe modellerin eğimli kenarları boyunca		

Yamaç Modeller'in Yatay Bileşenleri							
Geliş Açısı		@ 0 derece		artan eğimlerde		@ 75 derece	
Yer Hareketi		Amp. Oranı	Amp. bölg	Amp. Oranı	Amp. bölg	Amp. Oranı	Amp. bölg
Zayıf (Lineer)	@ F1	1,7 katı	Tepe-Kret	2,5 - 3	yamaçlarda		
	artan F1	6 katı	Tepe-Kret	amp.'dan diampfikasy ona dönüşüyor	yamaçda		
Kuvvetli (NonLin)	@ F1	zayıf ampl	yamaçda	2,0 - 3,0	yamaçlarda		
	artan F1	yüksek Amp	yamaçda	amp.'dan diampfikasy ona dönüşüyor	yamaçlarda		



Şekil 9 - Rakamsal verilerle Sakarya (Adapazarı) ilçesinde meydana gelen hasarların oransal dağılımı [32].

Şekil 9' da verilen bir başka çalışmada, rakamsal verilerle Sakarya (Adapazarı) ilçesinde meydana gelen hasarların oransal dağılımı Özen, B.' nin bir çalışmasında [32] TDV tarafından yayımlandı. Serdivan yapı stok pastası incelendiğinde, az, orta ve ağır hasar büyük bir pay tutarken, pastada hasarsız yapı dilimi oransal olarak çok küçüktür. Serdivan yapı stok pastası alttan ikinci satır başında en ağır tabloyla görülmektedir [32]. Çizelge 3' de yapılan parametrik çalışmanın genlik oranlarının büyümesi ve büyüme frekanslarının geliş açısı ve yamaç eğimleriyle olan etkileşimi

özetlenmiştir. Yamaç eğiminin azalması topoğrafik büyütme azaltırken, geliş açısının artması bazı bölgelerde büyütme bazı yerlerde azaltmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Çizelge 4’ de ise 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminin büyük ve küçük artçılarının kaydedilmiş zaman tanım alanı büyütme oranları ana fikri destekleyen gerçek kayıt değerleri olarak özetlenmiştir. Çizelge 4’ den görüleceği gibi bir tepenin kuzey tepe yamacı (Serdivan) ve güney tepe üstünde bulunan (İmar) kayıtları ve güney etek düzlüğü (Toyota) ile Kuzey etek düzlüğünde basen kenarında yer alan Hastane kayıtlarının genlikleri değişik ölçekteki artçılar için mukayese edilirse Serdivan / Hastane büyük depremlerde sistematik büyütme sergilememekle beraber yaklaşık 3 katı büyütme 4.5 ve 5.8 ‘lik depremlerde göz ardı edilmemelidir. Kret/Tepe üstüne örnek olabilecek Serdivan/İmar 1.5 -2 katı oran ile kret noktasından tepe üstüne doğru ilerlendiğinde küçülme simülasyonlarla benzerlik göstermektedir.

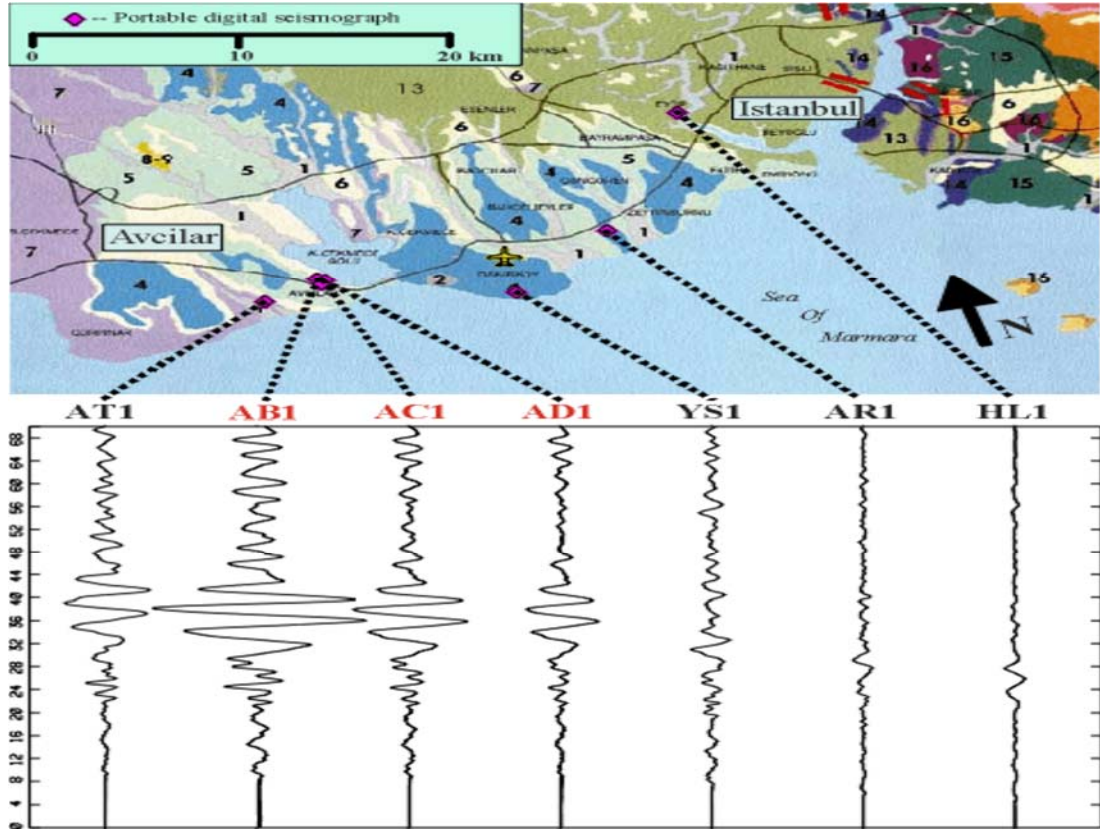
**Çizelge 4 - 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Artçılarının Adapazarı Çalışması içinde Kaydedilmiş Zaman Tanım Alanı Büyütme Oranları**

oranlar	Küçük depremler							Büyük Depremler				
	3,6	3,7	3,8	4	4	4,2	4,2	4,5	4,6	4,8	5,2	5,8
<b>İmar/Toyota</b>	0,5	-	1,2	0,9	2	0,8	1,3	6,5	-	0,95	1,2	1,1
<b>Serd/Toyota</b>	-	-	3	1,2	3,8	1,7	-	12	-	2,6	-	4,1
<b>İmar/Hastan</b>	0,6	-	3	0,9	-	0,25	-	1,7	-	-	1,2	0,8
<b>Serd/Hastan</b>	-	-	7,5	0,8	-	1	2,5	3,1	1,4	-	0,8	3,1
<b>Serd/İmar</b>	-	1,5	2,7	1,3	2	1	1,3	1,9	1,5	2,8	1,6	4

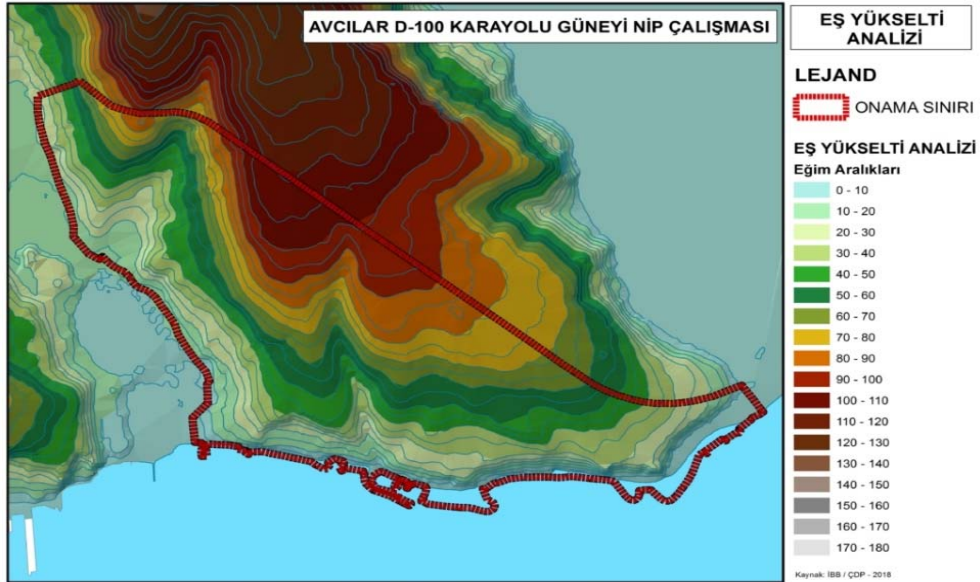
## 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİ VE AVCILAR-İSTANBUL ÇALIŞMASI

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde İstanbul’ da en fazla hasar Avcılarda oldu. Deprem merkezinden yaklaşık 90 Km. uzakta İstanbul’ un Avcılar bölgesinde sadece yamaç ve zirve (kret) bölgesindeki mahallelerde (Gümüş Pala Mah., Deniz Köşkları Mah. Ambarlı Mah., Firuzköy Mah., Cihangir Mah., ve Avcılar Merkezi) oluşan 274 can kaybı ile sonuçlanan bir deprem gerçeği değişik bilim disiplinleri tarafından çalışılmış ve ihtimal sebepleri açıklanmıştır. Alelcelde büyüklüğü 3 civarı öncü şoklar sonrası insanlar evlerini terk ettikleri için can kaybının nispetten az olduğu Avcılar’ da yapı hasarları 1823 konut ve 326 iş yerinin yıkıldığı ya da ağır hasarlı olduğu, 5 bin 106 konut ve 872 iş yerinde orta hasar, 3 bin 685 konut ve 461 iş yerinde de hafif hasar oluşması 90 Km uzaklıktaki bir coğrafyanın yerel etkisiyle de açıklanabilir. Hasarlı ve yıkılan binaların tasarım ve inşaat kalitesi için yazılan raporlar ve görüşlerin doğruluğu tartışmasıdır. Yapım yıllarında yürürlükte olan yönetmeliklerin günümüzde ulaşılan bilgilerden yoksun oluşturulması, yapıların mevcut affedilemeyecek kusurlarıyla yapısal af ilan edilip yasal hale getirilmesi ve benzeri uygulamalar bu can kayıplarının malesef insan kaynaklı olduğu gerçeğinin inkâr edilemeyeceğini gösteriyor. Günümüzün teknolojik izleme imkanları topoğrafik büyütme etkisinin de tartışmaya dahil edilmesini gerektirmektedir.

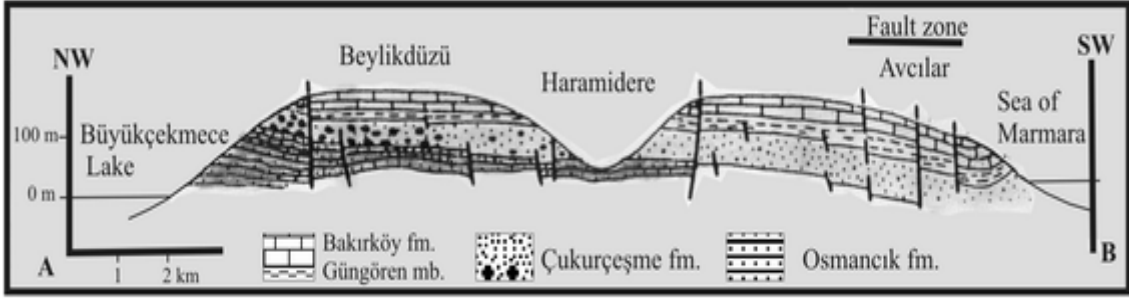
İstanbul’ un batı yakasına seyahet eden ana şokun Halıcıoğlu, Zeytinburnu, Yeşilköy istasyonlarına yaklaşık aynı dalga cephesiyle sabit yayılırken Yeşilköyde biraz büyüyerek yayıldıkları görülmektedir. Avcıların istasyonlarında aşırı büyüyerek batıya seyahet ettiklerini ve Ambarlı Termik Santral istasyonunda atenüasyona uğrayarak beylikdüzü yüzey yapısına doğru yayıldıklarını Şekil 10’ dan anlamaktayız.



Şekil 10 - 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi dalgalarının deprem merkezinden batıya İstanbul'a doğru yayılımını ve coğrafyadaki değişimini gösteren 60 saniyelik ivme-zaman geçmişi [13].



Şekil 11 - Avcılar merkez ve güney bölgesinin eş yükselti haritası [33]



Şekil 12 - Avcılar Doğu-Batı profil [34].



Şekil 13 - Avcılar bölgesinin hava fotoğrafı, yerleşim alanlarının Şekil 11 ve 12’ de gösterilen eğimli arazi üzerinde yayılımı [36].

Deprem merkezinden yaklaşık 90 Km. uzakta bulunan Avcılar bölgesinin aldığı hasar ve yıkımlar için değişik görüşler dile getirilmiştir. Bunlardan bazılarını hatırlayacak olursak; (1) yer altı mercekli katmanlara çarparak kırılan dalgaların girişiyle; (2) sismik genlik büyütmesiyle; (3) deniz içi heyelanların Avcılarda şiddeti artırdığıyla açıklayanlar olmuştur [35]. (4) Sığ derinliklerde kil katman ile sarılı suya doymuş kum katmanlarının sıkışmış yapı altında gözenek su basıncının artarak sismik büyütme gerçekleştiğini [35] açıklayanlar dahi olmuştur. Yer bilim





yaslandığı dağın eteklerinden yamaçlara doğru ilerlemiştir. Şehirlerin genişleme alanlarına karar verilirken, mücavir alanlar tespit edilirken, ulaşım, erişim, afet kontrolü ve yönetimi, sağlıklı kentleşme ve sahaların dinamik davranışları göz önünde bulundurulmak zorundadır. Şekil 19’da görülen uydu fotoğrafları yerleşim alanı iki katına büyümüş dağ yamaçlarının imar açıldığı bir şehir ve afet riskinin büyüdüğü bir yer seçimi örneğidir.

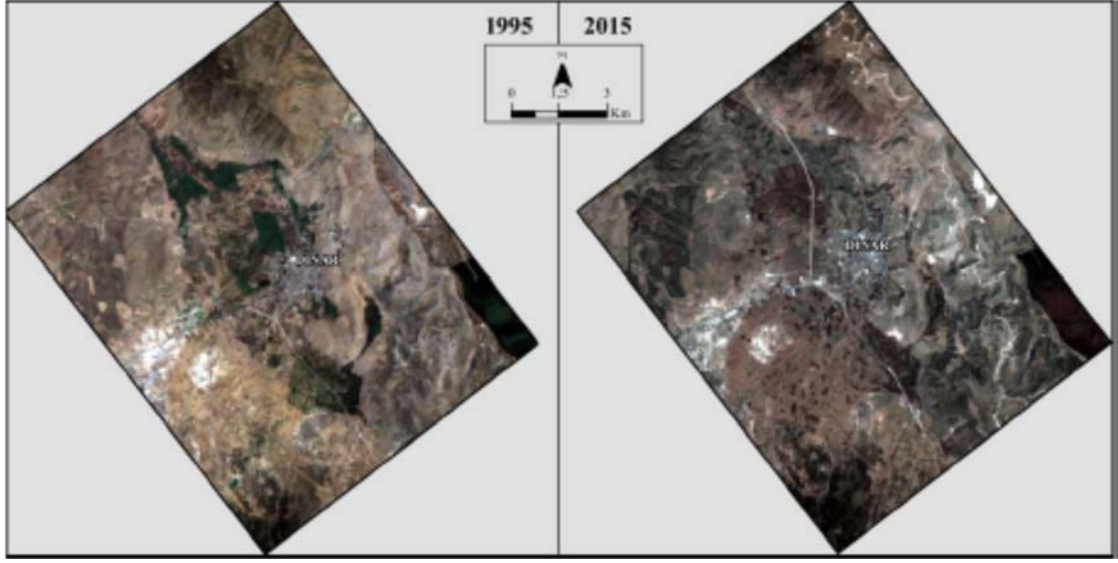


Şekil 17 - Afyonkarahisar, Dinar Santral caddesindeki tipik göçmeler [38].



Şekil 18 - Afyonkarahisar, Dinar Santral caddesi ağır hasarlı yapıların yıkımı [38].





**Şekil 19** - 1995 ve 2015 yıllarına ait uydu görüntüleri. Yerleşim 2 katı alana yayılmış ve yamaca doğru ilerlemiş [38].

### 1 MAYIS 2003 BİNGÖL DEPREMİ YEREL DAVRANIŞ ETKİLERİ

Çapakçur ve Gayıt çaylarının Kuzey ve Güney teraslarına yerleşen Bingöl' ün yeni şehir merkezi 40m-45m arası yüksekliğe ve 45°-50° yamaç eğimleri olan tepelerin üzerine Şekil 20' de verilen fotoğrafta görüldüğü gibi yayılmıştır. Şekil 20 Çapakçur suyunun oyduğu kanyonun tepeleri (teraslar) yeni şehir yerleşim alanları olarak yeni Bingöl' e ev sahipliği yaparken havzada suyun taşıyıp doldurduğu coğrafya üzerinde kurulmuş ve geçmiş depremlerde ve en son olarak 1971 depreminde ağır yapısal hasar almış ve çok can kaybı verilmiş olan eski Bingöl' e alternatif oluşturulmasına rağmen 1 Mayıs 2003 depreminde, teraslar ciddi yapısal hasarlar almıştır [39]. Şekil 21' de Şehir merkezinde yer alan mahalleler görülmektedir. Çizelge 5 Bölge istasyonlarının kaydettiği 6.4 Mw, 1 Mayıs 2003 Bingöl Depremini ve maksimumlarını vermektedir. Bingöl istasyonu P-S zaman farkından anlaşılacağı gibi deprem dış merkezine KB yönünde yaklaşık 14 Km uzakta en yakın istasyon olmasının yanısıra topoğrafik yükseltinin etkisiyle büyümenin farkı

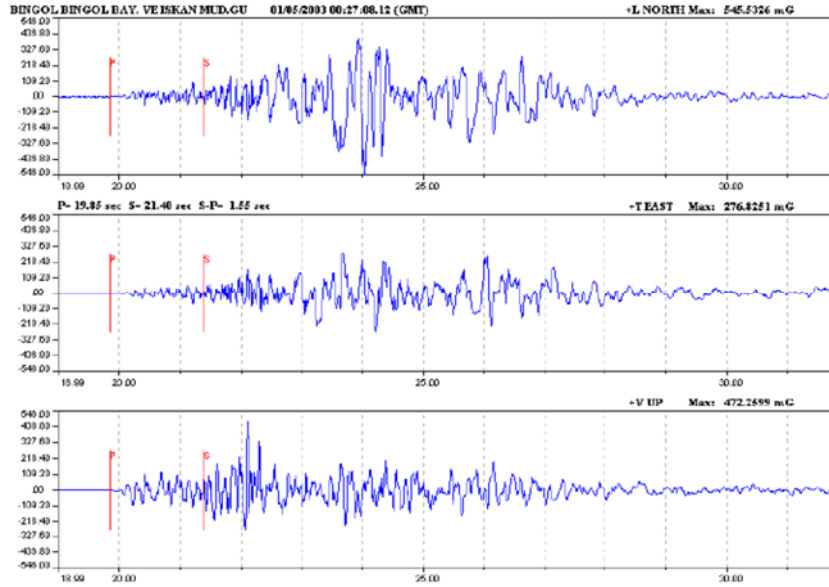


**Şekil 20** - Çapakçur suyunun oyduğu kanyonun tepeleri (teraslar) genişleyen şehir yerleşim alanları olarak yeni Bingöl' e ev sahipliği yaparken havzada suyun taşıyıp doldurduğu coğrafya üzerinde kurulmuş eski Bingöl' e alternatif olmuştur. Depremde, teraslara yayılmış yeni Bingöl ciddi yapısal hasarlar almıştır [39].

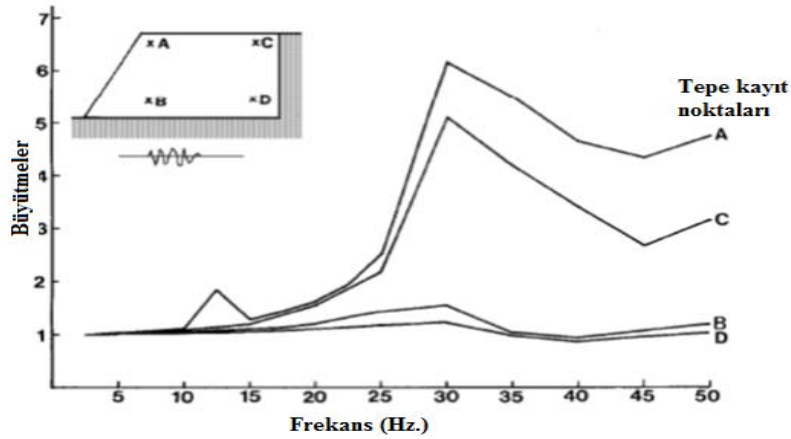




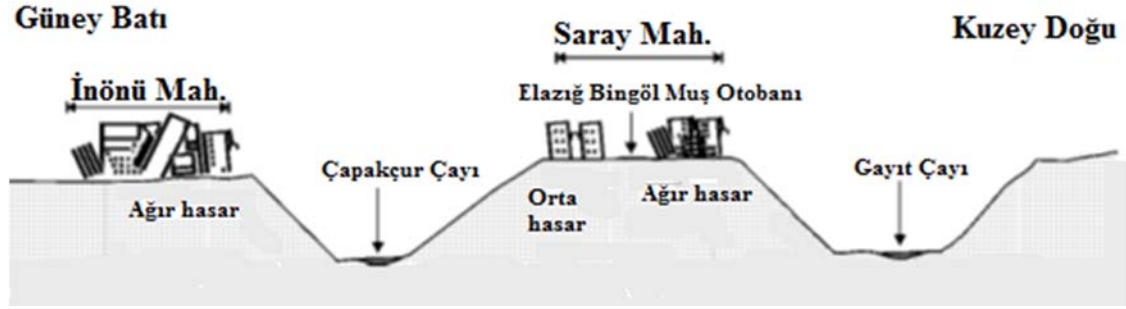
Şekil 22 - 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminde, Bingöl merkez ilçesi Saray mahallesinden yamaç kret noktasına yakın göçme ve ağır hasarlı Betonarme bina örnekleri [41]



Şekil 23 - Bingöl depreminin Deprem Araştırma Dairesine (DAD) ait Bingöl istasyon kayıtlarının üç bileşeni, P ve S dalgalarının varış zamanı işaretleri [40]



Şekil 24 - Eğimli yamaç yapı üzerinde kret noktası (A), kret ötesi düzlük (C), Yamaç eteği (B) ve tepe taban bölgesi (D) konumlarında kaydedilmiş ivme kayıtlarının Maksimum genliklerinin frekansa göre değişimi [39].



Şekil 25 - KD-GB yönünde Bingöl merkezinden alınan profil ve yerleşimlerin şematik olarak gösterilmiş hasar yayılımı [39].

Çizelge 6 - Bingöl merkez ve civarı hasar dağılımı [41]

SIRA NO	MAHALLE	HASAR DURUMU (ADET YAPI)			
		YIKIK	AĞIR HASAR	ORTA HASAR	HASARSIZ
1	MERKEZ SARAY MAHALLESİ	78	754	484	535
2	MERKEZ UYDUKEN MAH.		17	247	126
3	MERKEZ KARŞIYAKA MAH.		556	350	29
4	MERKEZ B. EVLER MAHALLESİ	21	234	254	127
5	MERKEZ YENİŞEHİR MAH.	3	103	320	337
6	MERKEZ YENİ MAHALLE	65	186	354	185
7	MERKEZ MİRZAN MAHALLESİ	3	35	22	54
8	MERKEZ KÜLTÜR MAHALLESİ	2	55	68	87
9	MERKEZ AYDINSU MAHALLESİ		1	9	124
10	MERKEZ İNÖNÜ MAHALLESİ	127	548	355	73
11	MERKEZ YEŞİLYURT MAH.	6	41	43	101
12	MERKEZ Y. AKPINAR MAH.	4	20	4	34
13	MERKEZ KALEÖNÜ MAH..	4	7	29	42
	<b>TOPLAM</b>	313	2557	2539	1854

## SONUÇLAR

Yüzey düzensizliğine bağlı olarak, tepki girişimleri kompleks büyüme ve küçültmeler üretmektedir. Genel olarak, girdi seviyesine göre kret civarında 2.5-3.0 katı büyütmeler gerçekleşmektedir. Artan geliş açısına bağlı olarak ise topoğrafik ivmeler azalmaktadır. Gelen ve kırılarak dönen dalgaların girişimiyle yamaçlarda değişen yüzey tepki genlikleri izlenmiştir.

Genel olarak, simetrik ve dengi olan simetrik olmayan eğimli tepe modellerinde maksimum bölgeler çok benzerlik gösterirken, büyütme oranlarında önemli farklar vermişlerdir. Kocaeli depreminde Avcılar-İstanbul' da ve Adapazarı-Sakarya' da Dinar' da ve Bingöl' de bu tespitler kuvvetle gözlenmiştir. Zaman tanım alanında, zayıf yer hareketi etkisinde simetrik tepelerin yamaç eğimleri arttıkça, yatay bileşenin büyütme oranları küçülmüştür. 26.56° yamaç eğimiyle tepe en yüksek büyütme oranını yapmıştır. Bu özelliği yerleşim alanlarının kullanımında tepelerin barındırdığı riskin göz önüne alınması gerekliliğini göstermektedir. Geliş açısının etkisini düşey ile 0° ve 75° arasında mukayese yapıldığında uç örnekler olarak görünmektedir. Bu etki en güçlü şekilde orta yamaç eğimi (26.56°) olan tepelerde gözlenmektedir. Yamaç eğimi küçüldüğü zaman (14.03°), maksimumlar küçülerek kret civarında azalarak yamaçlara kaymaktadır. Simetrik olmayan topoğrafyalar tepenin yanısıra yamaç ortasında riskli alanlar oluşturmaktadır. Bu özellik büyük yamaç eğim farkı olan D5 gibi tepelerde görülmemektedir. Yamaç eğiminin azalması topoğrafik büyütme oranını azaltırken, geliş açısının artması eğimli yüzeyde bazı bölgelerde büyütme bazı yerlerde azalma sebep olmaktadır.

Kuvvetli yer hareketinin zeminde oluşturduğu doğrusal olmayan davranış büyütme oranları bir miktar azaltmaktadır. Yatay bileşende düşey bileşene oranla yüksek büyütme oranları ile beraber düşey bileşen bazı yapıların tasarımında ihmal edilemeyecek oranlarda değerler vermektedir. Yönetmeliklerde özellikle depremin düşey bileşenin topoğrafik etkilerinin izlenmesi açısından ihmal edilemeyecek mertebede etkilerini göz önüne alacak kriterlerin tanımlanması kaçınılmazdır.

Çalışmanın sonuçları deprem senaryo üretiminden afet yönetimine, alan planlamadan mühendislik uygulamalarına uzanan bir kullanım imkânı sunmaktadır. Nümerik sonuçların şehir imar projelerinde, alan değerlendirme çalışmalarında ve saha geliştirme hizmetlerinde karar verici mercilere yansıtacak pratik sonuçlarını özetlersek;

Tepeler ve yamaçlar üzerine yerleşmiş ve genişleyen şehirlerin yerel dinamik deprem karakteristiklerinin anlaşılması ve barındırdıkları risklerin tanımlanması çok önemlidir. (2) Mühendislik yapılarının yüzey formasyonları üzerindeki konumları makro yaklaşım sergileyen yönetmelik kriterleri yerine yerel şartları ve risklerini doğru değerlerle kullanma imkânı sunmaktadır. (3) Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik metni içinde tanımlanmamış diğer deprem risklerini de göz önüne alınmaktadır. (4) Çalışmada, düzensiz geometriye sahip yüzey zemin yapılarının doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış özellikleriyle zemin büyütme oranları olan etkisi incelenmiş ve sonuçlarının mikro bölgeleme açısından önemine işaret edilmiş, şehircilik uygulamalarına önemli veri sağladığı görülmüştür.

### Kaynaklar

1. TÜBİTAK, ODTÜ ve MTA., '17 Ağustos 1999 Gölcük-Arifiye (Kuzeydoğu Marmara) Depremleri Sonrası Sakarya İli ve Ona Bağlı Yerleşkeler için Yerleşim Alanları araştırma Raporu', Ankara, Kasım, 1999.
2. Beyen, Kemal ve Erdik, Mustafa, 'Two-Dimensional Nonlinear Site Response Analysis Of Adapazarı Plain and Predictions Inferred From Aftershocks of the Kocaeli Earthquake Of 17 August 1999', Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 24, Issue 3, 2004, pp. 261-279.
3. Beyen, Kemal (1997), 'A Study on Two Dimensional Nonlinear Analysis of Site Response', PhD. Dissertation, Boğaziçi University, İstanbul.
4. Brambati A., Faccioli E., Carulli G.B., Cucchi F., Onofri R., Stefanini S. & Ulcigrai F. (1980) Studio di microzonazione sismica dell' area di Tarcento (Friuli). Regione Autonomia

- Friuli-Venezia Giulia & Università degli Studi di Trieste con la collaborazione del Politecnico di Milano. Trieste.
5. Siro, L. (1982) 'Southern Italy November 23, 1980 Earthquake' , Proceedings of 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, Greece.
  6. Celebi, M., (1987), 'Topographical and geological amplifications determined from strong motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 77(4), 1147-1167.
  7. Bard, Pierre-Yves, 'Effects of Surface Geology on Ground Motion: Recent Results and Remaining Issues', 10th European Conference on Earthquake Engineering, Duma (ed.), 1995, Balkema, Rotterdam.
  8. Sanchez-Sesma (1990), 'Elementary solution for the response of a wedge shaped medium to incident SH and SV waves', BSSA, 80, 737-742.
  9. Sanchez-Sesma, F. and Campillo, M. (1993), 'Topographic effect for incident P, SV and Rayleigh waves', Tectonophysics, 218, 113-125.
  10. Erdik, Mustafa (1992), 'Intensity Assessments, March 13, 1992 (Ms=6.8) Erzincan Earthquake', A Preliminary Reconnaissance Report, Boğaziçi University,1992.
  11. Erdik, Mustafa (1999), 'Report On 1999 Kocaeli and Düzce Earthquakes', Earthquake Engineering Web Page: <http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/Kocaelireport.pdf>, Boğaziçi University, Department of Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey.
  12. Tezcan SS and Ipek M, (1996), 'A reconnaissance report: 1995 Dinar, Turkey, earthquake', Engineering Structures 18: (12) pp. 906-916
  13. Cranswick, Edward, Oguz Ozel, Mark Meremonte, Mustafa Erdik, Erdal Safak, et. al., (2000), 'Earthquake Damage, Site Response, and Building Response in Avcilar, West of Istanbul, Turkey' , International Journal for Housing Science and Its Applications, Special Issue: Kocaeli Eathquake 1999, Vol. 24, No. 1, 2000, pp. 85-96.
  14. Davis, L.L., and West, L.R. (1973), 'Observed effects of topography on ground motion' , Bull. Seism. Soc. Am., 63, 283-298.
  15. Rogers et al., (1974), 'Topographic effects on ground motion for Incident P waves: A model study', Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 64, No. 2, 437-456.
  16. Berardi, Capozza, and Zonetti (1978), 'Analysis of rock motion accelerograms recorded at surface and underground during the 1976 Friuli seismic period', Proceedings of the 1976 Friuli Earthquake on the antiseismic design of nuclear installation conference, Rome, Italy.
  17. Griffiths D.W., Bollinger G.A. (1979), 'The effect of Appalachian Mountain topography on seismic waves', *Bull. seism. Soc. Am.*, Vol. 69, pp., 1081-1105.
  18. Tucker, B. E., J. L. King, D. Hatzfeld, and I. L. Nersesov (1984), 'Observations of hard-rock site effects', Bull. Seism. Soc. Am. 74, 121-136.,
  19. Boore, D. M., (1972), 'A note on the effect of simple topography on sesimic SH waves', Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.62, No.1, pp. 275-284.
  20. Zahradnik, J. and L. Urban (1984), 'Effect of a simple mountain range on underground seismic motion', Geophys. J. R. Astr. Soc. 79, 167-183.
  21. Smith, W.D., (1975), 'The application of finite element analysis to body wave propagation problems', Geophys. J., 42, 747-768.

22. Sills, L., (1978), 'Scattering of horizontally polarised shear waves by surface irregularities', *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 54, 319–348.
23. Sanchez-Sesma, F.J., Herrera, I. & Aviles, J., (1982), 'A boundary method for elastic wave diffraction: application to scattering SH waves by surface irregularities', *Bull. seism. Soc. Am.*, 72, 473–490.
24. Bouchon, M., (1973), 'Effect of topography on surface motion', *Bull. seism. Soc. Am.*, 63, 615–632.
25. Bard, P.Y., (1982), 'Diffracted waves and displacement field over two dimensional elevated topographies', *Geophys. J. Int.*, 71, 731–760.
26. Louis. Geli, P.-Y. Bard, and B. Jullien, (1988), 'The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1):42–63.
27. Rogers, A.M., Katz, L.J. & Bennett, T.J. (1974), 'Topographic effects on ground motion for incident P waves: a model study', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64 (2), pp 437-456.
28. Griffiths, D.W. & Bollinger, G.A. (1979), 'The effect of Appalachian Mountain topography on seismic waves', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69 (4), pp 1081-1105.
29. Umeda, Y., A Kuroiso, K. Ito, Y. Ito and T. Saeki, (1986), 'High acceleration in the epicentral area of the Western Nagana Prefecture, Japan, Earthquake of 1984', *J. seism. Soc. Japan* 39, 217-228.
30. Joyner WB. (1975), 'Fortran programs for calculating nonlinear seismic ground response in two dimensions', *US Geological Survey, Open File Report*. p. 78–287.
31. Erturaç, M. Korhan, (2018), 'Sakarya'nın Jeomorfolojik Özellikleri', 2017-02-18-003 Nolu proje: Sakarya'nın Fiziki Beşerî ve İktisadi Coğrafya Özellikleri, Sakarya Üniversitesi.
32. Özen, B., (2000), '17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depreminin Hasar Durumu (Rakamsal Verilerle)', *Türkiye Deprem Vakfı/Dr 010-53*.
33. <https://sehirplanlama.ibb.istanbul/d-100-karayolu-guneyi-nip/>
34. Şen, Şamil (2007), 'A fault zone cause of large amplification and damage in Avcılar (west of Istanbul) during 1999 Izmit earthquake', *Natural Hazards* 43, 351–363. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9122-5>.
35. Gürbüz, M., Kuran, U., ve Ergün, T., (2005), 'Avcılar Mikrobölgelendirme Çalışmaları', *Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Laboratuvarlar Şubesi*.
36. 'The Marmara, Turkey Earthquake of 17 August 1999: Reconnaissance Report', *Technical Report MCEER-00-0001*, March 23, 2000.
37. Bayülke, Nejat (2008), 'Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Yapıların Deprem Davranışı ve Güçlendirme', *İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi*, 27 Mayıs 2008.
38. Mehmet Ali Özdemir, Erdem Gür, (2016), 'Dinar Depremi Öncesinde ve Sonrasında Dinar Şehri ve Yakın Çevresinde Arazi Kullanımı', *TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Semp.*
39. Aydan Ömer, Ulusay, R., Miyajima, M., (2003), 'The Bingöl Earthquake Of May 1, 2003', *Japon İnşaat Mühendisleri Odası*.
40. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı AFAD, <https://tadas.afad.gov.tr/> .

*İki Boyutlu Doğrusal Olmayan Analizlere Dayalı Topoğrafyanın Deprem Yer Büyütmelerine Etkisi ve Hasar Gözlemleri*





# KIYI VE DENİZ YAPILARI

Yüzer Yapının Serbest Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketlerinin OpenFOAM ile Sayısal Modellenmesi <i>Umutcan İnal, Yalçın Yüksel, Ferdi Çakıcı, Emre Kahramanoğlu</i> .....	409
Küp Bloklı Dalgakıranlarda Dalga Yansıması <i>Bilal Ayaz, Cihan Şahin, Yalçın Yüksel</i> .....	419
Dalga Kaynaklı Deniz Tabanı Sıvılaşmasının Gömülü Altyapılar Etrafında Sayısal Modellemesi <i>S. Utku Yılmaz, V. Ş. Özgür Kırcı, B. Mutlu Sumer</i> .....	427
Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması <i>Yalçın Yüksel, Esin Çevik, Bülent Bayram, Hüseyin Yılmaz, Serdar Beji, Burak Akpınar, Havva Anıl Güner, Yeşim Çelikoğlu, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Tolga Bakırman, Ferdi Çakıcı, Deniz Bayraktar, Fulya İşlek, Umutcan İnal, M. Utku Öğür</i> .....	439
Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi İçin Yeni Bir Platform <i>Elif Girgin, Kadir Aktaş, Salih Ak, Bergüzar Öztunalı Özbahçeci, Ünver Özkol</i> .....	451
Koruma Tabakasında Tetrapod Bloklar Kullanılan Dalgakıran Kesitinin Antifer Bloklar ile Güçlendirilmesi <i>Berkay Akyol, Günay Gazaloğlu, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Işıkhan Güler, Ahmet Cevdet Yalçın, Ayşen Ergin</i> .....	463
İzmir Körfezinde Deniz Taşkınlarının İncelenmesi <i>Bergüzar Özbahçeci, Doğan Kısacık, Salih Ak</i> .....	473
Konteyner Terminali Yanaşma Yeri Kapasite Ölçüm Kriterlerinin Değerlendirilmesi <i>İdil Esra Elver, Esin Çevik</i> .....	487
Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Olası Etkileri <i>Fulya İşlek, Yalçın Yüksel, Cihan Şahin, Furkan Yüksel</i> .....	503
Kurupelit Yat Limanında Meydana Gelen Kıyı Şeridi Değişiminin Sayısal Modellenmesi <i>Yağız Arda Çiçek, Barış Ufuk Şentürk, Hasan Gökhan Güler, Cüneyt Baykal, Gülizar Özyurt Tarakcıoğlu, Ahmet Cevdet Yalçın, Işıkhan Güler, Ayşen Ergin</i> .....	513
Akarsularda Tsunami Dalgası İlerlemesinin Deneysel İncelenmesi <i>H. Anıl Güner, Yalçın Yüksel, Ahmet Cevdet Yalçın, Mehmet Öztürk, Cihan Şahin, Şükrü Ersoy, Cem Yılmaz, Onur Altıntaş, Barış Aydın, Merve Ayaz</i> .....	523

Kılavuz Kazıklarla Sabitlenen T-Tipi Bir Yüzer İskelenin Dalga Yüğü Etkisi Altındaki Tepkilerinin Nümerik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi <i>Murat Aksel, Mehmet Yusuf Erbişim, Fatih Buğrahan Yorğun, Şevket Çokğör, Oral Yağcı</i> .....	533
Karadeniz’de Spektral Pik Enerjinin Eğilim Analizi <i>Emine Acar, Adem Akpınar, Murat Kankal, Khalid Amarouche</i> .....	545
Ölçklendirilmiş Oceantec Dalga Enerji Dönüştürücüsünün Karadeniz’in Cide Kıyısındaki Performansı <i>Bilal Bingölbali, Ajab Gul Majidi, Adem Akpınar</i> .....	553

## Yüzer Yapının Serbest Dalıp Çıkma ve Baş Kıç Vurma Hareketlerinin OpenFOAM ile Sayısal Modellenmesi

Umutcan İNAL<sup>1</sup>, Yalçın YÜKSEL<sup>2</sup>, Ferdi ÇAKICI<sup>3</sup>, Emre KAHRAMANOĞLU<sup>4</sup>

### ÖZET

Günümüzde, açık deniz koşullarında yerleştirilmiş yüzer deniz türbinleri yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer işgal etmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu silindirik bir yüzer yapının dinamik davranışı, sonlu hacimler yöntemini kullanan ve bir açık kaynak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olan OpenFOAM aracılığı ile elde edilmiştir. Sayısal çözücülerden elde edilen sonuçların sayısal belirsizliği, güncel yöntemler kullanılarak ağ yapısı ve zaman adımı açısından incelenmiştir. 6 serbestlik derecesine sahip olan basit silindirik yapının serbest dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri OpenFOAM sayısal modeli kullanılarak hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Böylece yapının tanımlanmış bu hareketleri için, doğal periyotları ve sönüm katsayıları elde edilmiştir. Sonuçlar literatürde mevcut deneysel veriler ve doğrulanmış başka bir sayısal çalışmanın sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, karmaşık akışkan-yapı etkileşiminin sayısal bir dalga tankında başarılı bir şekilde analiz edilebildiğini ve fiziksel model testlerinden alınan sonuçların sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda basit silindirik yapı kullanılarak yapılan bu analizler, yüzer rüzgâr türbininin modellenerek tasarlanmasını sağlayabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** CFD, OpenFOAM, Akışkan-Yapı Etkileşimi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

### ABSTRACT

#### **Numerical Modeling of Free Heave and Pitch Motions of a Floating Structure with OpenFOAM**

Floating wind turbines placed in offshore conditions occupy an important place among recent renewable energy sources. In this study, the dynamic behavior of a three-dimensional cylindrical floating structure is obtained by using OpenFOAM which is an open-source Computational Fluid Dynamics software using the finite volume method. The numerical uncertainty of the results

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - umutcan.inal@yildiz.edu.tr

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - yuksel@yildiz.edu.tr

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - fcakici@yildiz.edu.tr

4 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir - emre.kahramanoglu@ikcu.edu.tr

obtained from the numerical solver is investigated in terms of network structure and time step using current methods. Free heave and pitch motions of this simple cylindrical structure with 6 degrees of freedom are evaluated and analyzed using the OpenFOAM numerical model. Thus, for these defined motions of the structure, natural periods and damping coefficients are obtained. The results were also compared with the experimental data available in the literature and the results of another validated numerical study. The obtained results show that the complex fluid-structure interaction can be successfully analyzed in a numerical wave tank and the results from the physical model tests are in good agreement with the numerical results. At the same time, these analyzes using a simple cylindrical structure will enable the floating wind turbine to be modeled and designed.

**Keywords:** CFD, OpenFOAM, Fluid-Structure Interaction, Computational Fluid Dynamics.

## GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılın en büyük sorunlarından biri olan iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerinin hafifletilebilmesi için rüzgar, güneş, biokütle, jeotermal ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem arz etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan emisyonları azaltacağından, iklim değişikliği etkilerini azaltmak adına önemli bir role sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları doğru uygulandığında sosyal ve ekonomik büyümeye, enerjiye erişime, güvenli ve sürdürülebilir enerji arzına ve enerji üretiminin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilir [1].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisinden tarih boyunca yararlanılabiliyor olmasına karşın, bu enerjinin ticari ölçekte kullanımı, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ancak 1970'lerde mümkün olmuştur [2].

Rüzgar enerjisinden faydalanabilmek adına 1970'lerde ve 1980'lerde hem yatay hem de dikey eksen tasarımları dahil olmak üzere karada kurulan (onshore) çeşitli rüzgar türbini konfigürasyonu araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda yatay eksenli rüzgar türbinlerinin daha verimli olduğu ve bu türbin tasarımlarının büyük ölçüde üç kanatlı ve türbin kanatlarının rüzgar akımına karşı konumlandırılmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir [1].

Rüzgar türbinlerinin oluşturduğu gürültü kirliliği ve estetik olmayan görünüşleri, türbinlerin karada konumlandırılmasında bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için rüzgar türbinlerini kıyıda uzak alanlarda yani açık denizde kurmanın bahsedilen sorunları pratik olarak ortadan kaldıracığı düşünülmüştür (Breton vd., 2009). Ayrıca, rüzgar türbinlerinin açık denizde kurulması, büyük projeler için geniş sürekli alanlar sağlamaktadır ve bu alanlar daha yüksek rüzgar hızlarına ve daha az türbülansa sahiptir, bu da türbinlerin enerji kaynağını daha verimli kullanmasını kolaylaştırmaktadır ve türbin üzerindeki yorulma yüklerini azaltmaktadır [4].

Açık deniz alanlarının rüzgar kaynağı potansiyeli, su derinliğinin 20 m'den fazla olduğu kıyıda uzak mesafelerde daha fazladır. Bu derinliklerde tabana sabitlenmiş açık deniz rüzgar türbinlerini kullanmak teknik ve ekonomik olarak uygun olmadığından, yüzer platformlar bu derinliklerde rüzgar türbinleri kurmak için çekici bir çözüm yöntemidir [5].

Gerçek deniz durumunda, yüzer açık deniz rüzgar türbinleri, altı serbestlik dereceli bir şekilde harekete sahiptir. Bu yapıların dinamik davranışları, en uygun platform konfigürasyonunu ve en iyi bağlama sisteminin değerlendirilmesinin gerekiyor olması bu yapıların tasarım sürecini zorlaştırmaktadır. Bu yapıların tasarımında, laboratuvarında ölçekli fiziksel modelleme hala en yaygın yaklaşımlardan biridir. Genellikle küçük ölçekli prototipleri araştırmak için dalga

basenleri kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin, ölçek etkileri ve yüksek deney maliyetleri (hem zaman hem de para açısından) gibi bazı dezavantajları vardır.

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle fiziksel modellemeye alternatif olarak, bu yapıların analizlerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları sayesinde sayısal olarak yapılabilmesi mümkün olmuştur. HAD, çeşitli geometrilerdeki yüzer yapılar üzerindeki hidrodinamik yükleri simüle etmek için yaygın bir yöntem haline gelmiştir. Düzgün bir şekilde çözülürse, Navier-Stokes denklemlerini çözmeye dayalı HAD yöntemleri, bir yüzer açık deniz yapısındaki doğrusal olmayan hidrodinamik yüklerin büyük yüzdesini yakalayabilir ve oldukça güvenilir sonuçlar verebilmektedir. HAD yazılımları aracılığıyla oluşturulan bu sayısal modeller, uygun şekilde doğrulanırsa, pahalı fiziksel modelleme deneylerinin yerine veya bunlara ek olarak yüzer platformların prototiplerini tasarlamak için kullanılabilir.

## AMAÇ

Bu çalışmanın temel amacı, yüzer platformların karmaşık akışkan – yapı etkileşimi analizlerinin sayısal bir dalga tankında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayısal modellerinin kullanılarak başarılı bir şekilde analiz edilebildiğini doğrulamak, sayısal modellemenin yüzer platformların tasarlanmasında zaman ve maliyet açısından daha maliyetli olan fiziksel modellere alternatif oluşturabildiğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda basit silindirik bir yapı kullanılarak yapılan bu analizler, yüzer rüzgar türbinlerinin platformları gibi çok daha karmaşık yapıların modellenerek tasarlanmasını sağlayabilmek adına bir ön çalışma niteliğindedir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, üç boyutlu yüzer silindirik yapının serbest dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketleri, Açık kaynaklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olan OpenFOAM kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal modelin analiz sonuçları halihazırda literatürde bulunan fiziksel model testlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

### Fiziksel Model

(Paredes vd., 2016) tarafından yapılan fiziksel model çalışması kapsamında, 35.85 kilogram ağırlığa, 0.515 m çapa ve 0.401 m yüksekliğe sahip olan silindirik bir şamandıra, 0.9 m su derinliğine sahip olan bir dalga tankında test edilmiştir. Yüzer şamandıranın su çekimi 0.172 m ve ağırlık merkezi z simetri eksenine boyunca şamandıranın tabanından 0.0758 m yukarıya yerleştirilmiştir. Ancak dalga tankında kullanılan suyun özgül ağırlığı Paredes vd. (2016) ve Palm vd. (2016) çalışmalarında belirtilmemiştir. Silindirik yapının ağırlık merkezi etrafında eylemsizlik momentleri  $I_{xx} = I_{yy} = 0.9 \text{ kg.m}^2$  and  $I_{zz} = 1.18 \text{ kg.m}^2$  olarak belirlenmiştir. Deneysel dalga tankının uzunluğu, genişliği ve derinliği sırasıyla 12 m, 5 m ve 0.9 m olarak belirlenmiştir. Paredes vd. (2016) tarafından hazırlanan deneysel kurulumun panoramik görüntüsü Şekil 1’de görülebilmektedir. [6] [7].

Fiziksel test aşamasında, şamandıranın serbest şekilde baş-kıç vurma ve dalıp çıkma hareketlerinin doğal periyotları ve sönüm katsayıları elde edilmiştir. Genel kapsamda serbest düşüş testleri olarak adlandırılan bu testler kapsamında, istenilen hareket doğrultusunda yapı başlangıçta bir yer değiştirmeye veya dönmeye maruz bırakılmaktadır. Daha sonra yapının denge koşuluna ulaşma esnasında yaptığı salınımlar incelenerek yapının sönüm katsayısı ve doğal periyodu elde edilmektedir.



Şekil 1 - Deneysel Kurulumun Panoramik Görüntüsü [6]

### OpenFOAM

Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışkanlar dinamiği, tek ve çok fazlı akış dinamiği, katı mekaniği ve elektromanyetizma dahil olmak üzere çeşitli fizik problemleri için çözümler sağlayan OpenFOAM, hem ticari hem de akademik kuruluşlardan mühendislik ve bilim alanlarının çoğunda geniş bir kullanıcı tabanına sahip olan bir açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Akışkan-Yapı etkileşimini incelemek adına oluşturulmuş olan InterFoam isimli çözücüsü, çok fazlı akışlar için geliştirilmiş ve dalga modellemesi gibi farklı fiziksel problemlerin çözümlerine temel oluşturmaktadır.

### Temel Denklemler

Tüm sıvı akışları kütle, momentum ve enerji korunumu ilkeleri tarafından yönetilir. Okyanus hidrodinamiği durumunda, sabit viskoziteli sıkıştırılamaz akışkan düşünülebilir. Sıkıştırılamaz bir akışkan için süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

burada  $\mathbf{u}$ , sıvı akışının hız vektörüdür. Bir Newton akışkanı göz önüne alındığında, momentum korunum ilkesi Navier-Stokes denklemleri tarafından aşağıdaki gibi verilir.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p^* - \mathbf{g}x\nabla \rho + \rho \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

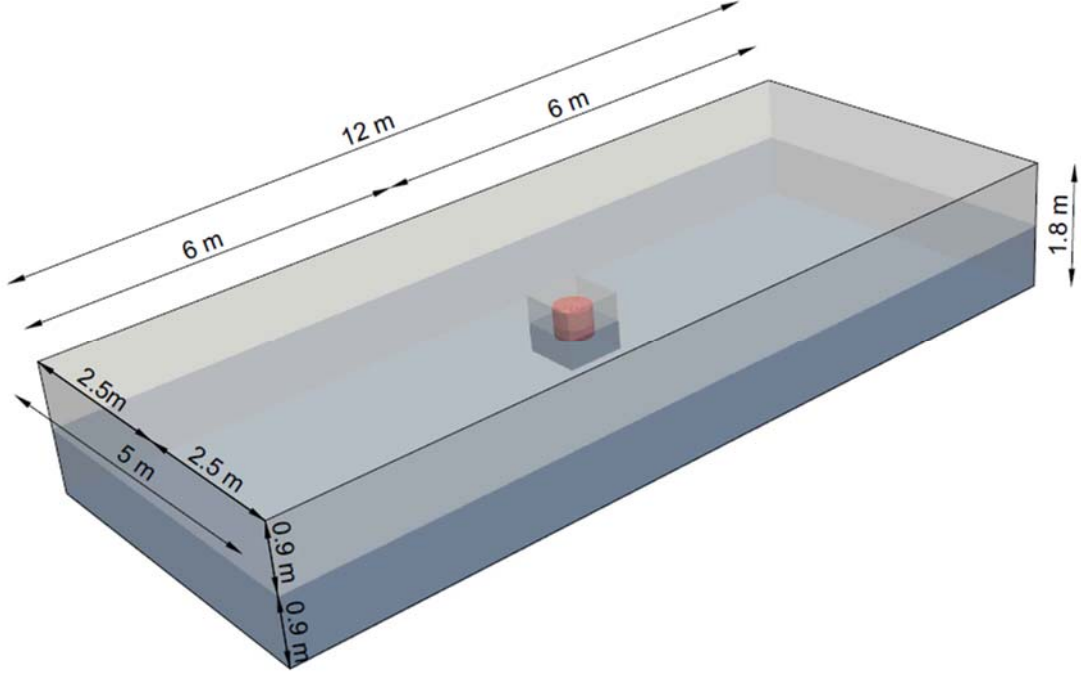
HAD alanında iki fazlı akışı modellemek için farklı yaklaşımlar vardır bunlardan bir tanesi Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi olan, VOF yaklaşımında, iki faz arasındaki ara yüz, bir adveksiyon denkleminin eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir;

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (3)$$

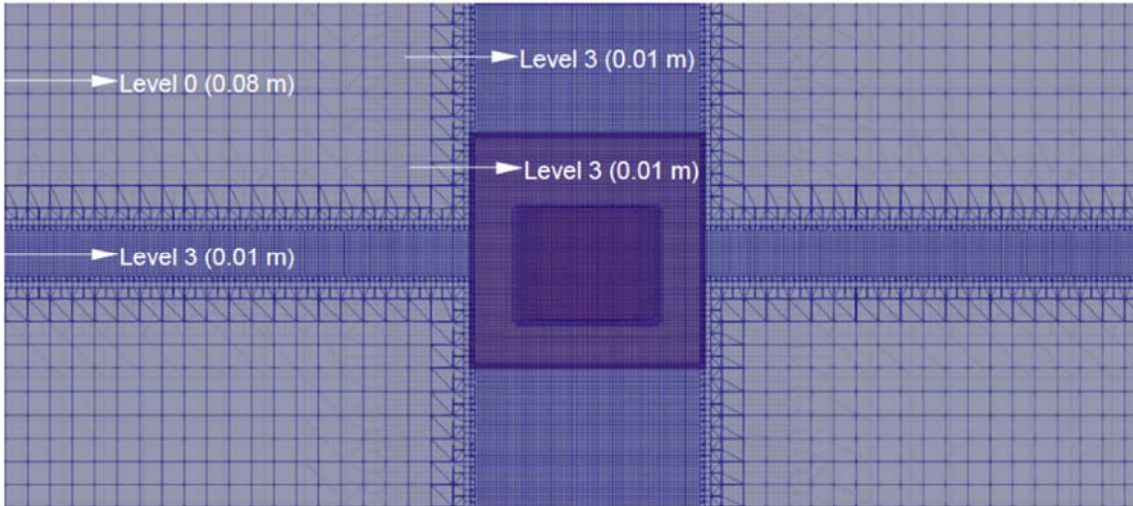
Burada  $\alpha$  suyun hacim oranıdır. Bu çalışmada  $\alpha$ , sudayken 1, havadayken 0 ve ara yüz bölgesinde bir ara değerdir (bu nedenle 0,5 değeri, hücrenin her iki akışkanın eşit hacimli kısımlarıyla doldurulduğu anlamına gelir). Bu denklem sadece ara yüz bölgesi ile ilgilidir.

### OpenFOAM Kullanılarak Sayısal Model Kurulumu

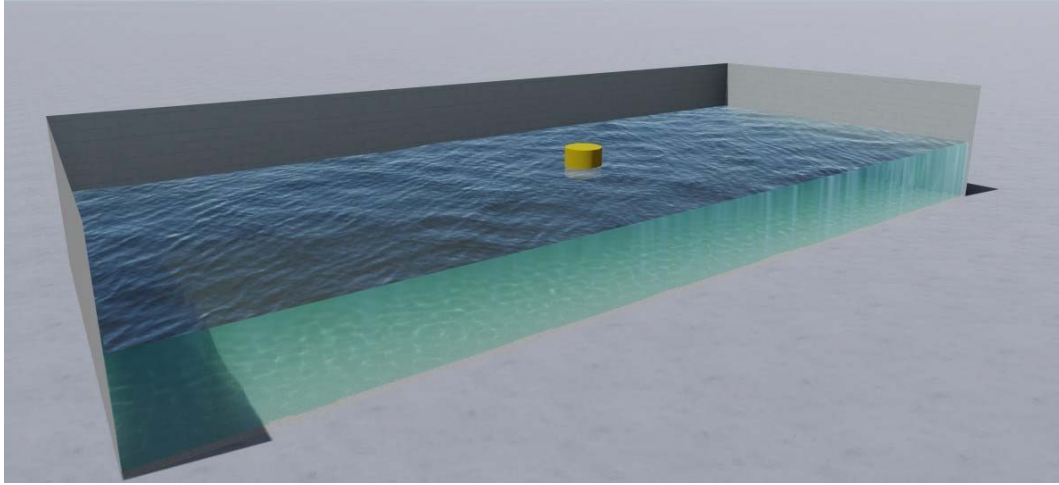
Sayısal Model kurulumunda, oluşturulan sayısal dalga tankının boyutları deneysel dalga tankı boyutlarıyla aynı olup, uzunluk, genişlik ve su derinliği sırasıyla 12 m, 5 m ve 0.9 m olarak belirlenmiştir. Sayısal modelde kullanılan şamandıra da deneysel modeldeki silindirik şamandıra ile aynı boyutlara ve ağırlığa sahip olup, 0.515 m çap, 0.401 m yükseklik ve 35.85 kg kütle sahiptir. Üç boyutlu silindirik şamandıra, dalga tankının merkezinde konumlandırılmış olup 0.172 m su çekimine sahiptir. Oluşturulan dalga tankı ve silindirik yapının görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2 - Hesaplama alanının boyutları ve genel görünüşü



Şekil 3 - Hesaplama Alanının Ağ Çözünürlüğü



**Şekil 4 - Sayısal Dalga Tankı ve 3 Boyutlu Silindirik Yapının Görselleştirilmesi**

Hesap alanındaki ve yapı etrafındaki ağ alanları OpenFOAM yazılımının yardımcı programları olan BlockMesh ve SnappyHexMesh kullanılarak oluşturulmuştur. Öncelikle arka plandaki ağ alanı BlockMesh kullanılarak, kenar uzunluğu 0.08 m olan kare hücrelerden oluşturulmuştur. Serbest yüzeydeki salınımları ve yüzer cismin hareketlerinin daha iyi analiz edebilmek adına, serbest yüzeyin yakınındaki ve yüzen cismin etrafındaki ağ alanı SnappyHexMesh'in seviyelendirme özelliği kullanılarak iyileştirilmiştir. Bununla birlikte cisimle birlikte hareket etme özelliğine sahip olan OversetMesh özelliği kullanılarak cismin etrafında cisme bağlı olarak hareket eden bir ağ alanı oluşturulmuş ve arka plan ağ alanı ile entegre edilmiştir. Hesaplama alanında kullanılan ağ boyutları Şekil 3'te, sayısal dalga tankının ve silindirik yapının görselleştirilmiş hali Şekil 4'te verilmiştir.

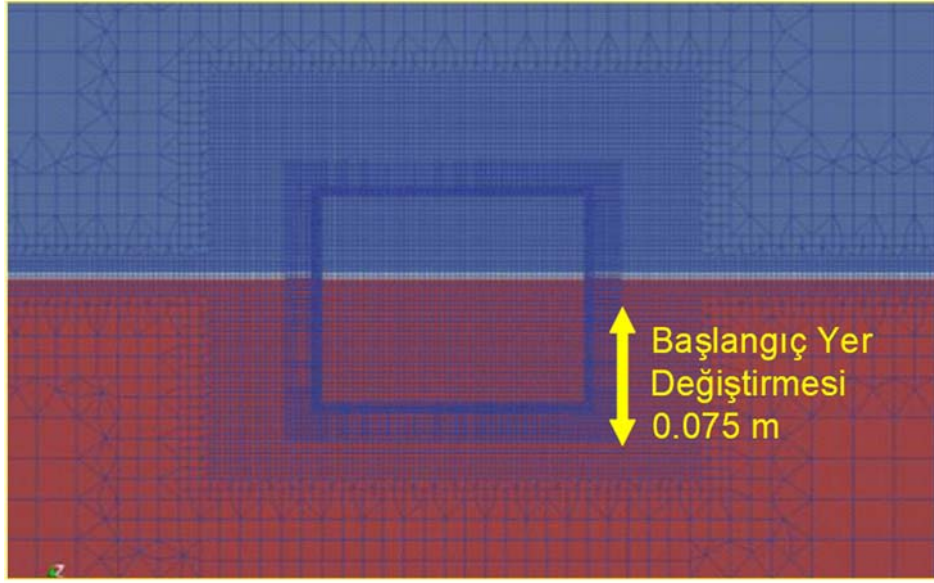
## **SONUÇ**

Bu bölümde, üç boyutlu silindirik yapının serbest baş-kıç vurma ve dalıp-çıkma hareketlerinin sayısal model sonuçları sunulmuştur. Oluşturulan sayısal dalga tankının doğrulanması için elde edilen bu sonuçlar, Paredes vd. (2016) tarafından yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Palm vd. (2016) tarafından yapılmış olan sayısal model çalışmasında analiz de OpenFOAM yazılımı kullanılarak yapılmıştır ancak dinamik ağ ayrıklaştırılması, OpenFOAM'ın OversetMesh özelliği yerine deforme olabilen ağ ayrıklaştırılması özelliği kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Palm vd. (2016) tarafından yapılan sayısal model ve Paredes vd. (2016) tarafından yapılan deneysel model sonuçları ile karşılaştırılıp belirtilen iki ayrı ağ ayrıklaştırılmasının performansları değerlendirilmiştir. [6] [7].

## **Dalıp Çıkma Hareketi İçin Serbest Düşüş Testi**

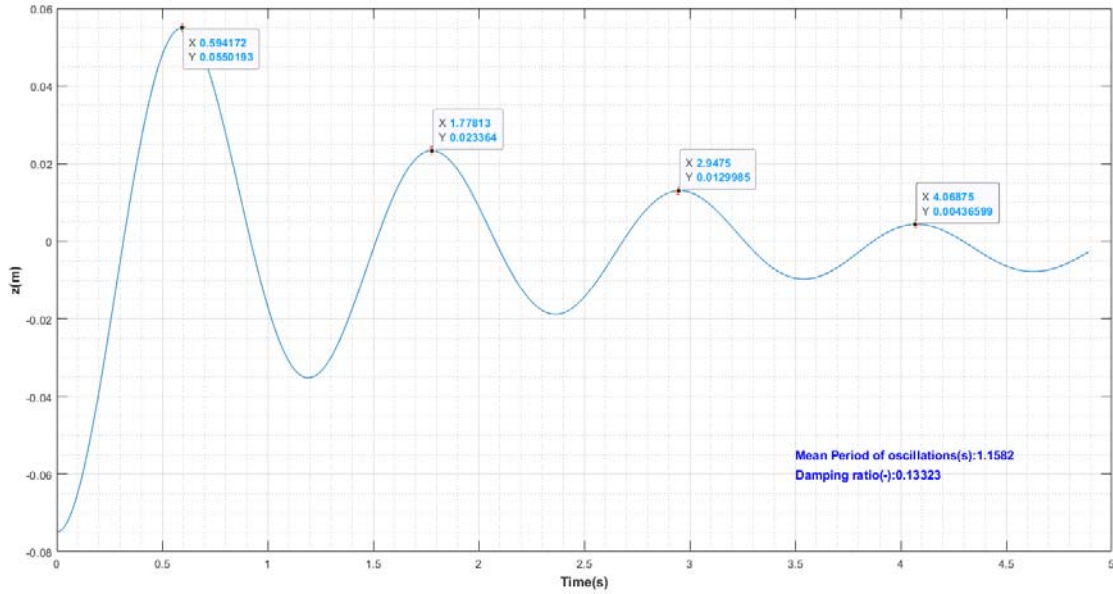
HAD analizini doğrulamak amacıyla önce silindirik yapının serbest düşme test sonuçları elde edilmiştir. Bu analizi yapabilmek için silindirik yapı etrafındaki ağ alanı ile denge konumundan 0.075 m aşağı ötelenmiş ve simülasyon başlatılmıştır. Bu yer değiştirme Paredes vd. (2016) ve Palm vd. (2016) çalışmalarında kullanılan yer değiştirmeye aynıdır [6] [7].





Şekil 5 - Yüzer Silindirin Başlangıç Yer Değiştirmesi

OversetMesh yönteminin, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. Salınım periyodu 1.15 s olarak bulunmuştur (Tablo 1 ve Şekil 6). Bu değer yüzer silindirin dalıp çıkma hareketinin doğal periyoduna eşittir. Bu periyot, dalgalara maruz kalan herhangi bir yüzen cismin tasarımı için önemli bir değerdir. Deneysel çalışmada kullanılan suyun özgül ağırlığı bilinmediği için, yapının denge durumunda 0.172 m su çekimine sahip olması koşulu kullanılarak suyun özgül ağırlığı hesaplanmıştır. Deneysel testlerde kullanılan su yoğunluğunun tam değerinin bilinmesi daha doğru sonuçlar alınmasını sağlayacaktır. Serbest dalıp-çıkma testinin fiziksel davranışı esas olarak geometriden, cismin kütesinden ve suyun yoğunluğundan etkilenir. Zaman adımı, ağ ayrıklaştırması veya sayısal şemalar gibi sayısal girdilerin seçimi de sayısal çözüm üzerinde ve dolayısıyla doğal periyot ve gövde salınımının sönümlenmesi üzerinde bir etkiye sahiptir.



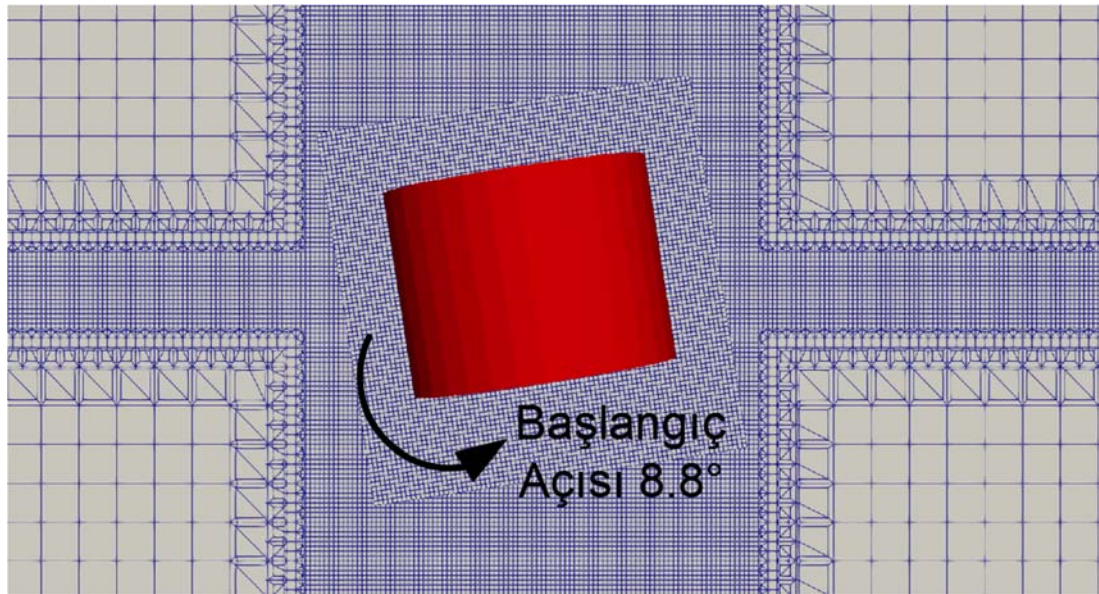
Şekil 6 - Boyutlu Silindirin Dalıp Çıkma Hareketinin Salınımı

**Tablo 1** - 3 Boyutlu Silindirin Dalıp Çıkma Hareketi Serbest Düşüş Testinin Doğal Periyotları ve Sönüm Katsayıları

Dalıp – Çıkma	Doğal Periyot (s)		Sönüm Katsayısı(-)	
	HAD	Deney	HAD	Deney
	1.15	1.112	0.13	0.098

### Baş-Kıç Vurma Hareketi İçin Serbest Düşüş Testi

Silindirik yapının Baş-Kıç vurma hareketi için serbest düşme test sonuçları elde edilmiştir. Bu analizi yapabilmek için silindirik yapı etrafındaki ağ alanı ile denge konumundan ağırlık merkezi etrafında  $8.8^\circ$  döndürülmüş ve simülasyon başlatılmıştır. Bu başlangıç dönme açısı Paredes vd. (2016) ve Palm vd. (2016) çalışmalarında kullanılan açı ile aynıdır [6] [7].



**Şekil 7** - Yüzer Silindirin Başlangıç Yer Değiştirmesi

**Tablo 2** - Boyutlu Silindirin Dalıp Çıkma Hareketi Serbest Düşüş Testinin Doğal Periyotları ve Sönüm Katsayıları

Baş-Kıç Vurma	Doğal Periyot (s)		Sönüm Katsayısı(-)	
	HAD	Deney	HAD	Deney
	1.16	1.17	0.028	0.026

OversetMesh yöntemi, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. Salınım periyodu 1.16 s olarak bulunmuştur (Tablo 2). Bu değer yüzer silindirin Baş-Kıç Vurma hareketinin doğal periyoduna eşittir. Yapının ataletinin ve ağırlık merkezinin konumunun, Baş-Kıç vurma hareketindeki salınım periyodu üzerinde büyük etkisi vardır.

Sonuç olarak, akışkan-yapı etkileşiminde, yapının dinamik davranışı sayısal model aracılığı ile saptanmıştır ve sayısal dalga tankıyla doğrulanmıştır. Gelecekte bu çalışmayı takiben, çalışmadan elde edilen sonuçlar ve yöntemler kullanılarak, açık deniz rüzgar türbini platformlarının tasarımında kullanabilmek için doğrulanmış bir sayısal dalga tankı oluşturmak, doğrusal ve

doğrusal olmayan dalga ve rüzgar etkisinde bu karmaşık platformların dinamik tepkilerini analiz etmek çalışmalarımızın temel hedefini oluşturmaktadır.

### Kaynaklar

1. Breton, S.-P., & Moe, G. (2009). "Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America". *Renewable Energy*, 34, 646-654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.040>
2. Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2007, September). "Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines". <https://www.osti.gov/biblio/917212>
3. Edenhofer, O., Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., . . . Stechow, C. (2011). "Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change".
4. EWEA. (2009). "Wind Energy, the Facts". European Wind Energy Association (EWEA). Brussels: (EWEA), European Wind Energy Association.
5. Henderson, A. R., Morgan, C., Smith, B., Sørensen, H. C., Barthelmie, R. J., & Boesmans, B. (2003). "Offshore Wind Energy in Europe— A Review of the State-of-the-Art". *Wind Energy*, 6, 35-52. doi:<https://doi.org/10.1002/we.82>
6. Palm, J., Eskilsson, C., Moura Paredes, G., & Bergdahl, L. (2016, May). "Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation". *International Journal of Marine Energy*, 16. doi:10.1016/j.ijome.2016.05.003
7. Paredes, G. M., Palm, J., Eskilsson, C., Bergdahl, L., & Taveira-Pinto, F. (2016). "Experimental investigation of mooring configurations for wave energy converters". (Volume 15,).
8. Pasqualetti, M., Richter, R., & Gipe, P. (2004). "History of wind energy". *Encyclopedia of energy*, 6, 419–433.



## Küp Bloklı Dalgakıranlarda Dalga Yansıması

Bilal AYAZ<sup>1</sup>, Cihan ŞAHİN<sup>2</sup>, Yalçın YÜKSEL<sup>3</sup>

### ÖZET

*Bu çalışmada, dalgakıran ve dalga parametrelerinin dalga yansımasına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Fiziksel model deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği laboratuvarında aktif yansıma sönümlendirme sistemine sahip piston tipi dalga üretici ile donatılmış dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Geleneksel dalgakıran modelleri farklı şev eğimleri (1:1.5, 1:2, 1:2.5) ile oluşturulmuştur. Patentinin bulunmaması ve imalat kolaylığından dolayı beton blok olarak küp blokların kullanıldığı dalgakıran modellerinin incelenmesi tercih edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda yapılar ve dalgalar için yansıma katsayıları belirlenmiştir. Dalga yansımasının şev eğimi ve surf parametresi ile arttığı, dalga dikliğinin artması ile ise azaldığı görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Dalgakıran, dalga yansıması, dalga spektrumu, küp blok.

### ABSTRACT

#### **Wave Reflection from Breakwaters with Cube Armor Units**

*In this study, the effects of wave parameters and breakwater on wave reflection were investigated experimentally. Physical model experiments were carried out in a wave channel equipped with an active reflection damping system at the Yıldız Technical University Hydraulic and Coastal Engineering laboratory. Breakwater models were built with different slope angles (1:1.5, 1:2, 1:2.5). Breakwaters with cube blocks were preferred in this study as they are simple and cheap in production. It was observed that the wave reflection increases with increasing slope angle and surf parameter and decreases with increasing wave steepness.*

**Keywords:** Breakwater, wave reflection, wave spectrum, cube block.

### GİRİŞ

Dalgaların kıyı yapıları ile etkileşimi sonucunda meydana gelen dalga yansıması liman girişi yakınında tehlikeli dalga koşullarının oluşması, yapıların stabilitesini etkilemesi, yaklaşım kanalı

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - ayazb499@gmail.com

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cisahin@yildiz.edu.tr

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - yalcinyksl@gmail.com

ve liman içindeki gemilerin seyirlerinin olumsuz etkilenmesi ve tabandaki katı madde hareketinin artması gibi çok sayıda probleme neden olmaktadır. Mühendislik uygulamalarında dalga yansımasının büyüklüğü yapıdan yansıyan ve yapıya gelen spektral dalga yüksekliklerinin oranını gösteren yansıma katsayısı ( $C_r$ ) ile karakterize edilmektedir. Literatürde kıyı yapılarına ait dalga yansıma katsayılarını veren ifadeler bu alanda yapılan çalışmaların sonuçlarına göre elde edilmiştir. [1]

Seelig ve Ahrens (1981) tarafından geçirimli taş ve beton bloklı, geçirimsiz taş ve pürüzsüz şevler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada yansıma katsayısı surf parametresi ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilmiştir. [2]

$$C_r = \frac{a_1 \cdot \xi_0^2}{\xi_0^2 + b_1} \quad (1)$$

Bu ifadeye yer alan katsayılar kullanılan şev yüzeylerine göre farklı değerler almaktadır.

Zanuttigh ve van der Meer (2006) tarafından yapılan çalışmada yansıma katsayısı surf parametresi ve farklı koruma tabakaları için belirli değere sahip olan pürüzlülük faktörü ile ifade edilmiştir [3]:

$$C_r = \tanh(a \cdot \xi_0^b) \quad (2)$$

$$a = 0.167[1 - \exp(-3.2\gamma_f)] \quad (3)$$

$$b = 1.49(\gamma_f - 0.38)^2 + 0.86 \quad (4)$$

Zanuttigh ve Van der Meer (2008) elde ettikleri yansıma katsayısı ifadesindeki a ve b katsayılarını kalibre ederek belirli şev tipleri için değerlerini elde etmişlerdir. [4]

Calabrese vd. (2008), düşük kretli dalgakıranlarda dalga yansımasını dalga dikliği, permeabilite ve şev eğimi ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada da dalga yansımasına dalga yüksekliği, periyodu, dikliğinin, surf parametresinin, yapı tipinin, şev eğiminin, koruma tabakası blok tipinin etkisi incelenmiştir. [5]

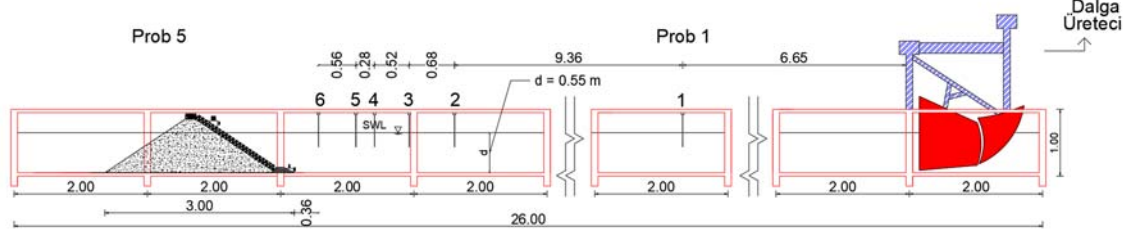
Buccino vd. (2011), ecopode koruma tabakasına sahip dalga aşması gerçekleşmeyen dalgakıranların tırmanma ve yansıma performanslarını ortaya koymak amacı ile yürüttükleri çalışma kapsamında iki adet dalgakıran modeli ile çalışmışlardır.[6] Kullanılan dalgakıran modelleri tek sıra ecopode koruma tabakalı 2/3 ve 3/4 şev eğimine sahip modellerdir. 0.4 ve 0.3 m su derinliklerinde JONSWAP dalga spektrumuna uygun dalgalar gönderilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarını, Zanuttigh ve van der Meer (2008) ve Calabrese vd. (2008) tarafından önerilen yansıma katsayısı ifadeleri ile karşılaştırmışlardır.

Literatürde kıyı yapılarına ait dalga yansıma katsayılarını veren ifadeler oldukça sınırlı sayıda yapı tipini dikkate alan az sayıda çalışmanın sonuçlarına göre elde edilmiştir. Bu çalışmada, küp bloklı geleneksel dalgakıranlarda farklı şev eğimleri (1:1.5, 1:2, 1:2.5) için dalga yansımasının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

Dalgakıran modelleri ile gerçekleştirilen fiziksel deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan dalga kanalı 26 metre uzunluğa, 1 metre genişliğe ve 1 metre yüksekliğe sahiptir (Şekil 1). Dalga kanalında kullanılan

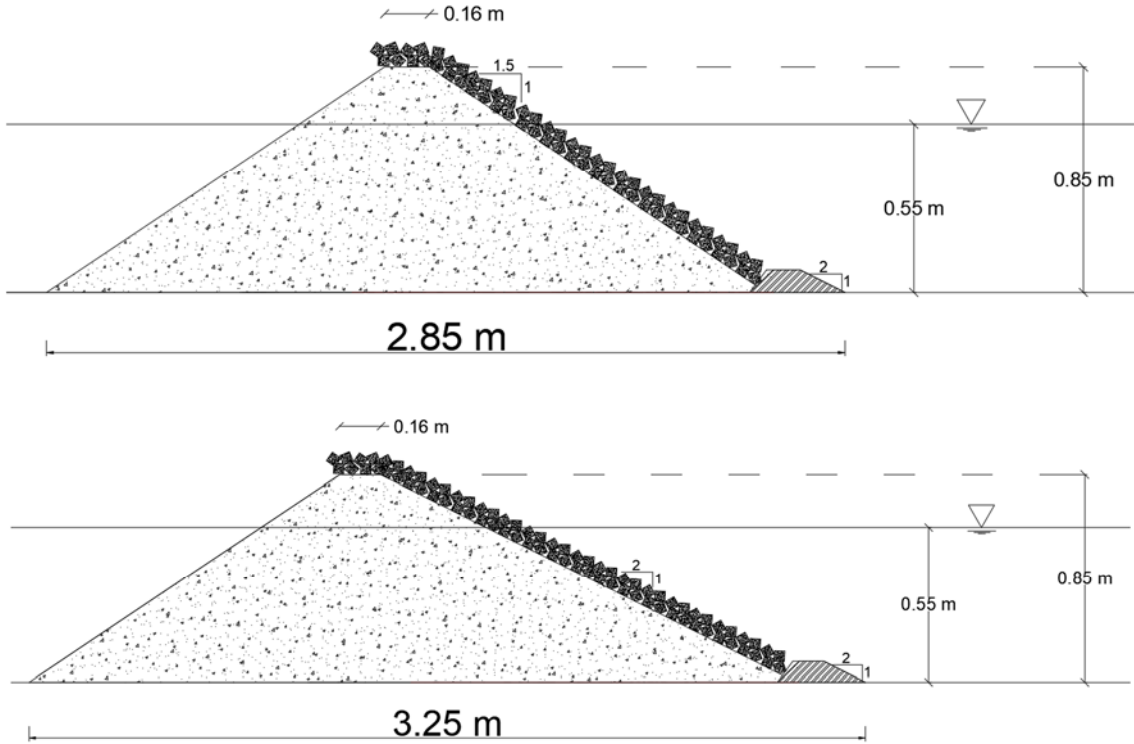
dalga üretici, yansıyan dalgaların üretilen dalgaları etkilememesi için üretece ulaşan yansıyan dalgaların sönümlenmesini sağlayan aktif sönümleme sistemine sahiptir.



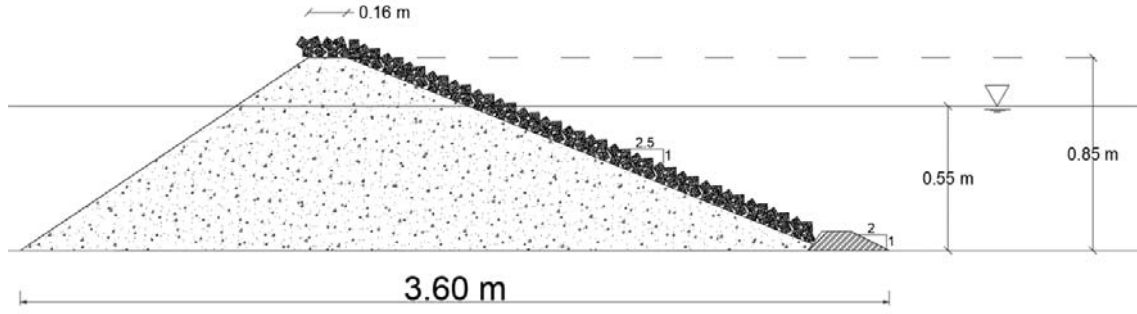
Şekil 1 - Dalga kanalı kesiti

Dalga kanalı içerisine kurulan dalgakıran modelleri 1/1.5, 1/2, 1/2.5 şev eğimine ve düzensiz dizilimli çift sıra küp blok koruma tabakasına sahiptir (Şekil 2). Yapılan tüm deneylerde su derinliği 55 cm'dir. Kret genişlikleri  $4D_n$  (16 cm) uzunluğundadır. Kullanılan küp blokların kenar uzunlukları 4 cm ve doğal taşların nominal çapları 3.4 cm'dir. Üretilen en az 800 adet dalgaya sahip düzensiz dalga serileri diklik parametresi ( $\gamma$ ) 3.3 olan JONSWAP spektrumuna uygun karakteristiğe sahiptir. Deneylerde üretilen dalga serilerinin spektral parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Deneyler sırasında yapılan ölçümlerden elde edilen veriler Mansard ve Funke (1980)'nin önerdiği yöntem ile analiz edilmiş, dalgakıran modeli önünde gelen ve yansıyan dalgalar ayırt edilerek yansıma katsayıları hesaplanmıştır.[7]



Şekil 2 - Düz şevli dalgakıran model kesitleri



Şekil 2 - Düz şevli dalgakıran model kesitleri (devam)

Tablo 1 - Deneylerde kullanılan dalga parametreleri

	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
<b>W1</b>	0.05	0.9
<b>W2</b>	0.07	1.3
<b>W3</b>	0.09	1.3
<b>W4</b>	0.09	1.7
<b>W5</b>	0.12	1.5
<b>W6</b>	0.14	1.6
<b>W7</b>	0.15	1.7
<b>W8</b>	0.16	1.8
<b>W9</b>	0.17	1.8
<b>W10</b>	0.18	2
<b>W11</b>	0.24	1.8

## DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

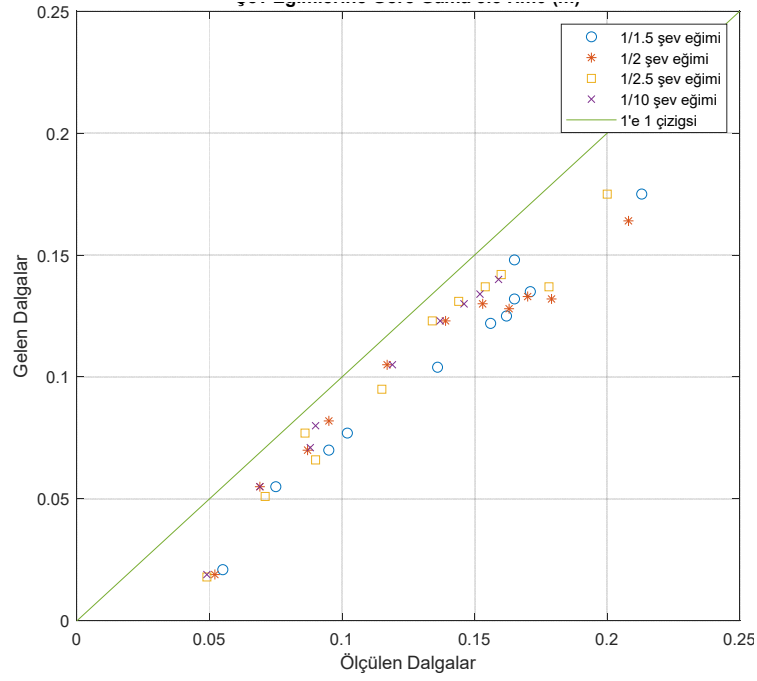
Şekil 3'te her şev eğimi için elde edilen verileri içeren her bir dalga serisinde ölçülen ve yapıya gelen spektral dalga yükseklikleri karşılaştırılmıştır. Bu grafikte dalga yansıması arttıkça veriler 1'e 1 çizgisinden uzaklaşmaktadır. Dalga yükseklikleri arttıkça ve daha dik şevlerde gelen dalgalar ile ölçülen dalgalar arasındaki farklar ve dolayısıyla dalga yansımasının etkisi artmaktadır. 1/1.5 sev eğiminde yapı önünde ölçülen dalga yükseklikleri yapıya gelen dalgalardan yaklaşık %25 daha fazla olmaktadır.

Yansıma katsayısının surf parametresi ve dalga dikliği ile değişimi de analiz edilmiştir. Surf parametresi ve dalga dikliği ile yansıma katsayısı grafikleri Şekil 4 ve 5'teki gibidir. Surf parametresi hem yapı hem de dalga parametrelerini içermektedir.

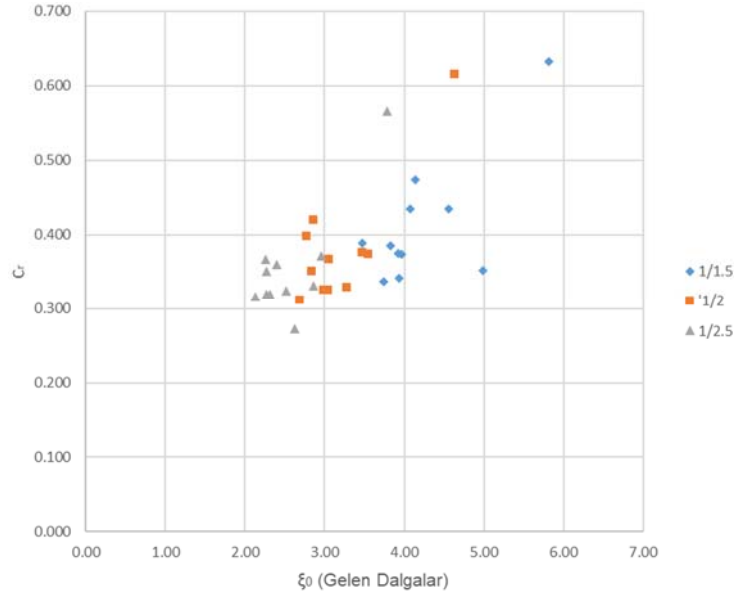
$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{(2\pi H_{m0,t})/(gT_m^2-1.0)}} \quad (5)$$

Bundan dolayı, Şekil 4'te şev eğiminin daha dik olduğu yapılar daha yüksek surf parametrelerine sahiptir. Elde edilen yansıma katsayılarının, literatürdeki diğer çalışmalarda ulaşılan sonuçlara (Seelig ve Ahrens, 1981) uygun olarak, surf parametresi ile birlikte arttığı görülmektedir.



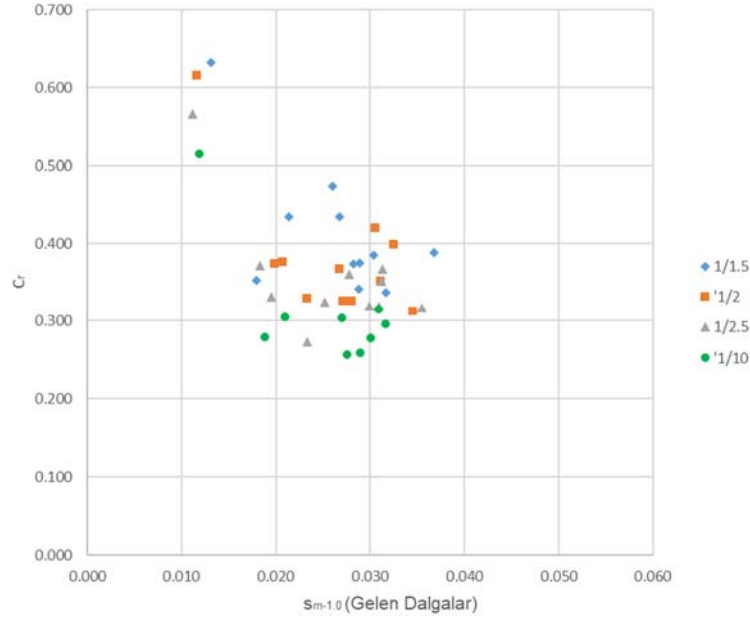


Şekil 3 - Gelen ve ölçülen  $H_{m0}$  dalga yüksekliklerini karşılaştırma grafiği



Şekil 4 - Surf parametresi ile yansıma katsayısının değişimi

Şekil 5'te, literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarına uygun olarak dalga dikliğinin artması ile dalga yansımalarının azaldığı görülmektedir (Altomare ve Gironella, 2014). [8] Şekil 4 ve 5'te ortak olarak daha dik şev eğimine sahip yapılarda daha yüksek yansımaların olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5 - Spektral dalga dikliği ile yansıma katsayısının değişimi

## SONUÇ

Mühendislik uygulamalarında dalga yansımasının büyüklüğü yapıdan yansıyan ve yapıya gelen spektral dalga yüksekliklerinin oranını gösteren yansıma katsayısı ( $C_r$ ) ile karakterize edilmektedir. Literatürde kıyı yapılarına ait dalga yansıma katsayılarını veren ifadeler oldukça sınırlı sayıda yapı tipini dikkate alan az sayıda çalışmanın sonuçlarına göre elde edilmiştir. Bu çalışmada, farklı şev eğimine sahip küp bloklü geleneksel dalgakıranlarda dalga yansımasının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda küp bloklü dalgakıranlarda farklı şev eğimi için yansıma katsayıları belirlenmiştir. Dalga yansımasının artan dalga yüksekliği ile arttığı görülmüştür. Yansıma katsayıları surf parametresi ile birlikte artmaktadır, Dalga dikliğinin artması ile dalga yansımasının azaldığı görülmüştür. Daha dik şev eğimine sahip yapılarda daha yüksek yansımaların oluştuğu gözlemlenmiştir.

## Kaynaklar

1. Pilar Díaz-Carrasco, Mads Røge Eldrup, Thomas Lykke Andersen, (2021), "Advance in wave reflection estimation for rubble mound breakwaters: The importance of the relative water depth", Coastal Engineering 168 103921
2. Seelig W.N., Ahrens J.P., (1981), "Estimation of Wave Reflection and Energy Dissipation Coefficients for Beaches, Revetments, and Breakwaters", U.S. Army, Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center
3. Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., (2006), "Wave reflection from coastal structures", Proc. XXX Int. Conf. Coast. Eng. vol. 5, 4337-4349.
4. Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., (2008), "Wave Reflection from Coastal Structures in Design Conditions", Coastal Engineering 55 771-779

5. Calabrese, M., Di Pace, P. Buccino, M., (2008), “Wave Reflection at Low Crested Breakwaters Ranging from Submerged to Exposed”, ASCE, Proc. of 31st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany
6. Buccino, M., Calabrese, M., Ciardulli, F., Di Pace, P. and Tomasicchio, G.R., (2011), “One Layer Concrete Armor Units With a Rock-Like Skin: Wave Reflection And Run-Up”, Journal of Coastal Research, suppl. Special Issue; Fort Lauderdale Vol. SI, Iss. 64, 469-473.
7. Mansard, E.P.D., Funke, E.R., (1980), “The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method” Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference. Sydney, Australia, pp. 154–172.
8. Altomare, C., Gironella, X., (2014), “An experimental study on scale effects in wave reflection of low-reflective quay walls with internal rubble mound for regular and random waves”, Coastal Engineering 90, 51–63



## Dalga Kaynaklı Deniz Tabanı Sıvılaşmasının Gömülü Altyapılar Etrafında Sayısal Modellemesi

S. Utku YILMAZ<sup>1</sup>, V. Ş. Özgür KIRCA<sup>2</sup>, B. Mutlu SUMER<sup>3</sup>

### ÖZET

Enerji sektöründe yoğun olarak kullanılmakta olan deniz tabanına gömülü boru hatları ve enerji iletim kabloları gibi altyapıların tasarımı, kıyı ve geoteknik mühendisliği açısından zorlu problemler ortaya çıkarmaktadır. Bunlardan biri olan zemin sıvılaşması, boru hatları gibi gömülü yapıların zemine yerleştirilmesi sonucu örselenen zeminin, dalga veya deprem gibi etkilerle stabil yapısının bozulması olarak ortaya çıkmakta ve söz konusu yapılarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, OpenFOAM platformunda geliştirilmekte olan bir sayısal model ile gömülü boru hattı ve enerji nakil kabloları gibi altyapılar etrafında dalga kaynaklı deniz tabanı sıvılaşması modellenmiştir. Geliştirilen model deneysel veriler ile doğrulanmış ve deniz tabanına gömülü altyapıların zeminin dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini nasıl etkilediği incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluk suyu basıncı, dalga kaynaklı zemin sıvılaşması, boru hattı, gömülü altyapılar, zemin efektif gerilmesi, OpenFOAM.

### ABSTRACT

#### *Numerical Modelling of Wave-Induced Seabed Liquefaction Around Buried Infrastructures*

Pipelines and power transmission cables buried in the seabed, which have been indispensable infrastructures for energy industry, pose many design challenges for coastal, marine, and geotechnical engineers. Seabed liquefaction, as one such problem, may cause significant damages for buried structures such as submarine pipelines when the loosened soil around the structure loses its integrity because of the cyclic loads due to earthquakes or waves. In this study, seabed liquefaction around buried structures are investigated by means of a numerical model that is being developed within the OpenFOAM CFD toolbox. The model is validated against available experimental data in the literature, and it is utilized to study how the presence of buried infrastructures affects wave-induced liquefaction.

**Keywords:** pore water pressure, wave-induced soil liquefaction, pipeline, buried infrastructures, soil effective stress, OpenFOAM.

---

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - yilmazselaha@itu.edu.tr

2 BM SUMER Mühendislik ve Araştırma, İTÜ Teknokent, İstanbul

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - kircave@itu.edu.tr

3 BM SUMER Mühendislik ve Araştırma, İTÜ Teknokent, İstanbul - bms@bmsumer.com

## **AMAÇ**

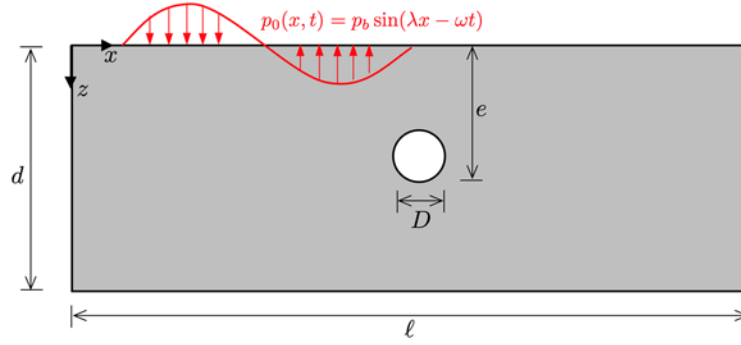
Denizaltı boru hatları, yaklaşık 50 yıldır petrol ve gaz endüstrisi için en önemli deniz altyapılarından biri olmuştur. Benzer şekilde, açık deniz rüzgâr enerjisi teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, enerjinin gerek rüzgâr tarlası içinde gerek rüzgâr tarlasından şebekeye naklini sağlayan kablolarının sayısı ve uzunlukları sürekli artmakta ve açık deniz kabloları gitgide önem kazanmaktadır. Güç iletiminde kullanılan bir açık deniz kablosunun çapı genellikle 0,05-0,4 m arasında iken, petrol ve gaz boru hatlarının çapları 0,2 m ilâ 1,5 m'dir. Açık deniz kablolarının boyutları, denizaltı boru hatlarına nispeten küçük olmasına rağmen, iki yapının geometrik benzerliği göz önüne alındığında, denizaltı boru hatlarının stabilitesi için kullanılagelen genel tasarım yönergeleri açık deniz kabloları için de çoğu durumda aynen benimsenmiştir. Denizaltı boru hatları ve açık deniz kabloları gibi altyapılar, gevşek durumdaki silt veya ince kum gibi ince taneli zeminlere gömüldüklerinde dalga kaynaklı sıvılaşma riski bu yapıların stabilitesini tehdit etmektedir [1]. Şiddetli dalgaların neden olduğu bu tekrarlı kayma gerilmeleri ve deformasyonları, zemin tanelerini yeniden düzenleyerek boşluk hacmini azaltırlar. Sonuç olarak, boşluk suyu basıncı birikir ve sonunda deniz tabanı zeminin efektif gerilmesini aşar, bu da zeminin sıvılaşmasına neden olur [1]. Bu durumda zemin, taneler ve deniz suyu karışımından oluşan bir sıvı gibi davranır ve taşıma kapasitesini kaybeder. Deniz tabanının sıvılaşması durumunda, yoğunluğu sıvılaşmış zeminin yoğunluğundan daha büyük olan gömülü nesnelere daha derine batarken, daha az yoğunluğa sahip nesnelere yüzeye doğru çıkabilir. Bu batma veya çıkma, tamirâtı çok güç ve yüksek maliyetli hasarlara neden olmaktadır. Deniz tabanındaki gömülü boru hatlarının veya açık deniz kablolarının varlığı zeminin sıvılaşma davranışını değiştirir. Çok sayıda araştırma, boru hatlarının (veya kablolar gibi geometrik olarak benzer yapıların) varlığının, boşluk suyu basıncı oluşumunu ve sıvılaşma riskini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir [2-6]. Bu nedenle, tasarımcılar ve uygulayıcılar için boru hatları veya kablolar etrafındaki sıvılaşma potansiyelini güvenilir yöntemlerle değerlendirebilmek önemlidir. Bu çalışmada, deniz tabanına gömülü bir boru hattı/kablo etrafındaki sıvılaşma potansiyelinin sayısal modelleme yöntemiyle benzeştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, devam etmekte olan NuLIMAS (Numerical Modelling of Liquefaction Around Marine Structures / Deniz Yapıları Çevresinde Sıvılaşmanın Sayısal Modellemesi) Projesi kapsamında deniz yapıları çevresinde dalga kaynaklı sıvılaşmanın modellenmesi için geliştirilmekte olan sayısal model kullanılmıştır. Dünya çapında en çok kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği platformlarından biri olan OpenFOAM platformunda geliştirilen bu sayısal modelde, ilk aşamada tekrarlı kayma gerilmeleri altında zemindeki boşluk suyu basıncının artışının modellenmesi kapsama alınmıştır. Projenin sonraki aşamalarında, sıvılaşmış zeminin davranışının ve sıvılaşma sonrasında ortaya çıkan zemin sıvılaşmasının da modellenmesi hedeflenmektedir. Mevcut çalışmada da kullanılan sayısal model, temel olarak iki bileşenden oluşmaktadır: (1), OpenFOAM'daki biotFoam çözücüsü aracılığıyla poro-elastik ortam için Biot denklemlerinin çözülmesi [7] ile tekrarlı kayma gerilmelerinin hesabı, (2). İlk bileşenden bulunan tekrarlı kayma gerilmeleri kullanılarak boşluk suyu basıncının hesabı [2, 8, 1 (bölüm 3)]. pressBuildupFoam [9] olarak adlandırılan bu yeni OpenFOAM çözücüsü, mevcut çalışmada boru hatlarının veya kabloların pürüzsüz yüzey (slip), pürüzlü yüzey (no-slip) veya kısmen pürüzlü yüzey (partially rough veya partially slip) gibi farklı sınır koşullarını da dikkate alacak şekilde ayrıca geliştirilmiştir. Bu da modele, pratik mühendislik uygulamalarında kullanılabilmesi ve sınır koşullarını daha gerçekçi ele alabilmesi konusunda avantaj sağlamaktadır.

## **PROBLEMİN TANIMI VE SAYISAL MODELİN KURULUMU**

Yukarıda bahsedildiği üzere, kullanılan sayısal modelin iki bileşeni bulunmaktadır. İlk bileşende, deniz tabanındaki zeminin ilerleyen dalgalar altında maruz kaldığı gerilmeler ve şekil değiştirmeler, poro-elastik bünye davranışı kabulünü esas alan Biot denklemleri ile çözülmektedir. Bu denklemler Sumer ([1], bölüm 2) tarafından ayrıntılı olarak verilmiş olup,

buradaki sayfa sınırı dolayısı ile tekrar verilmeyecektir. Sayısal modelin Biot denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ile çözen bu ilk bileşeni ile, zeminin şekil değiştirmesi, boşluk suyu basıncı ve normal gerilmeler yanında, modelin ikinci bileşeninin girdi parametresi olarak kullanacağı “tekrarlı kayma gerilmelerinin genliği” hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, problemin kurgusu gereği iki boyutlu çözüm elde edilmiş olsa da sayısal model üç boyutlu problemlere uyarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır.

İncelenen problemin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır.  $D$  çaplı bir silindir (boru veya kablo), deniz tabanında  $d$  derinliğindeki bir zemin tabakasına  $e$  kadar bir gömme derinliğinde gömülü bulunmaktadır. İlerleyen düzenli dalgaların sonucunda deniz tabanına  $p_0(x, t)$  kadar basınç salınımları etkimektedir. Bu basınç değişimleri Şekil 1'de gösterildiği üzere (hidrostatik basınç hariç tutulmak üzere) deniz tabanına zamana ve uzama göre sinüzoidal biçimde etkimektedir. Burada  $\lambda = 2\pi/L$  dalga sayısı ve  $\omega = 2\pi/T$  açısal frekans olup  $L$  ve  $T$  sırasıyla dalga boyu ve dalga periyodudur. Dalga boyu  $L$  ve basınç salınımlarının genliği  $p_b$  değerleri, lineer dalga teorisi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Zemin tabakasına etkiyen basınç salınımı  $p_0(x, t)$  sebebiyle zemin dokusu kayma deformasyonlarına maruz kalmaktadır. (Çalışma kapsamında tarif edilen basınç parametrelerinin tamamında, hidrostatik basınç üzerindeki basınç kastedilmektedir.) Problemden özellikle incelenecek olan gömülü yapı etrafındaki boşluk suyu basıncı ve sıvılaşmanın başlangıcıdır. Zira yapı etrafındaki zemin sıvılaştığında, artık taşıyıcılığını kaybetmektedir.



Şekil 1 - Problemin Şematik Gösterimi

OpenFOAM platformunda kodlanan pressureBuildupFoam adlı çözücü, Biot denklemleri ile zemin içindeki gerilmeleri çözdükten sonra aşağıdaki denklem ile zemin içinde biriken boşluk suyu basıncını çözer.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = c_v \left( \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} \right) + f \quad (1)$$

Bu denklemde  $\bar{p}$  periyot ortalama (biriken) boşluk suyu basıncı,  $c_v$  konsolidasyon katsayısı ve  $f$  aşağıdaki şekilde verilen boşluk suyu basıncı oluşumu kaynak terimidir.

$$f = \frac{\sigma_0'}{N_l T} \quad (2)$$

$$N_l = \left( \frac{1}{\alpha} \frac{\tau_{amp}}{\sigma_0'} \right)^{1/\beta} \quad (3)$$

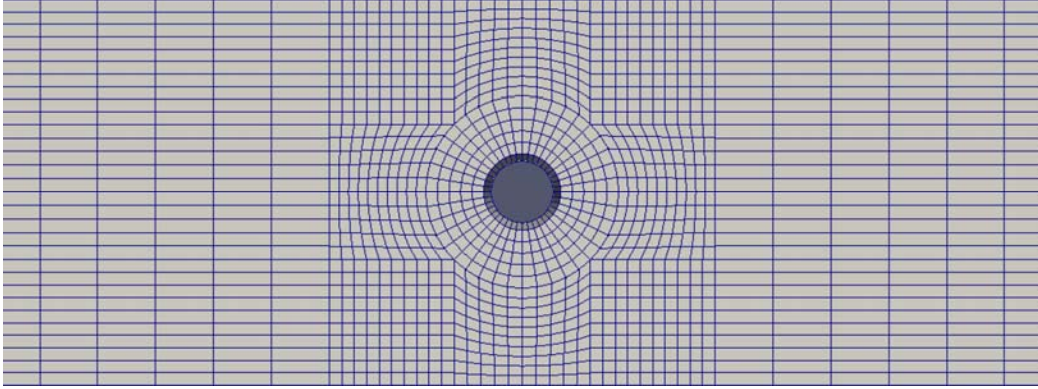
Bu denklemlerde  $\sigma_0'$  zeminin başlangıçtaki ortalama normal efektif gerilmesidir.

$$\sigma_0' = \gamma' z \frac{(2k_0+1)}{3} \quad (4)$$

Ayrıca burada  $\gamma'$  zeminin su altındaki özgül ağırlığı,  $k_0$  yanall toprak basıncı katsayısı,  $N_l$  sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı,  $\tau_{amp}$  dalga etkisi altında zemindeki tekrarlı kayma gerilmesinin genliğidir.  $\alpha$  ve  $\beta$  ise zeminin sıkılık indisinin ( $D_r$ ) bir fonksiyonu olarak verilen model katsayılarıdır [1]. Denklem (1) ile gösterilen ifade Biot denklemlerinden türetilmiş olup, orijinal halinde yalnızca düşey yönde basınç difüzyonunu içermektedir [1]. Daha sonra Sumer ve Cheng [2], bu denklemi iki boyuta genişleterek uygulayan ilk araştırmacılar olmuşlardır. Bu çalışmada ele alınan problemin iki boyutlu yapısı itibarı ile, boşluk suyu basıncı artışına neden olan kayma gerilmesi tensörü de iki boyutludur ve yalnızca bir kayma gerilmesi terimi, bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmadaki gibi iki boyutlu bir boru hattı/kablo problemi ele alındığında, Denklem (3) aynen kullanılabilir. Yukarıda anlatıldığı üzere ve Denklem (1)-(4)'ten görülebileceği gibi, biriken boşluk suyu basıncı dalgalar tarafından ortaya çıkardığı tekrarlı kayma gerilmesinin genliğine ( $\tau_{amp}$ ) bağlıdır. Bu terim, yukarıda açıklandığı gibi, modelin ilk bileşenindeki Biot denklemlerinin çözümünden elde edilmektedir. Daha sonra modelin ikinci bileşeni devreye girerek, Denklem (1)'de verilen sınır koşulları için zemin tanım kümesi üzerinde biriken boşluk suyu basıncı  $\bar{p}$  zamanın da bir fonksiyonu olarak elde edilir. Biriken boşluk suyu basıncı değeri, zeminin başlangıçtaki ortalama normal efektif gerilmesi değerine ulaştığında zemin sıvılaşacaktır [8]:

$$\frac{\bar{p}}{\sigma_{o'}} \geq 1 \quad (5)$$

Problemin sayısal modelde çözümü için, Şekil 1'de gösterilen problem geometrisi, Gmsh yardımcı programında [9] yapılandırılmış bir ağ (mesh) oluşturularak dörtgen hesap elemanlarına bölünmüştür. Çalışma kapsamında çeşitli hesap ağı (mesh) yapısı alternatifleri denenmiş ve en uygun ağ yapısı kullanılmıştır [10]. Modelde kullanılan bir hesap ağı örneği Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2 - Sayısal Modelde Kullanılan Örnek Bir Hesap Ağı.

Modelin ilk bileşeni olan Biot denklemlerinin çözümü için tanımlanan sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

- ✓ Zemin tabakasının tabanında ( $z = d$ ): Zeminin yer değiştirmesi sıfırdır ( $u, w = 0$ ), salınımlı boşluk suyu basıncının düşey gradyanı sıfırdır ( $\partial p / \partial z = 0$ ).
- ✓ Zemin tanım kümesinin yan cidarlarında ( $x = 0, x = \ell$ ): Yer değiştirmeler, gerilmeler ve salınımlı boşluk suyu basıncı her iki tarafta da eşit değerlere sahip olacak şekilde dikte edilir. Model alanının dalga uzunluğuna eşit ( $\ell = L$ ) seçilmesiyle bu sınır koşulu, model alanının yanall süreksizliği nedeniyle yerel kararsızlıkların oluşmamasını sağlamaktadır.



- ✓ Deniz tabanında ( $z = 0$ ): Zemindeki gerilmeler sıfırdır ve yer değiştirme serbesttir, salınlı boşluk suyu basıncı deniz tabanındaki dalga basıncına eşittir ( $p = p_0$ ).
- ✓ Silindir yüzeyinde: Salınlı boşluk suyu basıncı için normal gradyan sıfırdır ( $\partial p/\partial n = 0$ ). Zemin deformasyonları için üç farklı sınır koşulu denenmiştir: Pürüzsüz yüzey (yüzey sürtünmesizdir, yüzeye normal yer değiştirmeler sıfırdır), pürüzlü yüzey (yüzey tam sürtünmelidir ve tüm yer değiştirmeler sıfırdır) ve kısmen pürüzlü yüzey (yüzey kısmi sürtünmelidir). Üçüncü seçenek, valueFraction ( $vF$ ) parametresinin üzerinden ayarlanabilmektedir.  $0 \leq vF \leq 1$  olup,  $vF = 0$  pürüzsüz yüzey koşulu sınırı olurken  $vF = 1$  pürüzlü yüzey sınır koşulunu verir.

Modelin ikinci bileşeninde (Denklem (1)-(4)) periyot ortalama boşluk suyu basıncının ( $\bar{p}$ ) çözümü için tanımlanan sınır koşulları şöyledir:

- ✓ Zemin tabakasının tabanında ( $z = d$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncının düşey gradyanı sıfırdır ( $\partial \bar{p}/\partial z = 0$ ).
- ✓ Zemin tanım kümesinin yan cidarlarında ( $x = 0, x = \ell$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncı her iki tarafta da eşit değerlere sahip olacak şekilde dikte edilir.
- ✓ Deniz tabanında ( $z = 0$ ): Periyot ortalama boşluk suyu basıncı sıfırdır ( $\bar{p} = 0$ ).
- ✓ Silindirin yüzeyinde: Periyot ortalama boşluk suyu basıncının normal gradyanı sıfırdır ( $\partial \bar{p}/\partial n = 0$ ).

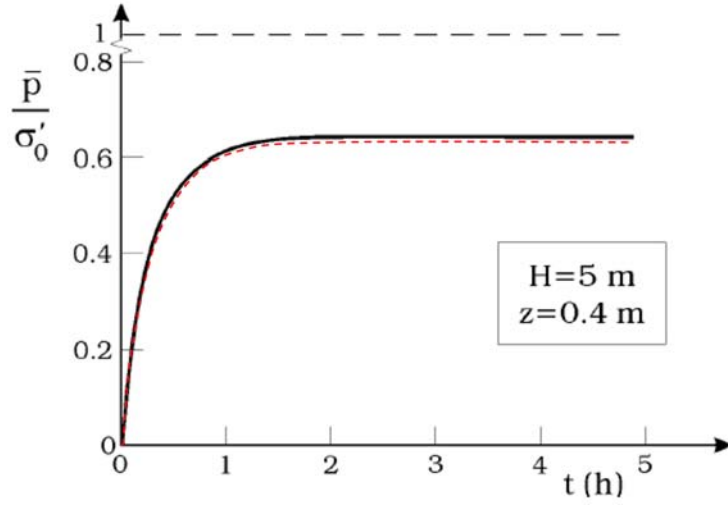
Sayısal model yukarıda açıklandığı şekilde kurulup çalıştırılarak, deniz tabanına gömülü silindirik yapılar etrafındaki zeminde dalga kaynaklı boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma potansiyeli benzeştirilmiştir.

## BULGULAR

Geliştirilen sayısal model ile elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır. İlk olarak, sayısal modelin doğrulanması için, Sumer [1 (s. 87-88)] tarafından verilen matematik model ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, zemin ile ilgili parametreler şu şekilde verilmektedir: Zemin tabakası derinliği  $d = 1$  m, zeminin toplam özgül ağırlığı  $\gamma' = 10,8$  kN/m<sup>3</sup>, kayma elastisite modülü  $G = 926$  kN/m<sup>2</sup>, hidrolik iletkenlik  $k = 1 \times 10^{-6}$  m/s, boşluk oranı  $n = 0,333$ , doygunluk oranı  $S_r = 1$ , yanal toprak basıncı katsayısı  $k_0 = 0,4$ , Poisson oranı  $\nu = 0,35$ , model katsayıları  $\alpha = 0,246$  ve  $\beta = -0,165$ . Dalga ile ilgili parametreler ise su derinliği  $h = 19$  m, dalga yüksekliği  $H = 5$  m ve dalga periyodu  $T = 13,7$  s şeklinde verilmektedir. Sayısal model bu girdi parametrelerine göre çalıştırılmış ve zemin içinde 0,4 m derinlikte biriken boşluk basıncı hesaplanarak Sumer [1] tarafından verilen çözüm ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 3'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi iki modelin sonuçları örtüşmektedir. Şekil 3'te zeminin başlangıçtaki ortalama efektif normal gerilmesi de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, bu örnekte biriken boşluk suyu basıncı zeminin efektif gerilmesine ulaşmadığından (Denklem (5)) zemin sıvılaşmaya uğramamıştır.

Modelin bu ilk doğrulanması sonrası, deniz tabanına gömülü boru hatları/kablolar etrafında dalga kaynaklı sıvılaşmanın modellenmesine geçilmiştir. Bu amaçla, Sumer ve diğerleri [4] tarafından yapılmış olan boru etrafında dalga kaynaklı sıvılaşma fiziksel model deneyleri, sayısal model ile benzeştirilmiştir. Sumer ve diğerleri [4], bir dalga kanalının tabanına yerleştirdikleri  $d = 0,17$  m derinliğinde bir kutuya silt yerleştirmiş ve bu düzenek ile dalga kaynaklı sıvılaşma deneyleri yürütmüşlerdir. Deneylerinde öncelikle boru hattı olmadan kutuya yerleştirilen siltin dalga kaynaklı sıvılaşma davranışı incelenmiş, daha sonra kutuya  $D = 4$  cm ve 8 cm çapındaki borular

farklı derinliklerde gömülmüş ve hem boruların etrafındaki hem de borulardan uzakta boşluk suyu basıncı ölçülmüştür. Deneylede kullanılan zemin ve dalga özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3 - Sonuçların Karşılaştırılması, Siyah Eğri: Sumer ([1], s. 89), Kırmızı Kesikli Eğri: Mevcut Model

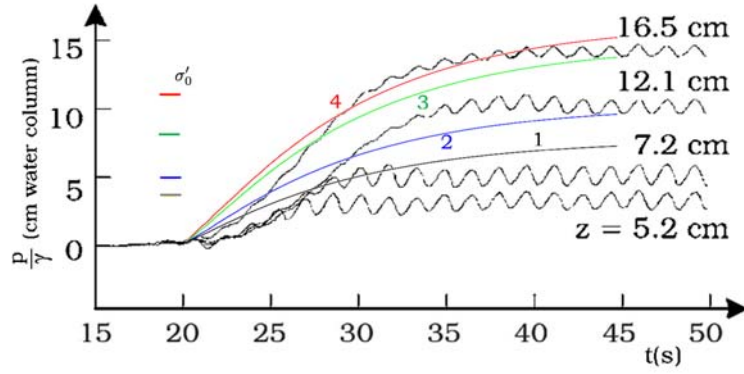
Tablo 1 - Zemin, Su ve Dalga Özellikleri

Bazı parametreler	Sembol	Değer
Zemin derinliği	$d$	17 cm
Toplam özgül ağırlık	$\gamma_t$	20,54 kN/m <sup>3</sup>
Kayma elastisite modülü	$G$	540 kN/m <sup>2</sup>
Poisson oranı	$\nu$	0,35
Doygunluk oranı	$S_r$	1
Boşluk oranı	$n$	0,46
Yanal toprak basıncı katsayısı	$k_0$	0,41
Model sabitleri	$\alpha, \beta$	0,2132 – 0,3194
Sıklık indisi	$D_r$	0,38
Hidrolik iletkenlik	$k$	$5,37 \times 10^{-6}$ m/s
Dalga yüksekliği	$H$	0,166 m
Dalga periyodu	$T$	1,6 s
Su derinliği	$h$	0,42 m
Boşluk suyunun hacimsel sıkıştırma modülü	$K$	$1,9 \times 10^6$ kN/m <sup>2</sup>

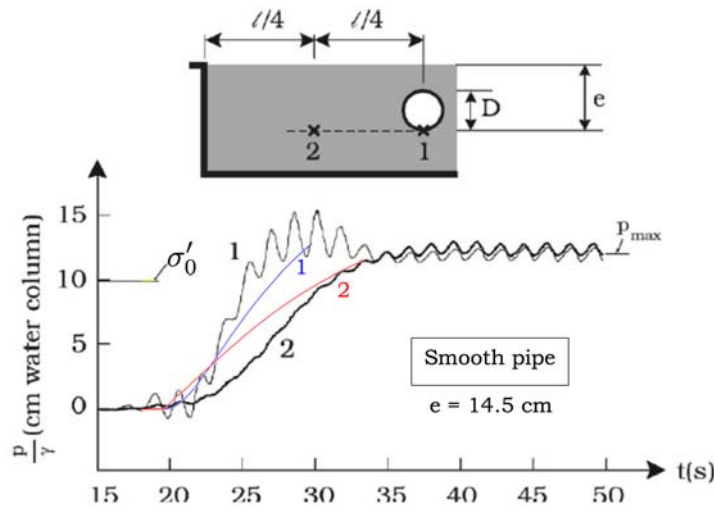
Sumer ve diğerleri [4] deneylerinde kullandıkları gömülü boruların cidarları için iki farklı sınır koşulu test etmişlerdir; pürüzsüz (sürtünmesiz) cidar ve pürüzlü (sürtünmeli) cidar. İlk koşulda

boru ve zemin bağıl olarak hareket edebilmelerine rağmen, ikinci koşulda boru cidarları Velcro malzeme ile kaplanarak boru ve zeminin bağıl hareketi engellenmiştir.

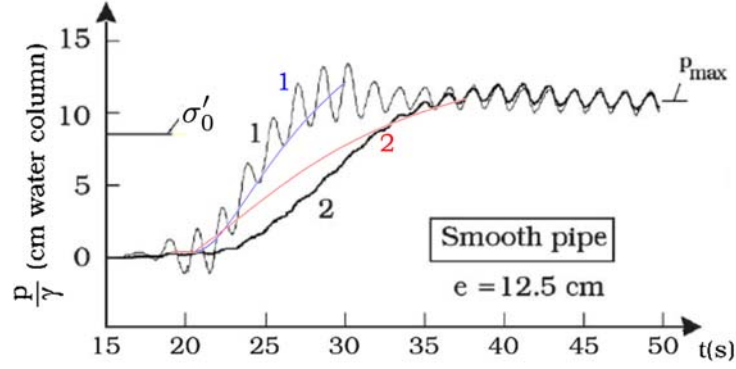
Şekil 4'te,  $D = 8$  cm ve  $e = 14,5$  cm olan pürüzsüz bir borunun uzak alanında düşey bir kesit boyunca çeşitli derinliklerde ölçülen periyot ortalama boşluk suyu basıncı ile Sumer ve diğerlerinin [4] deneylerinden elde edilen sonuçların karşılaştırması gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, sayısal model zemindeki boşluk suyu basıncının dalga altında artış davranışını yakalayabilmektedir. Şekil 5 ve 6'da ise iki farklı derinliğe gömülü borunun üzerinde ve ötesinde ölçülen boşluk suyu basınçları, deneyler ve modelde karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Sayısal modelin, zemin içinde boru bulunması durumunda boşluk suyu basıncının birikme davranışını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Şekil 4, 5 ve 6'de, efektif gerilmenin ( $\sigma_0'$ ) farklı derinliklere tekabül eden değerleri de verilmiştir. Görüldüğü üzere, deniz tabanında gömülü pürüzsüz cidarlı bir borunun varlığı, zeminin dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini arttırmaktadır. Geliştirilen sayısal modelin bu davranışı gerçekçi biçimde benzeştirebildiği sonuçlardan açıkça görülmektedir.



**Şekil 4** - Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Gömülü Borunun Uzağında Boşluk Suyu Basıncı Artışı (1, 2, 3 ve 4 eğrileri, sırasıyla  $z = 5,2, 7,2, 12,1$  ve  $16,5$  cm için sayısal model sonuçlarıdır.)

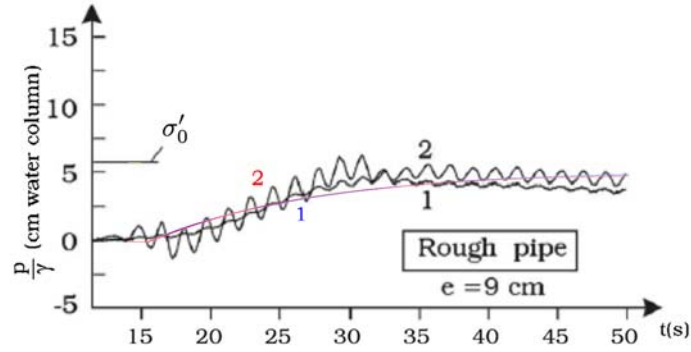


**Şekil 5** - Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzsüz Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 14,5$  cm

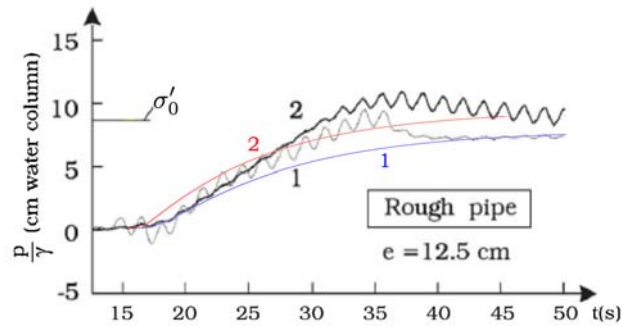


Şekil 6 - Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzsüz Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 12,5$  cm.

Pürüzlü boru için elde edilen model sonuçlarının deneyler ile karşılaştırılması ise sırasıyla Şekil 7 ve 8'de sunulmaktadır. Bu şekillerden görülebileceği üzere, pürüzlü yüzeye sahip bir boru deniz tabanına gömüldüğünde (pürüzsüz yüzeyli boru için elde edilen sonuçların aksine) dalga kaynaklı sıvılaşma potansiyelini arttırmamakta, aksine boşluk suyu basıncı artışı uzak alana kıyasla boru yakınında bir miktar daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu durum, boru yüzeyindeki kaymazlık koşulundan dolayı boru-zemin bağıl hareketinin sınırlanması ve bu bölgedeki zemin içinde kayma deformasyonlarının azalması dolayısıyla ortaya çıkmaktadır. Sayısal modelin pürüzlü boru durumu için de sıvılaşma davranışını başarılı biçimde benzeştirebildiği görülmektedir.

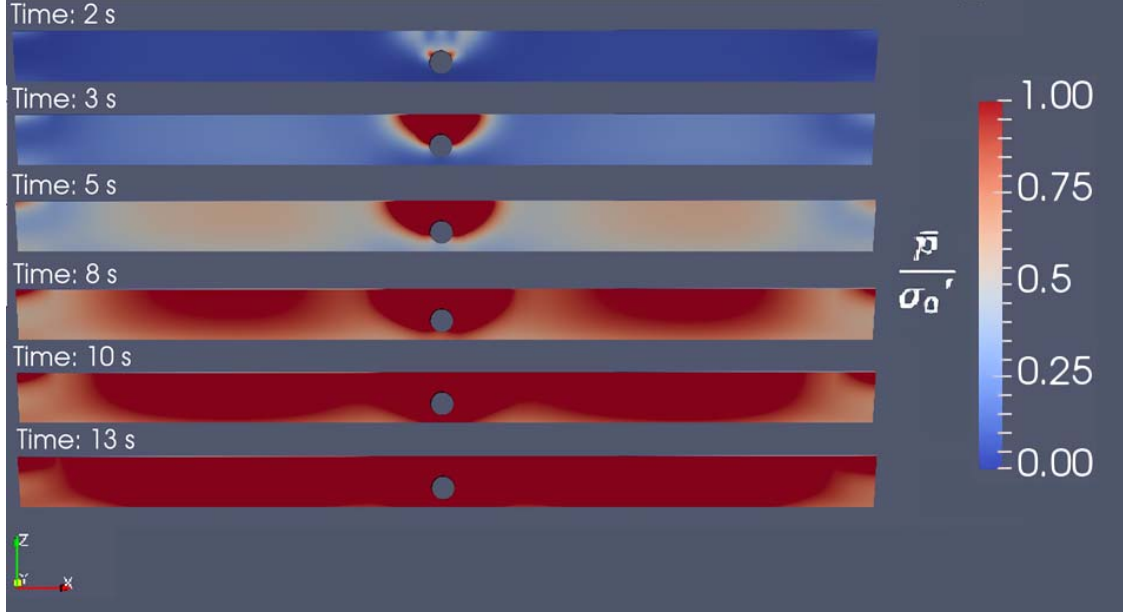


Şekil 7 - Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzlü Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 9$  cm.

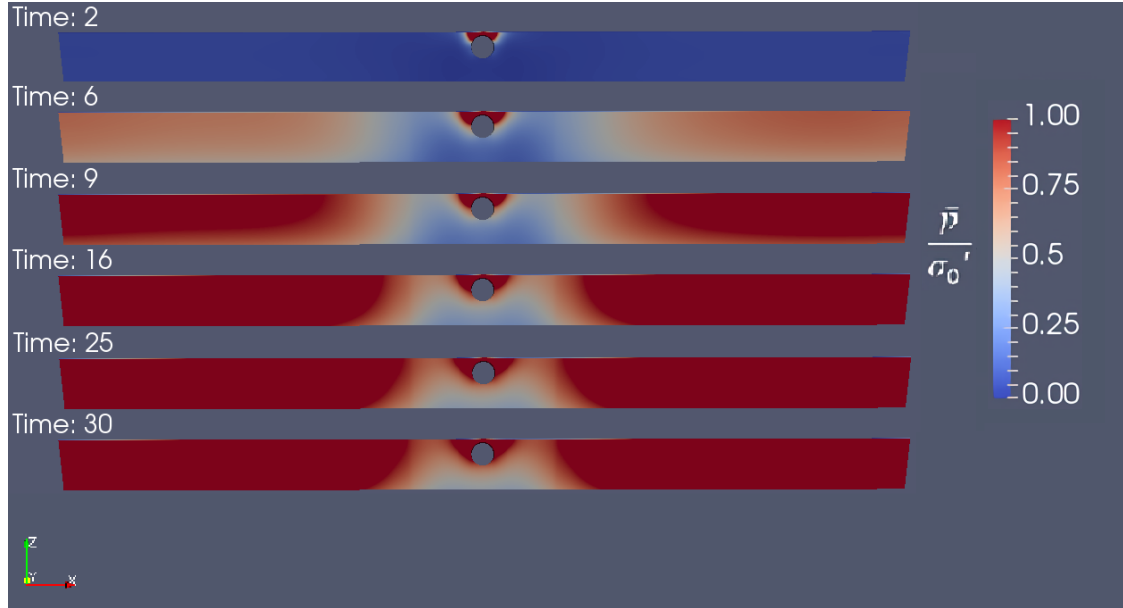


Şekil 8 - Sayısal Model Sonuçlarının Deneyler ile Karşılaştırılması [4]. Pürüzlü Borunun Altında (Eğri 1) ve Uzağında (Eğri 2) Boşluk Suyu Basıncı Artışı.  $D = 8$  cm,  $e = 12,5$  cm.

Yukarıdaki şekillerde gösterilen model sonuçları, boru cidarında kısmi pürüzlü yüzey sınır koşulunun kalibrasyon parametresi seçilmesi ile elde edilmiştir. Buna göre sayısal modeldeki boru için yüzey sınır koşulunun, valueFraction parametresinin değeri  $vF = 0,045$  olacak şekilde “kısmen pürüzlü” olarak ayarlanması ile deneydeki pürüzlülük durumunu tam olarak yansıtabildiği görülmüştür. Ayrıca  $vF$  parametresinin bir fonksiyonu olarak, sınır koşulunun doğrusal olmayan değişiminin anlaşılması için sayısal modelin duyarlılık analizi yapılmıştır ve buna göre 0,15'ten büyük bir  $vF =$  değeri ile yüzey sınır koşulunun pratik olarak tamamen pürüzlü hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır.



**Şekil 9** -  $D = 8$  cm,  $e = 14,5$  cm ve Pürüzsüz Yüzeyleli Boru Durumu İçin Belirli Zaman Adımlarında Zemin Sıvılaşmasının Gelişimi Gösteren Sayısal Model Sonucu



**Şekil 10** -  $D = 8$  cm,  $e = 9$  cm ve Pürüzlü Yüzeyleli Boru Durumu İçin Belirli Zaman Adımlarında Zemin Sıvılaşmasının Gelişimi Gösteren Sayısal Model Sonucu.

Yukarıda verilen sonuçlar her ne kadar geliştirilen sayısal modelin borunun altında ölçülen boşluk suyu basıncı için dalga kaynaklı sıvılaşma davranışını başarılı biçimde benzeştirebildiğini gösteriyorsa da gömülü borunun yan ve üst taraflarında ölçülen boşluk suyu basıncı için aynı uyum yakalanamamıştır. Bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu uyumsuzluğun sebebi net olmamakla birlikte, muhtemel sebeplerinden birinin, pürüzsüz boru deneylerinde borunun üst ve yan tarafındaki basınç ölçümlerinin hatalı olması olabileceği düşünülmektedir.

Son olarak, sayısal model tanım kümesi içinde boyutsuz periyot ortalama boşluk suyu basıncının (sıvılaşmanın) zamana göre değişimi gösteren sayısal model sonuçları, pürüzsüz ve pürüzlü boru durumu için sırasıyla Şekil 11 ve 12’de sunulmaktadır.

## **SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada, dalga kaynaklı boşluk suyu basıncı birikimini benzeştirebilmesi için OpenFOAM platformunda geliştirilmekte olan bir sayısal model kullanılarak, deniz tabanına gömülü bir boru hattı (veya iletim kablosu) etrafında dalga kaynaklı zemin sıvılaşması benzeştirilmiştir. Yukarıda açıklandığı üzere iki bileşende oluşan bu sayısal modelin ilk bileşeni ile Biot denklemleri kullanılarak zemin içinde dalga kaynaklı kayma gerilmeleri belirlenmekte, ardından ikinci model bileşeni ile Sümer [1 (bölüm 3)]’te açıklanan yöntem kullanılarak zemin içinde periyot ortalama boşluk suyu basıncı birikimi modellenmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen sayısal model kullanılarak Sumer ve diğerleri [4] tarafından yapılan deneyler benzeştirilmiştir. Çalışmada özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Borunun uzak alanındaki boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma davranışı açısından model ve deneyler sonuçları ile uyum içindedir.
- Sayısal model, gömülü boru cidarının pürüzlü veya pürüzsüz olması durumunu gerçekçi biçimde benzeştirebilmektedir. Hem pürüzsüz hem de pürüzlü borunun altında ölçülen boşluk suyu basıncı için model sonuçları deneyler ile çok iyi örtüşmektedir. Pürüzsüz cidarlı borunun deniz tabanındaki varlığı dalga kaynaklı sıvılaşma riskini arttırırken, pürüzlü boru durumunda aynı etki gözlemlenmemektedir.
- Model ayrıca gömülü borunun çevresinde (altta ve üstte) oluşan boşluk suyu basıncını, pürüzlü yüzey sınır koşulu için başarılı bir şekilde benzeştirebilirken, pürüzsüz borunun üstünde ve yanında ölçülen boşluk suyu basıncı, deneylere nispetle model sonuçlarında daha yüksektir.

Sonuç olarak geliştirilmekte olan model, gömülü yapılar etrafında dalga kaynaklı deniz tabanı sıvılaşması riskinin belirlenebilmesi için pratik uygulamalarda fayda sağlayacaktır.

## **Semboller**

- $c_v$  : Konsolidasyon katsayısı  
 $D_r$  : Zeminin bağıl (görel) yoğunluğu  
 $d$  : Zemin derinliği  
 $f$  : Kaynak terimi  
 $G$  : Zeminin kayma (shear) modülü  
 $H$  : Dalga yüksekliği  
 $h$  : Su derinliği  
 $k$  : Zeminin permeabilite (geçirgenlik katsayısı)

$k_0$	: Zeminin yanıl toprak basıncı
$N$	: Dalga sayısı
$N_i$	: Sıvılaşmaya neden olan çevrim sayısı
$n$	: Zeminin porozitesi
$p$	: Salınlımlı (faz çözümlü) boşluk suyu basıncı
$\bar{p}$	: Kümülatif boşluk suyu basıncı
$p_b$	: Çamur tabakasına (mudline) etkiyen dalga basıncı
$T$	: Dalga periyodu
$\alpha$	: Ampirik katsayı (model sabiti)
$\beta$	: Ampirik katsayı (model sabiti)
$\gamma'$	: Zeminin su altı özgül ağırlığı
$\nu$	: Poisson oranı
$\sigma'_0$	: Zeminin efektif gerilmesi
$\tau_{amp}$	: Tekrarlı (cyclic) kayma gerilmesi genliğı

#### Kaynaklar

1. Sumer, B.M. *Liquefaction Around Marine Structures (With CD-ROM)*. World Scientific, Singapore (2014).
2. Sumer B.M. and Cheng, N.-S. "A random-walk model for pore pressure accumulation in marine soils." *Proceedings of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-99*. Vol. 1: pp. 521-528. Brest, France, May30-June 4, 1999.
3. Cheng, L., Sumer, B. M., Fredsøe, J., Hu, Y. "Wave-Induced Liquefaction Around A Buried Pipeline." *The 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics (ISSMGE)*. pp. 577-583. Auckland, NZ, 2004.
4. Sumer, B. M., Truelsen, C., Fredsøe, J. "Liquefaction around pipelines under waves." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* Vol. 132 No: 4 (2006): pp. 266-275.
5. Dunn, S. L., Vun, P. L., Chan, A., Damgaard, J. S. "Numerical modeling of wave-induced liquefaction around pipelines." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* Vol: 132 No:4 (2006): pp. 276-288.
6. Zhao, H. Y., Jeng, D. S., Liao, C. C. "Parametric study of the wave-induced residual liquefaction around an embedded pipeline." *Applied Ocean Research* Vol: 55 (2006): pp. 163-180.
7. Rønby, J. "Openfoam library for soil mechanics." (2013) <https://github.com/roenby/soilFoam>.
8. Sumer, B. M., Kirca, V. S. O., Fredsøe, J. "Experimental validation of a mathematical model for seabed liquefaction under waves." *International Journal of Offshore and Polar Engineering* Vol: 22 No: 2 (2012): pp. 133-141.

9. Shanmugasundaram, R. K., Rusche, H., Windt, C., Kirca, Ö., Sumer, M., & Goseberg, N. (2022). Towards the Numerical Modelling of Residual Seabed Liquefaction Using OpenFOAM. *OpenFOAM® Journal*, 2, 94-115.
10. Yılmaz, S. U. (2022). *Numerical modelling of wave induced soil liquefaction around buried pipelines and cables/ Gömülü borular ve kablolar etrafında dalga kaynaklı zemin sıvılaşmasının sayısal modellenmesi* (Tez No: 708782) [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>



## Açık Deniz Yüzer Rüzgar Türbinlerinin Hidrodinamik Davranışının Araştırılması

Yalçın YUKSEL<sup>1</sup>, Esin ÇEVİK<sup>2</sup>, Bülent BAYRAM<sup>3</sup>, Hüseyin YILMAZ<sup>4</sup>, Serdar BEJİ<sup>5</sup>, Burak AKPINAR<sup>6</sup>, Havva Anıl GÜNER<sup>7</sup>, Yeşim ÇELİKOĞLU<sup>8</sup>, Mehmet ÖZTÜRK<sup>9</sup>, Cihan ŞAHİN<sup>10</sup>, Tolga BAKIRMAN<sup>11</sup>, Ferdi ÇAKICI<sup>12</sup>, Deniz BAYRAKTAR<sup>13</sup>, Fulya İŞLEK<sup>14</sup>, Umutkan İNAL<sup>15</sup>, M. Utku ÖĞÜR<sup>16</sup>

### ÖZET

Yenilenebilir enerji son yıllarda önemini artırmaktadır. Çünkü gerek iklim değişikliği gerekse dünya kaynaklarının her geçen gün azalması bu tür enerji kaynaklarına yönelik çalışmalarını önemli hale getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi özellikle gelişmiş ülkelerde yatırımın en fazla yapıldığı enerji yatırımları arasında sayılmaktadır. Rüzgar enerjisindeki verimliliğin artırılması amacıyla yatırımlar özellikle kıyı ve açık deniz alanlarında planlanmaktadır. Bu amaçla araştırmalar yerleşim yoğunluğunun fazla olduğu kıyı alanlarından ziyade enerji potansiyelinin daha fazla olduğu açık denizlerde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, açık deniz koşullarında planlanabilecek yüzer platform tipi rüzgar türbinlerinin dalga etkisinde hidrodinamik davranışının deneysel olarak incelenmesi önerilmiştir. Deneyler için dalga baseninde üç boyutlu olarak model kurulması planlanmıştır. Bu çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında kurulu bulunan üç boyutlu dalga

- 
- 1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - yalcinyksl@gmail.com
  - 2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cevik@yildiz.edu.tr
  - 3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - bulentbayram65@gmail.com
  - 4 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - hyilmaz@yildiz.edu.tr
  - 5 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - sbeji@itu.edu.tr
  - 6 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - bakpinar@yildiz.edu.tr
  - 7 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - aari@yildiz.edu.tr
  - 8 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - ycelik@yildiz.edu.tr
  - 9 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - meozturk@yildiz.edu.tr
  - 10 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cisahin@yildiz.edu.tr
  - 11 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - bakirman@yildiz.edu.tr
  - 12 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - fcakici@yildiz.edu.tr
  - 13 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - bayraktard@itu.edu.tr
  - 14 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - fislek@yildiz.edu.tr
  - 15 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - umutkan.inal@yildiz.edu.tr
  - 16 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - utku.ogur@std.yildiz.edu.tr

baseninde bir platformun farklı düzensiz dalga koşullarındaki davranışının incelenmesi amacıyla fiziksel model ölçeğinin nasıl belirleneceği ve ölçüm teknikleri anlatılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir Enerji, Rüzgar Türbini, Yüzer Yapıların Hidrodinamiği, Rüzgar Enerjisi.

## ABSTRACT

### **Investigation of the Hydrodynamic Behavior of Floating Offshore Wind Turbines**

The importance of renewable energy has increased in recent years. Because of both climate change and the decrease in the world's resources day by day, studies on such energy resources have become important. Among the renewable energy sources, wind energy is one of the most invested energy sources, especially in developed countries. In order to increase efficiency in wind energy, investments are planned especially in coastal and offshore areas. For this purpose, researchers are concentrated in the offshore here the energy potential is higher, rather than in the coastal areas where population density is high. In this study, it is proposed to experimentally investigate the hydrodynamic behavior of floating platform-type wind turbines, which can be planned in offshore conditions, under wave action. For the experiments, it is planned to establish a three-dimensional model in the wave basin. In this study, it is explained how to determine the physical model scale and measurement techniques in order to examine the behavior of a platform in different irregular wave conditions in the three-dimensional wave basin established in the Yildiz Technical University Hydrodynamics Research Laboratory.

**Keywords:** Renewable energy, Wind turbine, Hydrodynamics of floating structures, Wind Energy.

## GİRİŞ

Geçmişten günümüze toplumlar basit ihtiyaçlarını karşılayabilmek için enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Gelişmiş ve refah seviyesi yüksek bir uygarlık olmanın temelinde yüksek enerji üretimi ve bunun efektif bir biçimde dağıtılıp kullanılması yatmaktadır. Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve nüfus artışı enerjiye duyulan talebi hızla arttırmıştır. Bu talebi karşılayabilmek için 18. yüzyıldan beri medeniyetler arası fosil kökenli enerji kaynakları üzerinde yoğunlaşan bir rekabet söz konusudur. Ancak yapılan araştırmalar yenilenemez bir enerji kaynağı olan fosil kaynakların yakın gelecekte rezervlerinin tükeneceğini öngörmektedir. Dolayısıyla enerji üretiminin sürdürülebilirliği için yenilenebilir enerji gelişmiş medeniyetler için hayati önem taşımaktadır.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları üzerine çalışmalar artmıştır. Rüzgar enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında en popüler olanıdır ve özellikle son on beş yıldır açık deniz koşullarında rüzgar enerji türbinleri ön plana çıkmıştır. Wua vd. (2019) açık deniz rüzgar türbinlerinin temel tasarımı üzerine bugüne kadar yapılan çalışmaları özetlemiştir [1]. Bu çalışmada açık deniz rüzgar türbinlerinin sığ su koşullarından derin su koşullarına kadar olan temel sistemleri sınıflandırılmış ve özellikleri verilmiştir. Açık deniz rüzgar türbinlerinin temel sistemlerinin son yıllarda en önemli araştırma konularından biri olduğu anlatılmış ve gelişime açık olduğu belirtilmiştir.

Yong-sheng vd. (2018) tarafından tension-leg tipi yüzer rüzgar türbinleri üzerine yapılan deneysel çalışmada açık deniz rüzgar türbinlerinin en büyük rüzgar enerji potansiyeline sahip olduğu anlatılmıştır [2]. 1/50 ölçekli bir açık deniz türbin modeli kullanılarak sakin su, düzensiz dalga, rüzgar dalga ve akıntı kombinasyonu altında testler yapılmıştır. Testlerin sonucunda modelin doğal periyodu, sönüm, hareketin davranış genlik operatörleri ve tendon gerilmeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece sonraki çalışmalar için esaslar oluşturulmuştur. Martin vd. (2014) açık deniz

platformlarının rüzgar/dalga basen testlerinde kullanılacak modelleme yöntemleri üzerinde çalışmıştır [3]. Özellikle bu tip modellerin Fr (Froude) ve Re (Reynolds) model ölçek etkilerini araştırmışlar ve Re model ölçeklerinin ihmal edilmesi ve Fr model ölçeğinin kabul edilmesiyle ortaya çıkacak ölçek etkilerini tartışmışlardır.

Bu çalışmada, deniz üstü yüzer rüzgar türbinlerinin yerleştirilecek konumlarında etkisinde kalacakları potansiyel rüzgar ve dalga parametreleri belirlenerek fiziksel model koşullarının nasıl elde edilmesi gerektiği anlatılmıştır. Ayrıca kurulacak fiziksel model için ölçüm yöntemleri özetlenmiştir.

## **AMAÇ**

Bu çalışmanın temel amacı, açık deniz koşullarında planlanabilecek yüzer platform tipi rüzgar türbinlerinin dalga etkisinde hidrodinamik davranışının deneysel olarak incelenmesidir. Deneyler için dalga baseninde üç boyutlu olarak model kurulması planlanmıştır. Bu amaçla, Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında kurulu bulunan üç boyutlu dalga baseninde değişken konik dubalara sahip bir platformun farklı düzensiz dalga koşullarındaki davranışının incelenmesi amacıyla fiziksel model ölçeğinin nasıl belirleneceği ve ölçüm teknikleri anlatılmıştır.

## **POTANSİYEL RÜZGAR VE DALGA ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ**

Karadeniz rüzgar iklim analizleri, bir tarihsel ve iki gelecek dönem olmak üzere üç farklı zaman periyodunda araştırılmıştır. Araştırmalar, 1979–2018 tarihsel, 2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek için gerçekleştirilmiştir. Gelecek yıllara ait rüzgar iklimi ile ilgili yapılan analizler hem RCP4.5 hem de RCP8.5 bölgesel iklim senaryoları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Karadeniz çalışma alanı üzerindeki tarihsel rüzgar iklimi, yaygın olarak kullanılan iki yeniden analiz verileri ile 1979–2018 yılları için araştırılmıştır. Bunlar, 0.25°x0.25° uzamsal ve 6 saat zamansal çözünürlük ile ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) tarafından üretilen ERA-Interim ve 0.5°x0.5° uzamsal ve 1 saat zamansal çözünürlük ile NCEP (Climate Forecast System Reanalysis)'den elde edilen CFSR rüzgar verileridir. Bu çalışmada, deniz yüzeyinden 10 m yükseklikteki u ve v rüzgar hız bileşenleri dikkate alınmıştır. ERA-Interim ve CFSR yeniden analiz verilerinin doğruluğu ve güvenilirliği dünya üzerindeki birçok çalışma alanı için sayısız araştırmacı tarafından defalarca kanıtlanmıştır (Karadeniz için Islek vd. (2020, 2021), Akdeniz için Yuksel vd. (2020), Marmara için Yuksel vd. (2021), İber Yarımadası Bölgesi için Carvalho vd. (2012), Antarktika Kıtası için Bromwich vd. (2011), Güney Atlantik Avrupa ve Akdeniz için Menendez vd. (2011), İskandinavya için Jimenez vd. (2011), Endonezya için Tabata vd. (2011)) [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

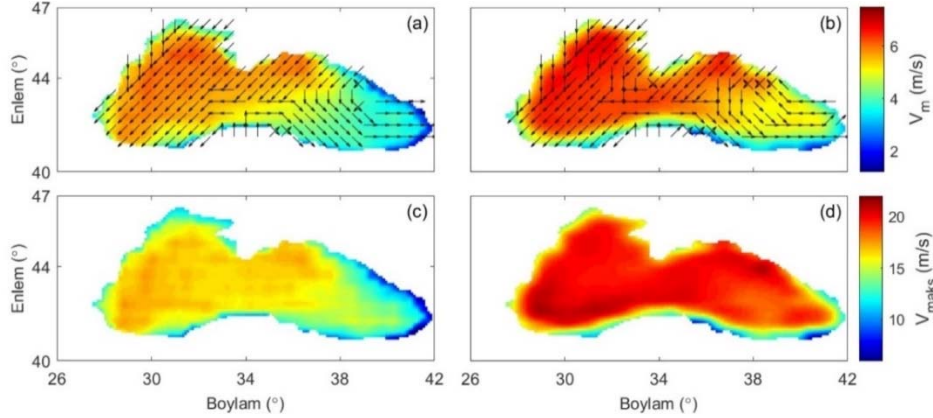
Şekil 1'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan rüzgar hızının uzun dönemli (40 yıllık) ortalama ( $V_m$ ) ve maksimum ( $V_{maks}$ ) değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Genel olarak ortalama rüzgar hızının uzamsal dağılımları iki yeniden analiz rüzgar verisi için benzerdir. Her iki yeniden analiz verisine göre Batı Karadeniz doğusuna kıyasla daha şiddetli rüzgarlara maruz kalmaktadır. Ancak CFSR verileri ile hesaplanan ortalama ve maksimum rüzgar değerlerinin ERA-Interim rüzgar verileri ile elde edilen değerlerden biraz daha yüksektir.

Batı Karadeniz'de ortalama rüzgar hızı ERA-Interim verilerinde 6.26 m/s'ye ulaşırken Doğu Karadeniz'de 1.96 m/s'ye düşmektedir. CFSR verilerinde ise ortalama rüzgar hızı Batı Karadeniz'de 6.78 m/s'ye ulaşırken Doğu Karadeniz'de bu değer 2.11 m/s'ye düşmektedir.

Havzanın batısından doğusuna doğru, her iki rüzgar verisi için de ortalama değerlerin azalması, rüzgar hızının ortalama değerlerinde belirgin bir batı-doğu değişkenliği olduğunu göstermektedir (Şekil 1).

Benzer sonuçlar, maksimum rüzgar hızı için de elde edilmiştir; ERA-Interim verileri için maksimum rüzgar hızı 17.57 m/s'yi, CFSR verilerinde ise 21.30 m/s'yi aşmaktadır. Havzanın doğusuna kıyasla batısında daha büyük maksimum rüzgar hızı tespit edilmesine karşın, Doğu Karadeniz'de Batı Karadeniz ile kıyaslanabilecek kadar yüksek maksimum rüzgar hızlarının olduğu saptanmıştır. Bu sonuç, Doğu Karadeniz'in değişken rüzgar koşullarına, Batı Karadeniz'in ise enerjik ve stabil rüzgar koşullarına maruz kaldığını göstermektedir.



**Şekil 1** - 1979–2018 yılları için (a, c) ERA-Interim, (b, d) CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan  $V_m$  ve  $V_{maks}$  parametrelerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları.

1979–2018 yılları için Karadeniz rüzgar gücü potansiyeli ERA-Interim ve CFSR yeniden analiz rüzgar verileri kullanılarak araştırılmıştır. İlk olarak, bir rüzgar türbininin motor göbek yüksekliği belirlenmiştir. Letcher (2017) ve Ganea vd. (2018) açık deniz rüzgar türbinlerinde, tipik motor göbek yüksekliğinin yaklaşık 100 m olduğunu belirtmişlerdir [13], [14]. Bu çalışmada, 100 m yükseklikteki rüzgar gücü potansiyeli dikkate alınmış ve deniz seviyesinden 10 m yükseklikte rüzgar hızlarından, motor göbek yüksekliğindeki (100 m) rüzgar hızlarına logaritmik hız profili ifadesi kullanılarak geçilmiştir. Bu yaklaşıma göre rüzgar hızı, yükseklikle yaklaşık olarak logaritmik arttığı kabul edilmektedir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir ([15], [16]).

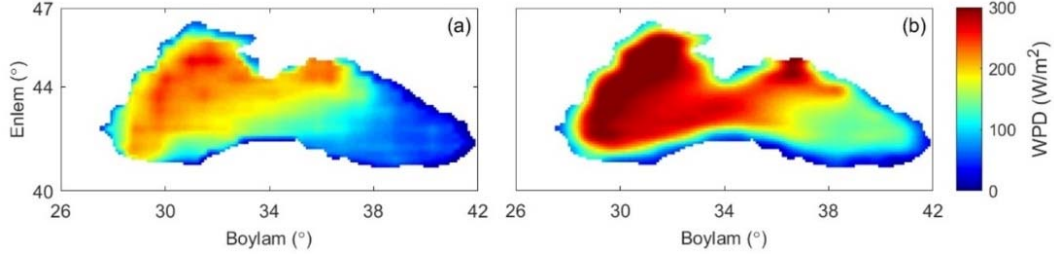
$$U_{100} = U_{10} \left[ \frac{\ln(z_{100}/z_0)}{\ln(z_{10}/z_0)} \right] \quad (1)$$

burada  $U_{100}$  ve  $U_{10}$  sırasıyla 100 m ve 10 m yükseklikteki rüzgar hızını,  $z_0$  ise 0.0002 m olarak dikkate alınan yüzey pürüz yüksekliğini göstermektedir [14], [17]. 100 m yükseklikteki rüzgar gücü yoğunluğu WPD (Wind Power Density,  $W/m^2$ ),  $\rho$  havanın özgül kütlesi ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ) ve 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı ( $V_m$ ) kullanılarak aşağıda verilen ifade yardımıyla hesaplanmıştır.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho V_m^3 \quad (2)$$

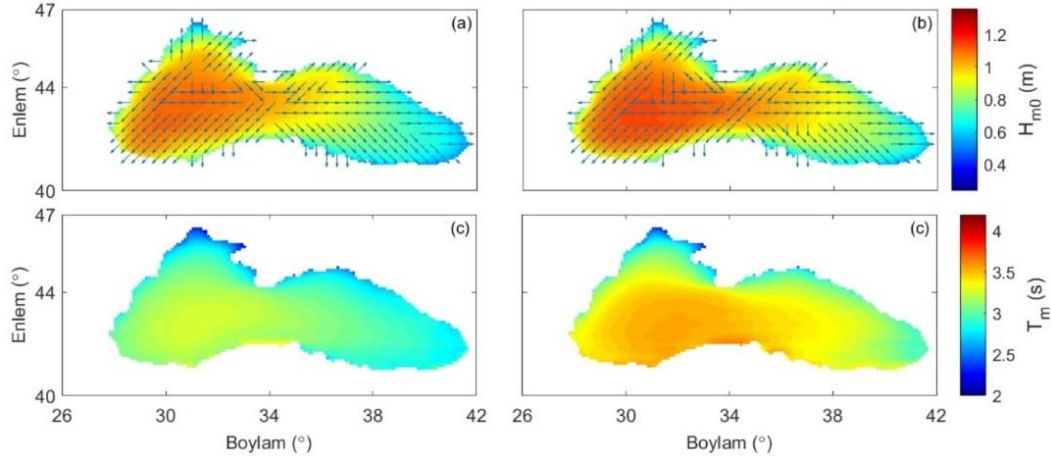
Şekil 2'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR verileri ile 1979–2018 yılları için belirlenen ortalama rüzgar hızından hesaplanan WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

Rüzgar hızının uzamsal dağılımlarında olduğu gibi (Şekil 2 a ve b), Batı Karadeniz'in rüzgar gücü potansiyeli havzanın diğer bölgelerine kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Batı Karadeniz hem ERA-Interim hem de CFSR verilerinde daha şiddetli rüzgarlara maruz kaldığından bu bölgenin rüzgar gücü açısından daha enerjik olduğu söylenebilmektedir. CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ortalama rüzgar gücünün ( $178 \text{ W/m}^2$ ), ERA-Interim ( $130 \text{ W/m}^2$ ) verileri ile hesaplanandan yaklaşık %37 daha büyük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2 - 1979–2018 yılları için (a) ERA-Interim, (b) CFSR rüzgar verileri ile hesaplanan ortalama WPD'nin Karadeniz çalışma alanı üzerinde uzamsal dağılımları.

Tarihsel dönemdeki Karadeniz dalga iklimini araştırmak için gerekli olan dalga parametreleri (belirgin dalga yüksekliği  $H_{m0}$  ve ortalama dalga periyodu  $T_m$ ) 1979–2018 yılları için ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımından elde edilmiştir. Şekil 3'de sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ( $H_{m0}$ ) ve ortalama dalga periyodu ( $T_m$ ) parametrelerinin uzun dönemli ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3 - (a, c) ERA-Interim ve (b, d) CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen  $H_{m0, \text{ort}}$  ve  $T_{m, \text{ort}}$  dalga parametrelerinin 1979–2018 yılları için 40 yıllık ortalamalarının Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları.

Şekil 3 (c ve d) hem ERA-Interim hem de CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen ortalama  $T_m$  değerlerinin birbirine benzer olarak 1.6 sn ile 3.6 sn arasında değiştiği belirlenmiştir. Ancak CFSR rüzgar girdileri ile elde edilen ortalama  $T_m$  değerlerinin ERA-Interim rüzgar girdileri ile elde edilen değerlerden biraz daha büyük olduğu Şekil 3 (c ve d)'de verilen uzamsal dağılım grafiğinden açıkça gözlenmektedir.

ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile modelden elde edilen dalga parametrelerine dayanarak, 1979–2018 yılları için Batı Karadeniz'in, özellikle Güneybatı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha büyük dalga yüksekliğine ve daha uzun periyotlu dalgalara maruz kaldığı ve dolayısıyla daha enerjik dalga koşullarına sahip olduğu söylenebilmektedir.

1979–2018 yıllarındaki Karadeniz dalga gücü potansiyeli ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri ile SWAN yazılımından elde edilen dalga parametreleri ( $H_{m0}$ ,  $T_{mm-1,0}$ ) kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, dalga gücü aşağıda verilen ifadeye göre hesaplanmıştır [18], [19].

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (3)$$

burada P dalga gücünü,  $H_s$  ( $H_{m0}$ ) belirgin dalga yüksekliğini,  $T_e$  ( $T_{mm-1,0}$ ) enerji periyodunu,  $\rho$  Karadeniz'in özgül kütleini ( $\approx 1015 \text{ kg/m}^3$ ) ve  $g$  yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Denklem (3) sadeleştirilirse aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$P = 0.486 H_s^2 T_e \quad (4)$$

Denklem 4'ten dalga gücünün, dalga periyoduna ve belirgin dalga yüksekliğine bağlı olduğu ve belirgin dalga yüksekliğinin karesi ile ilişkili olduğundan belirgin dalga yüksekliği değişikliklerine daha hassas olduğu görülmektedir.

Şekil 4'te sol panel ERA-Interim ve sağ panel CFSR rüzgar girdileriyle modelden elde edilen dalga parametreleri ile 1979–2018 yılları için hesaplanan dalga gücünün 40 yıllık ortalama maksimum ve 40 yıllık ortalama değerlerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımlarını göstermektedir.

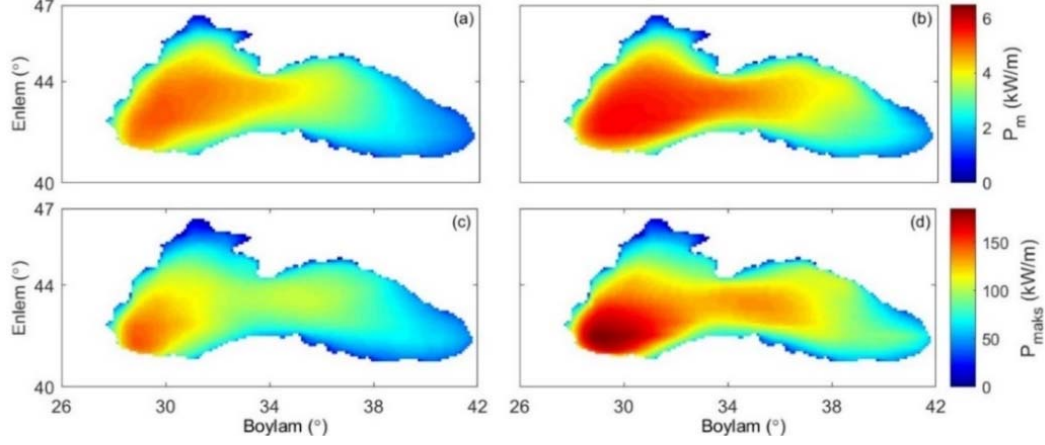
Şekil 4 (a ve b)'den, Batı Karadeniz'in havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek dalga gücüne sahip olduğu açıkça gözlenmektedir. Güneybatı Karadeniz'de, ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan ortalama dalga gücü değerlerinin sırasıyla  $5.17 \text{ kW/m}$  ve  $5.64 \text{ kW/m}$  değerlerine ulaştığı, Doğu Karadeniz'de bu değerlerin ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için sırasıyla  $1.05 \text{ kW/m}$  ve  $1.33 \text{ kW/m}$ 'ye düştüğü, en düşük değerlerin ise Kuzeybatı Karadeniz'de olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, Batı Karadeniz'in, özellikle Güneybatı Karadeniz'in, havzanın diğer kısımlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek dalga gücü potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4 (c ve d),  $P_{\text{maks}}$  değerlerinin Batı Karadeniz'de havzanın diğer bölgelerine kıyasla daha yüksek olduğunu ve yüksek değerlerin özellikle Güneybatı Karadeniz'de yoğunlaştığını göstermektedir. Maksimum dalga gücünün Güneybatı Karadeniz'de ERA-Interim ve CFSR rüzgar girdileri için en yüksek değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

ERA-Interim rüzgar girdileri için modelden elde edilen dalga parametreleri ile hesaplanan dalga gücünün hem ortalamalarının hem de maksimumlarının uzamsal dağılımları CFSR rüzgar girdileri ile elde edilenlere benzer olmasına karşın, değerlerin CFSR rüzgar girdileri ile elde edilenlerden biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir. Benzer sonuçlar rüzgar hız verilerinde de belirlenmiştir. Bu sonuç, rüzgar girdileri arasındaki farklı uzamsal ve zamansal çözünürlüğün etkisini göstermekte ve modele girilen rüzgar verilerinin önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, detaylı analizler için Karadeniz'in güneybatısından belirlenen proje bölgesi ( $30^\circ \text{ E}$ ;  $41.6^\circ \text{ N}$ ) rüzgar karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde havzanın diğer taraflarına göre daha şiddetli rüzgar hızına, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük değişim katsayına sahiptir [4]. Bu durum rüzgar hızının yüksek ama aynı zamanda ortalamaya göre daha az değişkenlik gösterdiği kritik bir durumu temsil etmektedir [4]. Dalga karakteristikleri bakımından değerlendirildiğinde proje bölgesi, rüzgar karakteristiklerine benzer şekilde, daha büyük dalga yüksekliğine, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük değişim katsayısına sahiptir. Bu sonuç,

proje bölgesinin dalga yüksekliğinin büyük ve aynı zamanda ortalamaya göre fazla değişkenlik göstermeyen enerjik dalgalara maruz kaldığını göstermektedir [5]. Bu çalışmada detaylı analizler için dikkate alınana proje bölgesi Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 4 - (a, c) ERA-Interim ve (b, d) CFSR rüzgar girdileriyle modellenen elde edilen dalga parametreleri için 1979–2018 yılları için hesaplanan (a, b)  $P_m$  ve (c, d)  $P_{maks}$  parametrelerinin Karadeniz çalışma alanı üzerindeki uzamsal dağılımları.



Şekil 5 - Çalışma alanı ve detaylı yerel analizler için seçilen proje bölgesi (30.0° E; 41.6° N)

Ayrıca çalışma bölgesindeki rüzgar hızı ve belirgin dalga yüksekliği için ekstrem değer analizi, tarihsel (1979–2018) ve gelecek dönemler (2021–2100) için GEV (Generalized Extreme Distribution) dağılımına göre incelenmiştir.

## FİZİKSEL MODEL VE DENEY KOŞULLARI

Deniz üstüne yerleştirilebilecek bir yüzer rüzgar türbininin hidrodinamik davranışının belirlenmesi için gerçekleştirilecek fiziksel model çalışmasında izlenecek yöntem aşağıda sıralanmıştır;

1-Sırf dalga halinde şamandıranın stabil yüzme durumu; Islek vd. (2020) tarafından 40 yıllık rüzgar verisi analiz edilerek gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen dalga iklimi kullanılarak, Batı Karadeniz'e ait ortalama belirgin dalga yüksekliği, maksimum dalga yüksekliği (farklı yineleme dönemleri için; 1, 10, 20 ve 50 yıl) için türbinin yüzme durumunda yaptığı hareketler ölçülecektir [4].

2-Sırf rüzgar halinde şamandıranın stabil yüzme durumu; Islek vd. (2021) 40 yıllık rüzgar verileri analiz edilerek gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen ortalama ve farklı yineleme dönemlerine ait ekstrem rüzgar koşulları modellenerek şamandıranın sakin su koşullarındaki yapacağı hareketler ölçülecektir [5].

3-Rüzgar ve dalga koşulları birlikte şamandıranın yüzme durumu; Birinci ve ikinci adımlardaki rüzgar ve dalga koşullarının kombinasyonu modellenerek şamandıranın yapacağı hareketler ölçülecektir.

Çalışmada Froude ölçek kanunu kullanılmıştır. Model ölçeği 1/50 dir. Tüm deneyler prototipte 50 m derinliğe karşılık gelen 1m model su derinliğinde gerçekleştirilecektir.

Islek vd. (2020 ve 2021) tarafından (30° E; 41.6° N) proje alanında belirlenen rüzgar ve dalga uzun dönem dalga istatistiği verileri kullanılarak, model ölçeğine Froude benzeşimi kullanılarak geçilmiş ve deneylerde kullanılacak rüzgar ve dalga koşulları Tablo 1 ve 2'de verilmiştir [4], [5].

**Tablo 1 - Prototip ve model için dalga koşulları**

Durum	Prototip				Model			
	H <sub>m0</sub> (m)	L <sub>m</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	H <sub>m0, m</sub> (m)	L <sub>m</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)
1 (ort)	1.039	20.6	3.63	4.54	0.02	0.41	0.51	0.64
2 (1 yıl)	4.03	66.82	6.55	8.18	0.08	1.33	0.92	1.15
3 (10 yıl)	7.48	120.13	8.78	10.98	0.15	2.40	1.24	1.55
4 (50 yıl)	8.63	137.9	9.40	11.75	0.17	2.76	1.32	1.65
5 (100 yıl)	9.09	145.01	9.64	12.05	0.18	2.90	1.36	1.70

**Tablo 2 - Prototip ve model için rüzgar koşulları**

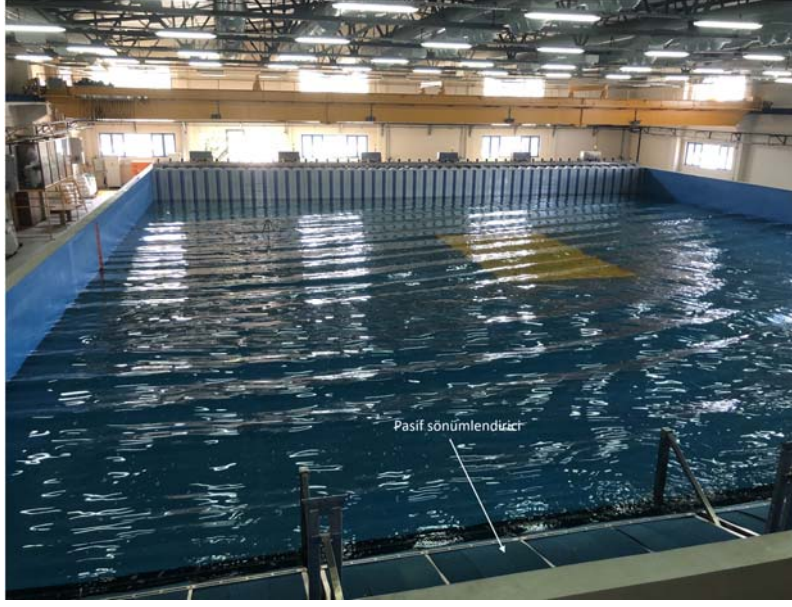
Durum	Prototip	Model
	V <sub>m</sub> (m/s)	V <sub>m</sub> (m/s)
1 (ort)	5.629	0.8
2 (1 yıl)	16.28	2.30
3 (10 yıl)	22.30	3.1
4 (50 yıl)	24.73	3.49
5 (100 yıl)	25.78	3.63



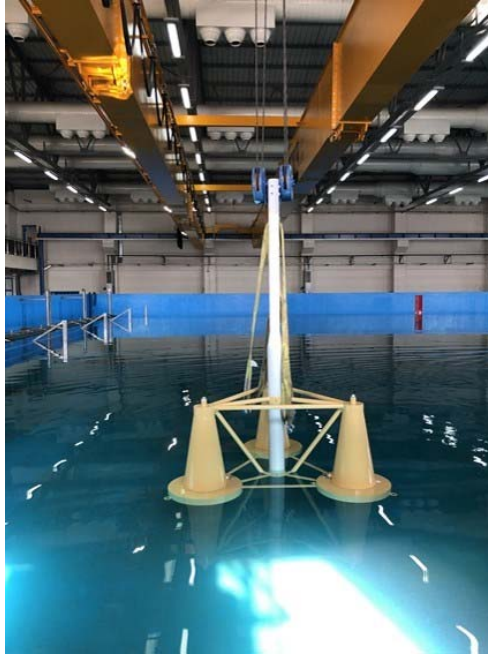
## **DENEYSEL ÇALIŞMA**

Deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi “Hidrodinamik Araştırma Laboratuvarında” kurulu bulunan 30.43 m uzunluğunda 28.85 m genişliğinde ve 2.20 m derinliğindeki dalga baseninde yapılacaktır (Şekil 6).

Şekil 7’de görülen yüzer rüzgar türbin modeli yarı batık (semi-submersible) ve tabana üç noktadan bağlanan tiptedir. Model ölçeği 1/50 seçilmiştir.



**Şekil 6 - Dalga baseni genel görünüm**



**Şekil 7 - 1/50 ölçekli model yüzer rüzgar türbini görünümü**

Dalga baseninde yüzer platformun altı serbestlik derecesi ölçülecektir. Ölçüm işlemlerinde kullanılacak ölçüm sistemleri;

1-IMU (inertial measurement unit); Yüzer modelin dönüklük modlarının (yaw, pitch ve roll) ölçülmesini sağlamaktadır.

2-Hızlı Kamera (2 adet); Yüzer modelin lineer hareketleri (surge, sway ve heave) ölçülecektir

3-Load Cell (3 adet); Yüzer modelin bağlantı sistemlerine gelen gerilmeler ölçülecektir.

4-Data loggers; Veri toplama sistemi, load cell'lerden gelen verileri analiz etmektedir.

5-Dalga Probu; Üretilen dalgaların ölçümünü sağlamaktadır.

6-Rüzgar üretici; Yüzer platformun üzerine etki eden rüzgar kuvvetini sağlayan sistemdir.

## **DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR**

Çalışmada, dalga ve rüzgar iklim analizlerinden Karadeniz'in güneybatısında belirlenen proje bölgesi rüzgar karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde havzanın diğer taraflarına göre daha şiddetli rüzgar hızına, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük değişim katsayısına sahiptir. Bu durum rüzgar hızının yüksek ama aynı zamanda ortalamaya göre daha az değişkenlik gösterdiği kritik bir durumu temsil etmektedir. Dalga karakteristikleri bakımından değerlendirildiğinde proje bölgesi, rüzgar karakteristiklerine benzer şekilde, daha büyük dalga yüksekliğine, daha uzun fırtına süresine ve daha düşük değişim katsayısına sahiptir. Bu sonuç, proje bölgesinin dalga yüksekliğinin büyük ve aynı zamanda ortalamaya göre fazla değişkenlik göstermeyen enerjik dalgalara maruz kaldığını göstermektedir. Sonuç olarak gerek rüzgar gerekse dalga için kararlı en yüksek rüzgar ve dalga enerji potansiyeli Güneybatı Karadeniz bölgesinde belirlenmiştir.

Rüzgar ve dalga iklim çalışmasından prototip ölçeğinde belirlenen farklı yinleme periyotlarına ait rüzgar hızı ve dalga yükseklikleri dikkate alınarak 1/50 ölçekli model rüzgar ve dalga parametreleri belirlenmiştir.

Açık deniz yüzer rüzgar türbininin 50 m derinliğe yerleştirileceği planlanmıştır. Model ölçeğinde 3 boyutlu deneysel çalışmaların dalga baseninde 1.0 m su derinliğinde yapılması belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada yüzer sistemin rüzgar ve dalga etkisindeki hidrodinamik davranışında 6 farklı serbestlik derecesinin (İleri-geri gitme (surge), yan öteleme (sway), dalıp-çıkma (heave), baş-kıç vurma (pitch), dervişleme (yaw) ve yalpa (roll) belirlenmesinde hızlı kamera ve IMU sistemleri kullanılacaktır. Yüzer sistemi tabana bağlayan bağlantı kablolarına gelecek kuvvetler ise load cell kullanılarak belirlenecektir.

## **Teşekkür**

Bu çalışma YTÜ FCD-2021-4200 tarafından FCD-2021-4200 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **Semboller**

$\rho$	Havanın özgül kütlesi
$g$	Yerçekimi ivmesi
$H_{m0, ort}$	Ortalama belirgin dalga yüksekliği
$L_m$	Ortalama dalga periyoduna göre salga boyu

$P_m$	Ortalama dalga gücü
$P_{maks}$	Maksimum ortalama dalga gücü
$T_e$	Enerji periyodu
$T_{m,ort}$	Ortalama ortalama dalga periyodu
$T_{mm-1,0}$	Enerji periyodu
$T_p$	Pik dalga periyodu
$U_{10}$	10 m yükseklikteki rüzgar hızı
$U_{100}$	100 m yükseklikteki rüzgar hızı
$V_m$	Ortalama rüzgar hızı
$V_{maks}$	Maksimum rüzgar hızı
WPD	Rüzgar gücü yoğunluğu
$z_0$	Pürüz yüksekliği

### **Kaynaklar**

1. Wua, X., Hu, Y., Lia, L., Yang, J., Duana, L., Wangf, T., Adcockg, T., Jiangh, Z., Gaoi, Z., Lina, Z., Borthwickj, A., Liao, S., “Foundations of offshore wind turbines: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 2019, pp. 379-393.
2. Yong-sheng, Z., Xiao-hec, S., Yan-pinga, H., Jian-mina, Y., Taoa, P., Yu-feng, K., “Experimental Study on New Multi-Column Tension-Leg-Type Floating Wind Turbine”, 32-2, 2018, pp. 123-131.
3. Martin, H. R., Kimball, R. W., Viselli, A. M., Goupee, A. J., “Methodology for Wind/Wave Basin Testing of Floating Offshore Wind Turbines”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136, 2014, pp. 1-9.
4. Islek, F., Yuksel, Y., and Sahin C., “Spatiotemporal long-term trends of extreme wind characteristics over the Black Sea,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 90, 2020, 101132.
5. Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C., and Ari Guner, H.A., “Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea using two different wind fields,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 94, 2021, 101165.
6. Yuksel, Y., Yuksel, Z.T., and Cihan, S., “Performance based design of coastal structures,” *Journal of Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23(4), 2020, 407–416.
7. Yuksel, Y., Yuksel, Z.T., Islek, F., Sahin, C., and Ari Guner, H.A., “Spatiotemporal long-term trends of wind and wave climate and extreme characteristics over the Sea of Marmara,” *Ocean Engineering*, 228, 2021, 108946.
8. Carvalho, D., Rocha, A., Gomez-Gesteira, M., “Ocean surface wind simulation forced by different reanalyses: comparison with observed data along the Iberian Peninsula coast,” *Ocean Model.* 56, 2012, 31–42.
9. Bromwich, D.H., Nicolas, J.P., Monaghan, A.J., “An assessment of precipitation changes over Antarctica and the Southern Ocean since 1989 in contemporary global reanalyses,” *J. Clim.* 24, 2011, 4189–4209.

10. Menendez, M., Tomas, A., Camus, P., Garcia-Diez, M., Fita, L., Fernandez, J., Méndez, F.J., Losada, I.J., “A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources,” OCEANS 2011, IEEE-Spain, 2011, 1–8.
11. Jimenez, B., Moennich, K., Rey, J., Durante, F., “Use of different globally available long-term data sets and its influence on expected wind farm energy yields,” DEWI-Magazin 22, 2011, 14–18.
12. Tabata, Y., Hashiguchi, H., Yamamoto, M.K., Yamamoto, M., Yamanaka, M.D., Mori, S., Syamsudin, F., Manik, T., “Lower tropospheric horizontal wind over Indonesia: A comparison of wind profiler network observations with global reanalyses,” J. Atmos. Sol. Phys. 73, 2011, 986–995.
13. Letcher, T., “Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines, 1st624 ed.; Academic Press/Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 622p, 2017, ISBN 9780128094518.
14. Ganea, D., Mereuta, E., and Rusu, L., “Estimation of the near Future Wind Power Potential in the Black Sea,” Energies 11(11), 2018, 3198.
15. Yamada, T., and Mellor, G.A., “A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data,” Journal of the Atmospheric Sciences, 32(12), 1975, 2309–2329.
16. Kubik, M.L., Coker, P.J., and Hunt, C., “Using meteorological wind data to estimate turbine generation output: a sensitivity analysis,” in: World Renewable Energy Congress-Sweden; Linköping; Sweden, 8-13 May 2011, vol. 057, Linköping University Electronic Press, 2011, pp. 4074–4081.
17. Rusu, L., “The wave and wind power potential in the western Black Sea,” Renewable Energy, 139, 2019, 1146–1158.
18. Rusu, E. and Onea, F. (2016). Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. Renewable Energy, 85, 687–703.
19. Islek, F., and Yuksel, Y., “Inter-comparison of long-term wave power potential in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with two different wind fields,” Dynamics of Atmospheres and Oceans, 93, 2021, 101192.

# Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi İçin Yeni Bir Platform

Elif GİRGIN<sup>1</sup>, Kadir AKTAŞ<sup>2</sup>, Salih AK<sup>3</sup>, Bergüzar ÖZTUNALI ÖZBAHÇECİ<sup>4</sup>,  
Ünver ÖZKOL<sup>5</sup>

## ÖZET

*Bu çalışmada, deniz üstü yüzer rüzgar türbinlerinin hidrodinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma yüzer rüzgar türbinleriyle ilgili ülkemizde gerçekleştirilen ilk küçük ölçekli deneysel model çalışması olma özelliğine sahiptir. Deneyler İYTE İnşaat Mühendisliği, hidrolik laboratuvarındaki 40.0mx1.0mx1.4m boyutlarındaki dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada biri kendi özgün tasarımı, diğeri ise bilinen spar tipinde olan iki farklı yüzer platform kullanılmıştır. Platformda farklı dalga koşullarında oluşan öteleme ve dönmeler ile zincirlere gelen kuvvetler ölçülmüştür. Serbest salınım, statik, yarı statik, ve düzenli ile düzensiz dalga ve rüzgarlı dalga testleri yapılmıştır. Deney sonuçları, özgün platformun özellikle kararlı enerji üretme ve yorulma gibi konular için kritik olan Y yönünde dönme açısından spar platforma göre daha stabil olduğunu göstermiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Deniz üstü rüzgar Türbini, yüzer platform, hidrolik model deneyleri, ANSYS-AQWA.

## ABSTRACT

### *A Novel Platform for Offshore Wind Energy*

*In this study, a new floating platform for the offshore wind turbines was developed to increase stability while decreasing the cost at the same time. Hydraulic model experiments were conducted in a wave channel (40mx1.0mx1.4m) in the hydraulics laboratory of Civil Eng. Dept/IZTECH. In order to compare the performance of the new floating platform, a known and applied floating platform type called spar was also modeled and tested under the same wave and wind conditions. Extensive test series were conducted, including static, quasi-static, free decay, only wave, and wind + wave tests. Experimental results show that the performance of the wind turbine with the new floating platform is better than the spar, especially considering the pitch motion, which is critical for energy generation and fatigue loads.*

**Keywords:** Floating Offshore Wind Turbine, Floating Platform, Hydraulic model experiment, ANSYS-Aqwa.

---

1 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - elifgirgin@iyte.edu.tr

2 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - kaktas@iyte.edu.tr

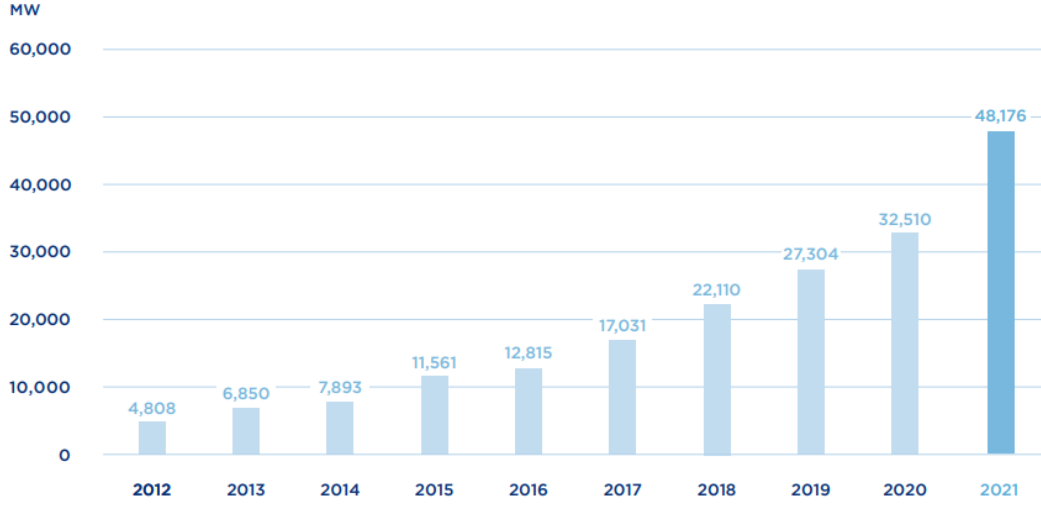
3 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - salihak@iyte.edu.tr

4 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - berguzarozbahceci@iyte.edu.tr

5 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir - unverozkol@iyte.edu.tr

## 1. AMAÇ

Deniz üzerine kurulan rüzgar türbinleri, açık denizde yüksek rüzgar hızlarına daha alçak irtifalarda erişilebildiği için karada kurulu benzerlerine göre daha fazla güç üretebilirler. Bu nedenle 1990'larda Danimarka'da başlayan deniz üstü rüzgar türbinlerinin kurulumu Şekil 1'de gösterildiği gibi her yıl artmaya devam etmektedir. Şekil 1, Global Offshore Wind raporuna göre 2021'de Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi (DÜRE) kurulu gücünün 50GW'a ulaştığını göstermektedir. 2020lere kadar AB ülkelerinin lider olduğu DÜRE kurulu gücünde 2021'de yaptığı atakla Çin öne geçmiştir.



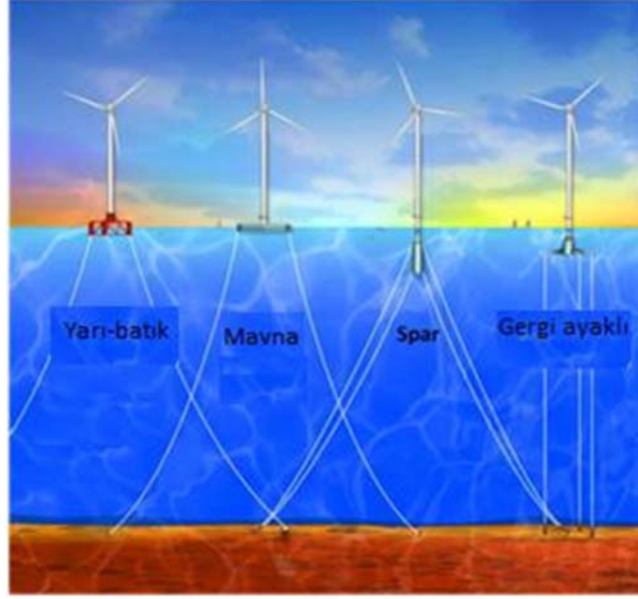
Şekil 1 - Deniz Üstü Rüzgar Enerjisi (DÜRE) kurulu gücünün yıllara bağlı artışı (1)

Dünyada olduğu gibi ülkemiz kara sularının da %80'inde su derinliği 50m'nin üzerindedir (2). 50m'yi aşan derinliklerde türbin direklerini deniz tabanına sabitlemek ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadır. Dolayısı ile türbinleri, deniz üstünde yüzer platformlar üzerine yerleştirilerek kurmak gün geçtikçe daha kabul gören bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Dünya bankası raporuna göre (2) Türkiye denizlerindeki rüzgar enerjisi türbin gücü potansiyelinin 12 GW'ı sabit platformlu, 57 GW'ı yüzer platformlu rüzgar türbinleri için uygun görünmektedir. Yüzer rüzgar türbinleri, sadece rüzgar kuvvetlerinin değil, ayrıca dalga ve akıntılarının yarattığı kuvvetlerin de etkisi altındadır. Türbinlerin üzerine gelen rüzgar ve dalga kaynaklı değişken kuvvetler, türbin sistemini her üç ekseninde doğrusal ve dönme yönünde salınma tabi tutar. Türbinin maruz kaldığı tüm bu salınımlar, özellikle akışkan kaynaklı oldukları için kolayca kararsız bir hal alabilmekte ve kötü bir senaryoda birbirlerini tetikleyici de olabilmektedirler. Bu da hem yüzer türbin tasarımcılarına birçok yeni bilinmeyen parametre getirmekte, hem de yatırımcılar bu türbinlerin güç ve dayanım performanslarının bu aşırı çevre koşulları altında nasıl etkileneceğinden emin olamamaktadırlar.

Bir yüzer rüzgar türbininde hem performans hem de maliyet açısından en kritik bileşen yüzer platformlardır. (3)'te yapılan çalışmaya göre bir yüzer rüzgar türbininin toplam maliyetinin %34'ü yüzer platform ve bağlantılarının maliyetiyken, yalnızca %22'si türbinin kendi maliyetidir. Yüzer rüzgar türbinleri için son 10-15 yılda farklı tipte platformlar geliştirilmiş olsa da, bazı tipik platform geometrieleri bu zaman içinde ön plana çıkmıştır. Bunlar Şekil 2'de gösterilmiştir Şekil 2'de verilen platformlardan mavna tipi suyun kaldırma kuvveti, Spar, balast(dengeleyici ağırlık) prensibi, Gergi ayaklı (TLP) ise yukarı kaldırma kuvvetinin bağlantı kabloları ile dengelenmesi ilkesiyle çalışmaktadır. Yarı batık ise hibrit bir platform olup hem suyun kaldırma kuvveti, hem de balast stabilite ilkelerini kullanmaktadır. Her bir platform tipinin avantajları gibi

dezavantajlarının da olması daha düşük maliyetlerle daha stabil yüzer platform arayışlarının tüm dünyada devam ettiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı kendi özgün yüzer platformumuzu geliştirerek üzerinde rüzgar türbini ve tabana bağlantılarıyla modellenmesi ve hidrolik model deneyleriyle düzenli ve düzensiz dalgalar ve rüzgar koşulları altında hidrodinamik performansının incelenmesidir. Bunun yanında, karşılaştırma yapabilmek amacıyla bilinen spar tipinde bir yüzer platform da modellenmiş aynı dalga ve rüzgar koşulları altında test edilmiştir.



Şekil 2 - Deniz üstü rüzgar türbinleri için yüzer platform tipleri (4)

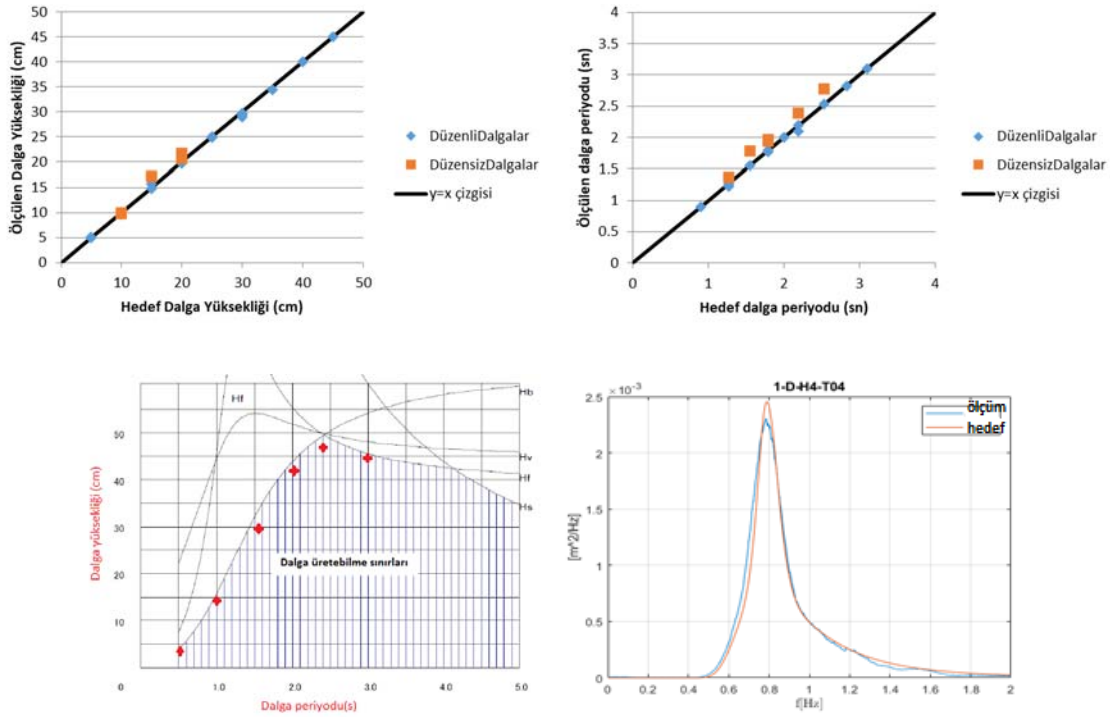
## 2. DENEY DÜZENEGİ

Deneyel çalışma İYTE İnşaat mühendisliği bölümü hidrolik laboratuvarındaki dalga kanalında gerçekleştirilmiştir. Kanal boyutları 40mx1.0mx1.4m olup, kanal sonunda yansımayı önlemek üzere 1/7 eğimde taş tahkimat yapılmıştır. Şekil 3’de dalga kanalının üstten görünüşü verilmiştir.



Şekil 3 - Dalga üreticisinin yerleştirildiği dalga kanalı

Kanal içinde dalga üretebilmek için 5kW'lık bir servo motoru olan piston tipi bir dalga üretici kendimiz tarafından tasarlanmış olup, strok boyu 1.0m, maksimum hızı 0.83 m/sdir. Üretici, hem temel deneylerde kullanmak üzere düzenli (sinüzoidal, dalga yüksekliği ve periyodu sabit) dalgalar, hem de doğada gözlemlenen düzensiz (dalga yüksekliği ve periyodu değişken) dalgaları üretebilmektedir. Deneylerde kullanılacak dalgaları üretmek için dalga özellikleri, su derinliği ve deney süresinin girileceği kullanıcı dostu bir arayüz matlab GUI kullanılarak geliştirilmiştir. Dalga üretimi için kullanıcı önce düzenli veya düzensiz dalga seçeneğini seçmekte ve istediği dalga özellikleri ve çalışma süresini girdikten sonra oluşturulan piston zaman serileri Simulink ile haberleştirilerek dalga üreticinin motoruna gerekli sinyallerin gitmesi sağlanmaktadır. elde edilen piston hareketlerinin istenilen düzenli ve düzensiz dalga profillerini oluşturup oluşturmayacağı ön testlerle kontrol edilmiştir. Kanal içinde oluşan dalga profillerinin ölçmek için rezistans tipi, 60 cm uzunluğundaki dalga ölçerler kullanılmıştır. Dalga ölçerler dalga kanalına yerleştirilerek kalibrasyonu yapılmış ve test çalışması gerçekleştirilmiştir. Test çalışmaları hedeflenen dalga yükseklik ve periyotlarının elde edilebildiği, düzensiz dalgalar için hedef spektrumların yakalanabildiği ve dalga yüksekliği dağılımının Rayleigh dağılımına uyduğunu göstermektedir. Şekil 4 bu test çalışmalarından örnekler sunmaktadır.



Şekil 4 - Düzenli ve düzensiz dalgaların kanalda hedeflendiği gibi oluşturulabildiğini gösteren test sonuçları

### 3. TÜRBİN VE YÜZER PLATFORM MODELLERİ

Rüzgar Türbini için yerli üretici NORTHEL firmasının POYRA-P36 türbini kullanılmıştır. POYRA-36 300 kW gücünde ve 36 m çaptadır. Kanat modeli tasarım ve imalatı konusundaki tüm detaylar (5)'de verilmiştir. 300KW'lık türbinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Rüzgar türbini modellemesinde geometrik boyut,  $\lambda$  çok büyük olduğu için genelde Reynolds boyutlandırılması yapılamaz. Çalışmada dalgaların yarattığı dinamik çok baskın olduğu için Froude boyutlandırılması kullanılmıştır. Dalga kanalının genişliği (1.0m), rüzgar türbinin çapı, kanaldaki maksimum su derinliği (1.0m) gibi kısıtlar düşünülerek model ölçeği  $\lambda=40$  olarak



belirlenmiştir. Kanat modeli 3D yazıcı ile STH filament malzemesi ile yapılmıştır. Şekil 5’de kanatlarıyla imal edilen rüzgar türbini modeli gösterilmektedir.

**Tablo 1** - 300-kW’lık rüzgar türbininin özellikleri

Güç	300 kW
Rotor oryantasyonu, konfigürasyonu	Rüzgara karşı, 3-kanatlı
Rotor çapı	36 m
Hub yüksekliği	39 m
Minimum, Nominal, Maksimum rüzgar hızı	2.9 m/s, 9.98 m/s, 25 m/s
Hub kütlesi	4.42 t
Kanat kütlesi	1.77 t
Kule kütlesi	34.90 t

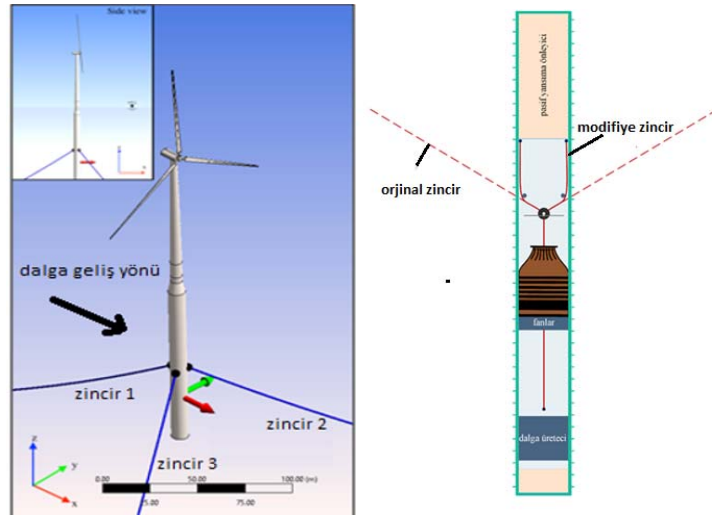


**Şekil 5** - Rüzgar türbini modeli

### 3.1. Spar tipi yüzer platformun tasarımı ve modeli

Spar tipi platform, hem literatürde bilinen ve performans verileri olan bir yüzer platform olması, hem de dalga kanalında hidrolik model deneylerinin yapılabileceği en uygun geometriye sahip olması açısından tercih edilmiştir. 300kW’lık rüzgar türbinini taşıyacak yüzer spar platformun tasarımı için önce parametrik bir çalışma yapılmıştır. Model sayısal olarak test edilmiş, 1/40 ölçekte modellenmiş olup fiziksel deneyleri gerçekleştirmek üzere imalatı yapılmıştır. Sayısal modellemede ANSYS-AQWA programı kullanılmıştır. ANSYS-AQWA; yüzer veya sabitlenmiş açık deniz yapıları, yüzer depolama, üretim ve boşaltım sistemleri (FPSO), yarı batık platformlar, gergi ayaklı platformlar (TLP), gemiler, yenilenebilir enerji sistemleri ve dalgakıran tasarımlarında; dalga, rüzgâr ve akıntının yapıya olan hidrodinamik etkileri ve bu etkilerden dolayı yapının vereceği tepkileri (hareketleri) hesaplama kabiliyeti olan bir mühendislik yazılımıdır (6). 3 boyutlu panel metot ve potansiyel teori tabanında geliştirilmiş olan yazılımda, çözüm yapılan akışkan, ideal olarak kabul edilmektedir. Platformlar ve diğer açık deniz yapılarında kullanılan ince, silindirik elemanların hidrodinamik analizleri içinse Morison elemanları kullanılarak çözümler sunulmaktadır.

Tasarlanan spar tipi yüzer platform modeli 2 mm kalınlığındaki çelikten imal ettirilmiş olup, içi boştur ve balast ağırlığının ayarlanabilmesi için üst tarafında kapak yapılmıştır. Şekil 6'da gösterildiği gibi spar platform deniz tabanına 3 tane, aralarında 120 derece açı olan zincirle katener olarak bağlanmaktadır. Spar modelin dalga kanalına yerleştirilmesi yine Şekil 6'da verilmiştir. Dalga kanalı 1m genişliğinde olduğu için zinciri konfigürasyonunda değişiklik olması gerekmiştir. Dalga yönünde uzanan zincir (zincir 1) olduğu gibi modellenilebilmiştir. Ancak bu zincire 120 derece yapan diğer iki zincirin (zincir 2 ve 3) prototipte olduğu açıda modellenmesine dalga kanalının boyutlarından dolayı imkan yoktur. Bu iki zincir Şekil 6'da görüldüğü gibi modifiye edilmiştir. Bağlantı zincirleri arasındaki açının ve kabloların geometrik ve elastik uyumluluğunun korunması için zincir yönünün değiştiği noktalara Şekil 6'da gösterildiği şekilde dikey sabit kasnak bazlı bir sistem tasarlanmıştır. Zincirler kanal tabanına güçlü mıknatıslarla çapalanmıştır.



Şekil 6 - Tasarımı yapılan spar platform (solda) ve modelde zincirlerin kanal içine yerleştirilmesi (sağda)

### 3.2. Özgün yüzer platformun tasarımı ve modeli

Öncelikle 5MW'lık rüzgar türbinini taşıyacak bir özgün yüzer platformun geliştirilmesi için çalışılmıştır. Çünkü 5MW'lık türbin referans türbin olarak kullanılmakta ve böylece verilerini bulmak mümkün olmaktadır. Ayrıca günümüzde daha büyük kapasiteli (>15MW) rüzgar türbinlerine yönelim vardır. Özgün platformun dalga hareketlerine yeterli dayanımı göstermesinin yanı sıra uygulanabilir ve ekonomik olması amaçlanmıştır. Özgün platform geometrisi Spar platformu gibi yüksek su kesimli platformlar ile büyük su düzlemi alanına yayılan yarı batık platform tiplerinin arasında olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun yanında dalga en fazla su seviyesinde etkili olduğu için, dalga etkilerini minimize etmek amacıyla, platformun batık olması düşünülmüştür. Ayrıca yeni platformun spar platformlara özgü düşük batıp çıkma tepkilerine ve yarı batık platformların düşük baş-kıç vurma tepkilerine sahip olması hedeflenmiştir. Özgün tasarıma dair kavramsal geliştirmelere başlanmış ve stabil ve ekonomik kesiti elde etmek üzere çok detaylı bir optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Seçilen parametreler alt ve üst limitler arasında değiştirilerek 800 kadar farklı tasarım alternatifi elde edilmiş ve performans ile maliyet açısından en uygun olanlar Pareto cephesi uygulanarak seçilmiş ve bu alternatifler önce tabana bağlanma zincirleri olmadan frekans bazında temel hidrodinamik difraksiyon hesaplaması ile ve sonra zincirlerle birlikte zaman bazlı hidrodinamik sayısal model analizleriyle ANSYS-AQWA kullanılarak değerlendirilmiştir. Özgün platform da spar ve yarı batık gibi katener zincirlerle

tabana bağlanmaktadır. Tasarım ve optimizasyon çalışmasında performans açısından hedeflenen kriterler şunlardır:

- 1) Tüm sistem düşey kuvvetler açısından dengede olmalıdır.
- 2) Metacenter  $> 0$  ( $>1m$ ,) olmalıdır (7)
- 3) Rüzgar eğilme açısı operasyonel durumda 6, hayatta kalma durumunda  $12^\circ$  den küçük olmalıdır (6).
- 4) Zincirlerdeki maksimum gerilme /zincirin taşıyabileceği maksimum yük oranı yani zincirin kopma emniyeti 1.27'nin üstünde olmalıdır (8).

Maliyet açısından ise platform toplam maliyetinin (bağlanma zincirleri dahil) 9milyon \$'ın altında olması hedeflenmiştir (9). Bu hedefler ışığında 5MW'lık rüzgar türbinini taşımak için geliştirilen özgün yüzer platformun, deneyde kullanılan 300kW'lık türbini taşıyacak şekilde modifiye edilmesi gerekmiştir. Bunun için, model ölçeğinin 1/40 olması dikkate alınarak, önce 40 m su derinliğinde yerleştirilecek 300 KW'lık rüzgar türbinini taşımaya uygun ve önceki özgün yüzer platformun karakteristik ve performans özelliklerini taşıyan prototip platform geliştirilmiştir. 300 KW için geliştirilen yüzer platform da 5 MW için yapılan tüm aşamalarda geçirilerek, birimsiz tepkileri, farklı dalgalar altındaki performansları ve zincirlere gelen yükler açısından değerlendirilmiştir. 5MW'lık platformda olduğu gibi boyuna ilerleme, dalıp çıkma ve baş-kıç vurmada performanslarının iyi olduğu ve zincirdeki gerilmelerde sorun olmadığı görülmüştür. Daha sonra, 40 m su derinliğine yerleştirilecek 300 kW'lık rüzgar türbinini taşımaya uygun olarak geliştirilen prototip özgün platform 1/40 ölçeğinde küçültülerek deneylerde kullanılmak üzere imal ettirilmiştir. Şekil 7'de özgün platformun kanal içindeki görünümü verilmektedir.

#### 4. DENEYLER VE ÖLÇÜM SİSTEMİ

Hem spar hem de özgün yüzer platform için geniş bir deney seti uygulanmış ve aşağıdaki testler gerçekleştirilmiştir:



Şekil 6 - Özgün Platformun dalga kanalı içindeki görünümü

- Statik testler (ağırlık merkezi ve draft)
- Yarı-statik testler (ötelemeye karşılık zincirde gerilme)
- Serbest salınım testleri
- Düzenli dalga
- Düzenli dalga+rüzgar
- Düzensiz dalga
- Düzensiz dalga+ rüzgar

Düzenli ve düzensiz dalga testlerinde üretilen dalga değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2 - Deneylerde kullanılan dalga özellikleri (prototip değerleri)**

Parametre	Aralık
Dalga yüksekliği	2-12m
Dalga dikliği	0.02, 0.04
Dalga periyodu	5.69s-19.6s
Test sayısı	48

Deneyler sırasında yapılan ölçümler ise Tablo 3’de özetlenmiştir.

**Tablo 3 - Deneylerde yapılan ölçümler ve ölçüm yöntemleri**

Yapılan ölçüm	Ölçüm yöntemi
Kule Üzerine Gelen Kuvvetler	Gerinim Pulu
Türbin ve platformun hareketi	Görüntü İşleme
Zincirlerde oluşan Gerinim	Yük Sensörleri
Rüzgar hız profilleri	Sıcak-Tel Anemometresi
Dalga profili	Dalga ölçerler

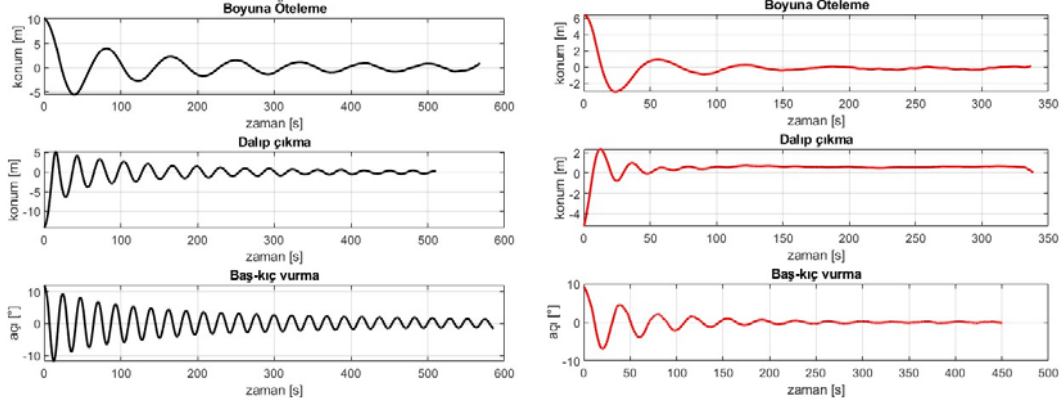
## 5. DENEY SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALAR

Bu bölümde spar ve özgün yüzer platform için deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulacaktır. Karşılaştırmalar üç serbestlik derecesi için verilecektir. Gerçek ortamda yüzer rüzgar türbinleri 6 serbestlik derecesinde deplasman ve dönmeye maruz kalırlar. Ancak deney ortamında dalga tek yönlü olarak geldiğinden yapı X yönünde deplasman (boyuna öteleme, surge), Z yönünde deplasman (dalıp çıkma, heave) ve Y yönünde dönme (baş-kıç vurma, pitch) hareketleri yapmaktadır ve dolayısıyla bu üç serbestlik derecesi etkindir.

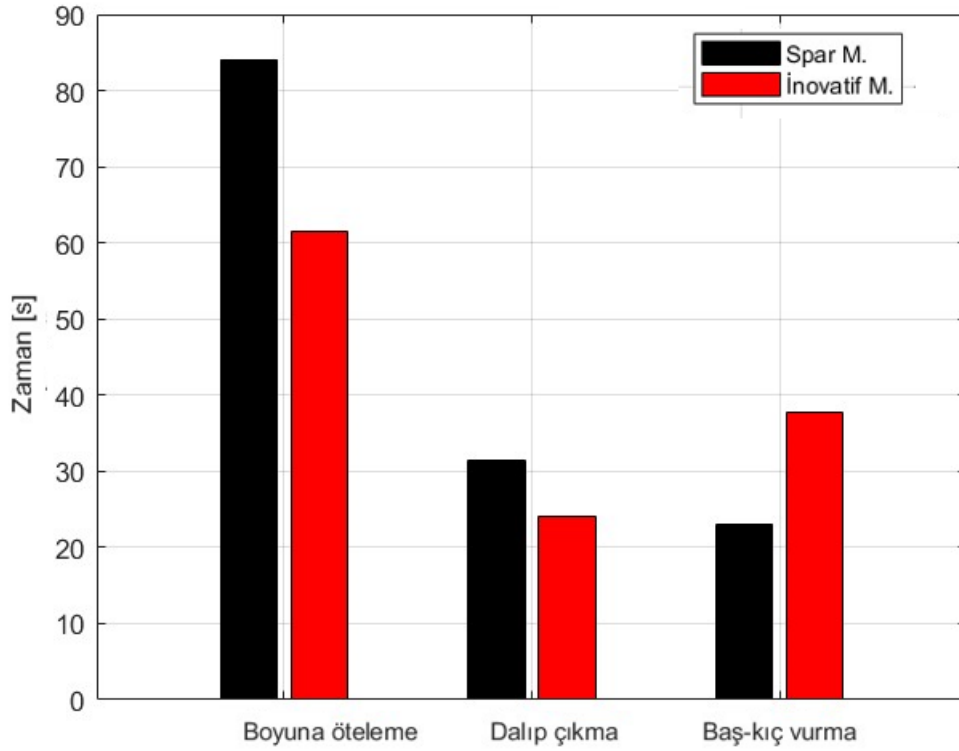
### 5.1. Serbest Salınım

Serbest salınım testlerinde platform X, Z yönlerinde bir ilk deplasman ve Y yönünde bir ilk rotasyona maruz bırakılmakta ve sonra platform ilk denge haline gelene kadar beklenmektedir. Serbest salınım deneyleri yapının sönümlenmesinin ve doğal periyotlarının bulunması için

önemlidir. Şekil 7’de spar ve özgün platform için serbest salınım test sonuçları gösterilirken, Şekil 8’de her iki platform için de doğal periyotlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 7 - Spar (sol) ve özgün platform (sağ) için serbest salınım test sonuçları

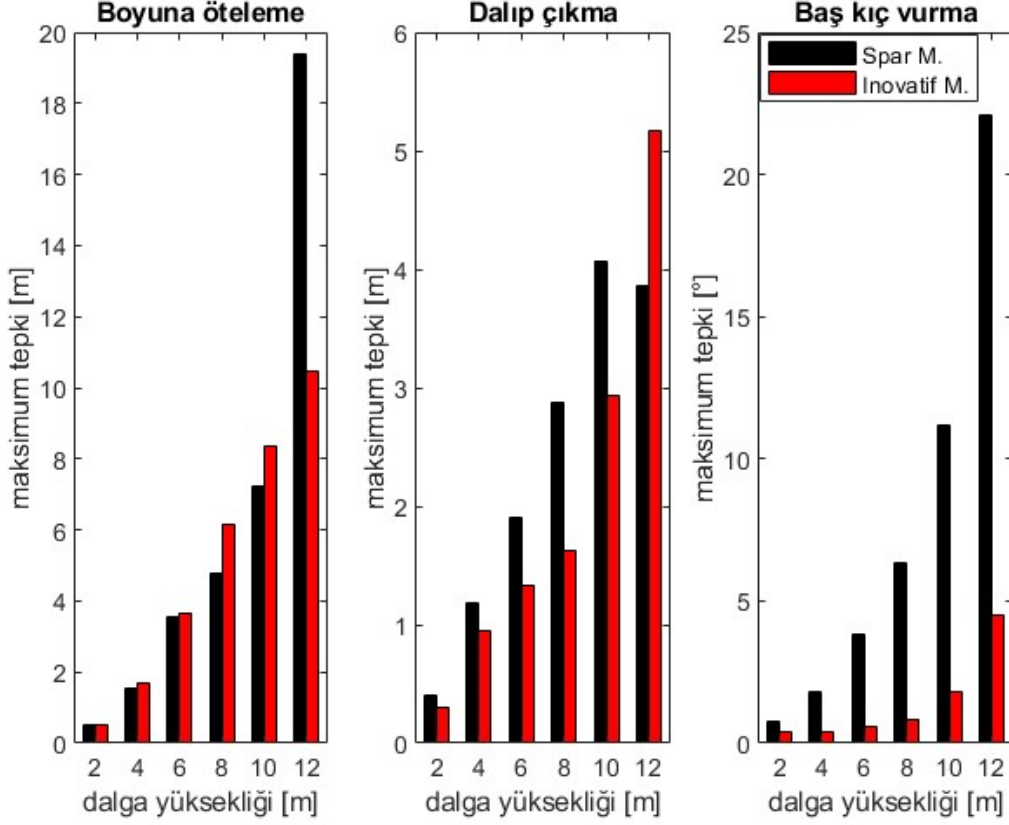


Şekil 8 - Spar ve Özgün platformun üç serbestlik derecesinde doğal periyotları

Şekil 7, özgün platformun spar’a göre çok daha kısa zamanda sönümlendiğini göstermektedir. Şekil 8’e göre ise her iki platformun da doğal periyotlarının dalga periyot aralığından (<20-25 sn) uzak olduğu, dolayısıyla rezonans açısından problem olmayacağı söylenebilir.

## 5.2. Yalnızca Dalga Deneyleri

Yalnızca dalgalar altında yapılan deneylerin sonuçları dalga yüksekliğine bağlı platformda oluşan deplasman ve dönmelerin spar ve özgün platformun karşılaştırılması olarak Şekil 9'da sunulmuştur.



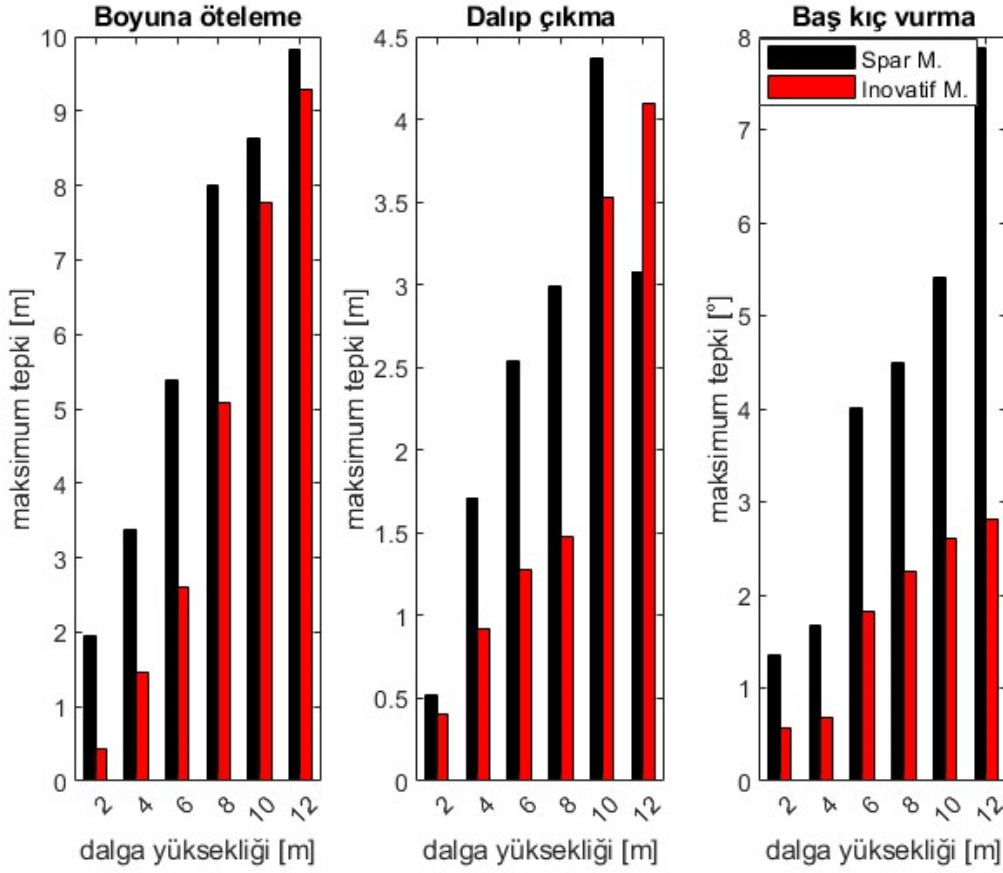
Şekil 9 - Farklı dalga yüksekliklerinde oluşan deplasman ve dönmelerin spar ve özgün platform için karşılaştırılması

Şekil 9, X yönündeki boyuna ötelemedeki hareketin her iki platform için benzer olduğunu, Z yönündeki dalıp çıkmada ise özgün platformun 10m dalgaya kadar spardan bir miktar daha iyi olduğunu göstermektedir. Y yönündeki dönme olan baş-kış vurmada ise özgün platformun çok daha az dönme yaptığı açık olarak görülmektedir. Yüzer rüzgar türbinlerinde kararlı enerji üretme ve oluşan fatik yükleri açısından en kritik hareket bu dönmedir. Dönme ne kadar az ise türbin o kadar stabil olur ve enerji üretimi daha kararlı olur.

## 5.3. Dalga ve Rüzgar Deneyleri

Dalga ve rüzgar deneylerinde dalga yüksekliği 2 ile 12m arasında değiştirilirken rüzgar hızı 20m/sn de tutulmuştur. Karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Sonuçlar rüzgar verilmeye başlandıktan sonra dalgalarla oluşan hareketleri göstermektedir.

Şekil 10, dalga ve rüzgarın birlikte yapıya etkidiği durumda da özgün platformun deplasman ve dönmelerinin spardan daha az olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla özgün yüzer platformun deniz üstü rüzgar enerjisi için kullanılmaya yönelik bir alternatif olabileceği gösterilmiştir.



Şekil 10 - Dalga ve rüzgarın birlikte etkideği deney sonuçlarının karşılaştırması

## SONUÇLAR

Deney sonuçları, geliştirilen yeni platformun tekniği bilinen ve uygulanan spar modele göre denenen geniş dalga ve ekstrem rüzgar koşulları altında daha stabil olduğunu göstermiştir.

Özellikle rüzgar ve dalga koşulları altında kararlı enerji üretmede önemli olan baş-kış vurma rotasyonu ve dalıp çıkma deplasmanları yeni platformda bir miktar daha azaltılmıştır.

Sayısal model kullanılarak yapılan karşılaştırma çalışmalarında, geliştirilen platformun aynı koşullar altında yarı-batık'a göre de salınım ve dönmelerinin daha az olduğunu göstermiştir.

Dengeleyici ağırlık spardaki gibi uzun drafta yerleştirilmemiştir. Ağırlık zincirlerle türbin kulesine asılmıştır. Yüzdürücülerin betondan imal edilmesi düşünülmektedir. Dolayısıyla çok daha ekonomik bir platform elde edilmiştir. Ancak detaylı maliyet hesabı yapılması gerekmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 217M451 ve 121M933 nolu projeler kapsamında desteklenmiştir.

### **Kaynaklar**

1. World Forum Offshore Wind (WFO) (2021) Global Offshore Wind Report
2. World Bank Group (2019) Expanding Offshore Wind to Emerging Markets, World Bank Group proceedings
3. Moné, C., M. Hand, M. Bolinger, J. Rand, D. Heimiller, J. Ho. 2017. 2015 Cost of Wind Energy Review (Technical Report). NREL/TP-6A20-66861. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (US)
4. W. Musial, S. Butterfield and B. Boone, "Feasibility of floating platform systems for wind turbines" in NREL/CP-500-34874, Nov. 2003.
5. Erol, Serkan. 2020. "Scaled Down Modelling Of A Horizontal Wind Turbine For A Floating Wind Turbine Research." Yüksek Lisans Tezi. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
6. Çekirdekçi B. 2015, ANSYS AQWA ile Gemi ve Açık Deniz Yapıları Dizaynına Yönelik Hidrodinamik Çözümler, Figes Ar-Ge dergisi, sayı:7
7. "DNVGL-ST-0119 Floating Wind Turbine Structures," no. July: 162. 2018.
8. "OFFSHORE STANDARD DNV GL AS Position Mooring," no. July: 114. 2015.
9. Karimi, 2017." A multi-objective design optimization approach for floating offshore wind turbine support structures" Journal of Ocean Engineering and Marine Energy 3(1):1-19



## Koruma Tabakasında Tetrapod Bloklar Kullanılan Dalgakıran Kesitinin Antifer Bloklar ile Güçlendirilmesi

Berkay AKYOL<sup>1</sup>, Günay GAZALOĞLU<sup>2</sup>, Hasan Gökhan GÜLER<sup>3</sup>, Cüneyt BAYKAL<sup>4</sup>, Gülizar ÖZYURT TARAKCIOĞLU<sup>5</sup>, Işıkhan GÜLER<sup>6</sup>, Ahmet Cevdet YALÇINER<sup>7</sup>, Ayşen ERGİN<sup>8</sup>

### ÖZET

18-19 Ocak 2018 tarihlerinde Karadeniz’de gerçekleşen güçlü bir fırtına sonucunda Batı Karadeniz’de bulunan ticari bir limanın dalgakıranları ağır hasar almıştır. Acil bir önlem olarak, dalgakıranlar hasar öncesi kesit tasarımları kullanılarak tamir edilmiştir, ancak bu dalgakıranların gelecekteki muhtemel fırtınalar sırasında hasar almaması için güçlendirilmesi ihtiyacı duyulmuştur. Dalgakıran kesitinin güçlendirilmesi için mevcut tetrapod blokların üzerine antifer blokların yerleştirilmesine karar verilmiş, güçlendirilen kesit ölçeklenerek ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarında yörenin dalga iklimi ve farklı kesit alternatifleri dikkate alınarak test edilmiştir. Güçlendirilen kesitin tasarım ve aşırı yüklemeye dalga koşulları altında hasar almadığı ve kabul edilebilir seviyelerde dalga aşmasının gerçekleştiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** dalgakıran, tetrapod, antifer, güçlendirme.

### ABSTRACT

**Reinforcement of the Breakwater Section with Antifer Blocks on Tetrapod Blocks Used in the Armor Layer**

A severe storm in the Black Sea occurred on 18-19 January 2018 caused significant damage along the breakwaters of a commercial port. As an urgent precaution, the breakwaters were

---

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - berkay.akyoll1996@gmail.com

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - gunay.gazaloglu@gmail.com

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - goguler@metu.edu.tr

4 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - cbaykal@metu.edu.tr

5 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - gulizar@metu.edu.tr

6 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - isikhan@metu.edu.tr

7 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - yalciner@metu.edu.tr

8 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ergin@metu.edu.tr

*repaired based on pre-damage sections, but it is still required to strengthen these breakwaters to avoid damage during future storms. To reinforce the breakwater section, it was decided to place antifer blocks on top of the existing tetrapod blocks in the armor layer. The reinforced section was scaled and tested in the Coastal and Ocean Engineering Laboratory Wave Flume of the METU Civil Engineering Department, under the wave climate of the port region and considering different alternative sections. It was observed that the reinforced section is stable under design and overload wave conditions, and wave overtopping is at acceptable levels.*

**Keywords:** *breakwater, tetrapod, antifer, reinforcement.*

## **GİRİŞ**

Denizel afetler etkisi altında oluşan kıyı yapıları hasarları ve bu hasarların onarılmasıyla ilgili olarak literatürde birçok örnek bulunmaktadır. Taş dolgu dalgakıranlarda fırtına etkisi altında gerçekleşen önemli hasar örneklerinden biri Portekiz’de bulunan Sines Limanı dalgakıranıdır (Baird et al., 1980). Ülkemizde ise etkili bir fırtına sonucu henüz imalat aşamasında iken ağır hasar alan Antalya Limanı dalgakıranı (Gunbak and Ergin, 1985) ve Karadeniz’de gerçekleşen güçlü bir fırtına sonucu hasar alan Giresun Limanı dalgakıranı (Kilicoglu et al., 2004) bu kapsamda önemli örnekler olarak verilebilir. Yapılan çalışmalar ile bu dalgakıranlarda hasara yol açan mekanizmaların anlaşılması, gelecekte bu hasarların gerçekleşmemesi için alınması gereken mühendislik önlemlerin ortaya çıkarılması için önem taşımaktadır. Ancak, literatürde bu tip hasarların giderilmesi ve dalgakıranların güçlendirilmesine yönelik fiziksel modelleme çalışmalarını içeren sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

18-19 Ocak 2018 tarihlerinde Karadeniz’de etkili olan bir fırtına sonucunda Batı Karadeniz’de bulunan ticari bir limanın ana ve tali dalgakıranları ağır hasar almıştır. Bu hasarı oluşturan fırtına ve hasarın boyutları Güler vd. (2022) tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bahsi geçen ticari limanın sürekli olarak çalışması gerekliliğiyle acil bir önlem olarak, dalgakıranlar hasar öncesi kesit tasarımları kullanılarak tamir edilmiş, ancak bu dalgakıranların gelecekteki muhtemel fırtınalar sırasında tekrar hasar almaması için güçlendirilmesi ihtiyacı duyulmuştur. Bu kapsamda mevcut tasarımda ana dalgakıran kesitleri koruma tabakasında bulunan 24 t ağırlığındaki tetrapod ünitelerin üzerine Frens (2007) tarafından önerildiği şekilde 0.61 yerleştirme sıklığına sahip (bkz. Bölüm 2) 48 t ağırlığındaki antifer ünitelerin yerleştirilerek dalgakıran kesitlerinin güçlendirilmesine karar verilmiştir. Bu çalışmada ana dalgakıranın gövde kesitlerinden dalga kırılması açısından daha kritik olarak kabul edilen (kırılan dalgalara daha çok maruz kalan), yapı önü su derinliği 18 m olan Kesit 4-4 için ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarı’nda gerçekleştirilen iki boyutlu fiziksel model deneyleri özetlenmektedir.

Bu kısa girişin ardından bildirinin ilerleyen bölümlerinde çalışmanın amaçları, fiziksel model çalışmalarının detayları, kesit revizyonları, yapı dayanımı ve dalga aşması ölçümleri ve deney sonuçları verilmektedir.

## **AMAÇ**

Etkili bir fırtına sonucunda hasar alan limanın ana dalgakıranında yer alan Kesit 4-4 için gerçekleştirilen deneylerin temel amacı mevcut kesitin en uygun şekilde güçlendirilerek, gelecekteki fırtınalar karşısında yapı dayanımı yüksek ve kabul edilebilir seviyelerde dalga aşmasına izin verilen bir kesit tasarlamaktır. Bu ana başlık altında çalışmanın amaçları: (i) kesit güçlendirme çalışmaları esnasında tetrapod üzerine yerleştirilen antifer bloklarının dayanımını değerlendirmek, (ii) güçlendirilmiş kesitte topuk etkisini belirlemek, (iii) dalga aşması durumlarını değerlendirmek, (iv) dalgakıranın yapı dayanımı ve dalga aşması ile birlikte ekonomi

ve imalat koşullarını da göz önünde bulundurarak gerekli değişiklikleri yapmak ve dalgakıran kesitine son halini vermektir.

## **FİZİKSEL MODELLEME ÇALIŞMALARI**

İki boyutlu fiziksel model deneylerinin elverişli bir şekilde yapılabilmesi için ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deniz Mühendisliği Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan 26 m x 6 m boyutlarındaki deney kanalı içine 0,6 ve 0,9 m genişliklerinde 18 m uzunluğunda iki adet iç kanal ve kanalların içine proje alanına ait ortalama taban eğimi (1:30) inşa edilmiştir. Limanın ana dalgakıranında bulunan Kesit 4-4 deney kanalı içerisinde ölçekli bir şekilde yerleştirilmiş, seçilen dalga koşulları altında yapı dayanımı ve dalga aşması ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sırasıyla model ölçeğinin belirlenmesi, dalga koşulları, deney düzeneği, ölçümler ve deney sonuçları sunulmaktadır.

### **Model Ölçeği**

Deney dalga koşulları, laboratuvar altyapısı ve ekipmanları ve Froude kuramı dikkate alınarak en uygun model uzunluk ölçeği  $\lambda_L=1:60$  olarak belirlenmiştir. Fiziksel model deneylerinde kullanılacak ağırlık ölçeği ( $\lambda_W$ ) belirlenirken dinamik benzerlik durumunun sağlanması adına Hudson vd. (1979) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. Su yoğunluğu ve yapay ünite yoğunluğu modelde  $1000 \text{ kg/m}^3$  ve  $2360 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüş, bu değerler prototipte  $1018 \text{ kg/m}^3$  ve  $2400 \text{ kg/m}^3$  olarak kabul edilmiş ve ağırlık ölçeği bu değerler kullanılarak belirlenmiştir. Deneylerde çekirdek tabakasında kullanılan taşların boyutlarının belirlenmesinde viskoziteden kaynaklı ölçek etkilerinin asgariye indirilmesi için Burcharth vd. (1999) tarafından verilen yaklaşım kullanılmıştır. Belirlenen model ölçeğine göre kesitlerde kullanılacak taş ve yapay blok ağırlıkları belirlenmiş, yapay bloklar üretilmiş, taşlar sınıflandırılmış ve sınıflarına göre renklendirilmiştir. Deneylerde kullanılan ünite ve taş boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** - Fiziksel model deneylerinde kullanılan yapay ünite ve taşların prototip ve model ölçeğinde ağırlıkları.

<b>Ünite ve Taş</b>	<b>Prototip</b>	<b>Model</b>
Antifer	48 (ton)	218,5 (gram)
Tetrapod	24 (ton)	109 (gram)
Küp	42 (ton)	190,7 (gram)
Taş	2-4 (ton)	9-18 (gram)
Taş	1-3 (ton)	4-13 (gram)
Taş	0,4-2 (ton)	2-11 (gram)
Taş	0,4-1 (ton)	2-6 (gram)
Taş*	0-0,4 (ton)	0-8 (gram)

*\*Deneylerde 0-0.4 ton aralığı taşların boyutlarının belirlenmesinde viskoziteden kaynaklı ölçek etkilerinin asgariye indirilmesi için Burcharth vd. (1999) tarafından verilen yaklaşım kullanılmıştır.*

## Dalga Koşulları

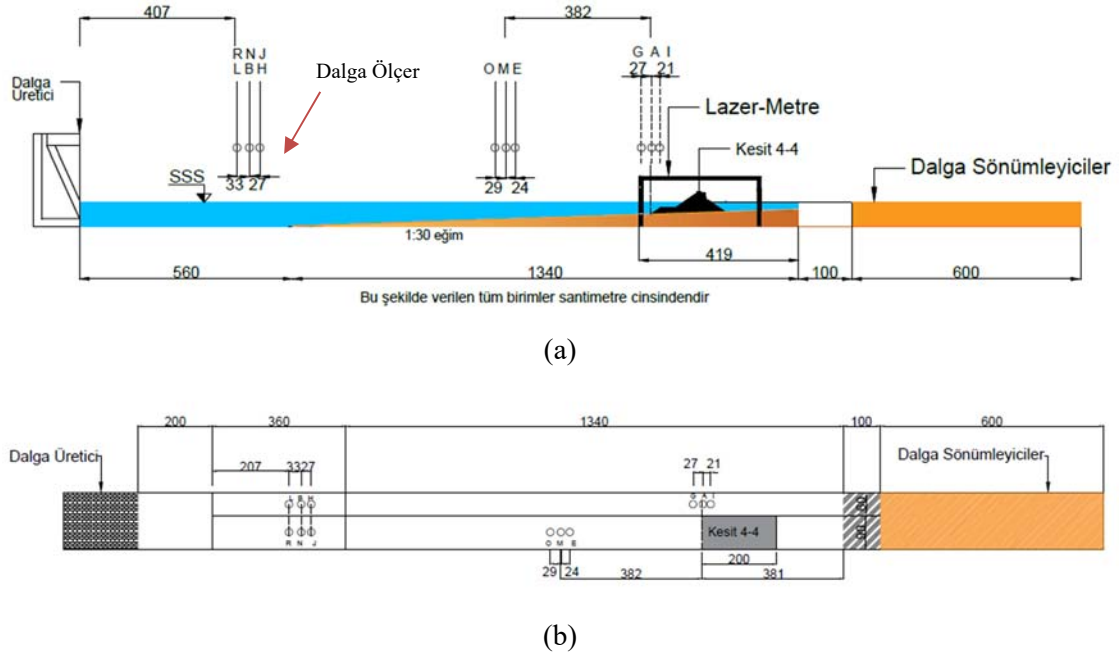
Fiziksel model deneylerinde dalgakıranın gövde kesiti (Kesit 4-4), üzerinde birikimli hasar durumlarının gözlemlenebilmesi adına, prototip ve model özellikleri Tablo 2’de verilen dalga koşulları altında test edilmiştir. Deney dalga koşulları altı farklı dalga ve su seviyesi kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu dalga ve su seviyesi özellikleri ODTÜ Kıyı ve Liman Müh. Lab. (2022) tarafından yapılan dalga iklimi çalışmalarının sonuçları kullanılarak seçilmiştir. Tablo 2’de verilen deney programı her bir farklı alternatif kesit için 2 kez uygulanmıştır. Her tekrar deneyinin başında kesit en baştan inşa edilmiştir. Bu yolla inşaat sırasında koruma tabakası ve topuk ünitelerinin dizilimlerinin farklılaşmasından kaynaklı gözlemlenebilecek hasar ve dalga aşması değişimlerinin de gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

**Tablo 2 -** Deneylerde uygulanan dalga ve su seviyesi koşulları prototip ve model değerleri.

Dalga Koşulu	Aşılma/Oluşma Olasılığı	Prototipte yapı önu belirgin dalga yüksekliği, $H_{m0, topuk}$ (m)	Prototipte yapı önu belirgin dalga periyodu, $T_s$ (s)	Modelde yapı önu belirgin dalga yüksekliği, $H_{m0, topuk}$ (m)	Modelde yapı önu belirgin dalga periyodu, $T_s$ (s)	Prototipte Dalga Serisi Süresi, (saat)	Prototipte Tasarım Deniz Suyu Seviyesi (m)
D1	10 saat/yıl	5,4	9,6	0,090	1,25	6,2	OSS (+0,12)
D2	5 yıl	6,9	10,3	0,115	1,33	8,1	OSS (+0,19)
D3	50 yıl	8,1	11,2	0,135	1,45	10,3	OSS (+0,23)
D4-1	100 yıl	8,6	11,5	0,143	1,49	10,5	DSS (+0,13)
D4-2	100 yıl	8,6	11,5	0,143	1,49	10,5	YSS (+0,95)
D5	100 yıl (%90 güvenilirlik üst limiti)	9,2	12,0	0,153	1,55	10,4	YSS (+0,98)

## Deney Düzenegi ve Ölçümler

Deneyler sırasında kesitin yerleştirildiği kanalda ve bu kanalın yanında boş bırakılan diğer iç kanalda su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Kanal içinde yapıdan ve dalga üreticiden yansıyan dalgaların analizlerinde belirli aralıklarla yerleştirilmiş 3 adet dalga ölçerin verisini kullanan Mansard ve Funke (1980) yöntemi kullanılmıştır. Deney düzenegi ve dalga ölçerlerin kanal içindeki konumları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Dalga ölçerlerin konumları ve kesitlerin yerleşimi (Uzunluk birimleri cm cinsindedir. a) Yandan görünüm, b) yukarıdan görünümü göstermektedir.)

### Antifer Blokların Yerleştirilmesi

Antifer blokları yerleştirilirken dikkat edilmesi gereken parametrelerden biri yerleştirme sıklığıdır. Antifer blokların yerleştirilmesi ve yapı dayanımı (stabilite) ile ilgili olarak literatürde çeşitli çalışmalar (Yağcı ve Kabdaşlı, 2003; Yağcı vd., 2004; Frens, 2007; Domingo, 2012) bulunmaktadır. Bu çalışmalar ile antiferlerin düzenli ya da düzensiz yerleştirildiği koşulda yapı dayanımı katsayılarında meydana gelen değişiklikler genel olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerde yerleştirme sıklığı, yerleştirilen blok sayısının katman başına ortalama yüzey birimi için en yüksek blok sayısına oranı olarak alınmıştır (Frens, 2007). Buna göre yerleştirme sıklığı aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır:

$$\phi = \frac{Nb \cdot D_n^2}{B \cdot L} \quad (1)$$

Yukarıda verilen denklemde belirli bir alandaki blok sayısı  $Nb$  ile, belirlenen alan genişliği  $B$  ile, belirlenen alan uzunluğu (eğim üzerindeki)  $L$  ile, kullanılan ünitenin nominal çapı ise  $D_n$  ile gösterilmiştir. Mevcut çalışmada antifer blokların Frens (2007) tarafından gerçekleştirilen 5 numaralı deneyde önerilen katmanlar halinde uygulanan düzensiz yerleştirme yöntemiyle ve yukarıda ayrıntılı bir şekilde tanımlanan yerleştirme sıklığının 0.61 olacağı şekilde yerleştirilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir. Yerleştirme sıklığı her bir deney öncesinde her katman için eğim boyunca alınan ölçümler kullanılarak belirlenmiştir.

Prototipte tetrapod bloklar üzerine antifer blokların yerleştirilmesinde zorluklar yaşanması muhtemeldir. Bu zorlukların başında tetrapod blokların yarattığı düzensiz yüzey gelmektedir. Bu çalışmada Frens (2007) tarafından önerilen metodun tercih edilmesinin sebebi, düzensiz yüzeylerin üzerine bu metod ile antiferlerin daha kolay bir şekilde yerleştirilebileceğinin ön görülmesidir. Bu çalışma sonucunda deneylerde yapı dayanımı ve aşma açısından uygun görülen kesit için antifer yerleşimi verilmiştir. Burada yapı dayanımı için en önemli parametre yerleştirme



## Kesit Revizyonları, Yapı Dayanımı ve Dalga Aşması Ölçümleri

Gerçekleştirilen fiziksel model deneylerinde mevcut tetrapod ünitelerin üzerine prototipte 48 t karşılık gelen antifer üniteler koruma tabakasına düzensiz bir şekilde Frens (2007) tarafından önerilen 0.61 yerleştirme sıklığı değeri gözetilerek yerleştirilmiştir. Dalga aşmasının azaltılması için yeniden kronman duvar imalatı gerektirmeyecek şekilde dalgakıran kesiti boyunca 48 t ağırlığındaki antifer üniteler düzenli olarak yerleştirilmiştir (Bknz. Şekil 2). Gerçekleştirilen deneylerde topuğun en ekonomik şekilde imal edilebilmesi için farklı topuk tasarımları içeren toplamda dört farklı alternatif kesit denenmiştir. Şekil 2’de verilen ve deneylerde ilk olarak denenilen Alternatif 1 kesitinde topuk 42 ton küplerden ve alt tabakalarında kalan bir bölümü de 2-4 ton taşlardan oluşturulmuştur. Alternatif 2’de ise Alternatif 1’de gözlenen yapı dayanımı ve dalga aşması miktarları göz önüne alınarak maliyeti azaltmak amacıyla Alternatif 1’deki topuğun alt kısmına battaniye olarak 0,4-1 ton taşlar koyulmuştur. Daha önceki alternatiflerde topukta kullanılan 42 ton küp ünitelerin maliyeti yükseltmesi sebebiyle, Alternatif 3’te 42 ton küplerin yerine 4-6 ton taşlar -14 m derinliğe, topuk genişliği 3 taş olacak şekilde yerleştirilmiştir. Alternatif 4’te ise dalga aşması debilerini azaltmak amacıyla topuk üst kotu -13,7 m seviyesine getirilmiştir ve topuk genişliği 6 taş olacak şekilde artırılmıştır.

## Deney Ölçümlerinin Özeti

Tablo 3’te tüm alternatiflerde deneylerde ölçülen dalga aşması değerleri özetlenmiştir. Tablo 3’te görülebileceği üzere genel itibarıyla Alternatif 1 ve 2’de, Alternatif 3 ve 4’e nazaran daha düşük dalga aşması miktarları ölçülmüştür. Kesit 4-4 liman tarafında yük indirme işlemleri gerçekleştirilmekte ve indirilen yükün depolama alanlarına taşınması için taşıma bandı sistemleri bulunmaktadır. Tablo 3’te verilen değerler yapının ekonomik ömrü boyunca her yıl gelmesi

**Tablo 3 - Tüm alternatiflerde Dalga Seti 1 ve Dalga Seti 2 deneylerinde ölçülen dalga aşması miktarları (prototip ölçeğinde).**

Set #		Dalga Seti # 1						Dalga Seti # 2					
Alternatif #	Dalga Koşulu	D1	D2	D3	D4-1	D4-2	D5	D1	D2	D3	D4-1	D4-2	D5
	Su Seviyesi	SSS	SSS	SSS	DSS	YSS	YSS	SSS	SSS	SSS	DSS	YSS	YSS
	Aşılma/Oluşma Olasılığı	10 s/yıl	5 yıl	50 yıl	100 yıl	100 yıl	100 yıl (90% üst limit)	10 s/yıl	5 yıl	50 yıl	100 yıl	100 yıl	100 yıl (90% üst limit)
Alt. 1	Dalga Aşması, q (l/s/m)	0	0,3	3,5	6,8	12	23	0	0,3	4	7,8	14	22,2
Alt. 2	Dalga Aşması, q (l/s/m)	0	2,3	11	17,7	24,3	37,4	0	1,2	5,1	10,3	15,6	27,8
Alt. 3	Dalga Aşması, q (l/s/m)	0	4,4	16,2	25	35,5	47,5	0	3,3	16,3	31,9	43,7	60,9
Alt. 4	Dalga Aşması, q (l/s/m)	0	1,5	9,5	17,7	23,7	30,8	0	2	10,5	28,9	43,6	48,7

beklenen D1 dalga koşulunda tüm alternatifler için EurOtop (2018) tarafından önerilen insanlar, araçlar ve liman arkası yapıları için güvenli olan 1 l/s/m dalga aşma debisi değerinin altında kaldığını göstermektedir. Ancak diğer dalga koşullarında dalga aşmasının 1 lt/s/m üzerine çıkması sebebiyle, bu fırtına koşulları durumunda dalgakıran üzerinde hiçbir şekilde insan ve araç kullanımına izin verilmemesi gerektiği belirtilmiştir. Bu dalga koşullarında Kesit 4-4'te liman tarafında bulunan taşıma bandı vb. yapıların da hasar alabileceği vurgulanmıştır. Dalgakıranın kret kotunun yükseltilmesi liman operasyonlarını etkileyeceğinden ve ekonomik bulunmadığından hasar riski alınmıştır.

**Tablo 4 - Tüm alternatiflerde Set 1 ve Set 2 dalga koşullarındaki koruma tabakasında ve topukta ölçülen hasar miktarları.**

Set #		Dalga Seti 1							Dalga Seti 2							
Alternatif #	Dalga Koşulu	D1	D2	D3	D4-1	D4-2	D5	Kümülatif	D1	D2	D3	D4-1	D4-2	D5	Kümülatif	
	Su Seviyesi	DSS	OSS	OSS	DSS	YSS	YSS		DSS	OSS	OSS	DSS	YSS	YSS		
	Aşılma /Oluşma Olasılığı	10 saat/yıl	5 yıl	50 yıl	100 yıl	100 yıl	100 yıl (90% üst limit)		10 saat/yıl	5 yıl	50 yıl	100 yıl	100 yıl	100 yıl (90% üst limit)		
Alt. 1	Koruma Tabakası	N <sub>od</sub>	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,06	0,17	0,00	0,00	0,00	0,06	0,06	0,06	0,17
		Küm. N <sub>od</sub>	0,00	0,00	0,00	0,11	0,11	0,17		0,00	0,00	0,00	0,06	0,11	0,17	
	Topuk	N <sub>od,t</sub>	0,00	0,05	0,16	0,11	0,11	0,16	0,60	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,05	0,38
		Küm. N <sub>od,t</sub>	0,00	0,05	0,22	0,32	0,43	0,60		0,00	0,00	0,32	0,32	0,32	0,38	
Alt. 2	Koruma Tabakası	N <sub>od</sub>	0,00	0,06	0,00	0,00	0,34	0,00	0,40	0,00	0,06	0,06	0,00	0,11	0,00	0,23
		Küm. N <sub>od</sub>	0,00	0,06	0,06	0,06	0,40	0,40		0,00	0,06	0,11	0,11	0,23	0,23	
	Topuk	N <sub>od,t</sub>	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,16	0,22	0,00	0,00	0,05	0,11	0,00	0,11	0,27
		Küm. N <sub>od,t</sub>	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05	0,22		0,00	0,00	0,05	0,16	0,16	0,27	
Alt. 3	Koruma Tabakası	N <sub>od</sub>	0,11	0,11	0,11	0,00	0,11	0,06	0,51	0,00	0,17	0,28	0,00	0,06	0,00	0,51
		Küm. N <sub>od</sub>	0,11	0,23	0,34	0,34	0,45	0,51		0,00	0,17	0,45	0,45	0,51	0,51	
	Topuk	N <sub>od,t</sub>	0,03	0,28	0,28	0,26	0,08	0,13	1,05	0,08	0,31	0,26	0,15	0,13	0,15	1,07
		Küm. N <sub>od,t</sub>	0,03	0,31	0,59	0,84	0,92	1,05		0,08	0,38	0,64	0,79	0,92	1,07	



Alt. 4	Koruma Tabakası	$N_{od}$	0,00	0,23	0,06	0,11	0,11	0,00	0,51	0,00	0,00	0,11	0,17	0,00	0,06	0,34
		Küm. $N_{od}$	0,00	0,23	0,28	0,40	0,51	0,51		0,00	0,00	0,11	0,28	0,28	0,34	
Topuk	Topuk	$N_{od,t}$	0,03	0,20	0,20	0,28	0,10	0,23	1,05	0,00	0,56	0,48	0,10	0,00	0,13	1,28
		Küm. $N_{od,t}$	0,03	0,23	0,43	0,71	0,82	1,05		0,00	0,56	1,05	1,15	1,15	1,28	

Dalga Seti 1 ve Dalga Seti 2 deneyleri boyunca tüm alternatiflerde ölçülen hasar miktarları koruma tabakası ve topuk için Tablo 4'te özetlenmiştir. Hasar ölçümleri  $N_{od}$  cinsinden her bir dalga koşulu için ve kümülatif olarak ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4'te verilen koruma tabakası hasar miktarları incelendiğinde tüm alternatiflerde hasarın kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Topuk için verilen hasar miktarları incelendiğinde ise Alternatif 1 ve Alternatif 2'te kabul edilebilir düzeyde hasar oluştuğu; diğer alternatiflerin topuklarının orta hasar düzeyinde hasar aldığı görülmüştür.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada gerçekleştirilen fiziksel model deneylerinde, daha önce hasar almış, eski kesit tasarımlarıyla tamir edilmiş bir dalgakırının güçlendirme çalışmaları için gerçekleştirilen iki boyutlu fiziksel model deneyleri özetlenmiştir. Bu deneyler Tablo 2'de verilen dalga ve su seviyesi koşullarında gerçekleştirilmiş, yapı dayanımı ve dalga aşması ölçülmüş ve kesitin daha ekonomik ve güvenli olabilmesi için dört farklı alternatif denenmiştir. Gerçekleştirilen fiziksel model deneyleri neticesinde özetle aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır:

- 48 ton ağırlığındaki antifer yapay blok ünitelerle güçlendirilen koruma tabakasında seçilen dalga ve su seviyesi koşulları altında oluşan hasarların tasarım ölçütlerini karşıladığı ve kesitlerin dengede olduğu görülmüştür.
- Antifer yapay blokların denge durumlarında mevcutta yer olan tetrapod yapay blokların üzerine yerleştirilmesinden kaynaklı bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Deney sırasında, prototip ölçekte antifer yerleşimi sırasında tetrapodlarda yaşanabilecek (veya hali hazırda oluşmuş) hasar dikkate alınmamıştır.
- Alternatif 4'te koruma tabakasında ölçülen hasar değerleri başlangıç hasar seviyesine yakın ve/veya altında kaldığı gözlenmiştir. Topuktaki hasarlar ise orta düzey hasar seviyesine yakın veya biraz fazla gözlemlendiğinden büyük fırtınalar sonrasında hasar tespitinin yapıp bakımının kesin olarak yapılması gerektiği görülmüştür.
- Yapılan gözlemlere göre topukta 4-6 ton ağırlığındaki taş sınıfının kullanılması (yeteri kadar sayıda bulunamaması durumunda 10 ton küp yapay ünitelerinin kullanılması), topuk üst yüksekliğinin -13,7 m kotundan daha yüksekte olmaması ve topuk üst genişliğinin 8 m'den az olmaması önerilmektedir.
- Koruma tabakasında düzensiz yerleştirilen antifer yapay blokların en az kret üstündeki düzenli yerleştirilen antiferlerin hizasına çıkarılması gerektiği gözlemlenmiştir.
- Kret üstüne düzenli olarak yerleştirilen 48 ton antifer bloklarda bir hareket gözlenmemiştir. Düzenli yerleştirilen bu antifer blokların dalga aşmasını azalttığı görülmüştür.
- Dalga aşması değerlerinin tüm alternatifler için 10 saat/yıl aşılma olasılığına sahip dalga durumuna karşılık gelen D1 dalga koşulunda insanlar, araçlar ve liman arkası yapılar için

güvenli olan seviyede kaldığı görülmüştür. Diğer dalga koşullarında ise liman operasyonlarının durdurulması önerilmiş ve dalgakıran arkasındaki liman yapılarının hasar alabileceği belirtilmiştir.

### **Kaynaklar**

1. AYGEM (Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü) (2016), “Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları”, T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
2. Baird, W. F., Caldwell, J. M., Edge, B. L., Magoon, O. T. & Treadwell, D. D. (1980). Report on the damage to the Sines breakwater, Portugal. Proceedings of the Seventeenth Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia, Vol 3., Ch. 184, ASCE, pp. 3063-3077.
3. Burcharth, H.F., Liu, Z., Troch, P. (1999). “Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests”, Proc. of the International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), vol. Cape Town, South Africa.
4. Domingo, A. M. V. (2012). “Evaluation of concrete armour units used to repair damaged dolos breakwaters”, MSc Thesis, Delft University.
5. EurOtop. (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but worldwide application. 2nd ed. <http://www.overtopping-manual.com>.
6. Frens, A. B. (2007), “The impact of placement method on Antifer-block stability”, MSc Thesis, Delft University.
7. Gunbak, A. R., Ergin, A. (1985). Damage and repair of Antalya Harbor Breakwater. In Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection, ed: Per Bruun, Elsevier.
8. Guler, H.G., Kirezci, Ç., Baykal, C., Tarakcioglu, G.O., Isik, E., Ergin, A., Yalciner, A.C., Guler, I. (2022). Major Damage at A Port Located in The Southwestern Black Sea Region Due to A Severe Storm. (hakem değerlendirmesinde)
9. Hudson, R. Y., Hermann, F. A., Sager, R. A., Whalin, R. W., Keulegan, G. H., Chatham, C. E., and Hales, L. Z. (1979). “Coastal Hydraulic Models” Special Report No.5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
10. Kılıçoğlu, A., Aral, F. & Yalçiner, A. C. (2004). Expert report on Giresun Port, Ankara, Turkey.
11. Mansard, E.P.D. and E.R. Funke. (1980). "The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method", Hydraulics Laboratory Technical Report LTRHY-72, National Research Council.
12. Yagci, O., Kapdasli, S. (2003). Alternative placement technique for antifer blocks used on breakwaters. *Ocean Engineering*, 30(11), 1433-1451.
13. Yagci, O., Kapdasli, S., Cigizoglu, H.K. (2004). The stability of the antifer units used on breakwaters in case of irregular placement. *Ocean Engineering*, 31(8-9), 1111-1127.
14. ODTÜ Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarı. (2022). “Ticari Limanın Kıyı Yapıları Güçlendirme ve Liman İçi Çalkantı İyileştirme Araştırma Projesi Final Raporu” ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deniz Mühendisliği Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye, 2022.

# İzmir Körfezinde Deniz Taşkınlarının İncelenmesi

Bergüzar ÖZBAHÇECİ<sup>1</sup>, Doğan KISACIK<sup>2</sup>, Salih AK<sup>3</sup>

## ÖZET

İzmir, uzun sahil şeridi ile ülkemizin önde gelen turizm ve ticaret şehirlerinden biridir. İzmir'in kıyı şeridi oldukça yoğun bir kullanıma sahiptir. Özellikle iç körfezdeki kıyı bölgesi yıllar içerisinde doldurularak sürekli genişletilmiş, dolgunun genişlemesiyle kıyı önündeki su derinliği artmış, böylece kıyı şeridi deniz etkilerine karşı daha kırılgan ve savunmasız olmuştur. Bu çalışmada, İzmir Körfezi'nde yaşanan ve sıklığı son yıllarda artan deniz taşkınları detaylı olarak incelenmiştir. Rüzgar ve dalga iklimi ile su seviyesindeki değişimler ve taşkın miktarları sayısal modelleme, ampirik formüller ve yerinde ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Özellikle körfezde yer alan dikey duvar koruma yapılarının kıyı taşkınları açısından kritik olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İzmir körfezi, deniz taşkını, rüzgâr iklimi, dalga modellemesi, dalga aşması, deniz seviyesindeki değişim.

## ABSTRACT

### *Investigation of Sea Floods in the Izmir Bay*

Izmir is one of our country's leading tourism and trade cities with its long coastline. The coastline of Izmir has a very intensive use. Especially the coastal area in the inner bay was filled and expanded over the years, and the water depth in front of the coast increased with the filling. Thus the coastline became more fragile and vulnerable to sea effects. In this study, sea floods experienced in Izmir Bay, whose frequency has increased in recent years, have been examined in detail. Changes in wind and wave climate, water level changes, and flood amounts were calculated using numerical modeling, empirical formulas, and on-site measurements. It has been determined that the vertical wall protection structures in the bay are critical for coastal flooding.

**Keywords:** Izmir Bay, Coastal flood, wind climate, wave modeling, wave overtopping, sea level fluctuations.

---

1 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - berguzarozbahceci@iyte.edu.tr

2 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - dogankisacik@iyte.edu.tr

3 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - salihak@iyte.edu.tr

## AMAC

İzmir, uzun sahil şeridi ile ülkemizin önde gelen turizm ve ticaret şehirlerinden biri olup, korunaklı İzmir Körfezi'nin çevresinde yer alır. Çiğli'deki eski Dalyan ile Balçova arasında kalan kısım İzmir iç körfez olarak adlandırılır. İzmir'in iç körfezi kesintisiz bir sahil yolu ile çevrilidir ve oldukça yoğun bir nüfusa ve kullanıma sahiptir. Hızlı kentleşme, sanayileşme ve nüfus yoğunluğunun artması nedeniyle yıllar içerisinde iç körfez kıyı bölgesi doldurularak sürekli genişletilmiştir. Kıyı dolgusunun genişlemesiyle deniz dibi topografyası da bozulmuş ve kıyı önündeki su derinliği artmış, böylece kıyı şeridi deniz etkilerine karşı daha kırılgan ve savunmasız olmuştur.

İzmir'de rüzgâr hayati önem taşır. Yazın serinletici deniz meltemi güneşin yakıcı sıcaklığını alıp götürür. Ancak rüzgâr kuvvetli olduğunda, fırtına dalgaları ve deniz kabarmasıyla birlikte körfezdeki su seviyesi artar. Rüzgâr, dalgalar ve su seviyesindeki artışın birleşimi, dalgaların kıyı koruma yapılarından aşmasına ve böylece deniz taşkınlarına neden olmaktadır. Körfezde çevredeki yolları, binaları ve dinlenme alanlarını deniz taşkınlarından korumak için, eğimli tip kıyı tahkimatı ve dik deniz duvarları gibi geleneksel kıyı koruma yapıları, kıyıya paralel olarak inşa edilmişlerdir. Buna rağmen deniz taşkınları sırasında büyük miktarda deniz suyunun kara tarafına taşarak, trafik sorunlarına yol açtığı ve binalara, mağazalara, dinlenme tesislerine zarar verdiği görülmektedir. Şekil 1, İzmir şehir merkezinde deniz taşkını felaketi sırasında oluşan dalga aşması ve kıyıda su taşkın görüntülerine ait örnek fotoğrafları göstermektedir.



Şekil 1 - İzmir şehir merkezinde deniz taşkının sonuçlarını gösteren örnek fotoğraflar

Geçmişte körfezde yaşanan deniz taşkını felaketleri incelendiğinde, eskiden 2-3 yılda bir oluşan taşkınların artık senede iki kere yaşandığı görülmektedir. İzmir körfezinde deniz taşkını sıklığının artmasının nedeninin küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği olabileceği düşünülmektedir. Son yıllarda iklim değişikliğine bağlı olarak deniz seviyesinin yükselmesi; atmosfer ve okyanus koşullarının aşırılığının fark edilir hale gelmesi dikkat çekicidir. İklim değişikliğiyle hem deniz seviyesinin yükselmesi, hem de fırtına şiddetinde rüzgâr ve yüksek dalgalar nedeniyle, kıyı yapılarının zarar görmesi, kıyı erozyonu, morfolojik değişim ve deniz taşkını felaketlerinin artması beklenmektedir. Bu nedenle iklim değişikliğine bağlı atmosfer ve deniz koşullarının değişimi dikkate alınarak yapılan afet değerlendirme çalışmaları önem kazanmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında İzmir körfezinde gel-git seviyesinin tahmini (Alpar ve Yuce, 1996), taşkını önlemek için “duran dalga havuzu” önerisinin fiziksel modellenmesi (Kısacık vd, 2019) körfezin fiziksel oşinografik özelliklerine ait çeşitli çalışmalar (Beşiktepe vd. 2011) yapıldığı görülmüştür. Ayrıca yazarların İzmir körfezinde deniz suyu seviyesindeki değişimleri araştırdıkları bir çalışma bulunmaktadır (Ak vd, 2022). Ancak deniz taşkınına neden olan rüzgâr, dalga ve su seviyesi değişimleri bir bütün olarak incelenerek körfezdeki taşkın miktarları hesaplanmamıştır. Bu çalışmanın amacı körfezdeki uzun dönemli rüzgâr ikliminin ve aşırı rüzgâr özelliklerinin belirlenmesi, deniz suyu seviyesinde oluşan gel-git, atmosferik ve iklim değişikliği

kaynaklı su seviyesi değişiminin bulunması, dalganın modellenmesi ve yapı önündeki dalga özelliklerinin ortaya çıkarılarak taşkın miktarlarının hesaplanmasıdır. Ayrıca deniz taşkını önlemeye yönelik bazı öneriler de ortaya konmuştur.

## KULLANILAN VERİ SETLERİ

Bu çalışmada çeşitli rüzgâr, hava basıncı, deniz suyu seviyesi ve batimetri verileri kullanılmıştır.

### Rüzgar Verisi

Rüzgar, dalga oluşumu için ana kaynaktır ve aynı zamanda su seviyesinde de artışa neden olur. Bu nedenle hız ve yön gibi rüzgâr özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin yıllık dağılımı ile ekstrem değerlerinin hesaplanması çok önemlidir. Çalışmada iki farklı veri seti kullanılmıştır:

- 1) Yerinde ölçüm verisi
- 2) Model verisi

### Yerinde Ölçüm Verisi

İzmir körfezinde yerinde ölçüm çalışmaları 2017 yılından itibaren İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından yürütülmektedir. Rüzgâr hızı ve yönü dört noktada (Foça, Güzelbahçe, Pasaport ve Bostanlı) 10 dakika süreyle ölçülmektedir. Bir sn aralıkla 10 dk ölçülen rüzgar verisinin ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri verilmektedir. Bu proje için analizlerde kullanılmak üzere yaklaşık 5 yıllık rüzgâr verileri İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından sağlanmıştır. Ölçümler önce gözden geçirilerek hatalı olanlar ayıklanmıştır.

### Model Verisi

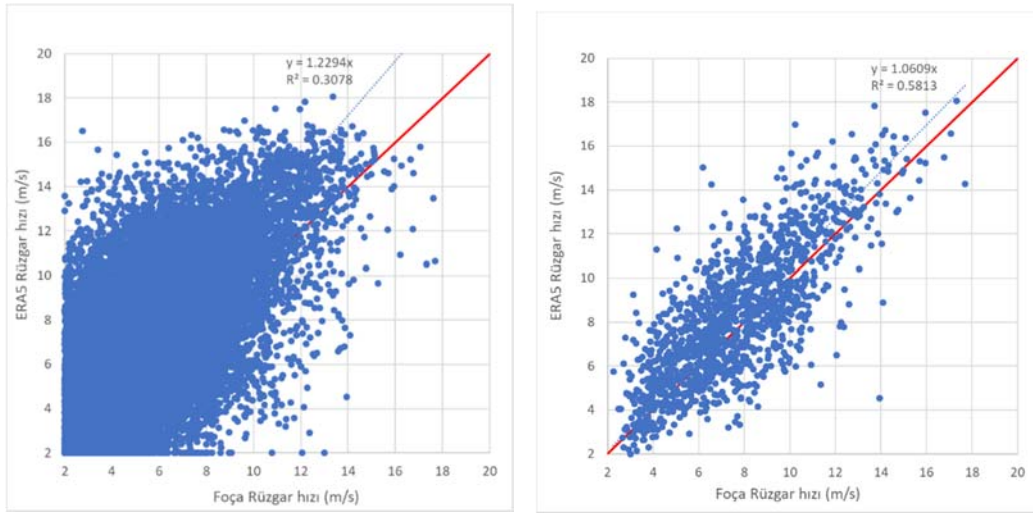
Rüzgâr iklimini belirlemek için uzun zamanlı verilere ihtiyaç vardır. ECMWF tarafından, Avrupa Komisyonu Copernicus İklim Değişikliği Hizmetinin (C3S) bir parçası olarak üretilen ERA5 adlı en son modelden 1979'dan günümüze kadar elde etmek mümkündür. İzmir Körfezi girişine yakın



Şekil 2 - ERA5 verileri ve Foça rüzgâr ölçüm istasyonunun konumları

bir noktada (38.8K 26.5 D) ERA5 saatlik rüzgâr verileri seçilmiş ve veriler ECMWF web sitesinden indirilmiştir. ERA5'in tutarlılık ve çözünürlük açısından iklim hesaplamaları için mevcut en iyi açık veri setlerinden birini temsil ettiği bilinmesine rağmen (Özbahçeci, 2020, Özbahçeci vd., 2020), verilerin rüzgâr iklimi analizinde kullanılmadan önce doğrulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, doğrulama analizi, İzmir Büyükşehir Belediyesi'nin Foça'da gerçekleştirdiği yerinde ölçümler ile yapılmıştır. Foça verileri ERA5 veri noktasına en yakın istasyonun Foça olmasından dolayı tercih edilmiştir. Şekil 2'de, ERA-5 rüzgâr verilerinin alındığı nokta ile Foça ölçüm istasyonunun yeri gösterilmiştir.

Doğrulama çalışmalarının detayları Ak vd. (2022)'de verilmiştir. Ak vd. (2022)'ye göre aynı saatlere karşılık gelen tüm rüzgar verisi karşılaştırıldığında ERA5 Foça'da ölçülen rüzgâr verisinden daha yüksektir ve saçılım fazladır. Ancak gün içindeki maksimum rüzgar hızı karşılaştırıldığında iki verinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 3'te karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 3 - ERA5 ve Foça rüzgar hızlarının karşılaştırılması (soldaki aynı saate denk gelen tüm veri, sağdaki günlük maksimum rüzgar)

### Deniz Suyu Seviyesi Verisi

Bu çalışmada iki farklı deniz suyu seviyesi verisi kullanılmıştır. Bunlar:

- 1) İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından Bostanlı ve Pasaportta yerinde ölçüm verisi
- 2) Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) programı kapsamında İzmir Menteş istasyonunda ölçülen su seviyesi verisi

İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından gerçekleştirilen su seviyesi ölçümleri yaklaşık 5 yıllıktır. Bu veri gel-git ve meteorolojik etmenlerle oluşan su seviyesi değişimlerini incelemek için yeterlidir. Ancak su seviyesindeki uzun süreli değişim eğilimini izlemek için TUDES verilerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

### Bostanlı ve Pasaport Deniz Suyu Seviyesi Verisi

2017 yılından itibaren İzmir iç körfezi içindeki su seviyesi İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından Bostanlı ve Pasaport istasyonlarında ölçülmektedir. 10 dk süreli ölçümler 1 sn aralıklarla alınmakta ve bu 10 dk'lık verinin minimum, ortalama ve maksimum değerleri kayıt edilmektedir. Bostanlı istasyonu Şekil 4'de verilmektedir.



Şekil 4 - Bostanlı deniz suyu seviyesi ölçüm istasyonu

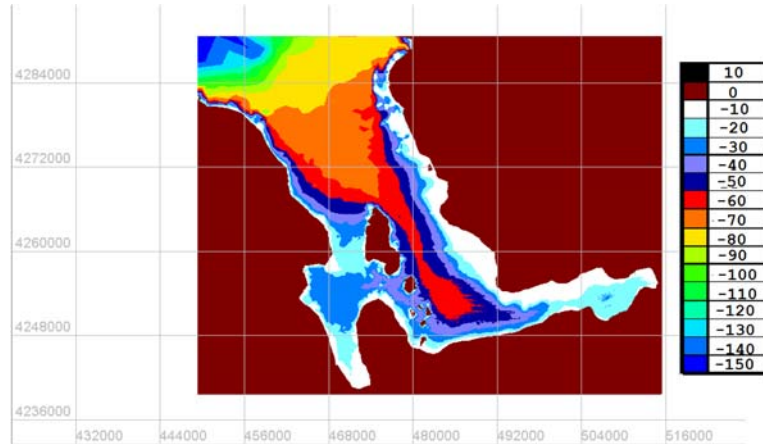
Bostanlı ve Pasaport istasyonlarında ölçülen su seviyeleri TUDKA-99'a (Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı) göre kalibre edilerek sonuçlar verilmektedir.

#### Menteş Deniz Suyu Seviyesi Verisi

Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) programının 20 gelgit istasyonundan biri Urla, Mentеш'te bulunmaktadır. 2000 yılından itibaren su seviyesi ölçümleri yapılmaktadır. 2000 ve 2001 yılında 15'er dakikada bir alınan ölçümler 2002den itibaren 10 dakikada bir alınmaya başlamıştır. Veriler TUDES veri sisteminden ücretsiz olarak indirilebilmektedir. Ancak ücretsiz veriler TUDKA99'a göre referans alınarak kalibre edilmemiştir.

#### Batimetri Verisi

Batimetri verisi, İzmir Büyükşehir Belediyesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'nden Dr. Gökhan Kaboğlu tarafından sağlanmıştır. Batimetri verisi X, Y, Z verisi olarak alınmış ve Blue Kenue (Kanada Ulusal Araştırma Kurumu tarafından geliştirilmiştir) isimli program kullanılarak 5mx5mlik düzenli veriye çevrilmiştir.

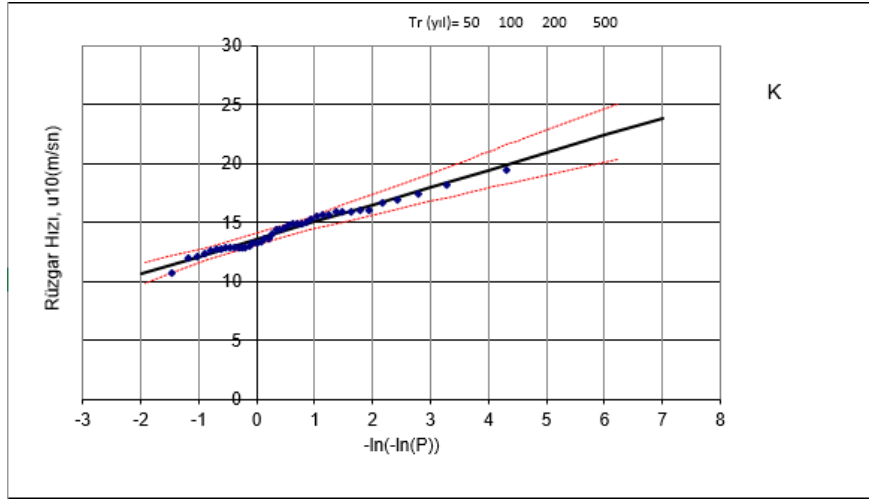


Şekil 5 - İzmir körfezi batimetre haritası (kahverengi kısım karayı temsil etmektedir)

## RÜZGÂR HIZI İÇİN EKSTREM DEĞER İSTATİSTİĞİ ANALİZİ

Uzun dönemde meydana gelebilecek ekstrem rüzgar değerlerinin bulunması için 42 yıla ait maksimum yıllık rüzgar verileri kullanılmış ve yapılan çalışmada en iyi uyum Gumbel dağılımında yakalanmıştır.

Şekil 6'da Kuzey yönü için Gumbel dağılımına uydurulan veri %95 güven aralığı eğrileri ile gösterilmiştir. Şekil 6'dan üstteki x-ekseninde 50,100,200 ve 500 yıllık yineleme periyoduna karşılık gelen rüzgâr hızlarını y eksenindeki verilerden okumak mümkündür. Buna göre  $R_p=100$  yıl için kuzeyden esen rüzgârın hızı yaklaşık  $20,3\pm 2,0$  m/s'ye eşittir. Ekstrem rüzgâr hızı analizinden sonra 100 yıllık yineleme periyoduna sahip rüzgâr hızları hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6 - Kuzey yönü için Gumbel dağılımı ile ekstrem rüzgâr hızı analizi

Tablo 1 - Yönlere Göre Yineleme periyodu 100 yıl olan rüzgâr hızları ve %95 Güven Aralığı Alt ve Üst Limitleri

	Rüzgâr hızı (m/s)		
	Üst Limit	TR=100 yıl	ALT Limit
K	22.08	20.33	18.58
KKB	18.60	17.09	15.58
KB	18.60	16.93	15.26
BKB	19.44	17.64	15.84
B	20.28	18.31	16.34
BGB	20.13	18.33	16.53
GB	20.22	18.61	16.99
GGB	20.25	19.01	17.77
G	21.63	20.52	19.41
GGD	22.62	21.17	19.72
GD	19.54	17.96	16.39

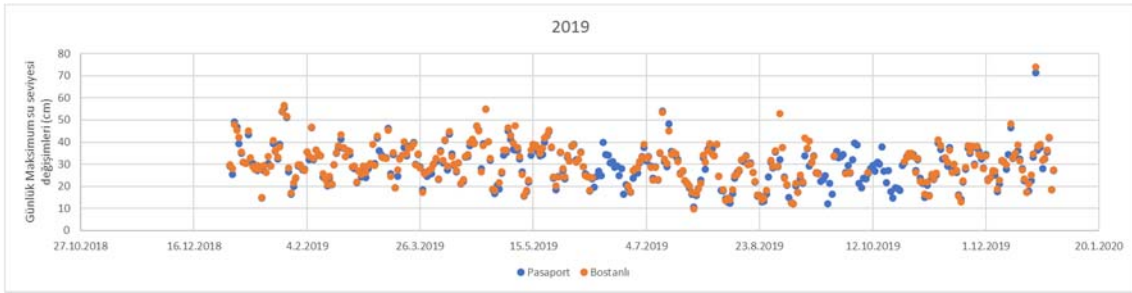


## DENİZ SUYU SEVİYESİ DEĞİŞİMİ

Su seviyesi değişimi yineleme periyoduna ve gerçekleşme sıklığına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Kamphius, 2020):

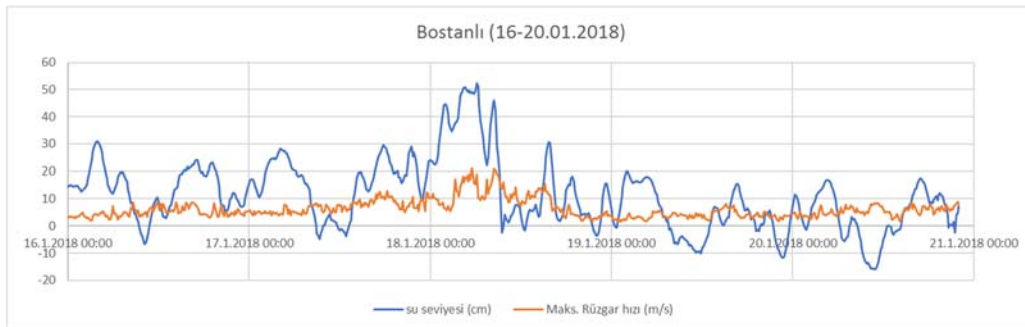
- Kısa Dönemli: Gelgitler, Fırtına Kabarması ve Barometrik Kabarma
- Mevsimsel
- Uzun Vadeli: İklimsel Değişim, İklim Değişikliği Nedeniyle Deniz Seviyesinin Yükselişi
- Nadir ve Aşırı olaylar: Kasırgalar ve Tsunamiler

Bu projede, deniz suyu seviyesindeki değişimleri belirlemek için, İzmir Belediyesi'nin Bostanlı ve Pasaport (Konak) lokasyonlarında ölçtüğü deniz suyu seviyesi verileri analiz edilmiştir. Rüzgarsız bir zaman aralığında, ortalama su seviyesi kontrol edildiğinde, astronomik gelgit nedeniyle su seviyesinin günde iki kez arttığı görülmüştür. Deniz suyu seviyesindeki günlük maksimum değişimleri hesaplamak için, bir gündeki ölçülen su seviyelerinin ortalaması alınarak bağıl sıfır seviyesi belirlendikten sonra bu ortalama değer minimum ve maksimum su seviyesinden çıkarılmıştır. Şekil 7, 2019 yılında Bostanlı ve Pasaport ölçüm noktaları için deniz suyu seviyesinde hesaplanan günlük maksimum değişimleri göstermektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, astronomik gelgit nedeniyle deniz seviyesi değişimi 10-40 cm arasındadır. Su seviyesi 40 cm'den fazla olduğunda fırtınanın varlığından bahsedilebilir.



Şekil 7 - 2019 yılında Bostanlı ve Pasaport ölçüm noktaları için deniz seviyesinde hesaplanan günlük maksimum değişimler

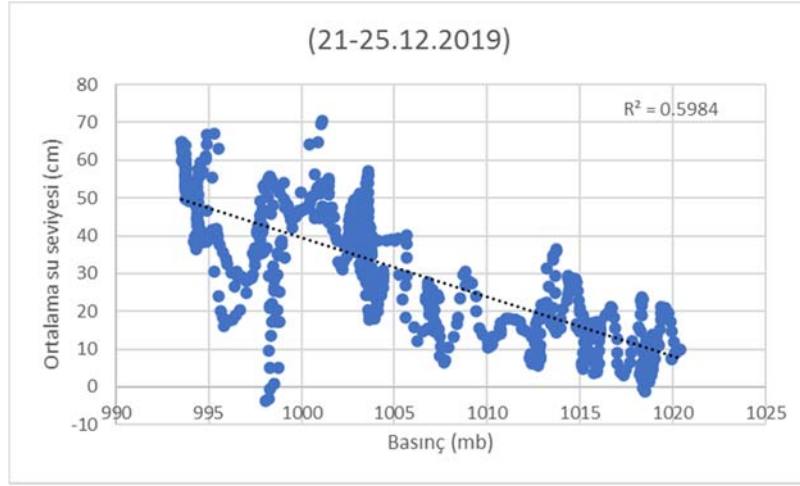
Fırtına kabarmasını belirlemek için yüksek rüzgârlı veriler incelenmiştir. Şekil 8, 16-20/01/2018 tarihleri arasındaki rüzgâr hızının ve su seviyesinin değişimini Bostanlı istasyonu için göstermektedir. En şiddetli su seviyesi değişimi 18.02.2018 tarihinde görülmüştür. Ortalama su seviyesinin fırtına öncesi 0-30 cm arasında olduğunu ve rüzgârın şiddeti arttıkça su seviyesinin arttığını ve 60 cm'ye ulaştığını göstermektedir. Devamında rüzgâr hızının düşüşüyle, su seviyesinin de düştüğü görülmektedir. 5 yıllık veriler incelendiğinde 23.12.2019 tarihinde Bostanlı'da ortalama su seviyesinin maksimum 76 cm'ye ulaştığı görülmüştür.



Şekil 8 - Bostanlı'da fırtına sırasında rüzgâr hızının ve su seviyesinin değişimi

Kuvvetli rüzgârlar büyük basınç değişimlerinin sonucu olduğundan, genellikle bir fırtına kabarmasına barometrik bir kabarma eşlik eder ve fırtına kabarması hesaplamalarında barometrik koşulların da dikkate alınması gerekir. Şekil 9'da gösterildiği gibi, şiddetli bir fırtına sırasında ortalama su seviyesi basınçla ters orantılıdır ve aralarında güçlü bir korelasyon vardır.

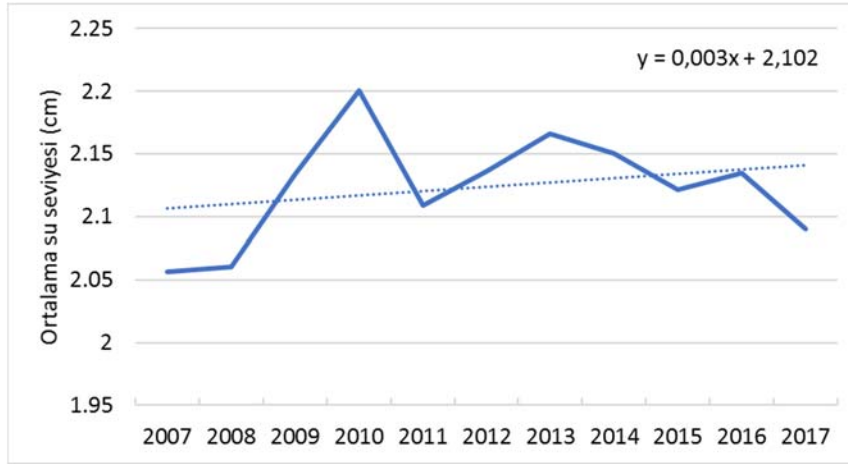
Bostanlı ve Pasaport'ta ölçülen deniz seviyesi verilerinin analizi, İzmir Körfezi'nde gelgit seviyesinin 10-40 cm arasında olduğunu göstermektedir. Ayrıca, fırtına ve barometrik kabarmalar nedeniyle ortalama su seviyesi 80 cm'ye kadar çıkabilmektedir.



Şekil 9 - Bostanlı'da şiddetli bir fırtına sırasında basınç ve ortalama deniz suyu seviyesi arasındaki ilişki

Şekil 10, Urla Menteş'te bulunan TUDES istasyon verilerine dayanılarak yapılan regresyon analizi sonucunu göstermektedir. Sonuçlarda 2007-2017 yılları arasında su seviyesinde artış eğilimi olduğu görülmektedir. Bu artış kabaca 3mm/yıl olarak tahmin edilebilir. Buna göre önümüzdeki 50 yıl içinde deniz seviyesinin 15 cm yükselebileceği tahmin edilebilir.

Su seviyesindeki değişimleri araştırmak için yapılan tüm bu analizler sonucunda, gelgit, fırtına kabarması, barometrik kabarma, deniz seviyesinin yükselmesi ve iklim değişikliği nedeniyle fırtına sırasında su seviyesinin yaklaşık 1.0 m'ye kadar yükselebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 10 - 2007-2017 yılları arasında su seviyesindeki artış

## DALGA MODELLEMESİ

Bu çalışmada, dalga modellemesi için literatürde sıklıkla kullanılan ve güvenilir olduğu kanıtlanan üçüncü nesil bir dalga modeli, SWAN (SimulatingWavesNearshore) kullanılmıştır. Modelde girdi olarak 2. Bölümde anlatılan, Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi'nin (ECMWF) açık deniz rüzgâr verilerinin en yenisi ve bir yeniden analiz verisi olan ERA5 rüzgâr verisi kullanılmıştır. Model kıyıya yakın dalgaları simüle etmek için iki boyutlu durağan olmayan modda çalıştırılmıştır. Model çalışmalarında şekil 5'de verilen batimetri verileri ve Tablo 1'de verilen yön ve rüzgâr verileri kullanılmıştır. Modelde hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2** - Kritik alanlar için SWAN modeli kullanılarak hesaplanan maksimum dalga yükseklikleri ve periyotları

Konum Adı	Hs(m)	Tp(s)
Bostanlı	1,13	3,87
Poligon	1,46	4,16
Karşıyaka	1,17	4,62
Mavişehir	0,74	3,74
Konak	1,43	4,85
Bayraklı	1,20	4,77

## DALGA AŞMASI

İzmir kıyı şeridinde bulunan gezinti alanları, eğimli tip kıyı tahkimatları veya dik kıyı duvarları ile denizin etkilerinden korunmaya çalışmaktadır. Yüksek kırılmalıya sahip bu bölgelerde, dalga aşma problemi önemli sıkıntılara yol açmaktadır. Bu nedenle, İzmir körfezi çevresinde 45 farklı noktada (Tablo 3) ölçülen dik kıyı duvarı kesit özelliklerini belirlenmiştir ve dalga aşma değerleri hesaplanmıştır.

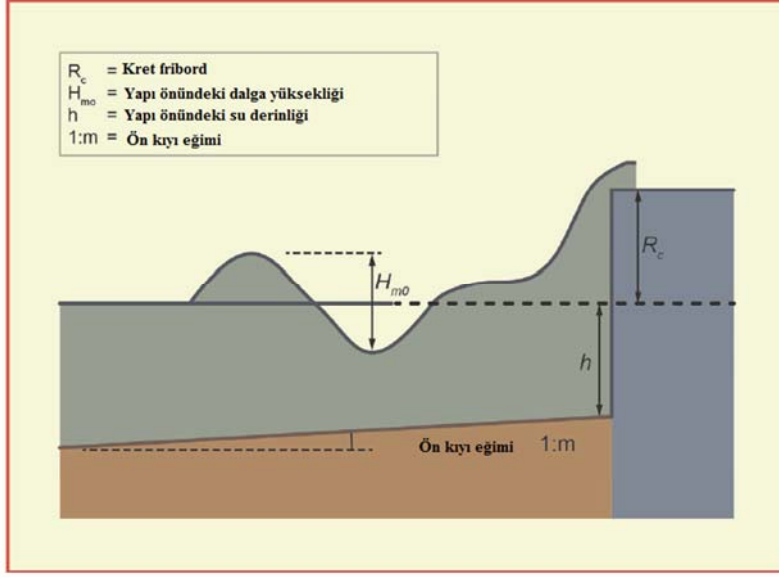
Aşma miktarı hesaplamaları için, dalga iklimi çalışmalarından elde edilen dalga yükseklik ve periyotları (Tablo 2) kullanılmıştır. Dalga verileri, aşmanın hesaplanacağı yapı önündeki en kritik dalga koşullarını kapsamaktadır. Tablo 3 ve belirtilen dik yapı kesitleri, bahsedilen fırtına koşulları altında test edilmiştir. Hesaplamalar iki farklı su seviyesi koşulu için yapılmıştır. Birinci koşul, körfezdeki Durgun Su Seviyesi (SWL, +0.00) koşulu, ikincisi ise yine önceki bölümlerde anlatılan Yüksek Su Seviyesi (HWL, +1.00) koşuludur.

**Tablo 3** - Dik Kıyı Duvarı Kesitleri

Konum Adı	#	Kesit	Su derinliği h (m)	Kret yüksekliği Rc (m)
ALAYBEY	V01	K1	1.91	1.46
	V02	K2	1	1.46
	V03	K3	2.17	1.46
	V04	K4	1.91	1.46
BAYRAKLI 2. ETAP	V05	Kesit 1-1	2.8	1.4
	V06	Kesit 2-2	2.8	1.4

<b>BAYRAKLI İNİŞ MERDİVENLERİ</b>	V07	Kesit 1-1	2.2	1.67
	V08	Kesit 2-2	2.2	1.67
	V09	Kesit 3-3	2.2	1.67
<b>KIYI PROJELER-KESİTLER</b>	V10	Kesit D-D	2.2	1.6
	V11	Kesit E-E	2.2	1.6
	V12	Kesit F-F	2.2	1.6
	V13	Kesit G-G	2.2	1.6
	V14	Kesit H-H	2.2	1.6
	V15	Kesit I-I	2.2	1.67
	V16	Kesit J-J	2.2	1.67
	V17	Kesit L-L	2.2	1.15
<b>BAYRAKLI 3. ETAP</b>	V18	Kesit 1-1	1.1	1.22
<b>BOSTANLI 1. ETAP- SAHİL DETAY</b>	V19	Kesit B-B	2.46	1.65
<b>BAYRAKLI 1. ETAP- ARAZİ KESİTLERİ</b>	V20	Kesit 2-2	3.35	1.65
<b>KONAK MEYDAN OTOBAN VİRAJ</b>	V21	ÖLÇÜM	3.18	1.4
<b>KARATAŞ</b>	V22	C-C Kesiti	0.63	1.46
	V23	D-D Kesiti	0.6	1.46
	V24	E-E Kesiti	0.6	1.46
	V25	F-F Kesiti	0.6	1.46
	V26	G-G Kesiti	0.6	1.46
	V27	H-H Kesiti	0.6	1.46
<b>GÜZELYALI</b>	V28	ÖLÇÜM	1.2	1.9
<b>Karşıyaka 1.Etap DENİZ MERDİVENİ 1 DETAY</b>	V29	A-A Kesiti	2.43	1.15
	V30	B-B Kesiti	2.43	1.2
	V31	C-C Kesiti	2.42	1.2
<b>Karşıyaka 1.Etap DENİZ MERDİVENİ 2 DETAY</b>	V32	A-A Kesiti	2.46	1.12
	V33	B-B Kesiti	2.43	1.2
	V34	C-C Kesiti	2.42	1.2
<b>1070 KARŞIYAKA ANIT ÇEVRESİ</b>	V35	KESİT 1A	2.42	1.33
	V36	KESİT 1	2.42	1.95
	V37	KESİT 2	2.42	1.15
	V38	KESİT 3	2.42	1.15
<b>KORDON Pasaport iskele civarı</b>	C1		2.350	1.300
	C2		2.100	1.300
	C3		1.850	1.250
	C4		2.000	1.150
	C5		2.300	1.200
	C6		1.800	1.270
	C7		1.250	1.300

Dalga aşma debileri EurOtop (2018)'de verilen yöntemler doğrultusunda hesaplanmıştır. Bu yöntemde, dalga aşma debisi (q), duvar kret kotu (Rc), yapı önü su derinliği (h) ve yine yapı önüne gelen dalga parametrelerinin ( $H_{m0}, T_{m-1,0}$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanır (Şekil 11).



Şekil 11 - Dik kıyı koruma yapılarındaki dalga aşma hadisesini açıklayan taslak şekil

EurOtop (2018) de dik yapılar için önerilen dalga aşım hesaplama yönergesi aşağıda özetlenmiştir:

a) Yapının önünde deniz taban etkisi yok ise (derin deniz,  $h/L_i > 0.5$ ).  $L_i$ ,  $h$  su derinliğinde  $T_{m-1,0}$ 'a dayalı hesaplanan dalga boyudur.

$$\frac{q}{\sqrt{g.H_{m0}^3}} = 0.047. \exp \left[ - \left( 2.35 \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{1.3} \right] \quad (1)$$

b) Deniz taban etkisi var, fakat dalga kırılması yok ise (impulsif olmayan,  $\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} > 0.23$ ).

$$\frac{q}{\sqrt{g.H_{m0}^3}} = 0.05 \exp \left[ -2.78 \frac{R_c}{H_{m0}} \right] \quad (2)$$

burada,  $L_{m-1,0}$ ,  $T_{m-1,0}$ 'a dayalı hesaplanan derin deniz dalga boyudur ( $L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2/2\pi$ ).

c) Kırılan dalgalar için, (impulsif,  $\frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} \leq 0.23$ ).

$$\frac{q}{\sqrt{g.H_{m0}^3}} = 0.011 \left( \frac{H_{m0}}{hs_{m-1,0}} \right)^{0.5} . \exp \left[ -2.2 \frac{R_c}{H_{m0}} \right], \quad 0 < R_c/H_{m0} < 1.35 \quad (3)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g.H_{m0}^3}} = 0.0014 \left( \frac{H_{m0}}{hs_{m-1,0}} \right)^{0.5} \left[ \frac{R_c}{H_{m0}} \right]^{-3}, \quad R_c/H_{m0} \geq 1.35 \quad (4)$$

Burada,  $s_{m-1,0}$ , dalga dikliğidir ( $2\pi H_{m0}/gT_{m-1,0}^2$ ).

**Tablo 4 - SWL durumu için dik kıyı koruma yapılarında hesaplanan dalga aşma debileri**

					SWL	HWL
#	h (m)	Rc (m)	Hmo (m)	Tm-1,0 (s)	q (l/m/s)	q (l/m/s)
V01	1.910	1.460	1.2000	4.500	4.734	<b>68.086</b>
V02	1.000	1.460	1.2000	4.500	6.543	<b>82.128</b>
V03	2.170	1.460	1.2000	4.500	4.442	<b>70.919</b>
V04	1.910	1.460	1.2000	4.500	4.734	<b>68.086</b>
V05	2.800	1.400	1.2000	4.500	4.435	<b>81.495</b>
V06	2.800	1.400	1.2000	4.500	4.435	<b>81.495</b>
V07	2.200	1.670	1.2000	4.500	2.948	<b>41.213</b>
V08	2.200	1.670	1.2000	4.500	2.948	<b>41.213</b>
V09	2.200	1.670	1.2000	4.500	2.948	<b>41.213</b>
V10	2.200	1.600	1.2000	4.500	3.352	<b>51.275</b>
V11	2.200	1.600	1.2000	4.500	3.352	<b>51.275</b>
V12	2.200	1.600	1.2000	4.500	3.352	<b>51.275</b>
V13	2.200	1.600	1.2000	4.500	3.352	<b>51.275</b>
V14	2.200	1.600	1.2000	4.500	3.352	<b>51.275</b>
V15	2.200	1.670	1.2000	4.500	2.948	<b>41.213</b>
V16	2.200	1.670	1.2000	4.500	2.948	<b>41.213</b>
V17	2.200	1.150	1.2000	4.500	<b>9.934</b>	<b>145.432</b>
V18	1.100	1.220	1.2000	4.500	<b>10.692</b>	<b>124.448</b>
V19	2.460	1.650	1.2000	4.500	1.789	<b>35.246</b>
V20	3.350	1.650	1.2000	4.500	0.875	<b>43.937</b>
V21	3.180	1.400	1.2000	4.500	<b>9.826</b>	<b>123.053</b>
V22	0.630	1.460	1.2000	4.500	<b>18.451</b>	<b>137.809</b>
V23	0.600	1.460	1.2000	4.500	<b>18.907</b>	<b>139.095</b>
V24	0.600	1.460	1.2000	4.500	<b>18.907</b>	<b>139.095</b>
V25	0.600	1.460	1.2000	4.500	<b>18.907</b>	<b>139.095</b>
V26	0.600	1.460	1.2000	4.500	<b>18.907</b>	<b>139.095</b>
V27	0.600	1.460	1.2000	4.500	<b>18.907</b>	<b>139.095</b>
V28	1.200	1.900	1.2000	4.500	5.713	<b>49.564</b>
V29	2.430	1.150	1.2000	4.500	7.754	<b>138.770</b>
V30	2.430	1.200	1.2000	4.500	6.533	<b>123.226</b>
V31	2.420	1.200	1.2000	4.500	6.547	<b>123.226</b>
V32	2.460	1.120	1.2000	4.500	<b>8.810</b>	<b>149.023</b>
V33	2.430	1.200	1.2000	4.500	6.533	<b>123.226</b>
V34	2.420	1.200	1.2000	4.500	6.547	<b>123.226</b>
V35	2.420	1.330	1.2000	4.500	4.809	<b>90.480</b>
V36	2.420	1.950	1.2000	4.500	1.526	<b>12.331</b>
V37	2.420	1.150	1.2000	4.500	7.770	<b>138.770</b>
V38	2.420	1.150	1.2000	4.500	7.770	<b>138.770</b>
C1	2.350	1.300	1.2000	4.500	<b>16.445</b>	<b>122.957</b>

<b>C2</b>	2.100	1.300	1.2000	4.500	<b>17.397</b>	<b>127.818</b>
<b>C3</b>	1.850	1.250	1.2000	4.500	<b>21.989</b>	<b>143.966</b>
<b>C4</b>	2.000	1.150	1.2000	4.500	<b>28.992</b>	<b>163.657</b>
<b>C5</b>	2.300	1.200	1.2000	4.500	<b>23.187</b>	<b>144.488</b>
<b>C6</b>	1.800	1.270	1.2000	4.500	<b>20.843</b>	<b>140.844</b>
<b>C7</b>	1.250	1.300	1.2000	4.500	<b>22.549</b>	<b>150.032</b>

İzmir Körfezi'ndeki mevcut dik kıyı duvarları incelendiğinde, kronman duvarlarında denize doğru olan bir çıkıntı görülür. Bu çıkıntının tasarım amacı, duvar üzerinde yukarı doğru tırmanan dalgayı denize doğru yönlendirerek dalga aşım miktarını azaltmaktır. Bu çıkıntılar, duvarın tepesinde bulunan ve nispeten küçük yapılar olup küçük dalga aşması durumlarında etkin çalışırlar. Bu üst yapıların dalga aşım hesaplarına yansımaları, aşağıdaki prosedüre dayalı olarak yapılır:

$$\gamma = 1, \quad R_c/H_{m0} \leq 0.5 \quad (5)$$

$$\gamma = 1.3 - 0.6 R_c/H_{m0}, \quad 0.5 < R_c/H_{m0} \leq 1$$

$$\gamma = 0.7, \quad R_c/H_{m0} > 1$$

EurOtop 2018 verilen limitlere çerçevesinde, dik kıyı duvarları için insan ve araç trafiğini etkilemeyecek 8,2 l/m/s' lik ( $H_{m0}=1,2$  m dalga yüksekliği için) üst sınır dalga aşma debisi belirlenmiştir.

Önceki bölümlerde tartışıldığı gibi, iki farklı deniz seviyesi senaryosu ele alınmıştır. Bunlar Durgun Su Seviyesi (SWL, +0.00) ve Yüksek Su Seviyesi koşullarıdır (HWL, +1.00). Yüksek Su Seviyesi koşulu, şiddetli bir fırtına sırasındaki deniz seviyesi yükselmesini ve gelecekteki olası deniz seviyesi yükselmelerini kapsayan koşuldur. Tablo 4 her iki su seviyesi durumu için hesaplanan ortalama aşma debilerini gösterir. SWL koşulunda 39 dik kıyı koruma kesitinden 17'sinde, tolere edilebilir aşma debisini üzerinde değerler elde edilmiştir. Bu kesitler V17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 32 ve C1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 kesitleridir. Bunun yanısıra HWL koşulu için tüm değerler tolere edilebilir debinin ( $q>8.2$  l/m/sn) üzerindedir. Tolere edilebilir değerlere düşmek için, bazı ek önlemlerin alınması gerekmektedir.

## SONUÇLAR

İzmir körfezindeki kıyı taşkın afetlerine neden olan, rüzgâr iklimi, su seviyesi değişimleri, dalga ve dalga aşması mekanizmaları detaylıca incelenmiştir.

ECMWF' nin en yeni saatlik yeniden analiz verisi ERA5'in, 1979 ve 2021 yılları arasındaki rüzgâr veri seti, İzmir Belediyesi'nin yerinde rüzgâr ölçümleri kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulamadan sonra, çeşitli rüzgâr yönleri için 100 yıllık yinelenme süresi ile ekstrem rüzgâr hızları elde edilmiştir.

Su seviyesindeki değişimler incelenmiş ve gelgit, fırtına kabarması, barometrik kabarma, deniz seviyesinin yükselmesi ve iklim değişikliği etkileri dikkate alındığında su seviyesinin fırtına sırasında 1.0 m'ye kadar yükselebileceği sonucuna varılmıştır.

ERA5'den elde edilen ekstrem rüzgâr verileri ve su seviyesindeki değişimler kullanılarak dalga, dünyada yaygınca kullanılan bir dalga tahmin modeli olan SWAN ile modellenmiştir. Böylece İzmir körfezi boyunca taşkınlar açısından kritik bölgelerin önündeki dalgalar hesaplanmıştır.

Hesaplanan ekstrem dalga verileri, körfez boyunca 40'dan fazla dik kıyı duvarlarından dalga aşım miktarlarının hesaplanmasında kullanılıp, hesaplanan dalga aşım miktarları, izin verilen limitlerle karşılaştırılmıştır. Dikey duvar koruma yapılarının dalga aşması ve kıyı taşkınları açısından kritik olduğu tespit edilmiştir.

### **Teşekkür**

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine destek veren ve su seviyesi, rüzgâr ölçüm verileri ve kıyı yapıları kesitlerini paylaşan İzmir Büyükşehir Belediyesi'ne, TUDES Mentеш mareograf istasyonu su seviyesi verilerini sağlayan Harita Genel Komutanlığı'na, ERA5 rüzgâr veri setini sağlayan ECMWF'e teşekkür ederiz

### **Kaynaklar**

1. Ak S., Ozbahceci BO, Kisacık D. (2022) "Effect of Sea Level Fluctuations On Coastal Flood Hazards In Izmir Bay", Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference on Hydroscience Engineering, Izmir Turkey
2. Alpar B., Yuce H. (1996) "Sea-level variations in the eastern coasts of the Aegean Sea". Estuar Coast Shelf Sci 42: 509–521
3. Beşiktepe, S., Sayin, E., İlhan, T., & Tokat, E. (2011) "İzmir Körfezi Akıntı Dinamiğinin Model ve Gözlem Yardımıyla İncelenmesi" 7. Kıyı Mühendisliği Konferansı Bildiri Kitabı
4. ECMWF: European Center for Medium-Range Weather Forecasts.
5. ECMWF. ERA 5. Retrieved from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
6. EurOtop (2018) Manual on wave overtopping of sea defenses and related structures, Second Edition, <http://www.overtopping-manual.com/>
7. Kamphius, J.W. (2020) Introduction to Coastal Engineering and Management. Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 48, World Scientific, 3rd Edition.
8. Karaca, M., & Nicholls, R. (2008). Potential Implications of Accelerated Sea-Level Rise for Turkey. Journal of Coastal Research - J COASTAL RES, 24, 288–298. <https://doi.org/10.2112/07A-0003.1>
9. Kisacık, D., Tarakcioglu, G.O., Baykal, C., (2019) "Stilling wave basins for overtopping reduction at an urban vertical seawall – The Kordon seawall at Izmir", Ocean Engineering, Volume 185, 2019, Pages 82-99, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.033>.
10. Ozbahceci B.O., Turgut A.R., Bozoklu A., Abdalla, S. (2020) "Calibration and Verification of Century Based Wave Climate Data Record Using Satellite Altimeter Data". Adv. Space Res. 66 (10), 2319-2339
11. Ozbahceci, B.O., 2020. "Extreme value statistics of wind speed and wave height of the Marmara Sea based on combined radar altimeter data." Adv. Space Res. 66 (10), 2302–2318. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.025>.
12. SWAN team, (2017) SWAN Scientific and Technical Documentation. SWAN Cycle III version 41.20 Delft University of Technology, Netherlands.



## Konteyner Terminali Yanaşma Yeri Kapasite Ölçüm Kriterlerinin Değerlendirilmesi

İdil Esra ELVER<sup>1</sup>, Esin ÇEVİK<sup>2</sup>

### ÖZET

Dünya ekonomisinin gelişmesiyle artan yük hacimleri ve ticaret yolları için verimli şekilde işleyen bir liman sisteminde, gerekli kapasiteyi korumak ve artan talebi karşılamak için liman altyapısına yatırım yapılması ihtiyacı doğmaktadır. Liman sistemi en genel anlamda üç bileşenden oluşmaktadır; deniz tarafı, kara tarafı ve kapıdır, bunların her birinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışmada liman altyapısı için yatırım karar verme sürecine yardımcı olacak mevcut kapasiteyi bütüncül değerlendiren yöntemler tartışılacak ve liman sistemi içindeki darboğazlar belirlenecektir. Bu amaçla dikkate alınan bir konteyner terminali vaka çalışması ile limanın deniz tarafının yani rıhtımlarının teorik kapasitesi farklı yöntemlerle hesaplanacak ve gerçekleşen kapasite kullanımı ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Konteyner terminalleri, yanaşma yeri, kapasite ölçümü.

### ABSTRACT

#### *The Evaluation of the Container Terminal Berthing Capacity Measurement Criteria*

As the world economy develops, there is a need to invest in port infrastructure in order to maintain the necessary capacity and meet the increasing demand in an efficient port system for increasing trade routes and cargo volumes. In the most general sense, the port system consists of three parts; sea side, land side and gate, each of which needs to be evaluated separately. In the study, methods that holistically evaluate the existing capacity to assist the investment decision-making process for port infrastructure will be discussed and bottlenecks within the port system will be identified. With a considered container terminal case study, the theoretical capacity of the sea side of the port, namely the quays, will be calculated by different methods and evaluated by comparing it with the actual one.

**Keywords:** Container terminals, berth, capacity measurement.

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - idil.esra.elver@gmail.com

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cevik@yildiz.edu.tr

## **GİRİŞ**

Günümüzde, dünyada ve ülkemizde uluslararası ticarete büyük oranda deniz yolu kullanılmaktadır. Bu anlamda, konteyner taşımacılığı ile limanlar büyük önem arz etmektedir. Dünya ticaretinin giderek artan hacmi, beraberinde konteyner terminallerinin önemini de arttırmaktadır. Konteyner terminalleri, konteynerlerin taşıma modlarının değiştirildiği, ambalajlama hizmetlerinin sunulduğu, konteynerlerin elleçlendiği ve konteynerlerin, gemiden demiryolu veya karayoluna akışının sağlandığı (tersi de olabilir) tesislerdir [1]. Tanımdan anlaşılacağı üzere, konteyner terminalleri; birçok farklı operasyonun yürütüldüğü, çok bileşenli, karmaşık bir yapıya sahiptir.

Konteyner terminali toplam kapasitesi, her bir terminal bileşenine ait kapasiteden farklı ölçülerde etkilenmektedir. Artan ticari taleplerin karşılanıp, diğer konteyner terminalleri ile rekabet edilebilmesi, terminal bileşenlerinin etkili yönetilmesi ve bu sayede bileşenlere ait kapasitenin yüksek oranda değerlendirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Literatürde, limanlarda mevcut kapasitenin değerlendirilmesine yönelik, kapasiteyi etkileyen faktörlerin tanımlanıp, mevcut durumlar üzerinde ne gibi değişiklikler yapılır ise kapasite artışı sağlanabileceği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Lagoudis vd. (2011) [2], liman kapasitesinin ölçütlerini incelemişler, dinamik ve statik kapasite kavramlarını liman bileşenleri üzerinde tek tek tanımlayıp, hesap yöntemlerini formüle etmişlerdir.

Tek bir liman bileşeni üzerinden kapasitenin değerlendirildiği çalışmalar da literatürde mevcuttur. Huang vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada, deniz trafiğinin giderek artması ile daha da önemli bir hale gelen demirleme alanlarının kullanımını analiz etmişlerdir.

Çolak vd. (2018) ise yapmış oldukları çalışmada, ithal konteynerlerin limanda istifleneceği en uygun alanın belirlenmesi üzerine araştırma yapmışlardır [4]. Mevcut operasyon süreci ile oluşturmuş oldukları iki senaryoyu karşılaştırarak, toplam yük boşaltma süresini kısaltan, gecikme zamanını azaltarak iş yükünü dengeleyen ve tıkanıklığı minimize eden bir yerleşim modeli meydana getirmeyi amaçlamışlardır.

Depolama alanı kapasitesi ile ilgili bir çalışma da Gençer ve Sekin (2019) tarafından yapılmış ve bu çalışmada, optimum depolama kapasitesinin elde edilmesine odaklanılmış, bu kapasitenin elde edilmesi için etkin saha planlamasının önemi tartışılmıştır.

Etkin saha planlamasına örnek olarak; gemiden boşaltılan yüklerin sahada yerleştirilecekleri yerin önceden belirlenmesi, saha içerisinde ihracat yüklerinin gidecekleri limana ve gidiş zamanlarına göre sınıflandırılmış bir şekilde istiflenmesi, gemi operasyonu sırasında tekrar elleçlemeye gerek duyulmayacak şekilde tüm yüklerin istiflenmesi verilmiştir [5].

Güven vd. (2014), konteyner terminal sahalarında bulunan ithalat, ihracat ve transit konteynerlerin istiflenme şekillerine odaklanmış bir çalışma yapmışlardır. Sahada konteynerler birkaç sıra halinde istiflenmektedir. Elleçleme sırası gelen konteyner, eğer istifteki diğer konteynerlerin altında kalmış ise birçok ekstra harekete sebep olacağından ekipmanın verimini düşürmektedir. Konteynerler yerleştirilirken, mümkün olduğunca az yeniden yerleştirme hareketi yapılması sağlanmalıdır. Konteynerler yüklenecekleri geminin yakınına istiflenirse, geminin geri dönüş süresi kısılır ve ekipmanlar daha verimli kullanılmış olur [6].

Phan vd. (2015) yapmış oldukları bir çalışmada, konteyner terminallerindeki elleçleme ekipmanlarının verimliliklerini araştırılmışlar ve tüm elleçleme sürecini kapsayan bir istatistiksel model ortaya koymuşlardır. Elleçleme operasyonu sırasında, genellikle konteynerler bir ekipmandan diğerine aktarılmaktadırlar. Bu aktarılma esnasındaki kayıp zamanlar ekipman verimliliğine olumsuz etki etmektedir. Bu çalışmada, elleçleme ekipmanlarının üretkenliklerinin,

bir sonraki aşamada kullanılacak ekipman ile birlikte değerlendirilmesi ile gerçeğe yakın bir şekilde elde edilebileceği görülmüştür.

## AMAÇ

Bu çalışmanın amacı; konteyner terminallerinde yanaşma yeri kapasitesini mevcut teorik yöntemlerle belirlemek ve mevcut durumu statik/dinamik analiz yöntemini kullanarak değerlendirmek, varsa darboğazların giderilmesi için önerilerde bulunmak ve yatırımların ne yönde yapılması gerektiğine katkı sunmaktır.

## YANAŞMA YERİ İÇİN ALTERNATİF KAPASİTE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Yanaşma yeri kapasitesi; yıl içerisinde her bir yanaşma yerinden hizmet alan gemi sayısı ile ölçülmekte olup yanaşan geminin tipi ve boyutlarına, limanın yıl içerisinde hizmet verebildiği gün sayısına, yanaşma yeri uzunluğuna ve derinliğine, demirleme alanına, limanda bulunan elleçleme ekipmanlarına ve liman sahasına bağlı olarak değişmektedir [8].

Soberón (2012) tarafından, Valenciaport Vakfı adına 2012 yılında yapılmış olan bir çalışmada, bir terminalin yanaşma yerinde bir yılda elleçlenen toplam konteyner miktarı hesaplanmıştır. Yıllık yanaşma yeri kapasitesi ( $K_y$ ) için Denklem 1 verilmiştir [9].

$$K_y = n \times \phi \times t_{yil} \times P \quad (1)$$

Burada;

$K_y$  : Terminalin veya yanaşma yerinin yıllık elleçleme kapasitesi (TEU/yıl)

$n$  : Yanaşma yeri sayısı

$\phi$  : Kabul edilebilir yanaşma yeri doluluk oranı

$t_{yil}$  : Terminalin bir yıl içerisindeki çalışma süresi (saat)

$P$  : Yıllık ortalama gemi üretkenliği (TEU/saat) olarak tanımlanmıştır.

Yanaşma yeri doluluk oranları, seçilmiş olan kuyruk sistemine (M/M/n, M/E<sub>k</sub>/n veya E<sub>k</sub>/E<sub>k</sub>/n) ve yanaşma yeri sayısına göre aynı bekleme süresi için elde edilmektedir. Soberón (2012), ortak kullanıcı ve kamuya ait terminallerde, M/E/n formunda, gelişlerin iyi planlandığı terminallerde ise E<sub>k</sub>/E<sub>k</sub>/n formunda kuyruk modellerinin kullanılmasını tavsiye etmiştir [9].

Yapılan çalışma sonucu elde edilmiş olan, farklı bekleme süreleri ve kuyruk modelleri için yanaşma yeri sayısına göre doluluk oranları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de verilen, izafi bekleme süresi ( $\varepsilon$ ), bekleme süresinin servis süresine oranı olup, Denklem 2’de verilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{T_b}{T_s} \quad (2)$$

$T_b$  : Bekleme süresi

$T_s$  : Servis süresi

Yıllık ortalama gemi üretkenliği ( $P$ ), yükleme ve boşaltma olmak üzere tüm hinterland ve transit yük miktarının ( $Q$ ), yanaşma yerinde harcanan brüt süreye ( $T_s$ ) oranı ile Denklem 3’teki gibi elde edilmektedir [9].

$$P = \frac{Q}{T_s} \quad (3)$$

**Tablo 1 - Yanaşma yeri doluluk oranları [9]**

n	$\phi$								
	$\varepsilon=T_b/T_s=0.05$			$\varepsilon=T_b/T_s=0.10$			$\varepsilon=T_b/T_s=0.20$		
	M/E <sub>2</sub> /n	M/E <sub>4</sub> /n	E <sub>2</sub> /E <sub>4</sub> /n	M/E <sub>2</sub> /n	M/E <sub>4</sub> /n	E <sub>2</sub> /E <sub>4</sub> /n	M/E <sub>2</sub> /n	M/E <sub>4</sub> /n	E <sub>2</sub> /E <sub>4</sub> /n
1	0.05	0.07	0.22	0.12	0.14	0.31	0.21	0.24	0.43
2	0.25	0.27	0.43	0.33	0.36	0.53	0.47	0.49	0.63
3	0.38	0.39	0.53	0.49	0.49	0.63	0.60	0.61	0.72
4	0.47	0.47	0.61	0.56	0.57	0.70	0.66	0.68	0.78
5	0.53	0.54	0.66	0.62	0.63	0.73	0.71	0.73	0.81
>6	0.57	0.58	0.69	0.66	0.67	0.77	0.74	0.76	0.84

Soberón (2012) tarafından yapılmış olan bu çalışmaya göre, terminal kapasite hesapları için geçerli olan bir diğer yaklaşım ise servis düzeyinin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir. Tablo 2’de görüldüğü üzere, buradaki iki temel değişken izafi bekleme süresi ve yıllık ortalama gemi üretkenliğidir (P) [9]. Servis düzeyleri; A en iyi, D ise en kötü şeklinde tanımlanmaktadır.

Bu durumda izafi bekleme süresinin minimum olduğu, yıllık ortalama gemi üretkenliğinin ise maksimum olduğu durum en iyi servis düzeyini vermekte ve AA ile tanımlanmaktadır.

**Tablo 2 - Servis düzeyleri [9]**

Servis Düzeyi	İzafi Bekleme Süresi, $\varepsilon$	Servis Düzeyi			
<b>D</b>	>0.20	-	-	-	-
<b>C</b>	0.10-0.20	-	CC	BC	AC
<b>B</b>	0.05-0.10	-	CB	BB	AB
<b>A</b>	<0.05	-	CA	BA	AA
Yıllık ortalama gemi üretkenliği (konteyner/saat) <b>P</b>		<35	35-50	50-65	>65
		<b>D</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
		<b>Servis düzeyi</b>			

Yanaşma yeri kapasitesinin teorik hesaplanması ile ilgili diğer bir çalışma ise Ligteringen (1999) tarafından, yanaşma yeri kullanım oranına bağlı olarak yapılmıştır [10]. Her bir yanaşma yerinde, bir yıldaki elleçleme miktarı TEU cinsinden, Denklem 4 ile edilebilmektedir.

$$c_b = p \times f \times N_b \times t_n \times m_b \quad (4)$$

Burada;

$c_b$  : Her bir yanaşma yerinde bir yılda elleçlenen ortalama TEU sayısı (TEU/yıl)

$p$  : Her bir vince ait brüt verim (tur veya TEU/saat)

$f$  : TEU faktörü, limanda bulunan 20 ft ve 40 ft boyutlarına sahip konteynerlerin oranı

$N_b$  : Yanaşma yeri başına vinç sayısı

$t_n$  : Yıllık çalışma saati (saat/yıl)  
 $m_b$  : Yanaşma yeri kullanım oranı

Thoresen (2003), yanaşma yeri kapasitesi ile ilgili olarak, haftada elleçlenen konteyner sayısını tanımlamış ( $C_{BOX}$ ) ve gemi gelişlerinin rastgele olması nedeniyle bir pik faktör kullanılmasını tavsiye etmiştir [11]. Yanaşma yeri kapasitesi,  $C_{BOX}$  (konteyner/hafta) Denklem 5'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$C_{BOX} = \frac{C_{TEU} \times P}{t_{hy} \times f} \quad (5)$$

Burada;

$C_{BOX}$  : Bir haftada elleçlenen konteyner sayısı (konteyner/hafta)  
 $C_{TEU}$  : Bir yılda her bir yanaşma yerinde hareket eden konteyner sayısı (TEU/yıl)  
 $P$  : Pik faktör (1.1-1.3 arasında değişmektedir.)  
 $t_{hy}$  : Bir yıldaki çalışma süresi (tavsiye edilen 50 hafta/yıl)  
 $f$  : TEU faktörü

Thoresen (2003) ayrıca bir yanaşma yerine yanaşacak konteyner gemilerinin adedini (yanaşma/hafta) pik faktör dikkate alınarak, aşağıdaki gibi vermiştir [11]:

$$S_{CS} = \frac{C_{BOX}}{S_{BCS}} \quad (6)$$

Burada;

$S_{CS}$  : Konteyner gemilerinin adedi (gemi/hafta)  
 $C_{BOX}$  : Bir haftada elleçlenen konteyner sayısı (konteyner/hafta)  
 $S_{BCS}$  : Bir konteyner gemisi için elleçlenecek konteyner sayısıdır (konteyner/gemi).

Thoresen (2003), bir konteyner gemisine ait yükleme ve boşaltma için geçen zamanı yani elleçleme (servis) süresini, saat olarak Denklem 7'deki gibi vermiştir [11].

$$T_{WTC} = \frac{S_{BCS}}{N_b \times P \times L_{SC} \times W_{CT}} \quad (7)$$

Burada;

$T_{WTC}$  : Konteyner gemisinin bağlanmasından ayrılmasına kadar geçen, toplam çalışma zamanı (saat/gemi)  
 $N_b$  : Her bir konteyner gemisi için çalışan vinçlerin toplam adedi  
 $P$  : Bir vincin bir saatte elleçleyebileceği konteyner adedi, brüt verim (konteyner/saat)  
 $L_{SC}$  : Elleçleme operasyonlarının başlaması ve bitirilmesi için gerekli olan çalışma zamanının yüzdesi (normal olarak 0.8 - 0.95 arasında değişmektedir.)  
 $W_{CT}$  : Geminin toplam çalışma zamanı içerisinde, vinç çalışma zamanının yüzdesi olarak verilmektedir. Bu değer normal olarak 0.7 - 0.9 arasında değişmektedir.

Thoresen (2003) tarafından, rıhtım sayısına ve gemi varışlarının iyi kontrol edilip edilmediğine bağlı olarak yanaşma yeri kullanım oranları ( $m_b$ ), Tablo 3'te verilmiştir ve Denklem 8'deki gibi

hesaplanabilmektedir [11]. Yanaşma yeri kullanım oranı ayrıca, rıhtım tipine, gemi tipi ve boyutuna, elleçleme ekipmanlarına ve çevresel koşullara da bağlıdır.

$$m_b = \frac{T_{WTC} \times 100}{N \times \frac{t_{gh} \times t_{sg}}{S_{CS}}} \quad (8)$$

Burada;

$t_{gh}$ ; bir haftadaki çalışma günleri (gün/hafta)

$t_{sg}$ ; bir gündeki çalışma saatleridir (saat/gün)

N: yanaşma yeri sayısı

**Tablo 3 - Yanaşma yeri kullanım oranları ( $m_b$ )**

Rıhtım sayısı	Gemi varışlarının kontrol koşullarına göre yanaşma yeri kullanım oranı, $m_b$ (%)		
	Yok	Orta	Yüksek
1	25	35	45
2	40	45	50
3	45	50	55
4	55	60	65
5	60	65	70
6 veya daha fazla	65	70	75

Kapasite değerlendirmesi için diğer bir yöntem ise Statik ve Dinamik boyutların analizidir. Bu analiz yöntemi, liman bileşenlerinin her biri için ayrı ayrı uygulanabilmektedir. Burada yine yanaşma yeri kapasitesini değerlendirmek için uygulanacaktır. Statik kapasite bir liman bileşeninin belli bir zamanda elleçleyebileceği yük miktarının alansal kullanılabilirliği ile ilişkilidir, dinamik kapasite ise bir liman bileşeninin belli bir zamanda elleçleyebileceği yük miktarının ekipman ve işgücü açısından değerlendirilmesidir. Tablo 4, Statik ve Dinamik analiz boyutlarını göstermektedir.

**Tablo 4 - Statik/Dinamik analiz boyutları**

Dinamik Kapasite	Yüksek	<ul style="list-style-type: none"> <li>İş gücü ve teknoloji tatmin edici seviyelerde çalışmaktadır.</li> <li>Statik kapasite kullanımı artırılabilir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tüm kaynakların kullanılması durumu</li> </ul>
	Düşük	<ul style="list-style-type: none"> <li>İş gücü ve teknoloji geliştirilebilir.</li> <li>Statik kapasite artırılabilir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>İş gücü ve teknoloji geliştirilebilir.</li> <li>Statik kapasite artırılamaz.</li> </ul>
Düşük			Yüksek
Statik Kapasite			

Statik rıhtım kapasitesi ( $ST_Q$ ), rıhtım uzunluğunun ( $I_Q$ ) ortalama gemi boyu ( $s_w$ ) ve gemiler arası güvenlik mesafesinin ( $z_Q$ ) toplamına bölünmesi ile elde edilmektedir. Dinamik kapasite ( $DT_Q$ ), rıhtım uzunluğunun ortalama gemi boyu ve servis süresine bölünmesi ile elde edilmektedir.

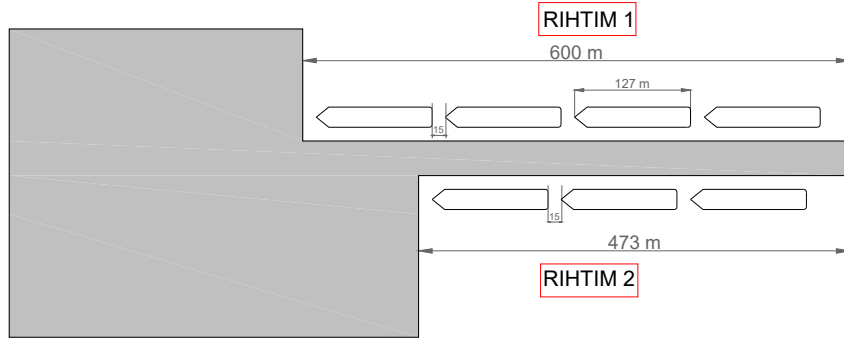
$$ST_Q = \frac{I_Q}{s_w + z_Q} \quad (9)$$

$$DT_Q = \frac{I_Q}{(s_w + z_Q) \times t_Q} \quad (10)$$

### YANAŞMA YERİ KAPASİTESİ: “X” TERMİNALİ VAKA ANALİZİ

Çalışmada Marmara Bölgesinde bulunan bir konteyner terminali dikkate alınmıştır ve X terminali olarak adlandırılacaktır. X konteyner terminalinde, liman yetkilileriyle yapılan görüşmeler sonucunda, 2020 yılında limandan hizmet alan gemilere ait bilgileri içeren bir yıllık veriler, liman veri tabanı sisteminden elde edilmiştir. Elde edilen veriler, gemilerin rıhtıma yanaşma ve ayrılma süreleri, gemilerin boyları, dolu/boş tahliye edilen ve yüklenen konteyner miktarları bilgilerini içermektedir.

Limanda bulunan iki adet rıhtımın toplam uzunluğu ise 1073 metredir. Şekil 1’de görüleceği üzere, birinci rıhtım 4 yanaşma yerli toplam 600 m uzunluğunda, ikinci rıhtım ise 3 yanaşma yerli 473 m uzunluğundadır.



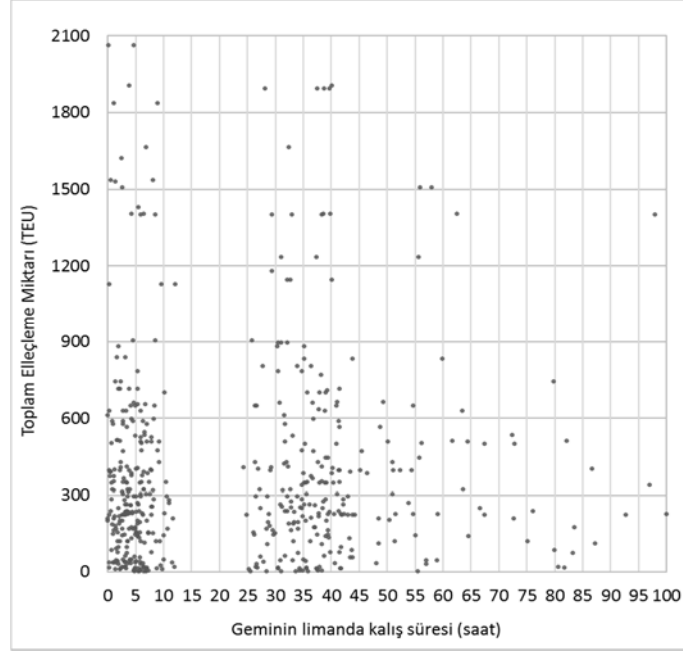
Şekil 1 - X konteyner limanı rıhtımları

X konteyner limanından sağlanan veriler 1 Ocak 2020-31 Aralık 2020 tarihleri arasında içermektedir. Bu süre içinde limandan toplam 525 adet gemi hizmet almıştır. Limanı kullanan en büyük gemi boyu 223 metre, en küçük gemi boyu 56.4 metre, ortalama gemi boyu ise 127 metre olarak belirlenmiştir.

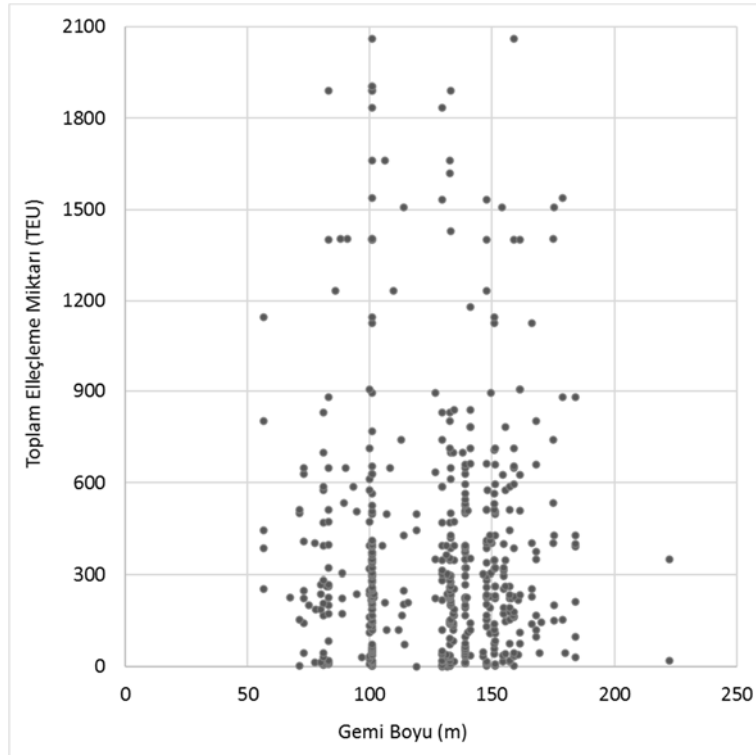
Bu dönemde hizmet alan 525 adet geminin, dolu ve boş olmak üzere, yükleme ve tahliye türünden toplam elleçleme miktarı ile limanda kalış süresi arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 2’de gösterilmiştir. Gemilerin limanda kalış sürelerinin, toplam elleçleme miktarı ile değişimine bakıldığında iki ayrı grup olduğu gözlemlenmiştir. Kalış süreleri, 15 saatten az veya 25-45 saatleri aralığında gruplaşmaktadır. Gemilerin kalış sürelerinin elleçlenen yük miktarı ile pek de ilişkisi olmadığı görülmüştür. Yıllık ortalama kalış süresi ise 24.5 saat olarak gerçekleşmiştir.

Toplam elleçleme miktarının gemi boyu ile değişimini gösteren Şekil 3’e bakıldığında, elleçleme miktarı ve gemi boyu arasında lineer bir değişim olmadığı sonucuna varılmaktadır. En fazla toplam elleçleme olan 2061 TEU değerindeki yük, 100 metre ve 160 metre boylarındaki iki

gemide gerçekteşmiştir. 2020 yılında limandan hizmet alan en büyük gemi olan 223 metrelik gemide elleçlenen toplam yük ise 350 TEU olarak gerçekteşmiştir.



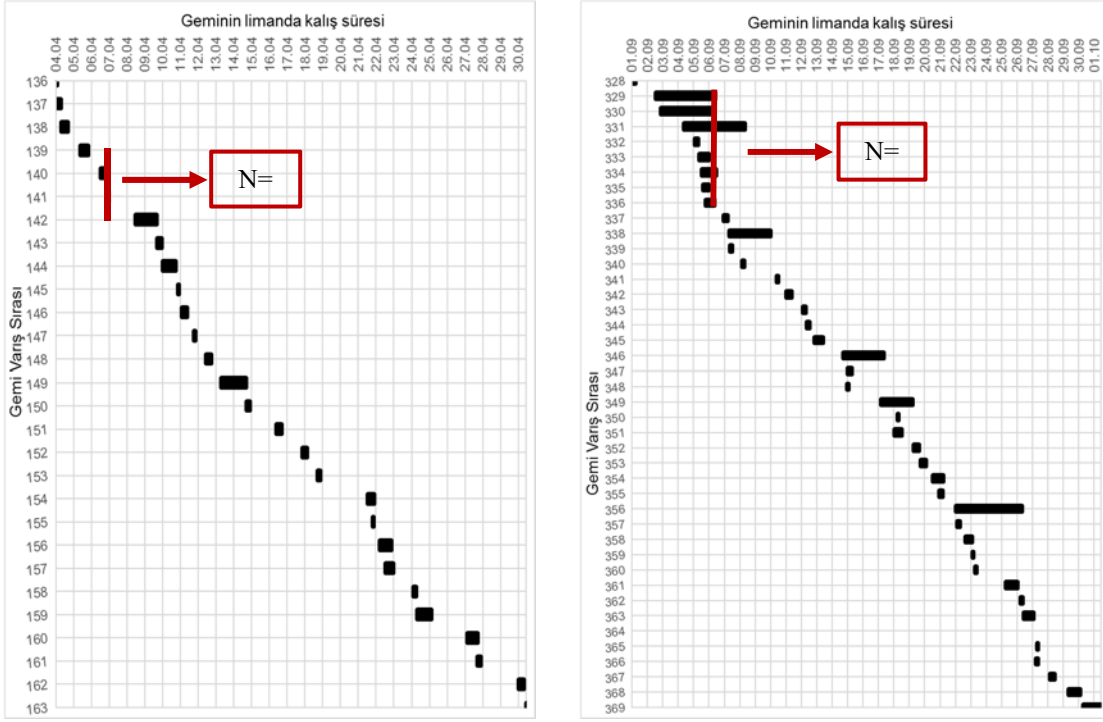
**şekil 2 - Gemilerin Limanda Kalış Sürelerinin Toplam Elleçleme Miktarı ile Değişimi**



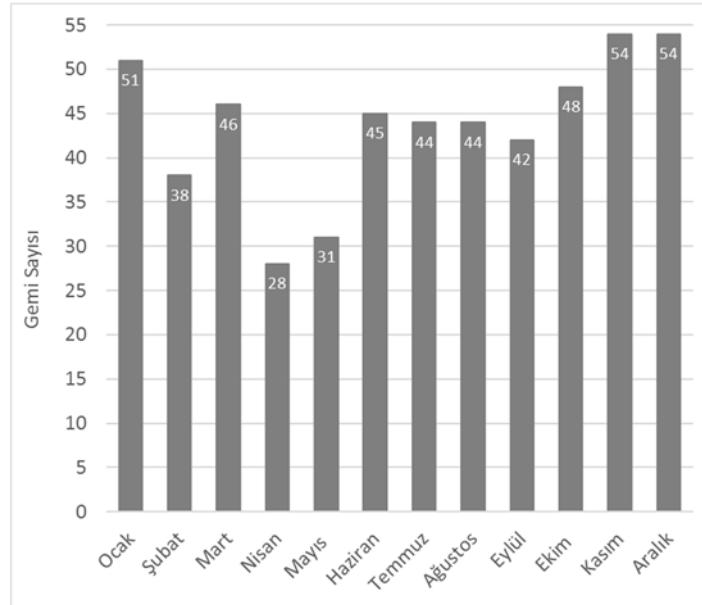
**şekil 3 - Toplam Elleçleme Miktarının Gemi Boyu ile Değişimi**



Dikkate alınan dönemde yanaşma yerlerinin doluluğunun incelenmesi için tüm gemilerin limana geliş ve limanda kalış sürelerini gösteren grafikler hazırlanmış ve en yoğun olan Eylül ile en az yoğun olan Nisan ayları örnek olarak alınmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Limanda bulunan tüm yanaşma yerlerinin dolu olması durumu Şekil 4'ten görülebileceği üzere, yıl boyunca yalnızca bir kez, 6 Eylül 2020 tarihinde gerçekleşmiştir. Yanaşma yeri kullanımları değerlendirme yılı için incelendiğinde, 4 adet yanaşma yerinin aynı anda dolu olması durumunun sıklıkla gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4 - 2020 yılı Nisan ve Eylül aylarında limandan hizmet alan gemilerin kalış süresi

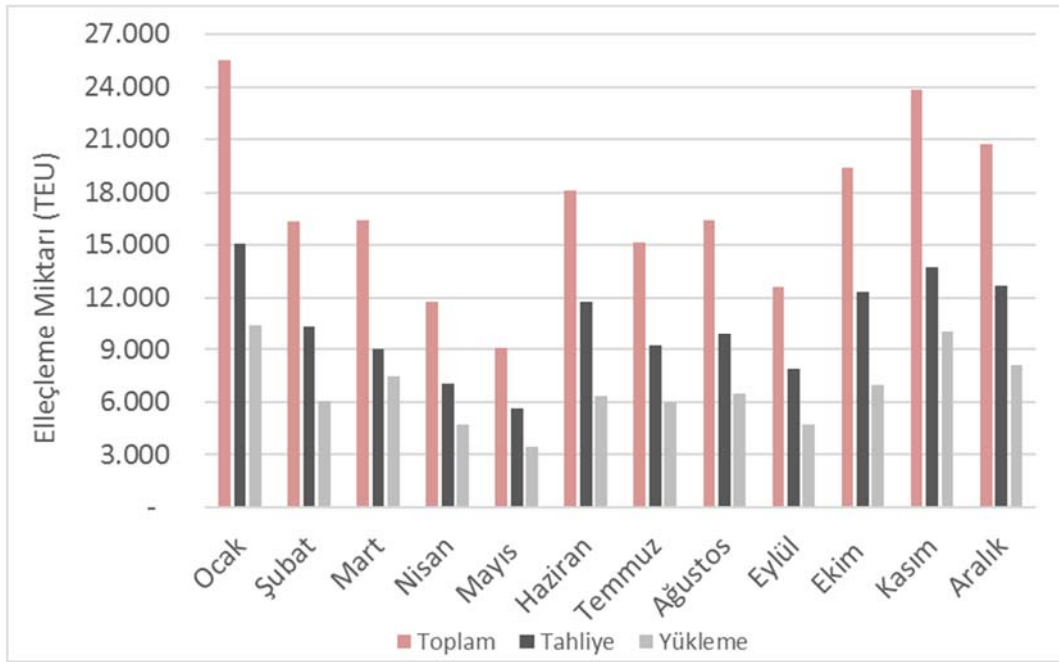


Şekil 5 - 2020 yılında limandan hizmet alan gemi sayısının aylık değişimi

Ocak 2020 yılında, limanın hizmet verdiği gemi sayısı 51 adet, ülkemizde ilk Covid-19 vakasının görüldüğü Mart 2020’de ise 46 adettir. Mart 2020’den sonra nisan ve mayıs aylarında limana varış yapan gemi sayısında bir miktar düşüş olmuştur. Ancak gemi sayısında meydana gelen bu azalmanın haziran ayında normale döndüğü görülmektedir. Ortalama olarak, ayda 44 gemi limandan hizmet almıştır. Şekil 5’te aylık görünümler şeklinde, 2020 yılı boyunca limandan hizmet alan gemi sayısının değişimi verilmiştir. 2020 yılı boyunca en az sayıda geminin geldiği ay 28 adet ile Nisan olup, bir ayda en fazla 54 adet gemi, Kasım ve Aralık aylarında gelmiştir.

Şekil 6’da ise 2020 yılında; yükleme, tahliye ve toplam elleçlenen TEU sayılarının aylara göre dağılımları görülmektedir. 2020 yılında, en fazla elleçlemenin 25 488 TEU ile ocak ayında, en az elleçlemenin ise 9 072 TEU ile mayıs ayında gerçekteştiği gözlemlenmiştir. İncelenen yılda, aylık elleçleme çoğunlukla 10 000 TEU değerinin üzerinde gerçekteşmiştir.

Nisan ve Mayıs aylarındaki elleçleme miktarındaki belirgin miktarda azalma, pandemi döneminin etkisi olarak yorumlanmıştır.



**Şekil 6** - 2020 yılı aylık elleçleme kapasitesi

Limana veri tabanı üzerinden elde edilen yük bilgilerinden, 1 Ocak-31 Aralık 2020 tarihleri arasında, dolu ve boş olmak üzere, tahliye ve yükleme miktarları bilinmektedir. Tablo 6, 2020 yılı için toplam elleçleme kapasitesine ait bilgileri göstermektedir.

**Tablo 5** - 2020 yılına ait toplam elleçleme miktarları (TEU)

Tahliye edilen dolu konteyner	84 026
Tahliye edilen boş konteyner	40 632
Yüklenen dolu konteyner	80 421
Yüklenen boş konteyner	227
Toplam elleçlenen konteyner	205 306

2020 yılına ait tüm gemilerin yük miktarları dikkate alınarak hesaplanan, toplam yüklenen dolu konteyner sayısı 80 421 TEU, toplam tahliye edilen dolu konteyner sayısı ise 84 026 TEU değerindedir. Yüklenen ve tahliye edilen dolu konteyner sayıları birbirlerine yakın olmakla birlikte tahliye edilen dolu konteyner sayısı yaklaşık 4 000 tane daha fazladır (Tablo 5). Toplam yüklenen boş konteyner sayısı 227 TEU, tahliye edilen boş konteyner sayısı 40 632 TEU şeklindedir. Yüklenen boş konteyner sayısı çok az iken tahliye edilen boş konteyner sayısı bir hayli fazladır.

Tahliye edilen boş konteyner ve yüklenen dolu konteyner miktarları toplam ihracat konusunda bilgi sahibi olunmasına olanak sağlamaktadır. Tahliye edilen boş konteynerler, herhangi bir limana götürülen yüklerin hedef limanda boşaltılıp, boş konteynerlerin geri getirilmesi anlamına gelebilmektedir. Bu anlamda; bu iki türden konteyner hareketinin toplamı olan 121 053 TEU, ihracat miktarı şeklinde yorumlanabilir. Tahliye edilen toplam dolu konteyner ve yüklenen toplam boş konteyner adedi olan 84 253 TEU ise toplam ithalat miktarı olarak yorumlanabilmektedir. Limandaki yük türlerine ait bilgilerin yorumlanması sonucunda, bu limanda ithalat miktarının ihracat miktarına oranla daha az olduğu çıkarımı yapılabilir.

X limanına ait; yıllık elleçleme kapasitesi, bir yılda limandan hizmet alan gemi sayısı, servis süresi, rıhtımda kullanılan elleçleme ekipmanı türü, adedi ve ekipmanın brüt verimi, her bir yük türü için TEU sayıları gibi veriler, liman yönetimi tarafından sağlanmıştır. Bu veriler Tablo 7’de özetlenmiştir ve bir sonraki bölümde teoriden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak, değerlendirilecektir.

**Tablo 6 - X terminaline ait veriler**

Yıllık TEU Elleçleme Kapasitesi	205 306 TEU
Haftalık TEU Elleçleme Kapasitesi	205 306 TEU/52 hafta=3948 TEU/hafta
Yılda Limandan Hizmet Alan Gemi Sayısı	525 adet
Haftada Limandan Hizmet Alan Gemi Sayısı	525 adet/52 hafta=10 gemi/hafta
Geminin Limana Yanaşmasından Ayrılmasına Kadar Geçen Süre	24.5 saat (ortalama)
Yanaşma Yeri Başına Rıhtım Kullanım Oranı (7 adet yanaşma yeri için)	12 885 saat/8760 saat/7=0.21
20 ft’lik Konteynerlerin Sayısı	53 820 adet
40 ft’lik Konteynerlerin Sayısı	75 743 adet
TEU faktörü, $f = \frac{N_{20f} + 2N_{40f}}{N_{toplam}}$	$f = \frac{53820 + 2 \times 75743}{129563} = 1.585$
Rıhtımda Bulunan Elleçleme Ekipmanı	Mobil vinç, 9 adet
Mobil Vincin Brüt Verimi	40 TEU/saat

## DEĞERLENDİRME

Çalışmada kapasite analizi iki farklı yöntemle gerçekleştirilecektir. Birincisi farklı araştırmacılar tarafından verilmiş teorik denklemler ile kapasitenin belirlenmesidir. Bir diğeri ise bütüncül bir yaklaşım olan statik ve dinamik analiz ile kullanımın değerlendirilmesidir. İlk olarak teorik denklemlerden, Ligteringen (1999) tarafından verilen Denklem 4 ile yıllık elleçleme miktarı yani kapasitesi elde edilecektir.

Bu ifadede kullanılan TEU faktörü (f) literatürde 1.4-1.7 arasında değişmektedir. Her iki konteyner türünden eşit sayıda olması durumunda TEU faktörü 1.5 olarak elde edilmektedir. Örnek çalışmanın yapıldığı liman için TEU faktörü (f), liman yönetiminden alınan verilerden, 1.585 olarak bulunmuştur. TEU faktörünün 1.5 değerinden büyük çıkması da 40 ft'lik konteynerlerin oranının daha fazla olduğunu göstermektedir. Hesaplanacak teorik kapasite için bu değer 1.5 olarak seçilmiştir.

Gerçekleştirilecek operasyon türüne, gemi boyutuna ve operatör tecrübesine bağlı olarak mobil liman vinçlerinin hızının saatte ortalama 15-20 hareket olduğu bilinmektedir. Mobil vince ait brüt verim teorik olarak 25 hareket/saat olarak hesaplanacaktır. Her bir vince ait brüt verim ise 40 TEU/saat olarak liman yetkilileri tarafından verilmiş olan bir değerdir. Limanın 365 gün 24 saat çalıştığı bilgisi yetkililerden alınmıştır.

Yanaşma yeri kullanım oranı ( $m_b$ ), gemilerin limanda kaldıkları saat olarak toplam sürenin, bir yıla bölünmesi ile bulunur. Önerilen yanaşma yeri kullanım oranları Thoresen (2003) tarafından Tablo 3'te, rıhtım sayısına bağlı olarak verilmiştir. Tabloya göre, 6 veya daha fazla rıhtıma sahip limanlar için, gemi varışlarının kontrol koşullarına göre en düşükten yükseğe yanaşma yeri kullanım oranı %65-75 aralığında değişim göstermelidir. Bu limanda, gemi varışlarının yüksek ölçüde kontrollü olduğu düşünülür ise, yanaşma yeri kullanım oranı ( $m_b$ ), %70 olarak kabul edilebilmektedir. Ancak gerçek verilerden 0.21 olarak hesaplanmıştır.

İncelenen terminalde, yanaşma yeri başına vinç sayısı ( $N_b$ ), 9 adet vincin 7 yanaşma yerine bölünmesi ile 1.29 olarak elde edilmiştir. Teorik olarak yapılan tüm kabuller sonucunda, yıllık yanaşma yeri kapasitesi, Ligteringen (1999) tarafından verilmiş Denklem 4 ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Bir yıldaki çalışma süresi 52 hafta olarak kabul edilmiştir.

$$c_b = 25 \frac{\text{hareket}}{\text{saat}} \times 1.5 \times 1.29 \times 24 \text{ saat} \times 365 \text{ gün} \times 0.70 = 296 \ 635 \text{ TEU/yıl (Bir yanaşma yerindeki yıllık elleçleme miktarı)}$$

7 adet yanaşma yeri için yıllık elleçleme kapasitesi ise aşağıdaki gibidir:

$$296 \ 635 \text{ TEU} \times 7 = 2 \ 076 \ 445 \text{ TEU}$$

Yıllık elleçleme kapasitesi ayrıca Thoresen (2003) tarafından verilmiş olan Denklem 5'teki ifade ile de bulunabilmektedir. Burada rıhtıma ait kapasite hesaplanacağı için öncelikle, rıhtım kullanım oranı ( $m_b$ ) ve rıhtım sayısı (N) bilgilerinden yola çıkılarak, Denklem 6 yardımıyla bir haftada limanı ziyaret eden gemi sayısı ( $S_{CS}$ ) bulunacaktır. Gemi gelişlerinin kontrol koşullarına göre, 7 adet yanaşma yerine sahip bir rıhtımın kullanım oranı 0.65-0.75 arasında değişmektedir.

Ortalama gemi boyu olan, 127 metrelik bir geminin kapasitesi yaklaşık 500-800 TEU arasındadır. Bir geminin limana yüklü gelip yüklü ayrıldığı düşünüldüğünde, minimum 1000 TEU yük taşıdığı kabulü yapılabilir. Bir konteyner gemisinin taşıdığı yük miktarı ( $S_{BCS}$ ), TEU faktörü (f) ile çarpılarak, konteyner cinsinden ifade edilebilir.

$$S_{BCS} = \frac{1000 \text{ TEU}}{1.5} = 667 \text{ konteyner/gemi}$$

Bir konteyner gemisine ait yükleme ve boşaltma için geçen zaman yani elleçleme süresi ( $T_{WTC}$ ), teorik olarak ( $L_{SC}=0.95$ ,  $W_{CT}=0.9$  seçilerek) Denklem 7'de verilen ifade ile elde edilmiştir.

$$T_{WTC} = \frac{S_{BCS}}{N_b \times p \times L_{SC} \times W_{CT}} = \frac{667 \text{ konteyner/gemi}}{1.29 \times 25 \frac{\text{konteyner}}{\text{saat}} \times 0.95 \times 0.9} \approx 24.2 \text{ saat}$$

$$m_b = \frac{T_{WTC} \times 100}{N \times \frac{t_{gh} \times t_{sg}}{S_{CS}}}$$

Rıhtım kullanım oranı 70 ve 75 değerleri için  $S_{CS}$  yani bir haftada limandan hizmet alan gemi sayısı Denklem 8 ile aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$70 = \frac{24.2 \times 100}{7 \times \frac{7 \times 24}{S_{CS}}} \quad \text{ise } S_{CS} = 34 \text{ gemi/hafta}$$

$$75 = \frac{24.2 \times 100}{7 \times \frac{7 \times 24}{S_{CS}}} \quad \text{ise } S_{CS} = 36.4 \text{ gemi/hafta}$$

Rıhtım kullanım oranı %70 için;

$$S_{CS} = 34 \text{ gemi/hafta} \times 1.2 = 41 \text{ gemi/hafta} = 2132 \text{ gemi/yıl}$$

Yıldaki gemi sayısı ( $S_{CS}$ ), Thoresen (2003) tarafından pik faktör dahil olarak formüle edilmiştir. Bu nedenle, 1.1-1.3 değerleri arasında değişen pik faktör ( $P$ ) 1.2 olarak kabul edilerek bir haftada limandan hizmet alan gemi sayısı bulunmuştur.  $S_{CS}$  ve  $S_{BCS}$  değerleri konteyner cinsinden Denklem 5'te yerlerine yazarak, haftalık elleçlenen konteyner sayısı  $C_{BOX}$  hesaplanmıştır.

$$S_{CS} \times S_{BCS} = C_{BOX}$$

$$C_{BOX} = 41 \frac{\text{gemi}}{\text{hafta}} \times 667 \frac{\text{konteyner}}{\text{gemi}} = 27\,350 \text{ konteyner/hafta}$$

$$C_{TEU} = \frac{C_{BOX} \times t_{hy} \times f_0}{P} = \frac{27\,347 \frac{\text{konteyner}}{\text{hafta}} \times 52 \text{ hafta} \times 1.5}{1.2} = 1\,777\,750 \text{ TEU}$$

Teorik kapasite Soberón (2012) tarafından verilen yıllık yanaşma yeri kapasitesi denklemine göre de hesaplanmıştır. İncelenen terminalde, liman yönetimi tarafından, gelişlerin iyi planlandığı bilgisi verilmiştir. Buna göre  $E_k/E_k/n$  formunda bir kuyruk modeli kullanılabilir. Bekleme süresi hakkında ise, yine liman yönetimi ile yapılan görüşmeler sonucunda bu sürenin en fazla 1 saat ve en az 30 dakika olmak üzere, planlamaya bağlı olduğu söylenmiştir. Edinilen bilgiler ışığında, bekleme süresinin servis süresine oranının oldukça düşük olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.  $E_2/E_4/n$  formunda bir kuyruk modeline sahip, yanaşma yeri sayısının 6'dan fazla ve izafi bekleme süresinin 0.05 olduğu bir limanda yanaşma yeri doluluk oranı Tablo 2'den 0.69 olarak okunmuştur.

X Limanı için servis düzeyinin AA seviyesinde olduğu, yönetim tarafından belirtilmiştir. Buna göre yıllık ortalama gemi üretkenlik değeri ( $P$ ) 70 TEU/saat seçilmiş ve Denklem 1'den yıllık yanaşma yeri kapasitesi elde edilmiştir.

$$K_y = n \times \phi \times t_{yil} \times P = 7 \times 0.69 \times 365 \times 24 \text{ saat} \times 70 \frac{\text{TEU}}{\text{saat}} = 2\,961\,756 \text{ TEU}$$

Tablo 8, X terminalinin mevcut rıhtım uzunluğu ve mevcut rıhtım elleçleme ekipmanları ile teorik kapasitesi farklı kapasite hesaplama kriterlerinden yararlanılarak hesaplanmış değerlerini ve terminalde gerçekleşen yanaşma yeri elleçleme miktarlarını birlikte göstermektedir.

Terminalde, yıllık gerçekleşen elleçleme miktarı, 205 306 TEU, literatürde verilen üç farklı teorik ifadeden elde edilen elleçleme miktarlarının çok altında kalmıştır. Gerçekleşen yanaşma yeri kullanım oranının (%21), teoriden 7 yanaşma yeri için hesaplanan yanaşma yeri kullanım

oranlarına (%69-%70) göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. İncelenen yılda terminalden hizmet alan gemi sayısı ise teoriden bulunan gemi sayısının yaklaşık olarak üçte birinden daha az gerçekleşmiştir. Rıhtımda gerçekleşen ortalama elleçleme süresi 24.5 saat, teorik ortalama elleçleme süresi 24.2 saat değerine oldukça yakındır.

**Tablo 8 - Teorik ve gerçek yanaşma yeri kapasitesinin değerlendirilmesi**

Kapasite bileşeni	Ligteringen, $c_b$	Soberón, $K_y$	Thoresen, $c_{TEU}$	X terminali
Yıllık Elleçleme Kapasitesi (TEU)	2 076 445	2 961 756	1 777 750	205 306
Limandan hizmet alan gemi sayısı (gemi/yıl)	-	-	2132	525
Ortalama elleçleme süresi (saat)	-	-	24.2	24.5
Yanaşma yeri kullanım oranı (%)	-	69	70	21

Terminal kapasitesinin kullanımının değerlendirilmesi için bir diğer yaklaşım ise Statik ve Dinamik analiz yöntemidir. İncelenen limanda, ortalama gemi boyu 127 metre olarak alındığında, statik kapasite Rıhtım 1 ve Rıhtım 2 için ayrı ayrı Denklem 9 ile elde edilmiştir.

$$ST_{Q1} = \frac{I_Q}{S_w + z_Q} = \frac{600}{(127 + 15)} = 4.22 \text{ gemi}$$

$$ST_{Q2} = \frac{I_Q}{S_w + z_Q} = \frac{473}{(127 + 15)} = 3.33 \text{ gemi}$$

Rıhtımdaki toplam yanaşma yeri sayısı;

$ST_{Q1} + ST_{Q2} = 4.22 + 3.33 = 7.55$  gemi olarak elde edilmektedir.

Dinamik kapasite açısından değerlendirildiğinde ( $t_Q = 24.5$  saat ortalama hizmet süresi) rıhtımı aynı anda en fazla 7 gemi kullanabilmektedir. Bu durumda yılda 2701 gemi hizmet alabilmektedir.

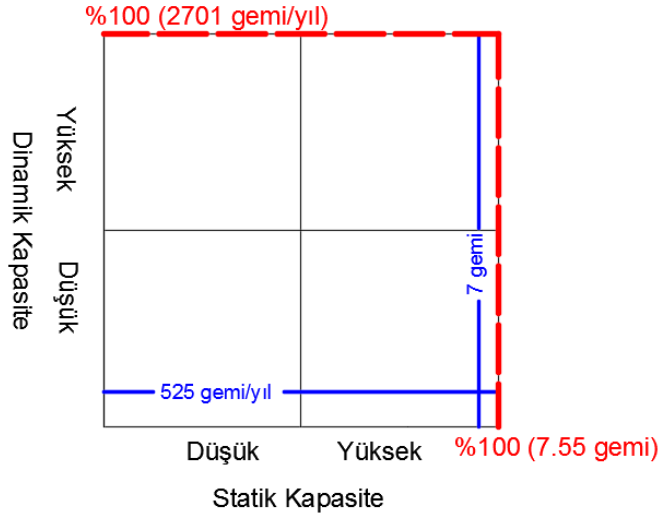
$$DT_Q = \frac{I_Q}{(s_w + z_Q) \times t_Q} = \frac{1073}{(127 + 15) \times \frac{24.5}{24} \text{ saat}} = 7.4 \text{ gemi/gün}$$

$$DT_Q = \frac{I_Q}{(s_w + z_Q) \times t_Q} = \frac{1073}{(127 + 15) \times \frac{24.5}{24} \text{ saat}} \times 7 = 51.82 \text{ gemi/hafta}$$

$$DT_Q = \frac{I_Q}{(s_w + z_Q) \times t_Q} = \frac{1073}{(127 + 15) \times \frac{24.5}{24} \text{ saat}} \times 365 = 2701 \text{ gemi/yıl}$$

Statik teorik kapasite 7.55 gemi yani gerçek kapasiteden yaklaşık %8 fazla olarak bulunmuştur. Statik kapasite %93 oranında kullanılabilir. Limandan elde edilen verilerde; haftada 10 geminin, yılda ise 525 geminin limandan hizmet aldığı görülmektedir.

Yılda 2701 gemi olarak elde edilen dinamik teorik kapasite ise %20 oranında kullanılmaktadır. Şekil 7'de yatay eksen düşük ve yüksek olmak üzere statik kapasitenin kullanım oranını, dikey eksen ise aynı şekilde dinamik kapasitenin kullanım oranını göstermektedir. Statik kapasite yüksek oranda değerlendirilirken, dinamik kapasitenin geliştirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu değerlendirme limanın farklı bileşenlerinin iki boyutlu fotoğrafını sunmaktadır. Böylece darboğazın konumdan mı yoksa teçhizatın mı yoksa her ikisinden birlikte mi kaynaklanmakta olduğu görülmektedir. Bu yapılan kapasite değerlendirme yöntemi ile yatırımın hangi yönde yapılması gerektiği kararlarının alınması önerilebilmektedir.



Şekil 7 - Yanaşma yerinin statik ve dinamik analizi

## SONUÇ

X konteyner terminalinin kapasitesi literatürde mevcut teorik denklemler ile elde edilmiş, 2020 yılına ait gerçekleşen değerler ile karşılaştırılmış ve ayrıca statik/dinamik analiz yöntemi ile de bir değerlendirme yapılmıştır.

- Üç farklı ifadeden elde edilen teorik kapasiteler arasında da belirgin farklılıklar vardır. Teorik olarak, çeşitli araştırmacıların vermiş olduğu formüller ile elde edilen elleçleme kapasitesinin, gerçekleşen elleçleme miktarının çok üzerinde olduğu görülmüştür.
- İnceleme konusu olan terminalinde, yanaşma yeri adedinin 7 bulunması, yanaşma yeri kullanım oranının teorik olarak yüksek olmasını gerektirmektedir. Ancak gerçek verilerden tüm yanaşma yerlerinin sürekli olarak dolu olmadığı görülmüş ve yanaşma yeri kullanım oranı %20'lerde kalmış olup olması gerekenin çok altındadır.
- Liman trafiği ve yük elleçleme verilerinin analizinden, dikkate alınan yılda limanı büyük gemilerin kullanmadığı ve gemilerin %76'sının 150 metreden kısa olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, terminalden hizmet alan gemilerden 88 adedinde (%16) yapılan elleçleme miktarı 50 TEU'dan az olduğu görülmüştür. Bu analizden X terminalinin, bir ana liman değil, uğrak limanı olarak hizmet verdiği değerlendirilebilir.

- Limanda, gerçekteşen ortalama elleçleme süresi 24.5 saat, mevcut ekipmanlarla teoriden 24.2 saat olarak hesaplanan ortalama elleçleme süresine oldukça yakındır.
- Statik/Dinamik analiz ile yapılan değerlendirmeden, statik kapasite olarak iyi bir değere sahip olan X terminali, dinamik analiz ile değerlendirildiğinde yetersiz olduğu tespiti yapılabilmektedir. Bunun sebebi ise analizin gerçekteştirildiği yılda, limana uğrayan gemi sayısının az oluşudur. Limandan hizmet alması gereken gemi sayısı, teoriden yılda yaklaşık 2132 adet, dinamik analizden ise 2701 adet olarak öngörülmektedir. Gerçek verilerden dikkate alınan yılda 525 adet geminin limandan hizmet aldığı bilinmektedir.

Çalışmanın bu aşamasında X terminalinin yanaşma yeri kapasitesi farklı yöntemlerle değerlendirilmiş ve terminal apronunun kapasitesinin altında çalıştığı görülmüştür. Terminalin yük hacminin artması ile daha verimli çalışacağı sonucu elde edilmiştir. Mevcut durumda terminal apronunun herhangi bir şekilde kapasite artırma ihtiyacı mevcut değildir. Bununla birlikte terminalin depolama alanının da ayrıca değerlendirilerek bütüncül bir değerlendirme yapılması ile daha doğru çözüm önerileri getirilebilir.

### **Kaynaklar**

1. Esmer, S., Konteyner Terminallerinde Lojistik Süreçlerin Optimizasyonu ve Bir Simülasyon Modeli, Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi, 2009
2. Lagoudis, I., Rice, Jr., J., “Revisiting Port Capacity: A Practical Method For Investment And Policy Decisions”, 2011
3. Huang, Y. S., Hsu, W. J., He, Y., Song, T., Souza, C., Ye, R., Chen, C., Nautiyal, S., “Anchorage Capacity Analysis Using Simulation”, 2009The International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation HMS, Spain, 2009, pp.1-6.
4. Çolak, M., Keskin, A., G., Esen, H., Bektaş, C., “A Simulation Based Approach for Efficient Yard Planning in a Container Port”, Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, Volume 22, Issue 3, 2018, 1157-1164
5. Gençer, H., Sekin, V., “Konteyner Limanları İçin Gemi Operasyon Hızı Odaklı Optimum Depolama Kapasitesi”, IV. Ulusal Liman Kongresi, “Küresel Eğilimler-Yerel Stratejiler”, İzmir, Kasım, 2019
6. Güven, C., Eliyi, D., “Trip Allocation And Stacking Policies At A Container Terminal”, 17th Meeting Of The Euro Working Group On Transportation, EWGT2014, 2014, 565-573
7. Phan, M., Kim H., “Estimating The Cycle Time of Container Handling in Terminals”, Department of Industrial Engineering, Pusan National University, 2015
8. T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Ulaştırma Kıyı Yapıları Master Plan Çalışması, 2010
9. Soberón, M.A. “The Capacity in Container Port Terminals”, Ad Hoc Expert Meeting on Assessing Port Performance, 2012
10. Ligteringen, H., Ports and Terminals, Delft Technische Universiteit, 1999
11. Thoresen, C. A., Port Designer’s Handbook: Recommendations and Guidelines, Thomas Telford, 2003



# Küresel İklim Değişikliğinin Rüzgar ve Dalga İklimi Üzerindeki Olası Etkileri

Fulya İŞLEK<sup>1</sup>, Yalçın YUKSEL<sup>2</sup>, Cihan ŞAHİN<sup>3</sup>, Furkan, YUKSEL<sup>4</sup>

## ÖZET

Küresel iklim değişikliğinin rüzgar/dalga karakteristikleri üzerindeki olası etki/etkileri RCP4.5 ve RCP8.5 (Representative Concentration Pathway) senaryolarına göre yakın gelecek 2021–2060 ve orta gelecek 2061–2100 dönemleri için araştırılmıştır. Rüzgar iklimi değerlendirmelerinde, SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tarafından geliştirilen RCA'nın (Rossby Centre Regional Climate Model) dördüncü versiyonu olan RCA4 iklim verileri kullanılmıştır. Dalga iklimi üzerindeki etkilerini araştırmak için gerekli olan dalga karakteristikleri, SMHI RCA4 iklim verilerinin girdi olarak kullanılmasıyla üçüncü nesil spektral dalga modelinden elde edilmiştir. Rüzgar/dalga parametrelerinin iki gelecek dönemdeki değişim eğilimleri değerlendirilmiş ve onların istatistiksel olarak anlamlı eğilimleri irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İklim değişikliği, Bölgesel İklim Modeli, Rüzgar Projeksiyonu, Dalga Projeksiyonu.

## ABSTRACT

### *Possible Impact(s) of Global Climate Change on the Wind and Wave Climate*

The possible impact(s) of global climate change on the wind/wave characteristics were investigated for near future 2021–2060 and middle future 2061–2100 periods under RCP4.5 and RCP8.5 (Representative Concentration Pathway) scenarios. RCA4 climate data, which is the fourth version of RCA (Rossby Center Regional Climate Model) developed by SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), were used in wind climate assessments. To detect the possible impact(s) on the wave climate, the wave data were generated from a third-generation wave model forced with SMHI RCA4 climate data. The long-term future trends of wind/wave characteristics were evaluated, and their statistical significance were examined.

**Keywords:** Climate change, Regional climate model, Wind projection, Wave projection.

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - fislek@yildiz.edu.tr

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - yuksel@yildiz.edu.tr

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cisahin@yildiz.edu.tr

4 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - furkan95yuksel@gmail.com

## **GİRİŞ**

İklim sistemini anlamak, küresel iklim değişikliği bilgisini geliştirmek ve belirsizlikleri hakkında tahminler sağlayabilmek için CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), Dünya İklim Araştırma Programının (World Climate Research Program, WCRP) Eşleştirilmiş Modelleme Çalışma Grubu (Working Group on Coupled Modelling, WGCM) tarafından 1995 yılında kurulmuştur. CMIP'nin beşinci aşaması (CMIP5) tamamlanmış bir projedir (2010–2014) ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Beşinci Değerlendirme Raporu (IPCC AR5), CMIP5 deneylerinin sonuçlarını özetlemiştir (Giorgetta vd., 2013). CMIP5 arşivleri, 28 farklı uluslararası modelleme grubunun (Hemer ve Trenham, 2016) katkıda bulunduğu yaklaşık 60 farklı küresel iklim modellerinden (General Climate Models, GCMs) iklim senaryosunu içermekte ve bu arşivler, birçok ulusal merkez için ESGF (Earth System Grid Federation) aracılığıyla dağıtılmaktadır (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>).

IPCC AR5'te gelecekteki iklim değişikliği değerlendirmeleri için Temsili Konsantrasyon Rotaları (Representative Concentration Pathways, RCPs) için senaryo setleri tanımlanmıştır. RCP'ler, başlangıçta dört temel senaryo seti için oluşturulmuştur. Radyasyon kuvvetinin  $2.6 \text{ W/m}^2$  ile  $8.5 \text{ W/m}^2$  arasında değişen değerlere göre tanımlanan bu temsili konsantrasyon rotaları; RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5'tir (Meinshausen vd., 2011). IPCC AR5 kapsamında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları en fazla tercih edilen senaryolar olmuştur (MGM, 2021).

Dünyanın farklı yerlerinde, GCM'lerin çıktılarını kullanarak iklim değişikliği etkilerini araştırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır (Erikson vd., 2015; Aarnes vd., 2017; Zhang vd., 2018; Chowdhury vd., 2019). GCM'lerin kaba çözünürlüğü (100–300 km) nedeniyle (Strandberg vd., 2014), ekstrem olayları gerçekçi bir şekilde yakalayamadığı ve bu modellerin bölgesel ve yerel ölçekte iklim değişkenliğini ve değişimini değerlendirmede yetersiz kaldığı belirlenmiştir (Wilby ve Fowler, 2010; Worku vd., 2018; Rana vd., 2020).

Bölgesel ve yerel ölçeklerde güvenilir iklim bilgisini sağlamak amacıyla, CMIP5 GCM projeksiyonları, WCRP aracılığıyla CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) Programı kapsamında ölçeği küçültülmüştür. Bu aşamada, yüksek çözünürlüklü geçmiş, günümüz ve gelecek iklim verilerine sahip CORDEX bölgesel iklim modelleri (Regional Climate Models, RCMs) dünya çapında on dört farklı alan için üretilmiştir (<https://cordex.org/domains/cordex-domain-description/>). CORDEX RCM benzeşimleri, Avrupa alanı için EURO-CORDEX projesi kapsamında yürütülmektedir (<http://www.euro-cordex.net>). Bu çalışmada, çalışma alanının Karadeniz olması sebebiyle iklim verileri için EURO-CORDEX projesinden sağlanmıştır.

Küresel iklim değişikliğinin kapsamında, Karadeniz çalışma alanında farklı iklim senaryolarına göre gelecekteki rüzgar ve dalga ikliminin değerlendirilmesi üzerine kısıtlı sayıda çalışma yapılmıştır. İklim değişikliğinin Karadeniz rüzgar gücü potansiyeli üzerindeki etkileri Koletsis vd. (2016), Davy vd. (2018), tarafından, rüzgar karakteristikleri Rusu (2018), Islek vd. (2022) tarafından, dalga gücü Rusu (2019c) ve (2020) tarafından araştırılmıştır.

Koletsis vd. (2016), Akdeniz ve Karadeniz rüzgar karakteristiklerini ve rüzgar gücünü tarihsel olarak 1961–1990 yılları için, gelecek dönem olarak 2021–2050 ve 2061–2090 olmak üzere iki gelecek dönem için araştırmışlardır. Karadeniz ortalama rüzgar gücünün gelecek dönemlerde  $\pm 50 \text{ W/m}^2$ 'ye ulaşan küçük değişimler göstereceğini belirlemiştir.

Davy vd. (2018), küresel iklim değişikliğinin rüzgar gücü üzerindeki etkisini iki iklim (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryosuna göre iki gelecek (2021–2050 ve 2061–2090) dönem için incelemiştir. İki gelecek dönem, tarihsel dönem ile karşılaştırılmış ve Karadeniz rüzgar gücü üzerindeki belirgin bir negatif etkinin olmayacağını tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, Rusu (2018) rüzgar hızının RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021–2050) artacağını ve rüzgar yönünün büyük değişkenlik göstereceğini belirtmiştir.

Islek vd. (2022), Karadeniz rüzgar karakteristiklerinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemlerindeki değişim eğilimlerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, iklim senaryolarının ekstrem rüzgar karakteristikleri üzerinde daha belirgin bir etkisinin olduğunu rapor etmişlerdir.

Rusu (2019c) ve (2020), RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yakın gelecek (2021–2050) ve uzak gelecek (2071–2100) dönemleri için Karadeniz dalga gücü potansiyelini analiz etmiştir. Hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte (2021–2050) dalga gücü potansiyelinin batı ve kuzeydoğu Karadeniz’de artacağını (Rusu, 2019c), iki iklim senaryosuna göre uzak gelecekte (207–12100) ise dalga gücü potansiyelinin nerdeyse tüm havza üzerinde azalacağını (Rusu, 2020) belirlemiştir.

## AMAÇ

Bu çalışmanın temel amacı, gelecekteki (2021–2100) Karadeniz rüzgar/dalga iklimini anlamak ve küresel iklim değişikliğinin rüzgar/dalga iklimi üzerindeki olası etki/etkilerini ortaya çıkarmaktır. Analizler, 1970–2005 yıllarını kapsayan tarihsel, 2021–2060 yıllarını kapsayan yakın gelecek ve 2061–2100 yıllarını kapsayan orta gelecek olmak üzere üç dönem için gerçekleştirilmiştir. Gelecek dönemler için yapılan rüzgar ve dalga iklim analizleri, hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için yapılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Rüzgar İklim Projeksiyon Modeli

Bu çalışmada, bölgesel iklim modelinin (RCM), SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tarafından geliştirilen RCA4 (Rossby Centre Regional Climate Model version4) iklim verileri kullanılmıştır. Bu iklim verileri Avrupa alanı için EURO-CORDEX (Cordinated Regional Climate Downscaling Experiment) çerçevesinde ESGF (Earth System Grid Federation) aracılığıyla yayımlanmaktadır (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>).

**Tablo 1** - RCA4 tarafından dinamik olarak ölçek küçültme için kullanılan on GCM (Strandberg vd., 2014).

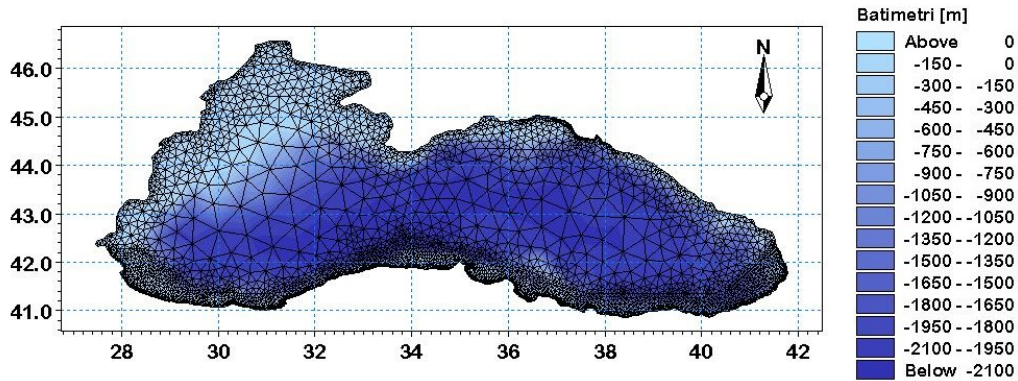
	GCM Adı	Kısaltma	EUR-0.44	EUR-0.11
1	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada	CanESM2	4.5, 8.5	–
2	Centre National de Recherches Météorologiques, France	CNRM-CM5	4.5, 8.5	4.5, 8.5
3	Consortium of European Research Institution and Researchers, Europe	EC-EARTH	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5
4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-ESM2M	4.5, 8.5	–
5	Met Office Hadley Centre, UK	HadGEM2-ES	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5
6	Institut Pierre-Simon Laplace, France	IPSL-CM5A-MR	4.5, 8.5	4.5, 8.5
7	National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC), Japan	MIROC5	2.6, 4.5, 8.5	–
8	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	MPI-ESM-LR	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 4.5, 8.5
9	Norwegian Climate Centre, Norway	NorESM1-M	2.6, 4.5, 8.5	2.6, 8.5
10	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia	CSIRO-Mk3-6.0	4.5, 8.5	–

Tablo 1, EURO-CORDEX kapsamında RCA4 tarafından dinamik olarak ölçeklendirilmiş küresel iklim modelinin (GCM) listesini göstermektedir. Islek vd. (2022), bu tabloda sunulan on iklim verisinden, hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için çıktı sağlayan, beş iklim verisi ile (CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-LR) detaylı olarak yerel ve alansal analizler yapmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, Karadeniz çalışma alanı için EC-EARTH iklim verilerinin diğer dört iklim verisinden (i) Karaburun ölçüm istasyonunda ölçülen rüzgar verileri ile daha az sapma gösterdiği, (ii) alansal olarak referans rüzgar verileriyle (CFSR, Climate Forecast System Reanalysis) daha uyumlu olduğu belirlenmiştir (Islek vd., 2022). Bu çalışmada,  $0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$  uzamsal ve 6 saat zamansal çözünürlüklü EC-EARTH iklim verileri dikkate alınmış ve analizler hem RCP4.5 hem de RCP8.5 iklim senaryoları için gerçekleştirilmiştir.

### Dalga İklim Projeksiyonu İçin Model Kurulumu

Karadeniz dalga iklim projeksiyonunun belirlenmesi için gerekli olan dalga parametreleri esnek ve yapılandırılmamış ağlara dayanan üçüncü nesil spektral dalga modeli olan MIKE 21 SW (Spectral Wave) kullanılarak elde edilmiştir. MIKE 21 SW, derin deniz ve kıyı bölgelerinde rüzgar ve solügan dalgalarının, gelişimini, sönümlenmesini ve dönüşümlerini benzeştirmektedir (DHI, 2007).

İlk olarak, her MIKE 21 SW benzeşiminde kullanılacak olan model hesap ağı tanımlanmıştır. Model alanı, tüm Karadeniz'i temsil edecek şekilde  $40^{\circ}$ – $47^{\circ}$ N ve  $26^{\circ}$ – $42^{\circ}$ E arasında kapsamaktadır. Esnek ve yapılandırılmamış ağ tekniğinin kullanılmasıyla kıyılara doğru artan çözünürlükte hesap ağı oluşturulmuştur. Karadeniz çalışma alanı için modelde dikkate alınan ağ yapısı 4755 düğüm noktası ve 8213 üçgen elemandan oluşmuştur. Daha sonra, Karadeniz'in batimetri verileri, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) başkanlığının ürettiği haritaların hesaplama ağı üzerine enterpole yapılmasıyla elde edilmiştir. Şekil 1, Karadeniz çalışma alanı için dikkate alınan model hesap ağını ve batimetrisini göstermektedir. Bu çalışmada rüzgar girdisi olarak  $0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$  uzamsal ve 6 saat zamansal çözünürlüklü EC-EARTH iklim verileri kullanılmıştır.



Şekil 1 - Çalışma alanı için model hesap ağı ve batimetri.

Bu çalışmada referans verisi olarak CFSR verisi dikkate alınmış ve model, referans verisi için kurulan fiziksel özelliklere göre koşturulmuştur. Bu çalışmada fiziksel süreçler için dikkate alınan parametreler: köpüklenme için  $C_{ds}=1.5$  ve  $\delta=0.8$ , derinlik kaynaklı dalga kırılması için  $\alpha=1$ ,  $\gamma=0.8$ , taban sürtünmesi için  $k_n=0.04$  m'dir. Fiziksel süreçler ile ilgili detaylar için Islek vd. (2020)'ye bakınız. Referans verisi olarak CFSR verilerinin kullanılmasının sebebi, tüm Karadeniz

çalışma alanı üzerinde EC-EARTH iklim verisi ile oldukça iyi uyum göstermiş olmasıdır (Islek vd., 2022).

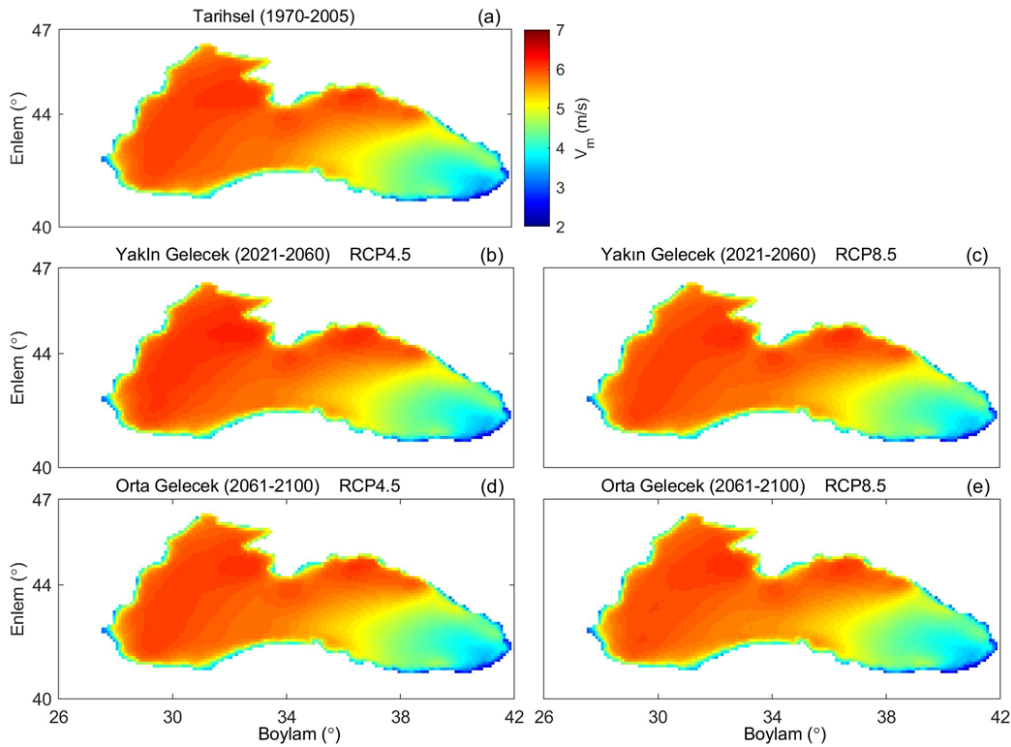
## RÜZGAR VE DALGA İKLİM PROJEKSİYONU İLE İLGİLİ BULGULAR

İklim değişikliğinin, Karadeniz rüzgar ve dalga projeksiyonları üzerindeki etkisi RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre EC-EARTH iklim verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler bir tarihsel, iki gelecek dönem olmak üzere üç farklı dönem için gerçekleştirilmiştir. Bunlar; 1970–2005 tarihsel, 2021–2060 yakın gelecek ve 2061–2100 orta gelecek dönemleridir. Bu çalışmada önce Karadeniz rüzgar iklim projeksiyonu ile ilgili bulgular, daha Karadeniz dalga iklim projeksiyonu için elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

### Rüzgar İklim Projeksiyonu ile İlgili Bulgular

Şekil 2, ortalama rüzgar hızının tarihsel (1970–2005), yakın gelecek (2021–2060) ve orta gelecek (2061–2100) dönemleri için Karadeniz çalışma alanındaki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Ortalama rüzgar hızının temel istatistik değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tarihsel ve iki gelecek döneme ait ortalama rüzgar hızlarının uzamsal dağılımları benzerdir. Diğer bir ifadeyle gelecekte batı ve kuzeydoğu Karadeniz, doğu Karadeniz’e kıyasla daha şiddetli rüzgar hızlarına maruz kalmaya devam edecektir.

Tarihsel dönem için ortalama rüzgar hızı 5.13 m/s iken, yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre ortalama rüzgar hızı, tarihsel dönemden biraz daha yüksek olarak, 5.15 m/s olarak bulunmuştur. Diğer taraftan orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre ortalama rüzgar hızı, tarihsel dönemden biraz düşük olarak, sırasıyla 5.12 m/s ve 5.08 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 2, Tablo 2).

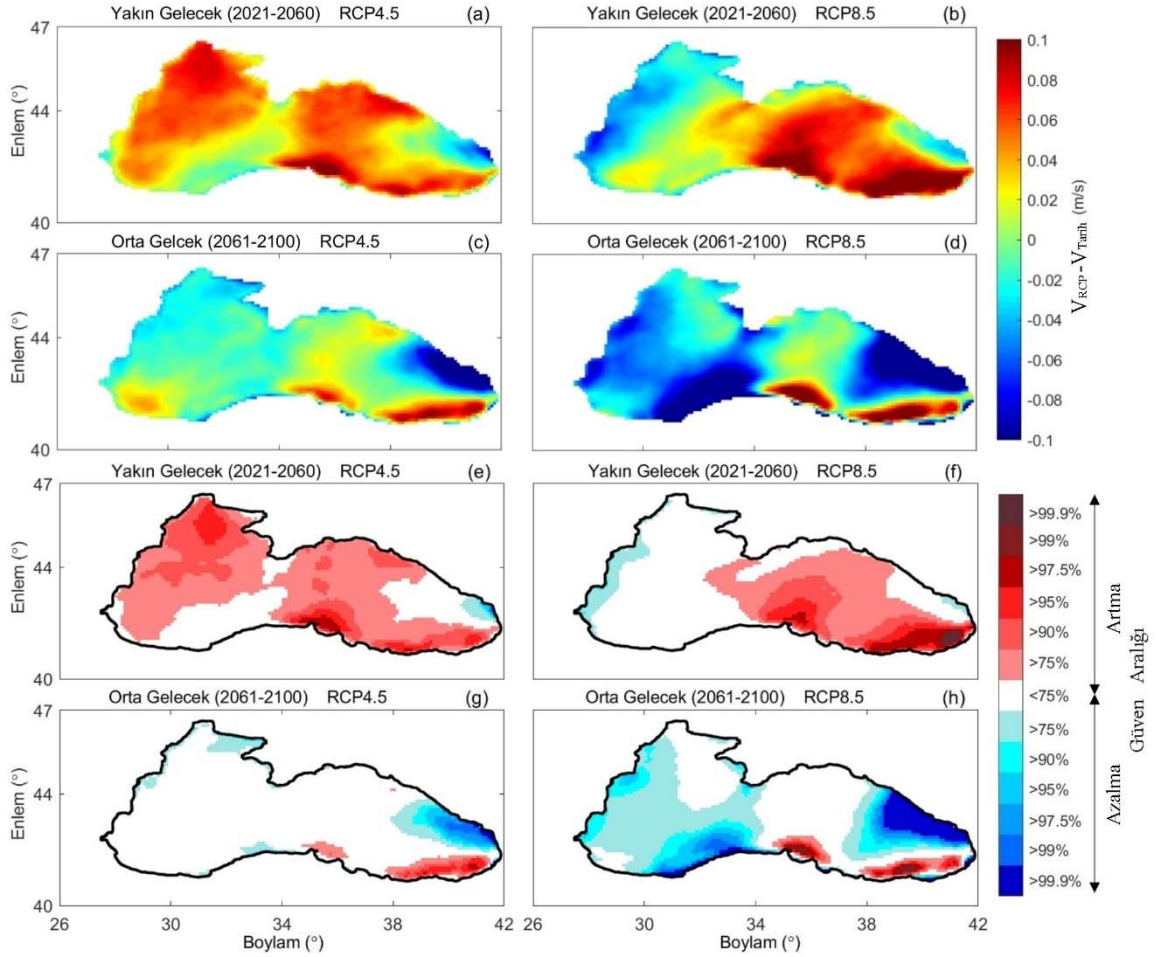


**Şekil 2** - Ortalama rüzgar hızının Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları, (a) tarihsel; (b, c) yakın gelecek (b) RCP4.5, (c) RCP8.5; (d, e) orta gelecek (d) RCP4.5, (e) RCP8.5.

**Tablo 2 - Ortala rüzgar hızının istatistik değerleri.**

$V_m$ (m/s)	Tarihsel	Yakın Gelecek		Orta Gelecek	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
<b>Min.</b>	2.32	2.31	2.35	2.31	2.24
<b>Ort.</b>	5.13	5.16	5.15	5.12	5.08
<b>Maks.</b>	6.14	6.18	6.15	6.12	6.13

Karadeniz rüzgar hız projeksiyonlarının (2021–2100), tarihsel döneme (1970–2005) göre değişiminin belirlenmesi için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre iki gelecek dönem için hesaplanan ortalama rüzgar hızı, tarihsel dönem için hesaplanandan çıkarılmıştır ( $V_{RCP} - V_{Tarih}$ ). İstatistiksel olarak belirgin değişimlerin Karadeniz üzerinde yerlerinin tespit edilmesi için Student's t-testi (Scheer, 1986) uygulanmıştır.



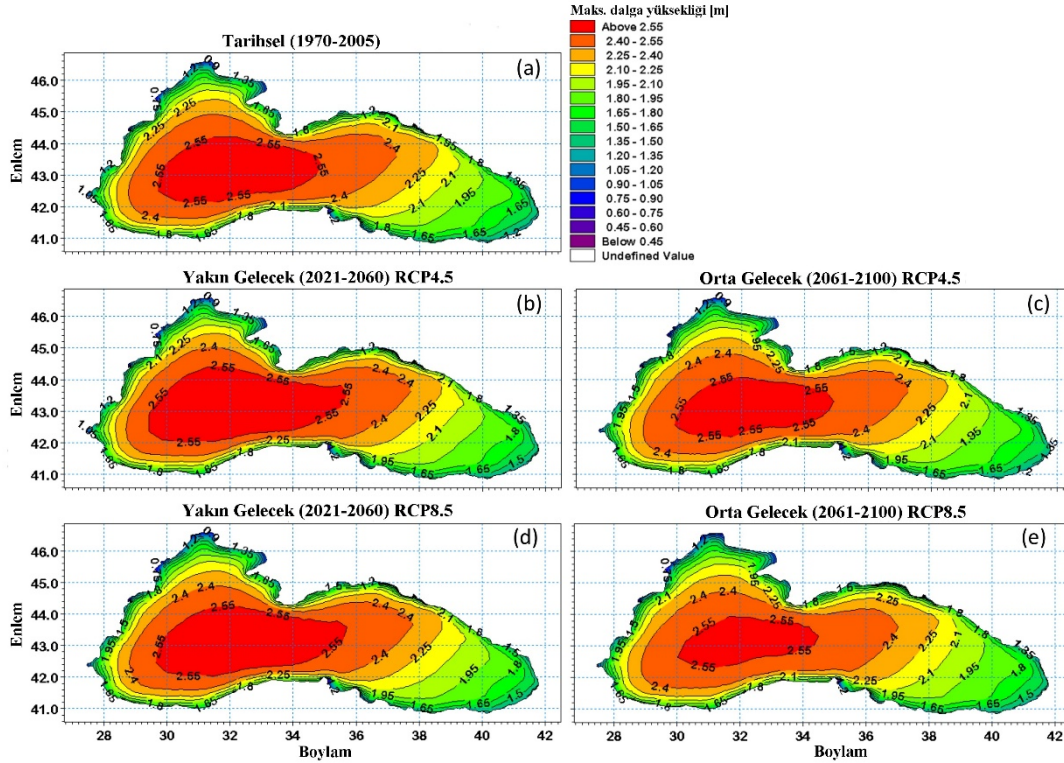
**Şekil 3 - İki RCP senaryosuna göre gelecek dönemler için ortalama rüzgar hızında öngörülen değişimler, (a, b) yakın gelecek, (c, d) orta gelecek. Farklı güven seviyeleri için Student's t-testine göre farkların istatistiksel anlamlılığı (e, f) yakın gelecek, (g, h) orta gelecek. Sol ve sağ paneller sırasıyla RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarını göstermektedir (Islek vd., 2022a).**

Yakın gelecek RCP4.5 senaryosunda, tarihsel döneme göre, ortalama rüzgar hızında öngörülen değişimler, kuzeydoğu ve güneybatı Karadeniz hariç, neredeyse tüm havzada artış eğilimindedir (Şekil 3a ve e). Bu artışlar, yakın gelecek RCP8.5 senaryosu için doğu Karadeniz’de, özellikle güneydoğu Karadeniz’de, daha belirgin artışlar olarak ortaya çıkarken, batı Karadeniz’de belirgin bir farklılığın olmadığı tespit edilmiştir. Yakın gelecekte RCP8.5 senaryosuna göre sadece doğu Karadeniz’de ortaya çıkan artışlar, RCP4.5 senaryosuna kıyasla daha belirgin olarak tahmin edilmiştir (Şekil 3b ve f).

Orta gelecek RCP4.5 senaryosunda tarihsel döneme göre ortalama rüzgar hızı, güneydoğu Karadeniz’de bazı küçük bölgeler hariç, neredeyse tüm havzada stabil kalmaktadır (Şekil 3c ve g). Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre, kuzeydoğu Karadeniz’in ortalama rüzgar hızında oldukça önemli bir düşüş olacağı öngörülmüştür. Buna karşın güney ve güneydoğu Karadeniz’de bazı küçük bölgelerde artış olacağı tahmin edilmiştir. Orta gelecek RCP8.5 senaryosuna göre kuzeydoğu Karadeniz’de öngörülen düşüşler, RCP4.5 senaryosuna göre daha belirgin düşüşler olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 3d ve h).

### Dalga İklim Projeksiyonu ile İlgili Bulgular

Şekil 4, maksimum dalga yüksekliği ( $H_{maks}$ ) parametresinin uzun dönemli ortalamalarının Karadeniz çalışma alanındaki uzamsal dağılımlarını göstermektedir. Hem tarihsel hem de iki gelecek dönem için de maksimum dalga yüksekliğinin en büyük değerleri batı ve orta Karadeniz’de ortaya çıkarken, daha küçük dalga yüksekliklerinin doğu Karadeniz’de ortaya çıktığı saptanmıştır. Tarihsel döneme göre ortalama  $H_{maks}$  1.82 m değerine ulaşırken, yakın gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarında tarihsel döneme göre biraz daha büyük olarak 1.84 m değerine, orta gelecek RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarında tarihsel döneme göre biraz daha düşük olarak 1.81 m değerine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 4 -  $H_{maks, ort}$  parametresinin Karadeniz üzerindeki uzamsal dağılımları; (a) tarihsel; (b, c) yakın gelecek (b) RCP4.5, (c) RCP8.5; (d, e) orta gelecek (d) RCP4.5, (e) RCP8.5 (İşlek vd., 2022b).

## SONUÇ

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosu, Karadeniz rüzgar iklim projeksiyonunun yakın gelecekte (2021–2060) artacağını öngörmektedir. Bu artış eğilimlerinin RCP8.5 senaryosu altında, RCP4.5 senaryosuna kıyasla, doğu Karadeniz’de daha belirgin olarak ortaya çıkacağı belirlenmiştir.

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosuna göre, Karadeniz rüzgar iklim projeksiyonu orta gelecekte (2061–2100) farklı özellik (artma/azalma eğilimi) göstermektedir. Rüzgar hız projeksiyonlarının RCP4.5 senaryosuna göre batı ve orta Karadeniz’de belirgin bir değişim eğiliminin belirlenmemesine karşın, RCP8.5 senaryosuna göre tüm havza üzerinde rüzgar hız projeksiyonlarının belirgin bir şekilde azalma eğilimi göstereceği saptanmıştır. Bu azalma eğilimlerinin özellikle kuzeydoğu Karadeniz’de en belirgin şekilde ortaya çıkacağı tespit edilmiştir.

Yakın gelecekte (2021–2060), RCP4.5 senaryosuna göre Karadeniz dalga iklim projeksiyonunun, rüzgar iklim projeksiyonuna benzer şekilde, artış eğiliminde olacağı belirlenmiştir.

Orta gelecekte (2061–2100) ise RCP8.5 senaryosuna göre Karadeniz dalga iklim projeksiyonunun, rüzgar iklim projeksiyonuna benzer şekilde, belirgin bir azalma eğiliminde olacağı saptanmıştır.

RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için belirlenen farklı (artma/azalma) eğilimler, **iki farklı iklim senaryosunun tanımından** (RCP4.5 senaryosu, radyasyon kuvvetinin 2040 yılı civarında 4.5 W/m<sup>2</sup> ile pike ulaşacağını ve daha sonra stabil olacağını varsayarken, RCP8.5 senaryosu 2100 yılına kadar radyasyon kuvvetinin 8.5 W/m<sup>2</sup>’ye ulaşacağı yüksek emisyon senaryosu varsaymaktadır (Moss vd., 2010; Van Vuuren vd., 2011)), **bu çalışmada dikkate alınan gelecek dönemlerin kapsadığı sürelerin** (yakın gelecek 2021–2060 ve orta gelecek 2061–2100) **farklılığından kaynaklanabilmektedir.**

## Semboller

$\delta$	Köpüklenme parametresi
$\alpha$	Kırılma parametresi
$\gamma$	Kırılma parametresi
$C_{ds}$	Köpüklenme parametresi
$H_{maks, ort}$	Ortalama maksimum dalga yüksekliği
$k_n$	Nikuradse pürüzlülüğü
$V_m$	Ortalama rüzgar hızı
$V_{RCP}$	Gelecekteki ortalama rüzgar hızı
$V_{Tarih}$	Tarihsel ortalama rüzgar hızı

## Kaynaklar

1. Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., et al., “Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI–ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5,” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5, 2013, pp 572–597.



2. Hemer, M.A., and Trenham, C.E., “Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble,” *Ocean Modelling*, 103, 2016, pp 190–203.
3. Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., and van Vuuren, D.P., “The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300,” *Climatic Change*, 109, 2011, pp 213-241.
4. MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) (2021). “IPCC İklim Değişikliği Senaryoları ve Tarihsel Gelişimi”.
5. Erikson, L.H., Hegermiller, C.A., Barnard, P.L., Ruggiero, P., and van Ormondt, M., Projected wave conditions in the Eastern North Pacific under the influence of two CMIP5 climate scenarios. *Ocean Modelling*, 2015, pp 171–185.
6. Aarnes, O.J., Reistad, M., Breivik, Ø., Bitner-Gregersen, E., Ingolf Eide, L., Gramstad, O., Magnusson, A.K., Natvig, B. and Vanem, E., “Projected changes in significant wave height toward the end of the 21st century: Northeast Atlantic,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(4), 2017, pp 3394–3303.
7. Zhang, F., Wang, C., Xie, G., Kong, W., Jin, S., Hu, J., and Chen X., “Projection of Global Wind and Solar Resources over Land in the 21st Century,” *Global Energy Interconnection*, 1(4), 2018, pp 443–51.
8. Chowdhury, P., Behera, M.R., and Reeve, D.E., “Wave climate projections along the Indian coast,” *International Journal of Climatology*, 2019, pp 1–12.
9. Strandberg, G., Barring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., Kolax, M., Kupiainen, M., Nikulin, G., Samuelsson, P., Ullestig, A., and Wang S., “CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4,” *Report Meteorology and Climatology*, No. 116; SMHI: Norrköping, Sweden, 2014.
10. Wilby, R.L., and Fowler, H.J., Regional climate downscaling, In: Fung, C.F., Lopez, A., New, M. (Eds.), *Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources*. Wiley-Blackwell Publishing, Chichester, 2010, pp 34–85.
11. Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., Dile, Y.T., and Taye, M.T., “Evaluation of regional climate models performance in simulating rainfall climatology of Jemma sub-basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2018, pp 53–63.
12. Rana, A, Nikulin, G., Kjelleström, E., Strandberg, G., Kupiainen, M., Hansson, U., and Kolax, M., “Contrasting regional and global climate simulations over South Asia,” *Climate Dynamics*, 54, 2020, pp 2883–2901.
13. Koletsis, I., Kotroni, V., Lagouvardos, K. and Soukissian, T., “Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 2016, pp 234–245
14. Davy, R., Gnatiuk, N., Pettersson, L. and Bobylev, L., “Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018, pp 1652–1659.
15. Rusu, E., “An analysis of the storm dynamics in the Black Sea,” *Romanian Journal of Technical Sciences–Applied Mechanics*, 63(2), 2018, pp 127–142.
16. Islek, F., Yuksel, Y., and Sahin C., “Evaluation of regional climate models and future wind characteristics in the Black Sea,” *International Journal of Climatology*, Vol. 47, 2022a, pp 1877–1901.

17. Rusu, L., “Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios,” *Renewable Energy*, 142, 2019c, pp 137–146.
18. Rusu, L., “A projection of the expected wave power in the Black Sea until the end of the 21st century,” *Renewable Energy*, 160, 2020, pp 136–147.
19. DHI, MIKE 21, Spectral Wave Module - Scientific Document, 2007, 42.
20. Islek, F., Yusek Y., and Sahin C., “Assessments of long-term wind and wave trends in the Black Sea,” *Proceedings of virtual Conference on Coastal Engineering*, No. 36, 2020.
21. Scheer, T.B., “The significance of differences between means. An empirical study,” *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 83(3), 1986, pp 405–408.
22. Islek, F., Yuksel, Y., and Sahin C., “Evaluation of regional climate models and future wave characteristics in an enclosed sea: A case study of the Black Sea,” *Ocean Engineering*, Vol. 262, 2022b, 112220.
23. Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K. vd., “The next generation of scenarios for climate change research and assessment,” *Nature*, 463 (7282), 2010, pp 747–756.
24. Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Volker, K., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, J.S., Rose, S.K., “The representative concentration pathways: An overview,” *Climatic Change*, 109, 2011, pp 5–31.

## Kurupelit Yat Limanında Meydana Gelen Kıyı Şeridi Değişiminin Sayısal Modellenmesi

Yağız Arda ÇİÇEK<sup>1</sup>, Barış Ufuk ŞENTÜRK<sup>2</sup>, Hasan Gökhan GÜLER<sup>3</sup>,  
Cüneyt BAYKAL<sup>4</sup>, Gülizar Özyurt TARAKCIOĞLU<sup>5</sup>, Ahmet Cevdet YALÇINER<sup>6</sup>,  
Işıkhan GÜLER<sup>7</sup>, Ayşen ERGİN<sup>8</sup>

### ÖZET

Ülkemizde İlkadım/Samsun yöresinde bulunan Kurupelit Yat Limanı'nın dalgakıran yapısı inşaatı sonrasında kıyı boyunca belirgin ölçüde kıyı erozyonu gözlemlenmiştir. Ayrıca, dalgakıran yapısının çevresinde ise birikmeler gözlemlenmiştir. Kıyı şeridinde meydana gelen değişikliklerin ilerleyen dönemlerde de benzer şekilde devam edeceği öngörülerek liman içinin tamamen dolgu malzemesi ile doldurulması ve dalgakıran yapısının 500 metre uzatılması yerel otoriteler tarafından çözüm önerisi olarak sunulmuştur. Bu çalışmada, bahsi geçen çözüm önerisinin uygulanması durumunda meydana gelecek olası sonuçlar iki farklı kum taşınım sayısal modeli yardımı ile araştırılmıştır. Çalışmada iki farklı kum taşınım modeli kullanılmıştır. Sayısal modelleme çalışmaları sonucunda her iki model de bahsi geçen çözüm önerisinin mevcut sorunları çözemeyeceğini ve kıyı şeridinde meydana gelen değişimlerin devam edeceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kıyı şeridi değişimi, kum taşınımı, sayısal modelleme, Kurupelit Yat Limanı

### ABSTRACT

#### *Numerical Modelling of Shoreline Change in Kurupelit Marina*

*In Kurupelit Marina, located in İlkadım/Samsun region in Turkey, severe erosion is observed in the longshore direction due to the construction of the breakwater. Therefore, a heavy shoreline change is observed. In addition, serious deposition is observed around the breakwater. It is*

---

1 KU Leuven, Belçika - yagizardacicek@gmail.com

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ufuk@metu.edu.tr

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - goguler@metu.edu.tr

4 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - cbaykal@metu.edu.tr

5 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - gulizar@metu.edu.tr

6 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - yalciner@metu.edu.tr

7 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - isikhan@metu.edu.tr

8 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ergin@metu.edu.tr

*understood by the local authorities that the condition would get even worse. Then, filling the marina with fill material and extending the breakwater by 500 meters are considered solution proposals. In this study, the possible results that will occur in the case of the implementation of the aforementioned solution proposals are investigated using numerical models. Two different sediment transport models are used. As a result, both models show that the proposed solutions will not solve the existing problems; on the contrary, the present situation will be even worse in the case of the implementation of the proposed solutions.*

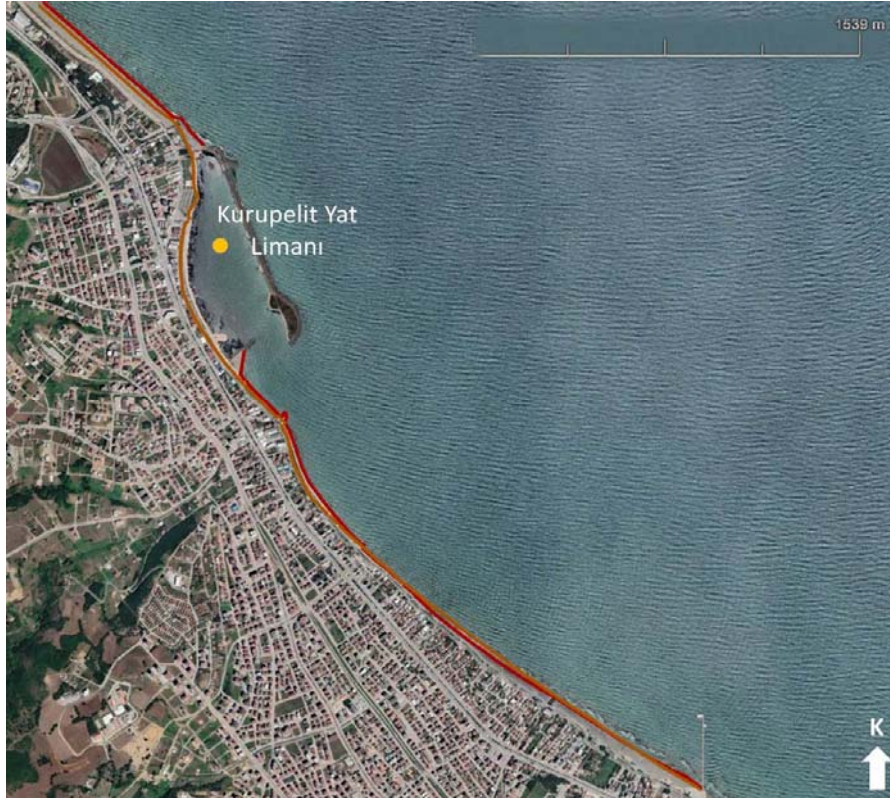
**Keywords:** *shoreline change, sediment transport, numerical modeling, Kurupelit Marina*

## GİRİŞ

Kıyı şeridinde meydana gelen yüksek erozyon ve birikme, kum taşınımından kaynaklanan ve kıyı mühendisleri tarafından sıklıkla karşılaşılan bir sorundur (Kökpınar vd., 2000; Ergin vd., 2006). Kıyı şeridinde meydana gelen bu olaylar, doğal kökenli sebeplerle ilişkilendirilebileceği gibi, deniz alanlarından yer kazanmak, ulaşımı kolaylaştırmak ya da ekonomik amaçlarla inşa edilen kıyı yapıları da kıyı şeridindeki değişimde büyük rol oynayan insan kaynaklı etkenlerdendir (Uzun, 2015). Bu bağlamda, ülkemizde ve dünyada, kıyı yapılarının tasarımı sırasında bu yapıların kıyı şeridine olası etkileri fiziksel ve sayısal modellemeler yardımı ile incelenmektedir (Ari, 2004 ve Sesli, 2006).

## AMAÇ

Ülkemizde İlkadım/Samsun yöresinde bulunan Kurupelit Yat Limanı'nın dalgakıranı (Şekil 1), yukarıda bahsi geçen beşeri etken kaynaklı kıyı şeridi değişimine bir örnek oluşturmuştur.



**Şekil 1** - Kurupelit Yat Limanının (41,367K, 36,232D) 2020 Yılına Ait Görüntüsü (kahverengi çizgi 2009, kırmızı çizgi 2020 yıllarına ait kıyı şeritlerini temsil etmektedir.)

Çeşitli navigasyon araçları kullanımı sonucu, yapılan bu dalgakıranın, 2009-2022 yılları arasında kıyı boyunca 50 metreyi aşan erozyona yol açtığı, dalgakıranın kuzey-batı bölgesindeki birikme değerlerinde ise ciddi bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun daha da kötüye giderek devam edeceği, kıyı mühendisleri tarafından öngörülmüş ve sorunun çözümü için sunulan önerilerin sayısal benzetim çalışmaları başlatılmıştır. Bu çalışmada, bahsi geçen yat limanının içinin tamamen dolgu ile kaplandığı ve dalgakıran yapısının 500 metre uzatıldığı durumda (Şekil 2) olası kum taşınımının ve kıyı şeridi değişiminin nasıl etkileneceği sayısal modeller aracılığı ile araştırılmıştır.



Şekil 2 - Kurupelit Yat Limanı doldurma alanı ve yeni dalgakıran yapısı (kırmızı çizgi doldurma alanını, mavi çizgi yeni dalgakıran yapısının tahmini konumunu göstermektedir.)

Sayısal benzetim çalışmalarında Artagan (2006), Baykal (2006), Şafak (2006) ve Esen (2007) tarafından geliştirilen CSIM Tek Çizgi kum taşınımı modeli ve Elghandour (2018) tarafından geliştirilen ShorelineS isimli kum taşınımı modeli kullanılmıştır. Çalışma genel anlamda şu araştırma sorularına cevap aramaktadır: (i) Kum taşınımı sayısal modellerinde kullanılan kalibrasyon parametrelerinin değeri bahsi geçen bölge için nedir? (ii) Liman içinini doldurmak ve dalgakıran uzunluğunu 500 metre arttırmak, kıyı şeridinde nasıl bir değişime yol açacak, mevcut sorunları çözebilecek midir? (iii) Kullanılan modeller arasında kıyı şeridi değişiminin tahmini açısından nasıl bir farklılık vardır?

Bu bildiri şu şekilde tasarlanmıştır: **YÖNTEM** kısmında kullanılan sayısal modeller tanıtılmış, kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi için izlenen yol açıklanmıştır. Sonrasında **SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI** kısmında kalibrasyon parametresinin değeri, olası yapısal değişikliğin kıyı şeridine olan etkisi ve iki model arasındaki farklılıklar anlatılmıştır. Son olarak **SONUÇ** kısmında model çıktıları ve mevcut çözüm önerisinin yeterliliği tartışılmış ve sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## YÖNTEM

Bu çalışmada, Artagan (2006), Baykal (2006), Şafak (2006) ve Esen (2007) tarafından geliştirilen kum taşınımı modeli ile Elghandour (2018) tarafından geliştirilen ShorelineS isimli kum taşınımı modeli kullanılmıştır. Bu kısımda öncelikle kullanılan sayısal modellerin çözdüğü kum taşınımı denklemleri verilmiştir. Ardından kalibrasyon parametresini belirlemekte kullanılan yöntem açıklanmıştır.

### CSIM Tek-Çizgi Kum Taşınım Modeli

CSIM Tek-Çizgi Kum Taşınım Modeli, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Kıyı ve Liman Mühendisliği Laboratuvarında geliştirilmiş olup, Pelnard-Consideré (1956) tarafından sunulan “tek-çizgi” teorisine dayalı bir boyutlu kıyı şeridi değişim tahmininde kullanılan bir modeldir. Teorideki ana varsayım, kumsal denge profili üzerine kurulmuştur. Kumsal denge profiline göre su derinliği ve kıyı şeridinden olan uzaklık Denklem (1) ile ifade edilmektedir (Bruun, 1954).

$$d = A_p \cdot y^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Burada,  $d$  su derinliğini,  $y$  ise kıyıdan olan uzaklığı vermektedir.  $A_p$  ise Dean (1983) tarafından Denklem (2) ile ifade edilmiştir.

$$A_p = [1,04 + 0,086 \cdot \ln(D_{50})]^2 \quad (2)$$

Denklem (2),  $0,0001 \leq D_{50} \leq 0,001$  metre koşulunda geçerli olup  $D_{50}$  parçacık boyutunu ifade etmektedir.

“tek-çizgi” teorisinin bir sonucu olarak kıyı şeridi değişimi, kütlelerin korunumu (Denklem 3) ve kum taşınımı denklemi (Denklem 5) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{D_c + B} \cdot \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + q \right) \quad (3)$$

Burada,  $y$  kıyı şeridinin konumunu,  $t$  zamanı,  $x$  kıyı boyu konumu,  $Q$  uzun dönem kıyı boyu katı madde (kum) taşınımını,  $q$  kum kaynağı ya da kum kaybını,  $B$  basamak genişliğini ve  $D_c$  kapama derinliğini temsil etmektedir. Kapama derinliği, Hallermeier (1978) tarafından Denklem (4)’te verildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$D_c = 2,28 \cdot H_{s,12} - 68,5 \cdot \left( \frac{H_{s,12}^2}{gT^2} \right) \quad (4)$$

Burada,  $H_{s,12}$  yılda 12 saat aşılacak belirgin dalga yüksekliğini ve  $T$  ise buna karşılık gelen dalga periyodunu temsil etmektedir. Belirgin dalga yüksekliğini ve karşılık gelen dalga periyodunu belirleyebilmek için Copernicus Marine Service veri sisteminden 41.854K, 36.125D koordinatına ait 01.01.2010 - 31.12.2020 tarihleri arasında saatlik rüzgar dalgası verisi alınmıştır.  $Q$  değerini hesaplamak için ise birçok matematiksel ifade bulunmaktadır. Bu çalışmada, Denklem (5)’te verilen CERC formülü (SPM, 1984) kullanılmıştır.

$$Q = \frac{K}{16 \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot (1-p)} \cdot \sqrt{\frac{g}{\gamma_b}} \cdot H_b^{\frac{5}{2}} \cdot \sin(2\alpha_b) \quad (5)$$

Burada,  $K$  değişkeni ileride kalibre edilecek olan boyutsuz parametredir.  $\rho_s$  ve  $\rho$  ise sırasıyla kumun ve suyun yoğunluklarıdır ve sırasıyla  $2650 \text{ kg/m}^3$  ve  $1025 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır.  $g$  yerçekimi ivmesini,  $p$  ise gözenekliliği temsil etmektedir ve  $p = 0,4$  olarak alınmıştır. Ayrıca,  $\gamma_b$  dalga kırılma indeksidir ve düz zeminlerde  $0,78$  olarak kabul edilmiştir. Son olarak  $H_b$  ve  $\alpha_b$  sırasıyla belirgin dalga kırılma yüksekliği ve kırılma açısıdır.

### Shorelines Modeli

Bu sayısal model, Elghandour (2018) tarafından geliştirilmiş olup kıyı şeridinin değişiminin tahmininde kullanılmaktadır. Model, “tek-çizgi” teorisini temel almaktadır ve kütlenin korunumu (Denklem 6) ve kum taşınımı (Denklem 7) denklemlerini çözmektedir.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{D} \cdot \left( \frac{\partial Q}{\partial x} + q \right) \quad (6)$$

Burada,  $y$  kıyı şeridinin konumunu,  $t$  zamanı,  $x$  kıyı boyu konumu,  $Q$  uzun dönem kıyı boyu katı madde (kum) taşınımı,  $q$  kum kaynağı ya da kum kaybını ve  $D$  aktif profil yüksekliğini temsil etmektedir. uzun dönem kıyı boyu katı madde (kum) taşınımının ( $Q$ ) hesabında SPM (1984) tarafından verilen CERC1 formülü (Denklem 7) çözülmektedir.

$$Q = bH_{s0}^2 \sin 2(\phi_{loc}) \quad (7)$$

Burada,  $b$  değişkeni ileride kalibre edilecek olan parametredir. Ayrıca,  $H_{s0}$  belirgin dalga yüksekliği,  $\phi_{loc}$  ise derin deniz geliş açısı ile kıyı şeridi oryantasyonunun arasında kalan açı olarak verilmiştir.

### Kalibrasyon Parametresinin Belirlenmesi

Denklem 5 ve Denklem 7’den görülebileceği üzere, uzun dönem kıyı boyu katı madde (kum) taşınımı hesabında  $K$  ve  $b$  olarak belirtilen kalibrasyon parametreleri kullanılmıştır. Bu parametrelerin belirlenebilmesi için öncelikle 2021 yılına ait kıyı şeridi Google Earth’ten alınan ve 5 metre çözünürlüğü olan resimlerin her metrede sayısallaştırılması yöntemi ile saptanmıştır. Sonrasında ise sayısal modeller yardımı ile ilgili yıllara ait dalga parametreleri kullanılarak 2009-2021 yılları arasındaki kıyı şeridi değişimi bulunmuştur. Modellerin kullanımı sırasında kalibrasyon parametreleri ilk olarak varsayılan değerler olarak alınmıştır. Ardından, model sonuçları 2021 yılındaki kıyı şeridi ile kıyaslanmış, ve kalibrasyon parametrelerinde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Bu kıyaslamalar, ilgili bölgedeki en kritik (en yüksek erozyona uğrayan) alanlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Son olarak model sonuçları ile 2021 yılındaki kıyı şeridi arasındaki kritik bölgelerdeki uygunluk yeterli bulunana kadar (Bağlı Karesel Ortalama Hata değeri %2’den küçük olana kadar) kalibrasyon parametreleri değiştirilmiştir.

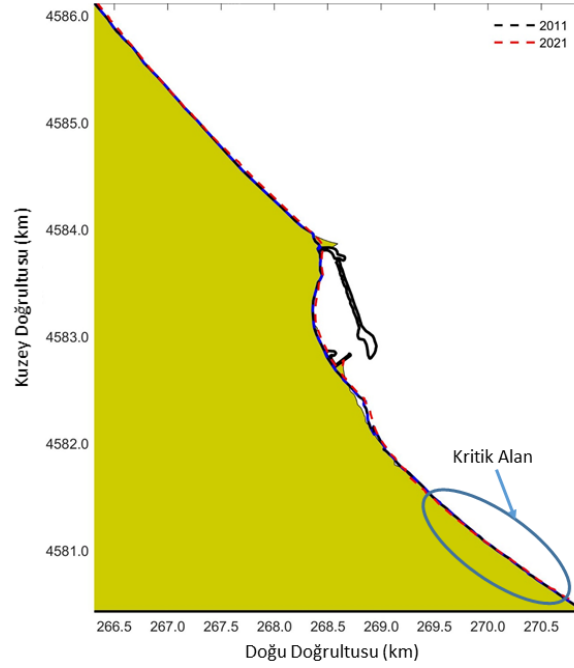
### SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMALARI

Bu kısımda sayısal modelleme çalışmalarının sonuçları iki alt başlık altında verilmiştir. Öncelikle kalibrasyon parametrelerini belirlemek amacı ile 2009-2021 yılları arasında sayısal modelleme sonuçları ve bu sonuçlar ışığında elde edilen kalibrasyon parametreleri açıklanmıştır. Sonrasında ise Kurupelit Yat Limanı’nın içi doldurulmuş ve dalgakıran yapısının 500 metre uzatılmış hali sayısal modeller aracılığı ile 2021-2040 yılları arasında çalışılmış, olası kıyı şeridi değişimleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kıyı şeridi değişiminin bölgeye olası etkileri açısından

değerlendirilmiştir. Ayrıca kullanılan modeller, elde ettikleri sonuçlar bazında kıyaslanmış ve kıyı şeridini tahmin etme performansları tartışılmıştır.

### Kalibrasyon Parametresi Sonuçları

Mevcut çalışmanın ilk adımı olarak Denklem 5 ve Denklem 7’de verilen  $K$  ve  $b$  parametreleri, **YÖNTEM** kısmında anlatıldığı üzere bölgenin 2009-2021 yılları arasındaki kıyı şeridi değişimi baz alınarak kalibre edilmiş ve en uygun değerler belirlenmiştir. Kalibrasyon işlemleri sırasında Şekil 3’te belirtilen kritik bölge baz alınmış, bu bölgedeki erozyonun doğru tahmini öncelikli kıstas olarak belirlenmiştir.



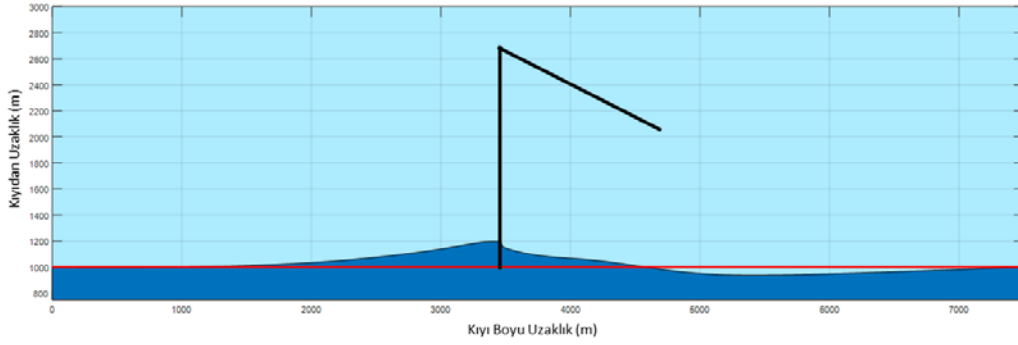
Şekil 3 - 2011 ve 2021 yıllarına ait kıyı şeritleri ve modelleme sonuçları

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere kritik alandaki erozyon değerleri sayısal modelleme sonuçları ile oldukça uyumludur. Kalibrasyon çalışmaları sonucunda Bağıl Karesel Ortalama Hata değeri %1.8 olarak belirlenmiştir. Bu uygunluğu sağlayan kalibrasyon parametreleri ise şu şekilde bulunmuştur: CSIM kum taşınım modelinde bahsi geçen ve Denklem 5’te kullanılan  $K$  parametresi  $K = 1,0$  olarak belirlenmiştir. ShorelineS modelinde bahsi geçen ve Denklem 7’de kullanılan  $b$  parametresi ise  $b = 8,5 \cdot 10^4$  olarak belirlenmiştir.

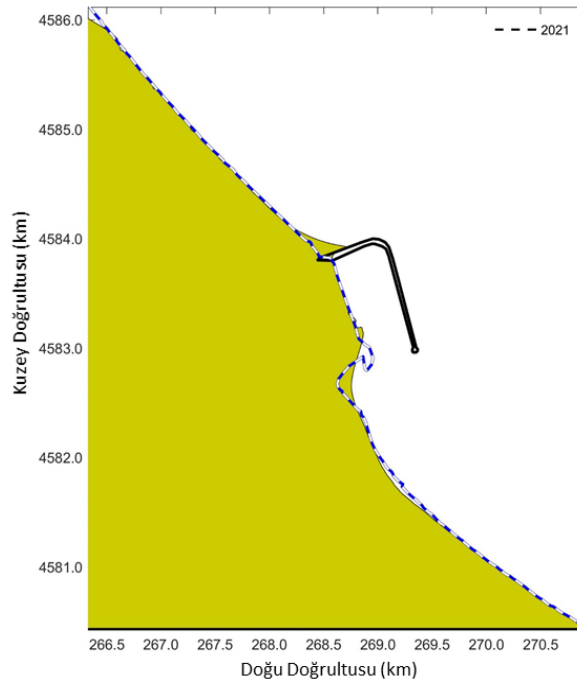
### Kıyı Şeridi Değişimi Sonuçları

Kalibrasyon parametrelerinin iki sayısal model için de belirlenmesinin ardından 2021-2040 yılları arasında Kurupelit Yat Limanı’nın iç kısmı tamamen dolgu ile doldurulmuş ve 500 metre uzunluğuna sahip yeni bir dalgakıran inşa edildiği varsayılmıştır. Yeni şartlar altında kıyı şeridinde meydana gelecek olası değişimlerin tahmini için benzetim çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak CSIM kum taşınım modeli kullanılmış ve sonuçlar Şekil 4’te verilmiştir. Sonrasında ise ShorelineS modeli kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları sonuçları Şekil 5’te verilmiştir.





Şekil 4 - CSIM kum taşınım modelinin kıyı şeridi değişimi sonuçları



Şekil 5 - ShorelineS modelinin kıyı şeridi değişimi sonuçları

Şekil 4 ve Şekil 5'ten de anlaşılacağı üzere her iki benzetim çalışmasının sonucunda da 2040 yılının sonunda erozyona uğrayan kritik bölgedeki erozyon miktarlarının daha da artacağı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yeni yapılan 500 metre uzatılmış dalgakıran yapısının ardında oluşan birikme miktarlarında da ciddi artışlar olabileceği anlaşılmıştır. Ek olarak, CSIM kum taşınım modeli kritik bölgedeki en yüksek erozyon miktarını 62 metre bulurken, ShorelineS modeli aynı bölgede bu değeri 63 metre bulmuştur. Bu da iki modelin de birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiğini ve benzer performanslarda çalıştıklarını göstermiştir.

Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulan grafiklerden de anlaşılacağı üzere bahsi geçen yat limanının içini tamamen dolgu malzemesi ile kaplamak ve dalgakıran yapısını 500 metre uzatmak, İlkadım/Samsun yöresinde bulunan Kurupelit Yat Limanı'ndaki kum taşınımı sonrası meydana gelen kıyı şeridi değişimi sorunlarını çözmeyecektir. Aksine, durum daha da vahim bir vaziyet olarak erozyonun yüksek olduğu kritik bölgelerde bulunan yapılara zarar verecektir. Ek olarak, dalgakıran yapısının arkasında oluşan birikme kaynaklı su seviyesinde düşüş, kıyı boyunda oluşan erozyon kaynaklı su seviyesinde artış meydana gelecektir. Bu da doğal habitata zarar verecek, bu

bölgelerde yaşayan deniz canlılarının hayatlarını riske girecektir. Sonuç olarak, büyük masraflarla yapılması düşünülen bu çalışmanın mevcut durumu daha da bozarak büyük felaketlere yol açması olası bir senaryodur.

## **SONUÇ**

Bu çalışmada, İlkadım/Samsun yöresinde bulunan Kurupelit Yat Limanı'ndaki mevcut dalgakıran yapısından kaynaklanan kıyı şeridi değişimini engellemek için düşünülen liman içini dolgu malzemesi ile kaplama ve dalgakıran yapısını 500 metre uzatma önerisinin kıyı şeridine olası etkileri incelenmiştir. Çalışmada CSIM kum taşınım modeli ve ShorelineS kum taşınımı modeli kullanılmıştır. Öncelikle sayısal modellerin çözdüğü denklemlerde bulunan kalibrasyon parametrelerini ( $K, b$ ) saptamak amacıyla 2009-2021 yılları arasında oluşan kıyı şeridi değişimi belirlenmiş, sonrasında ise sayısal modeller bu kıyı şeridi değişimine benzer sonuçlar verene kadar kalibrasyon parametreleri değiştirilmiştir. Sonuç olarak bu parametrelerin değerleri  $K = 1,0$  ve  $b = 8,5 \cdot 10^4$  olarak bulunmuştur. Sonrasında ise liman içindeki alanın dolgu malzemesi ile kaplandığı ve mevcut dalgakıranın 500 metre uzatıldığı varsayılarak 2021-2040 yılları arasında kıyı şeridi değişimi sayısal modellenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda iki model de benzer sonuçlar vermiş, dalgakıranın arka kısmında büyük miktarlarda birikme, kıyı boyunda ise ciddi erozyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca iki sayısal model de kritik bölgedeki erozyon miktarlarını benzer bulmuştur. Bu da iki modelin de benzer performansta çalıştığını, ve uyumlu sonuç verdiğini göstermiştir.

Bu çalışmada Kurupelit Yat Limanı'ndaki kıyı şeridi değişimi sorunu için sunulan çözüm önerisinin, durumu düzeltmekten ziyade daha da kötü sonuçlara yol açacağı öngörülmüştür. Önerilen çözümün imalat maliyeti ve olası kötü senaryoların doğaya ve kıyı kenarındaki yapılarla verdiği zarar düşünüldüğünde alternatif çözümlerin araştırılması, daha detaylı sayısal modelleme çalışmalarının yapılması gereklidir.

## **Kaynaklar**

1. Ari, H. A. (2004), "A study on shoreline numerical modeling; Karaburun case study" MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Yıldız Technical University. (In Turkish)
2. Artagan, S.S (2006), "A one-line numerical model for shoreline evolution under the interaction of wind waves and offshore breakwaters" MSc Thesis, supervisor: Prof. Dr. Ayşen Ergin, co-supervisor: Işıkhan Güler, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
3. Baykal, C. (2006), "Numerical Modeling of wave diffraction in one-dimensional shoreline change model" MSc Thesis, supervisor: Prof. Dr. Ayşen Ergin, co-supervisor: Prof. Dr. Ahmet Cevdet Yalciner, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
4. Bruun, P., (1954), "Measures Against Erosion at Groins and Jetties", Proc. 3rd Conf. on Coastal Engrg., ASCE, Cambridge, Massachusetts, pg.137-164
5. Dean, R.G., (1983), CRC handbook of coastal processes and erosion, P.D. Komar, ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla.
6. Elghandour, A. M. (2018), "Efficient modelling of coastal evolution: Development, verification and validation of ShorelineS model" MSc Thesis, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft.

7. Ergin, A., Güler, I., Yalciner, A.C., Baykal, C., Artagan, S.S., Şafak, I. (2006), “A One-Line Numerical Model for Wind Wave Induced Shoreline Changes”, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey
8. Esen, M. (2007), “An implicit one-line numerical model on longshore sediment transport” MSc Thesis, supervisor: Prof. Dr. Ayşen Ergin, co-supervisor: Işıkhan Güler, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
9. Hallermeier, R.J., (1978), “Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion”, Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Engrg., ASCE, New York, 1493-1512
10. Şafak, I. (2006), “Numerical modeling of wind wave induced longshore sediment transport” MSc Thesis, supervisor: Prof. Dr. Ayşen Ergin, co-supervisor: Işıkhan Güler, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University.
11. Kökpınar, M.A., Güler, I., Darama, Y., (2000), “Bafra Ovası Kızılırmak-Karadeniz Birleşimindeki Kıyı Erozyonunun İncelenmesi”, III. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Çanakkale, 507-524
12. Pelnard-Considere, R., (1956), “Essai de Theorie de l’Evolution des Forms de Rivage en Plage de Sable et de Galets”, 4th Journees de l’Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No.1, 289-298
13. Sesli, A. F. (2006). “Sayısal Fotogrametri ile Kıyı Alanlarındaki Değişimin İncelenmesi” Jeodezi, Jeoformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, Sayı 95, S. 11-17
14. Shore Protection Manual (SPM), (1984), U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
15. Uzun, M. (2014). “Hersek Deltasında (Yalova) kıyı çizgisi-Kıyı Alanı değişimleri ve etkileri” Doğu Coğrafya Dergisi, 19(32), 27.



## Akarsularda Tsunami Dalgası İlerlemesinin Deneysel İncelenmesi

H. Anıl GÜNER<sup>1</sup>, Yalçın YÜKSEL<sup>2</sup>, Ahmet Cevdet YALÇINER<sup>3</sup>, Mehmet ÖZTÜRK<sup>4</sup>, Cihan ŞAHİN<sup>5</sup>, Şükrü ERSOY<sup>6</sup>, Cem YILMAZER<sup>7</sup>, Onur ALTINTAŞ<sup>8</sup>, Barış AYDIN<sup>9</sup>, Merve AYAZ<sup>10</sup>

### ÖZET

Tsunami dalgalarının en çok etkili olduğu kritik yerlerden biri akarsu ağızları ve akarsu yollarıdır. Bu nedenle tsunami dalgasının akarsularda ilerlemesinin fiziksel model yardımıyla araştırılması tsunami etkilerinin akarsular ve çevresine etkilerini anlamakta önemli faydalar sağlayacaktır. Bu konuda araştırma yapmak üzere, YTÜ Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarında bulunan kıvrımlı kanal kullanılmıştır. Kanal, doğrusal ve bunu takip eden iki farklı kıvrım geometrisine sahiptir. Dikdörtgen kesit alanına sahip olan kanalın yüksekliği 60 cm, genişliği ise 90 cm'dir. Tabanı alüminyum, yan duvarları ise pleksiglas malzemedan oluşturulmuştur. Kanalın mansabına yerleştirilmiş olan bir tsunami üretici akımın menbasına doğru ilerleyecek şekilde tsunami dalgaları üretmektedir. Bu dalganın kanal boyunca ilerlemesi, kıvrım yapan bölümlerde değişimi farklı hidrolojik koşullarda incelenecektir. Bu çalışma ile deney sistemine ait bilgiler verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tsunami, Akarsu, Kıvrımlı Kanal, Tsunami Üretici, Fiziksel modelleme.

### ABSTRACT

#### *Experimental Investigation of the Tsunami Wave Propagation in Rivers*

*One of the critical locations, where tsunami waves are most effective is river mouths and river beds. For this reason, investigating the propagation of the tsunami wave along the rivers by using*

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - aari@yildiz.edu.tr

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - yuksel@yildiz.edu.tr

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - yalciner@metu.edu.tr

4 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - meozturk@yildiz.edu.tr

5 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cisahin@yildiz.edu.tr

6 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - sersoy@yildiz.edu.tr

7 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - cemylmazer92@gmail.com

8 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - onuraltintas2323@gmail.com

9 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - aydin.baris178@gmail.com

10 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - ayazmerve1@hotmail.com

*physical modeling provides important benefits in understanding the effects of tsunami propagation in streams and their surroundings. To do research on this subject, the propagation of a tsunami wave in a curved channel will be studied in the Hydraulic and Coastal Engineering Laboratory at YTU to stimulate the behavior of tsunami waves. The waves are generated by a tsunami-generator located at the downstream of the channel. The channel made of plexiglass sidewalls and aluminum bottom, and the height and width of the channel are 60 cm and 90 cm, respectively. The propagation of tsunami waves along the meandering channel will be investigated under different hydraulic conditions. In this study, the informations concerning the experimental set-up are given.*

**Keywords:** *Tsunami, River, Meandering Channel, Tsunami generator, Physical modelling.*

## **GİRİŞ**

Tsunami dalgaları, kıyılara ulaştıklarında, sığ sularda şiddetli akıntılar ve su düzeyi yükselmelerine neden olmalarının yanında, düşük kotlu kıyı yerleşimleri ve tarım alanlarında su baskınları oluşturarak da hasarlara neden olmaktadır. Bu etkilerden başka, denizlere dökülen akarsular boyunca akarsu akımına ters yönde ilerleyerek akarsu havzalarında taşkınlara ve çevredeki yerleşimler ve tarım alanlarında da hasara neden olmaktadır. Tsunaminin nehir boyunca karşı akıntıyla etkileşmesi ve akarsuların kıvrım yapan su yatakları ve bunların akarsu yatağı boyunca değişen kesit alanları ve geometrileri nedeniyle, tsunami dalgalarının davranışı ve taşkın oluşumu karmaşık bir hidrodinamik yapı ortaya çıkarmaktadır. Bu karmaşık probleme yönelik literatürde göreceli olarak az bilgi yer almaktadır.

Denize doğru taban eğimleri azalan ve akım hızları düşen akarsular, taşıdıkları katı maddeleri bu bölgelere yığarak verimli düzlükler oluştururlar. Drenaj alanına bağlı olarak bütün akarsular denize değişik boyutlara sahip birer delta oluşturarak bağlanmaktadır. Mısır'daki Nil Deltası, ABD'deki Mississippi Deltası, Türkiye'deki Gediz, Menderes ve Seyhan Deltaları büyük deltalara örnek verilebilir. Mevsimsel olarak yağışlar sonucu akarsulardan kaynaklı tatlı su taşkınları yerleşim yerleri için tehdit olmakla beraber daha geniş tarım alanlarını su altında bırakması nedeniyle yerleşik halk tarafından tercih edilebilir olmuşlardır. Yıllık olarak dönemleri çok iyi bilinen bu taşkınlardan yerleşik uygarlıklar tarımsal üretimlerini artırmada büyük faydalar sağlamışlardır (örneğin Fırat ve Dicle boyunca yerleşen kadim Sümer ve Nil boyunca yerleşen kadim Mısır uygarlıkları). Hakkında neredeyse çok az şey bilinen ve oluşumundan ancak kısa bir zaman önce haberdar olunabilen tsunami gibi deniz kaynaklı taşkınlar ise akarsu akışının tersine doğru ilerleyerek akarsular boyunca mevcut olan hem yerleşim alanları hem de tarım alanları üzerinde yıkıcı bir etkiye sahip olmaktadır.

Ağırlık dalgası sınıfına giren tsunami dalgaları uzun dalgalar (diğeri ise gel-git dalgalarıdır) olup deniz/okyanus tabanındaki tektonik hareketler, volkanik patlamalar veya heyelanlar sonucu meydana gelen ve kıyı içlerine doğru uzun mesafeler boyunca ilerleyen oldukça yıkıcı etkiye sahip olan büyük su kütlesi hareketleridir. Bu anlamda tektonik olarak oldukça aktif olan denizlerimizde –özellikle Ege Denizi ve Marmara Denizi'nde- meydana gelecek tsunamiler ülkemiz kıyılarında deniz kaynaklı potansiyel yıkıcı etkilere sahiptirler. Hatta uzun dalga sınıfına giren tsunami dalgaları, meydana geldiği noktadan binlerce kilometre uzağa ulaşabilmeleri nedeniyle Akdeniz'in kuzey doğusundaki kıyılarımız için de risk oluşturmaktadırlar. Uzun dalgalar– rüzgar dalgası gibi kısa dalgalardan farklı olarak- etkileri deniz tabanı tarafından da hissedilen dalga ilerleme doğrultusunda kütle taşınımının olduğu dalgalardır. Tsunamilerin kıyılardaki yerleşim yerleri üzerindeki yıkıcı etkileri özellikle 90'lı yıllardan itibaren yoğun olarak çalışılmış ve bu konuda oldukça iyi bir bilgi birikimi oluşmuştur ([1]; [2]; [3]; [4]). Çalışmaların büyük bölümü kıyı boyunca meydana gelen tsunami dalgası-kıyı etkileşimi ve bu doğa olayının kıyı yerleşimleri üzerindeki katastrofik etkileri üzerine odaklanmaktadır. Ancak tsunamiler akarsu ağızlarından içeri girerek akarsu membasına doğru da uzun mesafeler

katedebilir ve akarsu boyunca var olan yerleşim alanları, tarım alanları ve ekolojik yaşam üzerinde de kıyı alanlarındakine benzer yıkıcı etkiler yaratabilmektedir ([5]; [6]; [7]; [8]).

Tsunami dalgasının açık denizdeki davranışı ile akarsu ağzından girdikten sonraki davranışı önemli farklılıklar göstermektedir. Tsunami dalgası akarsu ağzından girdikten sonra ilerleyen dalga ön cephesindeki akım çizgileri eğrisel bir form almakta ve dalga dışbükey (konveks) bir forma kavuşmaktadır. Diğer bir deyişle derinlik boyunca akım çizgilerinin paralelliği bozulmakta ve düşey yönde ivmelenme önem kazanmaktadır. Bunun sonucunda hidrostatik basınç etkisini kaybetmekte, hidrostatik olmayan etki belirleyici olmakta ve tsunami dalgası yeni bir forma bürünmektedir. Bu durum dalganın akarsu ortamındaki hidrodinamik davranışının analizinde açık denizdekenden farklı kabul ve yaklaşımları zorunlu kılmaktadır ([9]; [6]; [10]; [11]).

Tsunami dalgalarının akarsulardaki temel karakteristikleri (su seviyesi artışı, dalga ilerleme mesafesi) ve özel koşullardaki davranışının (iç ve dış kıvrımlardaki davranışı gibi) niceliksel ve –özellikle de- niteliksel olarak belirlenmesinde koşulları kullanıcı tarafından belirlenen deneysel çalışmalar çok sayıda senaryonun çalışılmasına imkan vermektedir. Ayrıca deneysel çalışmalar bu konuda sayısal modellerin geliştirilmesinde, modellerin kalibrasyonu ve doğrulanmasında gerekli güvenilir bilginin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

### **Amaç**

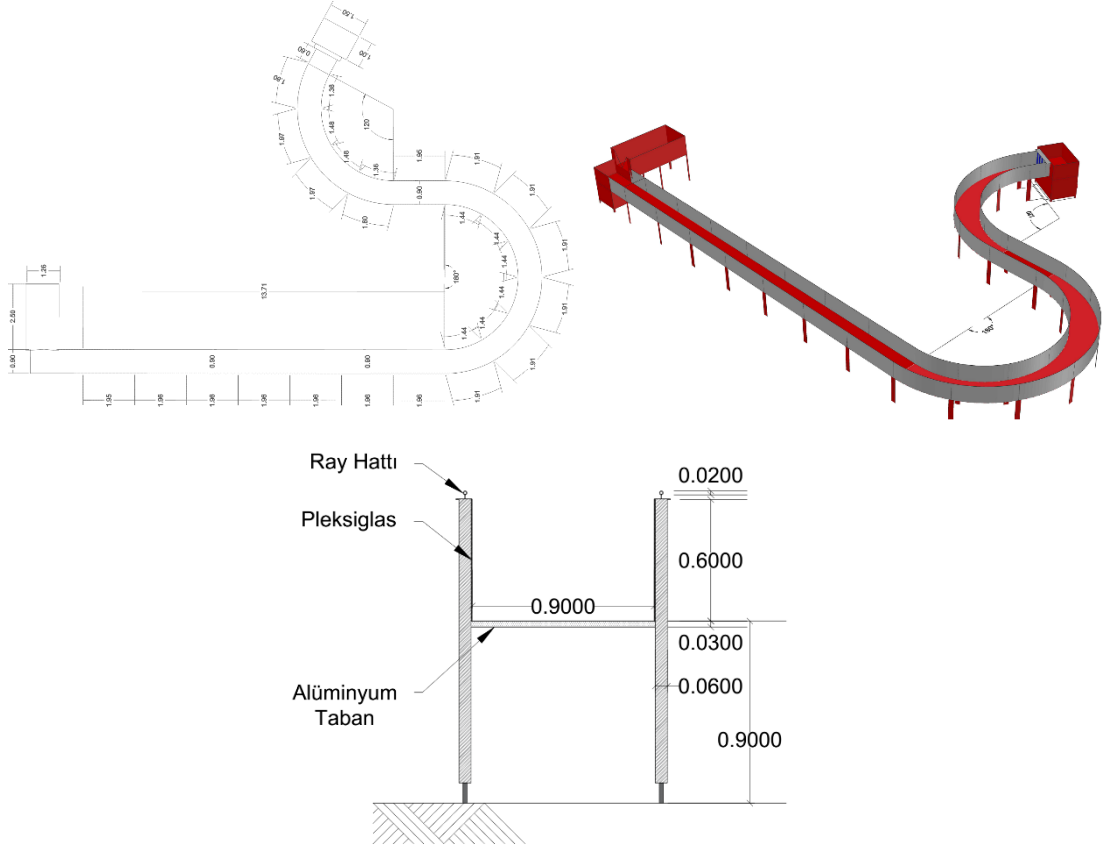
Bu çalışmanın amacı akarsu ağzından giren tsunami dalgalarının akarsuyun hidrolojik koşullarından ve geometrisinden nasıl etkilenerek ilerlediğinin belirlenmesidir. Böylece akarsularda ilerleyen tsunami dalgalarının hidrodinamik parametreleri (kat ettiği mesafe, dalga hızı, yüksekliği/su seviyesi değişimleri gibi) deneysel olarak belirlenecektir. Bu doğrultuda bu amaçları karşılayacak en uygun deney sisteminin nasıl seçildiği ve kurulduğu anlatılmıştır.

### **Yöntem**

Menderesler yaparak mansaba ulaşan bir akarsu boyunca ilerleyen tsunami dalgasının akarsu kanalı boyunca hidrodinamik koşullarında meydana gelecek değişimi incelenecektir. Literatür incelemelerine göre bu konuda yeterli sayıda deneysel çalışma olmadığı gözlenmiştir. Çalışmada Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarında kurulu bulunan 13.7 m uzunluğunda doğrusal kanalın ardından 180° ve 120°'lik kıvrımlı kesitlerden oluşan 0.90 m genişliğinde 0.60 m yüksekliğindeki alüminyum tabanlı yan duvarları pleksiglasdan imal edilmiş kanal kullanılacaktır (Şekil 1). Tsunami dalgasının oluşturulması amacıyla kanalın mansabına farklı tsunami dalgalarını oluşturacak bir tsunami üretici yerleştirilmiştir (Şekil 2).

Çalışma aşağıdaki deney koşullarında yapılacaktır;

1-Çalışmanın ilk aşamasında deprem büyüklüğüne bağlı olarak tsunami dalgasının büyüklüğü belirlenecektir. Oluşturulan senaryolara göre belirlenecek tsunami dalgası kanal boyutlarına bağlı olarak model ölçeği seçilecektir. Bu aşamada öncelikli olarak Güney Ege Denizi ve Marmara Denizi fay karakteristikleri dikkate alınacaktır. Farklı fay zonları için seçilecek farklı deprem moment büyüklüklerine göre ve fayların bulunduğu bölgelerdeki jeolojik yapılar dikkate alınarak fay hareketleri tanımlanacaktır. Seçilecek farklı yineleme dönemine (72 yıl, 475 yıl ve 2475 yıl) sahip depremlerden moment büyüklükleri ve bunlara bağlı tsunami dalga yükseklikleri belirlenecektir [12].



Şekil 1 - Mevcut kıvrımlı kanalın görünümü

2-Akarsuyun kurak hava koşullarını temsilen, kurak hava koşullarında kanal boyunca tsunami dalgasının ilerlemesi. Bu durum Bodrum-Kos ve İzmir depremleri ile oluşan tsunamilerin bu bölgelerdeki derelerde kurak hava koşullarındaki ilerlemesinin benzeridir. Bu koşullarda kanalda su derinliği;

i)  $h=10$  cm

ii)  $h=20$  cm

olarak dikkate alınacaktır. Ancak kanalda akış oluşturulmayacak ve statik halde doğrusal ve kıvrımlı (menderesli) kanal boyunca tsunami dalgasının ilerlemesi modellenecektir.

3-Akarsuyun yağışlı hava koşullarını temsil eden kanal akışına sahip olması halinde, mansaptan giren tsunami dalgasının doğrusal ve kıvrımlı kanal kısımlarında nasıl değiştiği deneysel olarak belirlenecektir. Bu aşamada akarsuyun farklı hidrodinamik koşullarının farklı tsunami dalgalarıyla nasıl etkileştiği detaylı olarak gözlemlenecektir.

i) 10 cm derinlikte kararlı akım koşulunda

ii) 20 cm derinlikte kararlı akım koşulunda

doğrusal ve kıvrımlı (menderesli) kanal boyunca ilerleyen tsunami dalgasının değişimi yine laboratuvarında mevcut dalga problemleri yardımıyla ölçülebilecektir.



## Deney Sistemi

Literatürde uzun dalgaların fiziksel olarak modellenmesiyle ilgili birçok kaynak bulunmaktadır. Üretim kaynağına göre (Heyalan, deprem, meteor ve volkanik patlamalar gibi) bu dalga türleri laboratuvar ölçeğinde farklı şekillerde üretilebilmektedir [13]. Fiziksel modellemede uzunluk ve zaman ölçeği seçimi oldukça önemlidir. Tsunamilerin küresel etkileri sebebiyle de bu seçim o kadar kolay olmamaktadır.

[14], [15] ve [16] çalışmalarında detaylı olarak fiziksel uzun dalga modellemesini derlemişlerdir. Uzun dalga üretimi üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar ana başlıklar altında aşağıdaki gibi verilebilmektedir [17];

- Piston tipi dalga üretimi
- Baraj yıkılması analogisi
- Düşeyde hareket eden dalga pedalı ile dalga üretimi
- Hacime dayalı dalga üretimi

Bu yaklaşımlara ek olarak heyelan sebepli uzun dalga üretim teknikleri de mevcuttur.

Piston tipi dalga üreteçleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Dolayısıyla kullanımları ve limitleri üzerinde oldukça fazla tecrübe ve birikim mevcuttur. Üretebilecekleri dalga karakteristikleri derinlik ve piston hareket aralığı ile sınırlı olmaktadır. Gerçek tsunami dalgasının üretilebilmesi sırasında yaşanan zorluk ise bu dalgaların ekstrem boyutlarda dalga uzunluğuna sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (~500 km). Hiç bir geleneksel dalga pedalı bu dalga boyunu üretecek hareket aralığına sahip değildir [18]. [19] çalışmasında 1/100 ölçeğinde piston tipi dalga üretici ile başarılı sayılacak uzun dalga üretilmiş fakat dalga çukurlarının üretimi tepeleri kadar iyi gerçekleşmemiştir. Bu sebeple dalga çukurlarının stabil olamayabileceğini belirtmişlerdir. Bu sebeple piston tipi dalga üreteçlerinin tsunami dalgasından daha çok soliter dalga üretebildiğini söylemek mümkündür. [20] ve [21] çalışmalarında “soliter dalga paradigma”nın artık tsunami dalga yaklaşımında benzersiz şekilde uygulanamayacağını ve tsunami dalgasının laboratuvar ortamında ölçeklendirilmesi istenildiğinde jeofiziksel ölçeklerle uyumsuzluk gösterdiğini belirtmişlerdir. Soliter dalga uygulandığında zamansal ve uzamsal boyutta hatalar meydana gelmekte ve bu etki dalga kıyı ile etkileşim halinde ise daha da büyük oranlarda oluşmaktadır. Bu sebeple laboratuvar çalışmalarında daha uzun periyotlu veya uzun dalga boyuna sahip bir dalga formu gerekmektedir [17].

Öte yandan baraj yıkılması analogisi yaparak oluşturulan dalga üretimi sinüzoidal formda dalga üretmektedir ve sadece bu bağlamda pozitif (dalga tepesi yaklaşımı) dalga üretilebilmektedir. Buna ek olarak dalga limitli olarak kontrol edilebilmektedir çünkü dalga yayılması sadece ağırlık kuvveti tarafından kontrol edilmektedir.

Düşeyde hareket eden dalga pedalı ile dalga üretimi ise genellikle tektonik kaynaklı tsunami dalgasının kaynak bölgesinde daha çok uygulanmaktadır. Aynı zamanda düşey kütle hareketinin olduğu bölgede vorteksler, türbülans ve yönsüz akılar oluşabilmektedir.

Tsunami dalgası üretimi yaklaşımında hacim odaklı dalga üretim tekniğinin ilk aşamaları [22] ve [23] tarafından rapor edilmiştir. Pnömatik dalga üretici gelişmeye başladığı aşamalarda başarılı ve farklı amaç ve ölçekler için çok yönlü bir ekipman olarak adlandırılmıştır. İlk olarak gel-git dalgası üretimi için kullanılmıştır [24]. 2008 yılında HR Wallingford tarafından (London’s Global University (UCL) desteğiyle) yeni bir pnömatik tsunami üretici geliştirilmiştir. [25], [26], [27], [28], [18], [29] ve [19] çalışmalarında yeni dalga üreticinin çalışma prensiplerini ve kalibrasyon ve doğrulama testlerini açıklamışlardır. Yeni tsunami üreticinin soliter, N-dalga ve 2004 Hint Okyanusu tsunamisinin (Mercator trace) kısa simülasyonunu büyük dalga uzunlukları ile yeniden üretmişlerdir. Bu cihaz ilk defa ekstrem uzunluktaki tsunami dalgalarının (hem tepe hem çukur gelişli) stabil benzeşimini gerçekleştirmiştir.



Şekil 2 - Tsunami Üretici



Şekil 3 - Tsunami Dalgasının Kıvrımlı Kanalda İlerlemesi

Bu bilgiler ışığında, YTÜ Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarında pnömatik tipte tsunami üretici kurulmuştur (Şekil 2). Üreticinin çalışma prensibi şu şekildedir:

Ters çevrilmiş bir tank uzun bir kanalın sonunda, suya batmış ağzı kanal çıkışına dönük olacak şekilde konumlandırılmaktadır. Vakum pompası vasıtasıyla tankın üstündeki havayı çekerek aynı zamanda kanaldaki suyun da tsunami üreticisine çekilmesini sağlamaktadır. Çekilen su daha sonra kontrollü bir şekilde dalga üretecek şekilde salınmaktadır. Tankın üstünde yer alan dört farklı çapa sahip hava vanaları vasıtasıyla bilgisayar üzerinden kontrol edilerek istenilen dalga şekli üretilebilmektedir. Deney sisteminin kurulmasının ardından “Yöntem” kısmında anlatılan deneysel çalışmalar gerçekleştirilecektir. Şekil 3’te ön deneylerde elde edilen tsunami dalgasının kıvrımlı kanal boyunca ilerlemesi görülmektedir.

## **SONUÇLAR**

Pnömatik tsunami üreticisi ile farklı büyüklüklere sahip tsunami dalgası deney kanalında oluşturulan farklı (yağışlı ve kurak) hava hidrolojik koşullarında çalışabilmektedir. Kurak hava koşullarında bir akarsu havzasını benzeştirilmesi durumunda kanalda su akışı bulunmamaktadır. Bu durumda istenilen tsunami dalgası için senkronize çalışan bir yedek depodan su çekebilmektedir. İkinci koşul akarsu yatağında suyun statik halde bulunması temsil edilebilmektedir. Üçüncü koşulda ise kanalda farklı derinlik ve hızlarda akışın olması durumunda kanal ağzından giren tsunami dalgaları modellenerek üretilebilmektedir. Kurulan deney sisteminde yapılan ön testlerden her üç koşulunda gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Tsunami dalgasının farklı hidrolojik koşullarda kırılmadan ya da kırılarak ilerlediği gözlemlenebilmektedir. Böylece tsunami dalgasını bir kanal boyunca ilerlemesi sırasında değişimi modellenerek belirlenebilecektir. Bu çalışmanın sonuçları yardımıyla geliştirilecek sayısal modellerin doğrulaması sağlanabilecektir. Doğrulanmış modeller yardımıyla gerçek havza modelleri de kurulabilecektir.

Kıvrımlı ve doğrusal kısımları içeren yapıda planlanan kanal bu yapısıyla kıvrımlarda ilerleyen tsunami dalgasına etkiyen merkezkaç kuvveti ile çarpılan dalga profili ölçülebilmekte ve taşmalara neden olan parametreler belirlenebilmektedir.

## **Kaynaklar**

1. Spence, R., Palmer, J., and Potangaroa, R., “Eyewitness Reports of the 2004 Indian Ocean Tsunami from Sri Lanka, Thailand and Indonesia”. In R. Spence, J. Palmer, & R. Potangaroa, *The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited*, Springer Netherlands, 2009 pp 473-495.
2. Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., and Yanagisawa, H., “Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up”. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, 7, 2011.
3. USGS. (2013a, January 28). Magnitude 9.1 - Off The West Coast Of Northern Sumatra. Retrieved February 11, 2013, from USGS Earthquake Hazards Program: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/us2004slav.php>.
4. USGS. (2013b, February 6). Magnitude 9.0 - Near The East Coast Of Honshu, Japan. Retrieved February 12, 2013, from USGS Earthquake Hazards Program: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/#summary>.
5. Yasuda, H., Watanabe, Y., and Fujima, K., 2004. “Report on river propagation of tsunami generated by the Tokachi-oki Earthquake on 26 September, 2003,” *J. Hydraulics, Coastal and Environment Engineering, JSCE*, -Vol. 768/II, 2003, pp 209-218 (in Japanese with English abstract)

6. Tanaka, H., Ishino, K., Nawarathna, B., Nakagawa, H., Yano, S., Yasuda, H., Watanabe, Y. and Hasegawa, K., "Field investigation of disaster in Sri Lankan rivers caused by the 2004 Indian Ocean Tsunami," *Journal Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 26(1), 2008, pp 91–112.
7. Yüksel, Y., Yalçiner, A.C., Ersoy, Ş., Şahin, C., Güler, I., Öztürk, M., Çelikoğlu, Y., Güner, A. A., Aykut, O., Doğan, G. G., İşlek, F., Sarı, Ş., , "Türkiye Acil Afet İzleme Projesi", TÜBİTAK MAM, 2020, Proje No: 5200101.
8. Doğan, G., Yalçiner, A.C., Yüksel, Y., Polat, O., Güler, I., Ulutaş, E., Sahin, C., Ozbahceci, B., Necmioğlu, Ö., Kanoğlu, U., Kalligeris, N., Charalampakis, M., Skanavis, V., Melis, N., Synolakis, C., "Tsunami Effects and Performance of Port Structures," Chapter 2 Editors; Çetin, Ö., Mynolakis, G., Sextos, A., Stewart, J.A., 2020, ETAM, TDV, EERI, GEER.
9. Tsuji, Y., Yanuma, T., Murata, I., and Fujiwara C., "Tsunami ascending in rivers as an undular bore," *Natural Hazards*, Vol. 4, 1991, pp 257–266.
10. Yasuda, H., "One-dimensional study on propagation of tsunami wave in river channels," *J. Hyd. Engrg.*, Vol. 136(2), 2010, pp 93–105.
11. Tolkova, E., Tanaka, H., and Roh, M., "Tsunami Observations in Rivers from a Perspective of Tsunami Interaction with Tide and Riverine Flow," *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, 2015, pp 953–968.
12. Abe, K., "A new scale of tsunami magnitude, Mt in tsunamis-their science and Engineering," Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.
13. Hughes, S.A., "Physical models and laboratory techniques in coastal engineering," *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 7, World Scientific, Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, November 1993.
14. Liu, P.L.-F., Synolakis, C.E., and Yeh, H.H., "Report on the international workshop on long-wave run-up," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 229, pp 675–688.
15. Yeh, H., Liu, P.L.F., and Synolakis, C., "Long-wave Runup Models," World Scientific, Singapore, River Edge, New York, 1995.
16. Liu, P.L.-F., "Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup," *Advances In Coastal And Ocean Engineering*, Vol. 10, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., September 2008
17. Goseberg, N., Wurpts, A. and Schlurmann, T., "Laboratory-scale generation of tsunami and long waves," *Coastal Engineering*, Vol. 79, pp 57-74.
18. Allsop, W., Chandler, I., and Zaccaria, M., "Improvements in the Physical Modelling of Tsunamis and their Effects," *Proceeding of the 5th International Conference on Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, Coastlab14, Varna, Bulgaria, 29 Sept – 2nd Oct 2014.
19. Schimmels, S., Sriram, V., Didenkulova, I., and Fernandez, H., "On the generation of tsunami in a large scale wave flume," *Coastal Engineering Proceedings*, Vol. 1 (34), 2014.
20. Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., Schäffer, H.A., "On the solitary wave paradigm for tsunamis," *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, Vol. 113 (12), pp 1–22.
21. Madsen, P.A., Fuhrman, D.R., and Schäffer, H.A., "A critical discussion of the solitary wave paradigm for tsunamis," In: Smith, J.M. (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Coastal engineering*, Vol. 2. World Scientific, pp 1262–1274.

22. Reynolds, O., “On certain laws relating to the regime of rivers and estuaries, and on the possibility of experiments on a small scale,” British Association Report, United Kingdom, 1887.
23. Wilkie, M.J., and Young, G.A.J., “Pneumatic tide generator,” *The Engineer*, Vol. 11, 1992, pp 133.
24. Allen, R., Davies, T., and Horn, C., “The design of a control system for small hydraulic models,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 3, 1992, pp 1098–1102.
25. Allsop, W., Robinson, D, Charvet I, Rossetto, T. and Abernethy, R, “A unique tsunami generator for physical modelling of violent flows and their impact,” Proc. 14th World Conference on Earthquake Engineering, October, Beijing, 2008
26. Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I. and Robinson, D., “Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator,” *Coastal Engineering*, Vol. 58(6), 2011, pp 517-527.
27. Robinson, D., “Development of the HRW Tsunami Generator: Conceptual design and preparatory modelling studies (IT585)”, HR Wallingford, 2009.
28. Charvet I., “Experimental modelling of long elevated and depressed waves using a new pneumatic wave generator,” PhD thesis, University College London, 2011.
29. Allsop, W., Chandler, I., and Zaccaria, M., “Improving the generation of tsunami waves in physical modelling,” HR Wallingford report DDS0336-RT001, HR Wallingford for HYDRALAB IV, 2014.



# Kılavuz Kazıklarla Sabitlenen T-Tipi Bir Yüzer İskelenin Dalga Yükü Etkisi Altındaki Tepkilerinin Nümerik Analiz Yöntemleri ile İncelenmesi

Murat AKSEL<sup>1</sup>, Mehmet Yusuf ERBİŞİM<sup>2</sup>, Fatih Buğrahan YORĞUN<sup>3</sup>, Şevket ÇOKGÖR<sup>4</sup>, Oral YAĞCI<sup>5</sup>

## ÖZET

*Su seviyesi değişimlerine uyumları, imalat kolaylıkları, mobiliteleri ve estetik beklentileri karşılayabilmeleri sebebiyle yüzer tipteki iskelelere olan talep ülkemizde artmaktadır. Yüzer iskeleler hizmet konumunda tutulabilmesi için ya tonoz zincir sistemi ile ya da bir kılavuz kazık yardımıyla bağlanmaktadır. Kılavuz kazık, zemin ve yüzer yapının çevresel koşullar altındaki ilişkisi son derece karmaşık bir etkileşim problemidir. Bu karmaşık hesaplama sürecinde sayısal modelleme yönteminin kullanılması problemin tüm detaylarının araştırılabilmesine ve imalat sonrasında olası hasarların önceden öngörülerek hasar riskinin azaltılmasına imkan sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, bir kıyı bölgesinde kılavuz kazıklı bağlama sistemi ile tutturulmuş yüzer betonarme iskele yapısının dalga ve rüzgar yükleri altında hareketinin ve bu hareket sonucunda kazık ve yapı üzerinde meydana gelen kuvvetler sunulmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Yüzer iskele, dalga, rüzgar, nümerik modelleme.

## ABSTRACT

### **Investigation of the Reactions of a T-Type Floating Pier Fixed with Guide Piles Under the Impact of Wave Load by Numerical Analysis Methods**

*Due to its capacity to respond to changes in water levels, ease of production, mobility, and ability to fulfill aesthetic standards, floating type piers are getting more applicable in our country. In order to keep the floating docks in service position, they are either connected to the vault with a chain system or with the help of a guide stake. The relationship of the guide pile, soil and floating structure under environmental conditions is an extremely complex interaction problem. The use of numerical modeling method in this complex calculation process allows to investigate all the*

---

1 Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya - murat.aksel@alanya.edu.tr

2 HEC Engineering, İstanbul - mehmet@hec-engineering.com

3 HEC Engineering, İstanbul - fatih@hec-engineering.com

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - cokgor@itu.edu.tr

5 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - yagciora@itu.edu.tr

*details of the problem and to reduce the risk of damage by predicting possible damages after manufacturing. Within the scope of this study, the movement of the floating reinforced concrete pier structure attached with the guide pile mooring system in a coastal region under wave and wind loads and the forces on the pile and structure as a result of this movement are presented.*

**Keywords:** *Floating dock, wave, wind, numerical modeling.*

## **GİRİŞ**

### **Yüzer İskeleler ve Kullanım Alanları**

İskeleler, tekne, bot, gemi gibi deniz taşıtlarının yanaştığı tahtadan, betondan veya çelikten imal edilen su yüzeyinin üzerinde kalan deniz yapılarıdır. İskeleler kazıklı, kılavuz kazıklı veya zincirle tonozlara bağlanarak imal edilebilir. Yüzer iskelelerde kılavuz kazıklı sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüzer iskeleler aldıkları yükler ve bulunduğu koşullar itibari ile dinamik bir etki altındadır. Yüzer iskeleler, belirli işletme prosedürleri altında sürekli değişen özellikler için hidrodinamik ve mekanik etkileşimlerin karmaşık olduğu çok gövdeli sistemleri içerir. Yüzer iskelelerin yapısal sistemi kılavuz kazıklar tarafından yanall olarak sabit tutulan duba (ponton) adı verilen bir veya birkaç yüzer gövdeden oluşur

Dubalar genellikle çelik veya içi EPS köpük dolgululu betonarme malzemeden yapılan ve rijit bir yapı oluşturmak için kiriş ve takviyeler ile güçlendirilmiş dikdörtgen prizma formunda yapılarıdır. Dubalardan oluşan iskele grubu su üzerinde maruz kalabilecekleri dalga, rüzgar yükleri ve değişen su seviyelerine tepki verebilmesi için esnek bir yapıya sahip olacak şekilde imal edilirler. Esnek tepki gösterebilmesi için iki duba arasında öteleme veya dönme serbestlik derecelerini kısıtlayan ve enine şekilde etrafında dönmeye imkan sağlayan menteşeler veya konnektörler bulunmaktadır. Dubalar ve kazıklar arasındaki bağlantılar dubaya sabitlenmiş ve yanlarında ufak tekerlek bulunan kılavuz çerçeve ile sağlanır. Kılavuz çerçeveler, dubaların su seviyesi değişimi ve dalgaların etkisi ile oluşan dikey hareketini kazıkların sabitlendiği ekseninde gerçekleştirir. Bu yapıların çevresel koşullar altındaki davranışı son derece kompleksdir. Bu yapıların çevresel koşullar altındaki davranışlarını ve çevresel koşulların yapıları etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur.

Lee, H. H. (v.d.) 2007 yılında kazık kolonları ile dikdörtgen geçirimsiz dubadan oluşan iki boyutlu yüzer bir iskele ve bu iskeleye etkiyen dalgaları incelenmiştir [1]. Bir başka çalışmada gemi yanaşması sırasında yüzer iskelelerin davranışını değerlendirmek için bir dizi farklı analiz yapılmıştır [2]. 2021 yılında farklı konfigürasyonlara sahip bir dizi geçirimli ve geçirimsiz dalgakıranın, rijit yüzer bir iskele tarafından yerçekimi dalgalarının saçılması, doğrusal potansiyel akış teorisi çerçevesinde analizi yapılmıştır [3]. Başka çalışmada yüzer köprülerin dubaları rüzgar ve dalga yükünün dinamik hareketlerine verdiği tepkileri ve bu yüzer cisimlerin hidrodinamik etkileşimi nedeniyle dubalara etkiyen kuvvetleri, seçilen bir duba üzerindeki dalga kuvvetleri ve akışkan ile diğer etkileşimlerinin küresel köprü dinamik tepkileri üzerindeki etkisi incelenmiştir [4]. 2022 yılında dikdörtgen bir hendek üzerinde yüzen bir rıhtım tarafından su dalgalarının saçılması ve radyasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır [5]. Li, v.d. (2021) eğimli bir kumsalda, kazık etrafında dalga kaynaklı oyulmanın üç boyutlu (3B) sayısal simülasyonu açık kaynak kodlu bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programı olan OpenFOAM'da modellemiştir [6]. Bir başka çalışmada WEC (dalga enerjisi cihazları) ağında her bir alt yapı arasındaki mekanik etkileşimin yanı sıra dalga-yapı etkileşimi ile de başa çıkabilen tam eşleştirilmiş bir sayısal modelleme aracı geliştirilmeye çalışılmıştır [7]. Yine dalga enerjisinin kullanılması ve hidroelastik tepkinin azaltılması için duba tipi çok büyük yüzer yapıların açık deniz tarafına (dalga geliş yönüne) iki modlu dalga enerjisi dönüştürücü tipi bir bağlantı konumlandırarak bu alanda çalışmalar gerçekleştirilmiştir [8]. 2014 yılında yapılmış bir çalışmada yüzer dalgakıranın yapısal tepkisini (bağlantı elemanlarının iç kuvvetleri ve bağlama halatlarının gerilimleri) araştırmak ve



değerlendirmek için 3B deneyler uygulanmıştır [9]. Yine 2017 yılında yazılmış bir makalede esnek bir şekilde bağlanmış, zincirlerle demirlenmiş modüllerden oluşan duba tipi modüler bir yüzer dalgakıranın hidroelastik ve yapısal tepkisinin birleşik araştırılmasını amaçlayan 3 boyutlu deneyler yapılmıştır [10]. 2011 yılında yapılan bir çalışmada dalgalarla etkileşime giren birden fazla bağımsız blok içeren yüzer iskelenin hidrodinamik analizi gerçekleştirilmiştir [11]. Başka bir çalışmada bağlama kazıkları etrafında yerel oyulma ile açık deniz yapılarının stabilitesi zayıflayabileceği ve bu tür yapıların tasarımı için oyulma sürecinin ve karakteristik oyulma konisinin daha hassas hesaplanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda sabit akım koşulu ve düzenli dalga koşulu olmak üzere iki farklı sınır koşulu için bir iskele etrafındaki oyulma ve birikme modelini hesaplamak için üç boyutlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli kullanılmıştır [12]. Baykal, v.d. (2015) akıntıya maruz kalan dikey bir silindir etrafındaki akım ve oyulma, sıkıştırılamaz akışkan kabulüyle Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerine dayanan üç boyutlu bir sayısal model kullanılarak incelenmiştir [13]. 2014 yılında yapılmış bir çalışmada zincirlerle bağlanmış yüzer yapının gelen dalgalara tepkisinin birleşik sayısal/teorik araştırması dinamik dalga tepkisi, düzenli ve düzensiz dalgalarda sayısal simülasyonlarla araştırılmıştır [14]. Benzer bir çalışma 2011'de menteşelerle ve kablo tipi zincirler ile bağlanmış bir yüzer dalgakıranın genel performansı, frekans alanındaki monokromatik doğrusal dalgaların etkisi altında incelenmiştir [15]. 1995 yılında yapılmış bir çalışmada dalgaların serbestçe yüzen uzun yapılarla etkileşiminden kaynaklanan kırınım/radyasyon sınır değeri problemi, sonlu elemanlar tekniği kullanılarak incelenmiştir [16]. Bir başka çalışmada yarı-batık ve hibrit tip çok büyük yüzer yapıların hidroelastik analizini ve deneysel doğrulaması yapılmıştır [17]. 2015'te yazılmış bir konferans bildirisinde ponton tipi yüzer yapının performansı 3 boyutlu sayısal modellemesi ve deneysel araştırması yapılmıştır [18]. Bir başka çalışmada esnek ve rijit bağlantı elemanlar ile birbirine bağlanan birkaç dubadan oluşan yüzer bir iskelenin hareketlerini analiz etmek için bir prosedür geliştirilmiştir [19]. Son olarak 2015'te yapılmış bir çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz programı olan Abaqus paket yazılımı kullanılarak geminin yüzer iskeleler üzerindeki etkisine ilişkin bir araştırma yapılmıştır [20].

## **AMAÇ**

### **Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Zemin, kılavuz kazık, kılavuz çerçeve ve dubaların çevresel koşullar ile ilişkisi hem teorik hem pratik mühendislik bilgisi gerektirir. Fiziğin temel kanunlarının geçerli olduğu, mekaniğin bir at konu başlığı olan akışkanlar mekaniğinde, deneysel çalışma ve teorik yaklaşımların birlikte kullanılır. Teorik yaklaşımlar bazı durumlarda gerçeğe uygun sonuçlar vermeyebilir. Bunun nedeni, teorinin uygulanması esnasında yapılan kabullerin uygulamadaki olaylar için tam geçerli olmaması olabilir. Karmaşık bir geometri ve akışkanın viskozitesi, teorinin doğrudan uygulanmasına engel oluşturan en önemli etkenlerden ikisidir. Karmaşık hesaplama sürecinde sayısal modelleme yönteminin kullanılması problemin tüm detaylarının araştırılabilmesine ve imalat sonrasında olası hasarların önceden öngörülerek hasar riskinin azaltılmasına imkan sağlamaktadır. Hesaplama sürecinde nümerik modelleme yönteminin kullanılması problemin tüm detaylarının araştırılabilmesine ve imalat sonrasında olası hasarların önceden öngörülerek hasar riskinin azaltılmasına imkan sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında bir kıyı bölgesinde kılavuz kazıklı bağlama sistemi ile tutturulmuş yüzer betonarme iskele yapısının dalga ve rüzgar yükleri altında hareketinin ve bu hareket sonucunda yapı üzerinde meydana gelen deplasmanlar, tabanda oluşan kayma gerilmeleri ve zincirleme iplerinde oluşan gerilme kuvvetleri hesaplanmıştır

## YÖNTEM

### Modelleme ve Simülasyon Kurulumu

Bu çalışmada zemine rijit olarak sabitlenmiş kılavuz kazıklarla iki eksenle limitlenmiş yüzer tip T kesitli betonarme iskele sisteminin düzenli dalga sınır koşulu altında zamansal olarak 3B davranışı incelenmiştir.

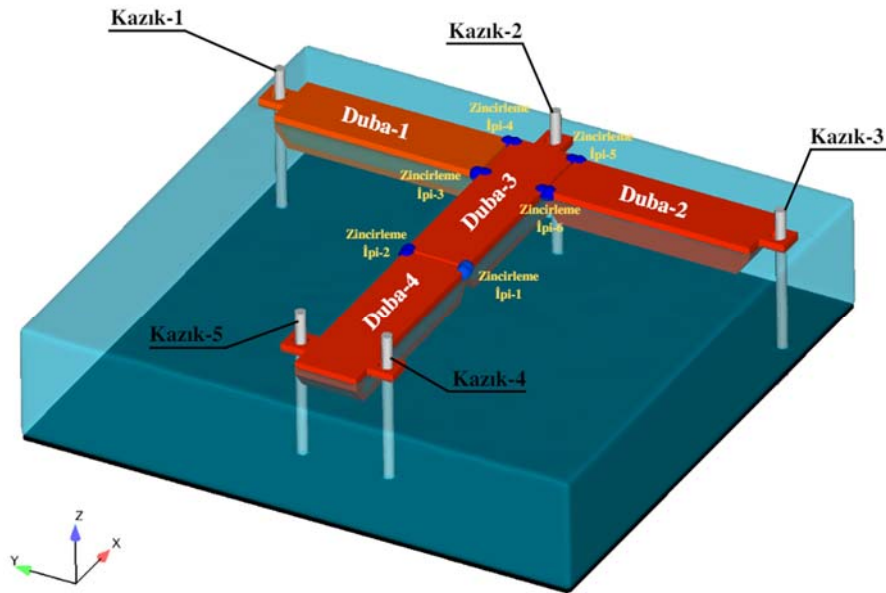
### Modelleme Programı ve Yapılan Çalışmalar

Dalga ilerlemesi ve yapı-dalga etkileşimi analizi Flow-3D çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Daha önce bu çalışma kapsamına benzer analizler için kullanılan Flow-3D paket programı ile yapılan çalışmalar aşağıda sunulmaktadır.

2016 yılında yapılmış bir çalışmada iki özdeş yüzen duba arasındaki akışkan rezonansı incelenmiştir [21]. Bir diğer çalışmada, gemi gövdelerinin etrafındaki serbest yüzey akışını modellemek için FLOW-3D'den yararlanılmıştır [22]. Başka bir çalışmada, FLOW-3D kullanılarak Hazar Denizi'nin çevre koşulları ile 0, 45 ve 90 derecelik dalgaya maruz kalan yarı-batık bir platformun dalgalanma ve sallanma hareketleri hesaplanmıştır [23].

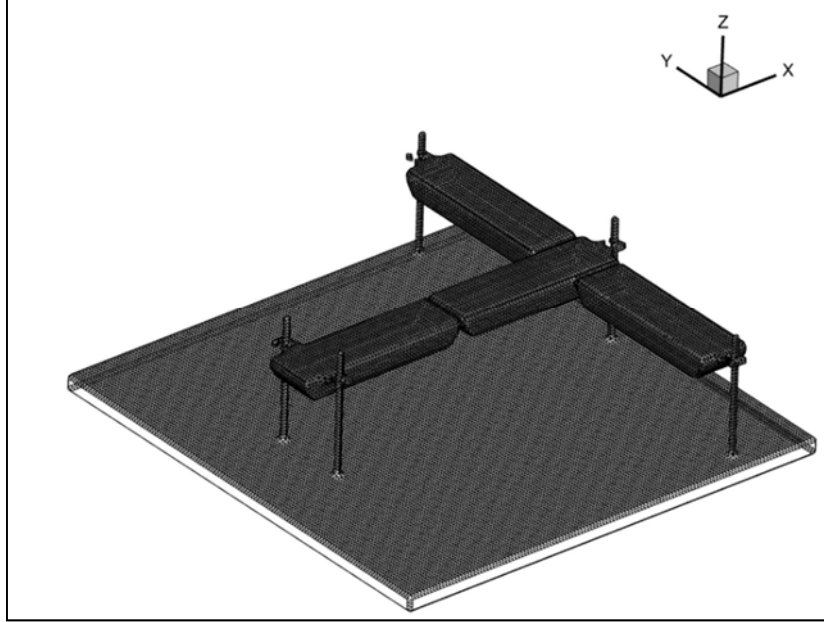
### Modelin Kurulumu ve Çözülmesi

Flow-3D modelleme yazılımında üç boyutlu hidrodinamik modelleme yöntemi kullanılarak yüzer yapıların dalga etkisi altındaki 3 boyutlu deplasmanları, ara bağlantı kablolarında meydana gelen gerilmeler, deniz tabanında ve özellikle kazıklar etrafında meydana gelen dalga kaynaklı taban kayma gerilmeleri hesaplanmıştır. Modelleme çalışmasında akım ortamının sürekli olduğu, taban eğiminin olmadığı (batimetrik koşullar ihmal edilmiştir), tabanın hareketsiz olduğu (sediment hareketinin ihmal edildiği) ve dalga koşulunun düzenli olduğu kabulleri yapılmıştır. Hareketli taban durumu için daha uzun süreli analiz yapılması ve başlangıç batimetrik durumunun belirli olması gerekmektedir. Bu çalışmada taban hareketi (oyulma/birikme) süreci yok sayılmış ancak sadece hareket başlangıcına neden olacak taban kayma gerilmesi dağılımı hesaplanmıştır.

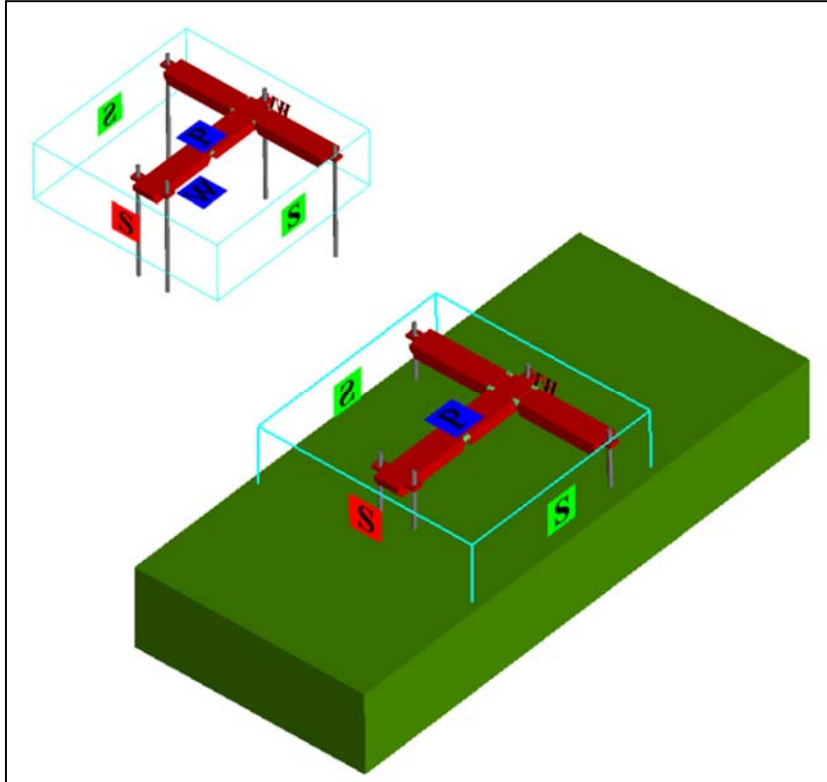


Şekil 1 - Model Elemanlarının 3 Boyutlu Şematik Gösterimi

Şekil 1’de model geometrisi, Şekil 2’de model ağ yapısı ve Şekil 3’te ise modelin sınır koşulları gösterilmektedir. Özellikleri sunulan model, 32 GB kurulu RAM kapasiteli, 20 çekirdekli, *Intel Xeon* İşlemcili iş bilgisayarında çözümlenmiştir. Çözüm süresi için limit değer belirlenmesinde model sonuçlarının kararlı hale ulaşması çözüm hacmindeki kinetik enerji değerinin sabitlenmesi (*mass-averaged mean kinetic energy*) beklenmiştir ve bu süre bu model koşulları için 300 sn’dir. Çözümleme süresi belirtilen bilgisayar ortamında gerçek zamanda yaklaşık 13 saat sürmüştür.

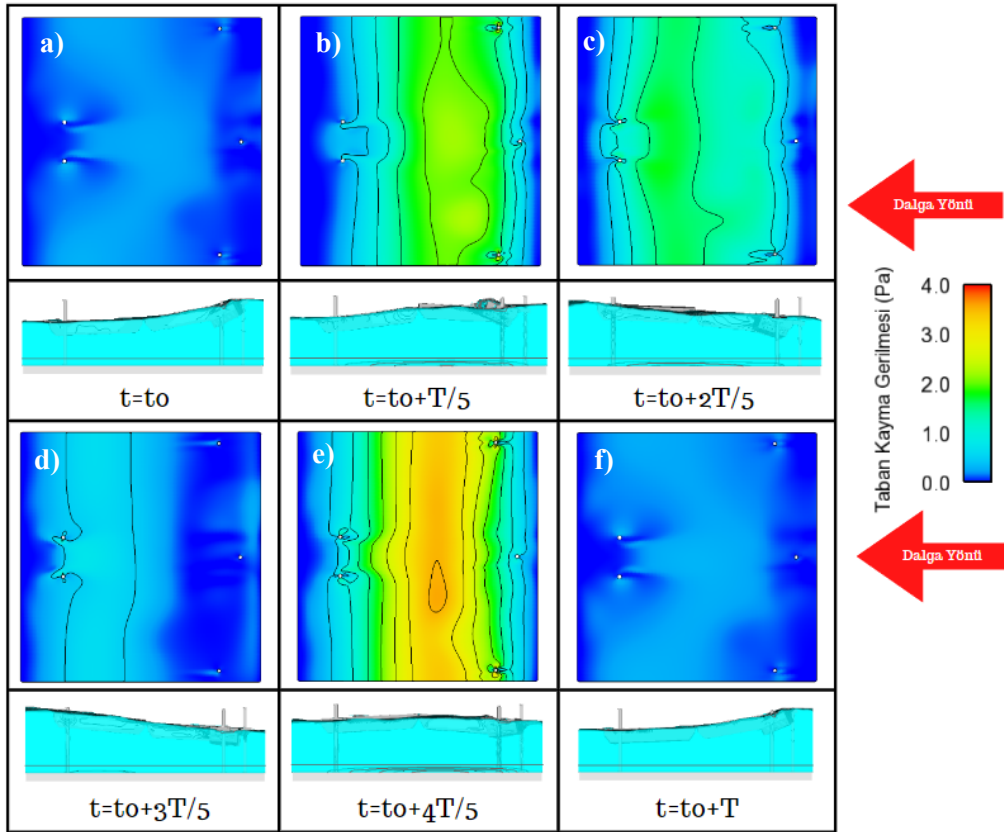


Şekil 2 - Modelin Ağ Yapısı



Şekil 3 - Modelin Sınır Koşulları

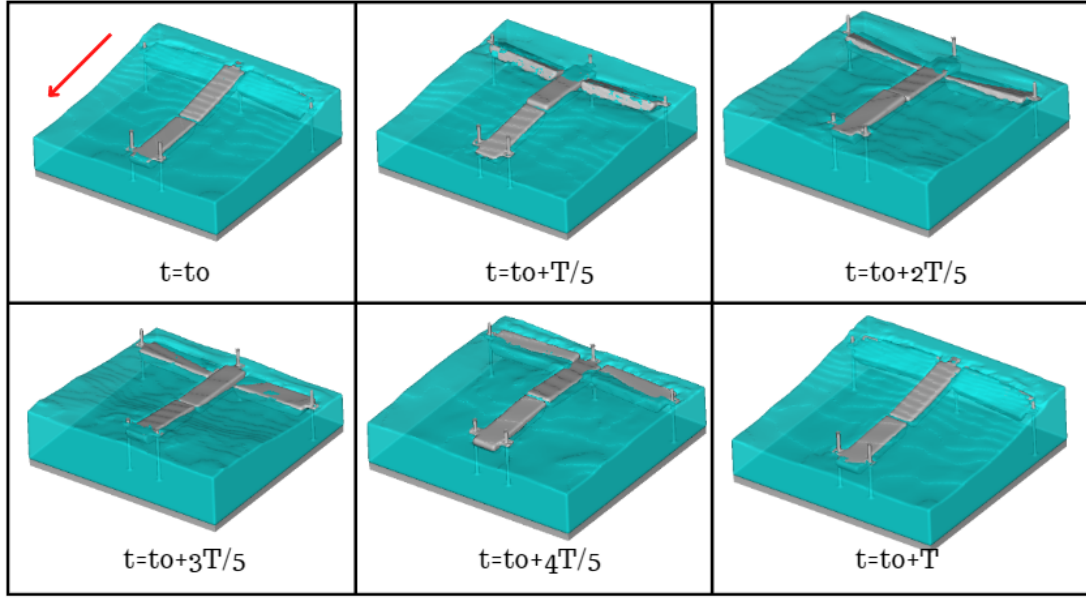
Şekil 3'te sunulan model çözüm hacminin genişliği 27 metre, uzunluğu 26 metre, yüksekliği 8.15 metredir. Modelde 3 metre genişlik ve 10 metre uzunlukta 4 adet duba T-plan formunda birbirlerine ikişer adet noktadan zincirleme ipi ile bağlanmıştır. Modelin ağ yapısı Şekil 2'de işaretlenmiştir. Model hücre boyutu 0,2 m olan 719.550 adet hücreden oluşmaktadır. Modelin sınır koşulları Şekil 3'te harflerle belirtilmiştir. Dalganın geldiği yön dalga sınır koşulu olarak tanımlanmıştır (W). Periyodu (T) 8s, dalga yüksekliği (H) 0.5m olan dalga tanımlanmıştır. Sağ, sol ve ön yüzeyler olan açık deniz koşulu sınırlar simetri (S) olarak tanımlanmıştır. Zeminin olduğu geçirimsiz taban kısmı duvar (W) olarak modellenmiştir. Hareketsiz taban kabulüyle sadece rijit sınır uygulanmıştır. Üst yüzey (P) ise atmosfere açık sınır olarak seçilmiş ve rölatif basınç durumu gözetilerek basınç değeri 0 Pa olarak modellenmiştir.



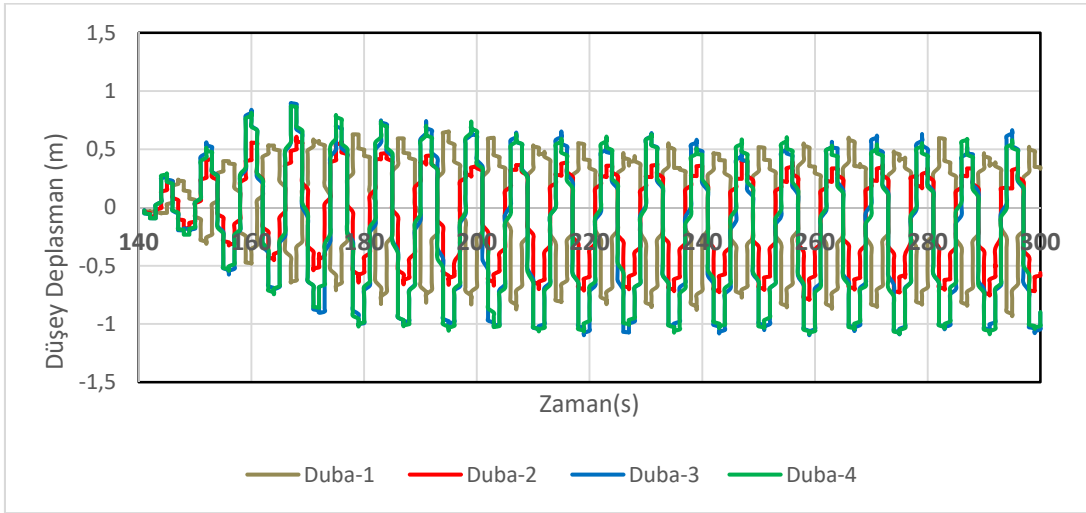
**Şekil 4 - Taban Kayma Gerilmeleri Dağılımı**

### **Simülasyon Sonuçları**

Şekil 4'te deniz tabanındaki taban kayma gerilmesinin dağılımı dalga periyoduna bağlı olarak tabandan ve boy kesitten görünüşü zamansal enstantanede sunulmuştur. Dalga geçişinde dalga periyodunun 1/5'lik zamanına eşdeğer anda (Şekil 4b) dalga geçiş süresinde en fazla taban kayma gerilmesi meydana geldiği hesaplanmıştır. Bir tam periyodun 3/5'li zaman diliminde (Şekil 4d) tabanda minimum kayma gerilmesi olduğu görülmektedir. Şekil 4'te bir dalga geçiş periyodu boyunca periyot 5 adıma bölünerek her bir adıma ait su yüzeyi değişimi ve yapıların tepkisi görülmektedir. Şekil 4a durumunda yapının dalga ilk geldiği andaki konumu verilmektedir, dalga ilerledikçe yapının da dalga doğrultusunda yükseldiği gözlemlenmektedir. Şekil 5'da yüzer iskelenin 3 Boyutlu görünümü periyoda bağlı değişen her bir dalga adımı için verilmektedir. Dubaların 140 saniye ile 300 saniye aralığındaki dalga etkisinde yaptıkları deplasmanlar Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmaktadır.

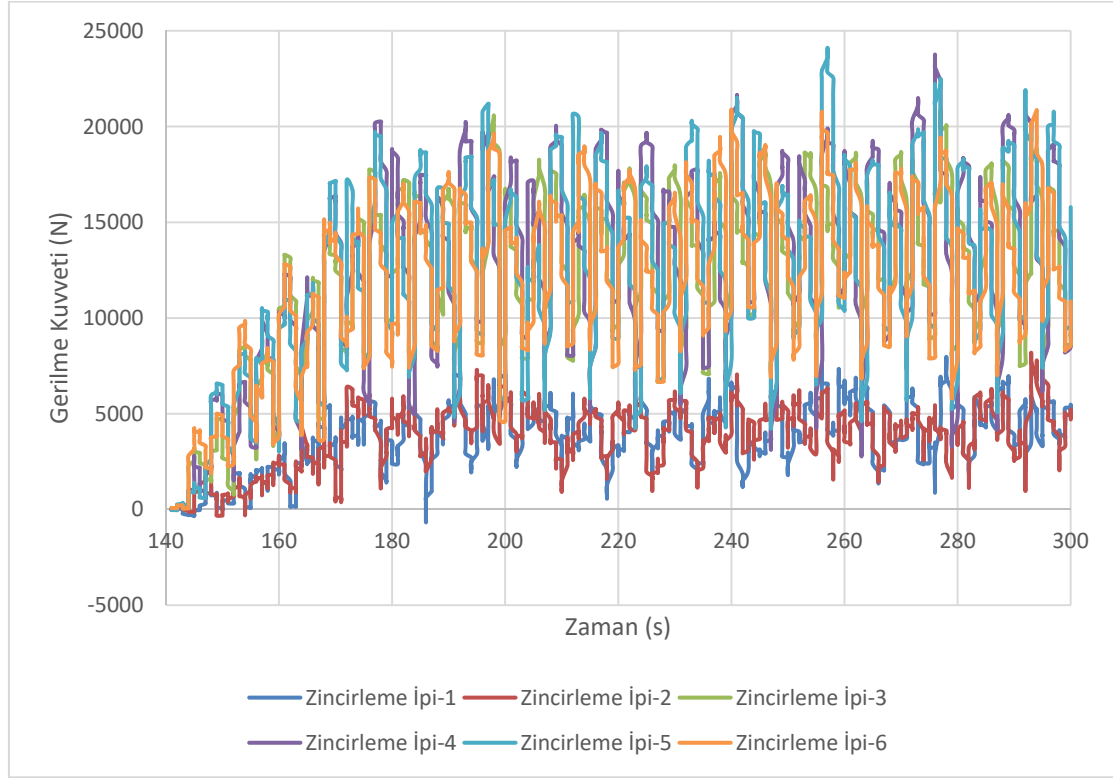


Şekil 5 - Dalganın Yönü ve Dalganın İlerleyişi (Şekildeki kırmızı ok dalganın yönünü temsil etmektedir.)

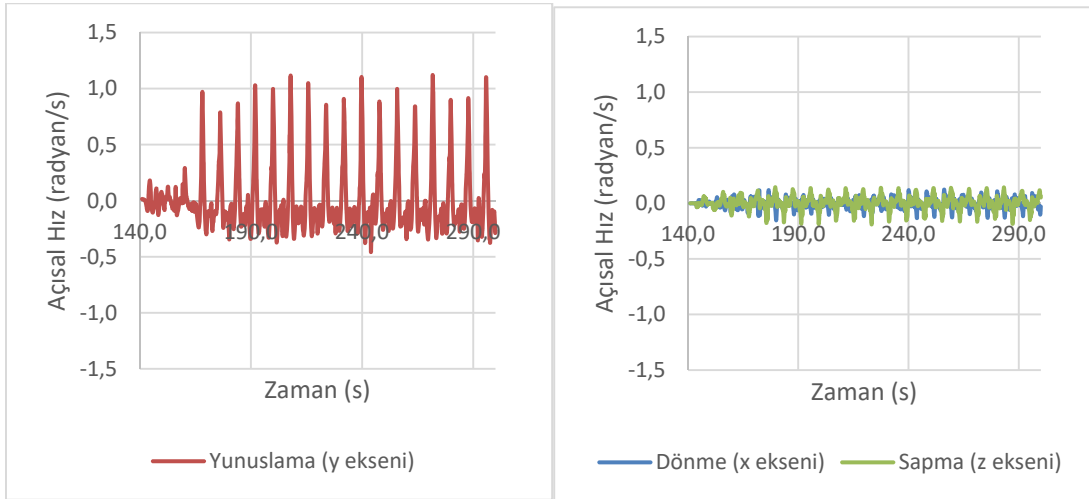


Şekil 6 - Dalganın etkisindeki dubaların düşey deplasmanları

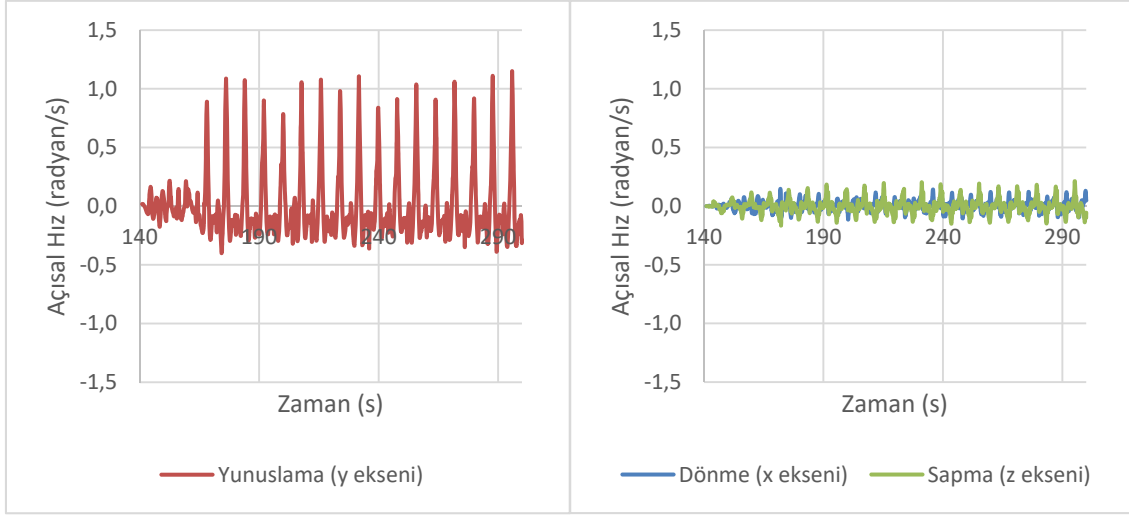
Şekil 7’de Duba-3 ve Duba-4’ün benzer düzen ile devam ettiği ve diğer dubalara göre daha fazla düşey ekseninde deplasman yaptıkları görülmektedir. Şekil 8’de tüm dubaların y ekseninde yaptığı deplasman düzeni birbirinden farklı olduğu gözlenmektedir. Şekil 9’da Duba-1 ve Duba-2’nin Duba-3 ve Duba-4’e kıyasla x ekseninde daha düşük bir deplasman yaptığı görülmektedir. Şekil 7’de Zincirleme iplerine gelen gerilme kuvvetleri kıyas grafiği verilmektedir. Burada 1 ve 2 numaralı zincirleme iplerine gelen gerilme kuvvetinin diğer zincirleme iplerine gelen gerilme kuvvetlerinden önemli ölçüde düşük olduğu hesaplanmıştır.



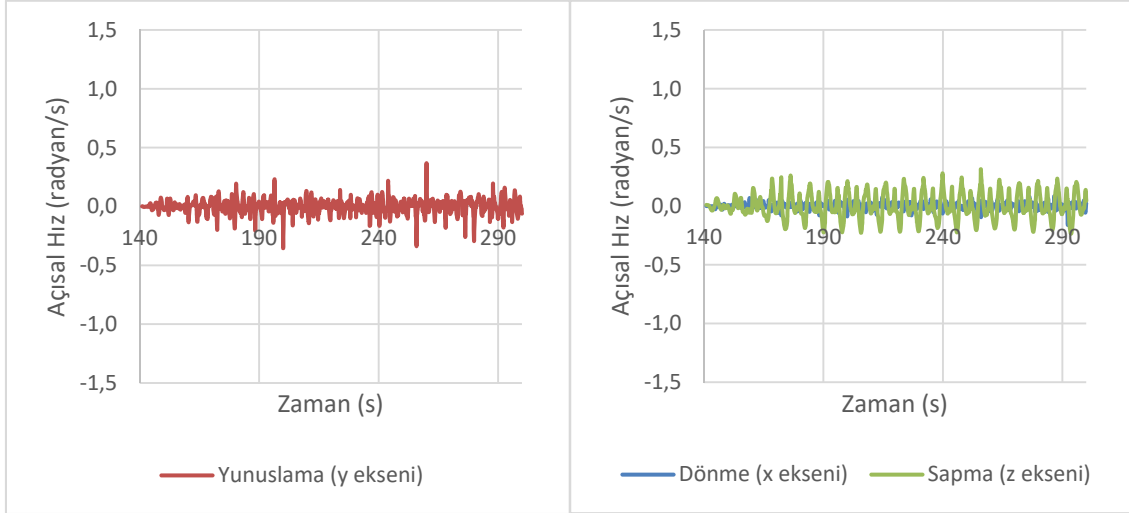
Şekil 7 - Zincirleme İplerine gelen gerilme kuvvetlerinin kıyas grafiği



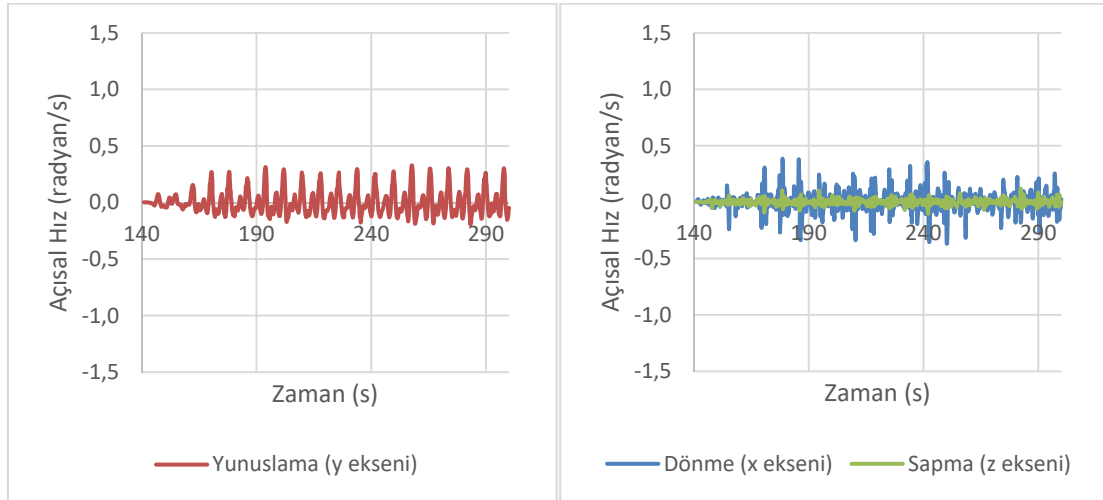
Şekil 8 - Duba-1'e ait yunuslama, dönme ve sapma değerleri



Şekil 9 - Duba-2'ye ait yunuslama, dönme ve sapma değerleri



Şekil 10 - Duba-3'e ait yunuslama, dönme ve sapma değerleri



Şekil 11 - Duba-4'e ait yunuslama, dönme ve sapma değerleri

## SONUÇ

Flow-3D paket yazılımı üç boyutlu hareketli bir objenin (pontonların) altı serbestlikte hareketini dalga etkisi altında modelleyebilmektedir. Yapılan modelleme çalışması sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmektedir.

- Bir dalga geçiş süresinin beş eşit ana ayrıştırılarak görselleştirilmiş Şekil 4'te görülebileceği üzere dalga tepesi geçişinde tabanda en yüksek değerde kayma gerilmesi hesaplanmıştır.
- Taban kayma gerilmesinin dalga tepesi geçişi sırasında kazık etrafında da dalga tepesinin geçiş noktasında aldığı değere yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 4).
- Düşey kılavuz kazıkları sayesinde dönme (roll) ve sapma (yaw) hareketleri limitli kalmaktadır (Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10). Bu değerler (dönme ve sapma) yunuslama eksenindeki açısal hız değerinin %10 kadardır.
- T formatındaki iskele yerleşimde dalgaya uzun kenarları dik gelecek şekilde konumlanmış 1 ve 2 numaralı pontonlar ile T geçişindeki dalga doğrultusu ile aynı yönde uzun kenarı konumlanmış 3 numaralı ponton arasındaki bağlantı elemanlarında diğer bağlantı elemanlarına göre 3 kat fazla gerilme hesaplanmıştır.
- Bağlantı elemanlarında yüksek gerilme kuvveti hesaplanan noktalar için önlem olarak bağlantı elemanının kesiti büyütülebilir ve/veya kullanılan malzeme daha yüksek mukavemete sahip elemanla değiştirilebilir
- Ayrıca model sonuçlarından da görülebileceği üzere kılavuz kazık sistemlerinde düşey yönlü deplasmanın ve yunuslama hareketinin limitlendirilmesi ve kullanım konforunun iyileştirilmesi adına mutlaka tonoz ile bağlantı da yapılması gereklidir.

## Kaynaklar

1. H. H. Lee, L. Y. Chen, W. K. Weng ve S. W. Shyue, «The prediction of the dynamic and structural motions of a floating-pier system in waves,» *Ocean engineering*, cilt 34, no. 7, pp. 1044-1059, 2007.
2. A. Mostofi ve K. Bargi, «New concept in analysis of floating piers for ship berthing impact,» *Marine structures*, cilt 25, no. 1, pp. 58-70, 2012.
3. K. G. Vijay, V. Venkateswarlu ve T. Sahoo, «Bragg scattering of surface gravity waves by an array of submerged breakwaters and a floating dock,» *Wave Motion*, no. 106, 2021.
4. A. Fenerci, K. A. Kvåle, X. Xiang ve O. Øiseth, « Hydrodynamic interaction of floating bridge pontoons and its effect on the bridge dynamic responses,» *Marine Structure*, cilt 83, no. 103174, 2022.
5. A. Choudhary, K. Trivedi, S. Koley ve S. C. Martha, «On the scattering and radiation of water waves by a finite dock floating over a rectangular trench.,» *Wave Motion*, cilt 110, no. 102869, 2022.
6. J. Li, D. R. Fuhrman, X. Kong, M. Xie ve Y. Yang, «Three-dimensional numerical simulation of wave-induced scour around a pile on a sloping beach,» *Ocean Engineering*, cilt 233, no. 109174, 2021.
7. X. Li, Q. Xiao, Y. Zhou, D. Ning, A. Incecik, R. Nicoll ve D. Campbell, « Coupled CFD-MBD numerical modeling of a mechanically coupled WEC array,» *Ocean Engineering*, cilt 256, no. 111541, 2022.



8. H. P. Nguyen, C. M. Wang ve V. H. Luong, « Two-mode WEC-type attachment for wave energy extraction and reduction of hydroelastic response of pontoon-type VLFS,» *Ocean Engineering*, cilt 197, no. 106875, 2020.
9. E. Loukogeorgaki, O. Yagci ve M. S. Kabdasli, «3D Experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules,» *Coastal Engineering*, cilt 91, pp. 164-180, 2014.
10. E. Loukogeorgaki, E. N. Lentsiou, M. Aksel ve O. Yagci, «Experimental investigation of the hydroelastic and the structural response of a moored pontoon-type modular floating breakwater with flexible connectors,» *Coastal Engineering*, cilt 121, pp. 240-254, 2017.
11. Z. Tajali ve M. Shafieefar, «Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action,» *Ocean Engineering*, cilt 38, no. 17-18, pp. 1925-1933, 2011.
12. M. S. Afzal, H. Bihs, A. Kamath ve Ø. A. Arntsen, «Three dimensional numerical modelling of pier scour under current and waves using level set method,» %1 içinde *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014.
13. C. Baykal, B. M. Sumer, D. R. Fuhrman, N. G. Jacobsen ve J. Fredsøe, «Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder,» %1 içinde *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 2015.
14. D. Dessi ve S. S. Minna, «Experimental investigation vs numerical simulation of the dynamic response of a moored floating structure to waves.,» %1 içinde *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , 2014.
15. I. Diamantoulaki ve D. C. Angelides, «Modeling of cable-moored floating breakwaters connected with hinges,» *Engineering Structures*, cilt 33, no. 5, pp. 1536-1552, 2011.
16. S. A. Sannasiraj, V. Sundar ve R. Sundaravadivelu, «The hydrodynamic behaviour of long floating structures in directional seas,» *Applied Ocean Research*, cilt 17, no. 4, pp. 233-243, 1995.
17. T. Utsunomiya, E. Watanabe, T. Hiraishi, T. Noguchi ve S. Yamamoto, «Experimental Validation of Hydroelastic Analysis of Pontoon-, Semisubmersible- and Hybrid-Type VLFS,» %1 içinde *Proceedings of the ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Portugal, 2008.
18. E. Loukogeorgaki, M. Vasileiou ve R. Evgenia , «3D Experimental and Numerical Investigation of the Performance of a Modular Floating Structure,» %1 içinde *Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, 2015.
19. M. Shahrabi ve K. Bargi, « Numerical simulation of multi-body floating piers to investigate pontoon stability,» *Front. Struct. Civ. Eng.*, no. 7, p. 325–331, 2013.
20. A. Chegenizadeh, B. Ghadimi, H. Nikraz ve E. Heshmati, «A novel numerical model approach for examining ship berthing impact on floating piers,» *Journal of Engineering Science & Technology*, cilt 10 , no. 8, pp. 1054-1064, 2015.
21. L. I. Xin, L. Y. Xu ve J. M. Yang, «Study of fluid resonance between two side-by-side floating barges,» *Journal of Hydrodynamics*, cilt 28, no. 5, pp. 767-777, 2016.
22. E. Muk-Pavic, S. Chin ve D. Spencer, «Validation of the CFD code Flow-3D for the free surface flow around the ships' hulls,» 2006.
23. H. Sabziyan, H. Ghassemi, F. Azarsina ve S. Kazemi, «Effect of mooring lines pattern in a semi-submersible platform at surge and sway movements,» *Journal of Ocean Research*, cilt 2, no. 1, pp. 17-22, 2014.



## Karadeniz’de Spektral Pik Enerjinin Eğilim Analizi

Emine ACAR<sup>1</sup>, Adem AKPINAR<sup>2</sup>, Murat KANKAL<sup>3</sup>, Khalid AMAROUCHE<sup>4</sup>

### ÖZET

*Bu çalışmada, Karadeniz üzerinde deniz dalgalarının sahip olduğu spektral pik enerjilerinin uzun dönemli eğilimleri araştırılmıştır. Bu hedef doğrultusunda, ERA5 yeniden analiz verilerine ait 1979-2020 yıllarını kapsayan dalga spektrumlarından elde edilen yıllık ve mevsimlik ortalama spektral pik enerji değerleri üzerine Mann-Kendall testi ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi uygulanmıştır. Mann-Kendall ile bütüncül bir şekilde ve yenilikçi yöntem ile alt kategorilerde (düşük ve yüksek değerler) sınıflandırılan spektral pik enerjiler için çıkarımlar yapılmıştır. Sonuç olarak yıllık ortalama spektral pik enerjinin Mann-Kendall testine göre belirgin bir eğilime sahip değilken yenilikçi yöntemle göre yüksek ve düşük kategorilerinde özellikle Doğu Karadeniz’de artmaya eğilimli olduğu ancak değişim oranının %10’u geçmediği belirlenmiştir. Ayrıca, ortalama spektral pik enerjinin Karadeniz genelinde ilkbahar ve yaz mevsimlerinde artan, kış ve sonbahar mevsimlerinde ise azalan eğilimde olduğu da tespit edilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Spektral pik enerji, Yenilikçi Eğilim Analizi, Mann-Kendall, ERA5, Karadeniz

### ABSTRACT

#### *Trend Analysis of Spectral Peak Energy on the Black Sea*

*In this study, the long-term trends of the spectral peak energies of sea waves over the Black Sea were investigated. In line with this goal, Mann-Kendall test and Improved Visualization of Innovative Trend Analysis were applied on the annual and seasonal mean spectral peak energy values obtained from the wave spectra of the ERA5 re-analysis covering the years 1979-2020. It was possible to make inferences for spectral peak energies, which were classified in sub-categories (low and high values) with innovative approach, and also determined holistically with Mann-Kendall. As a result, it was determined that while the annual mean spectral peak energy did not have a significant trend according to the Mann-Kendall test, it tended to increase in the high and low categories according to the innovative method, especially in the Eastern Black Sea*

---

1 Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - emineacar@uludag.edu.tr

2 Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - ademakpinar@uludag.edu.tr

3 Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - mkankal@uludag.edu.tr

4 Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa - khalidamarouche@uludag.edu.tr

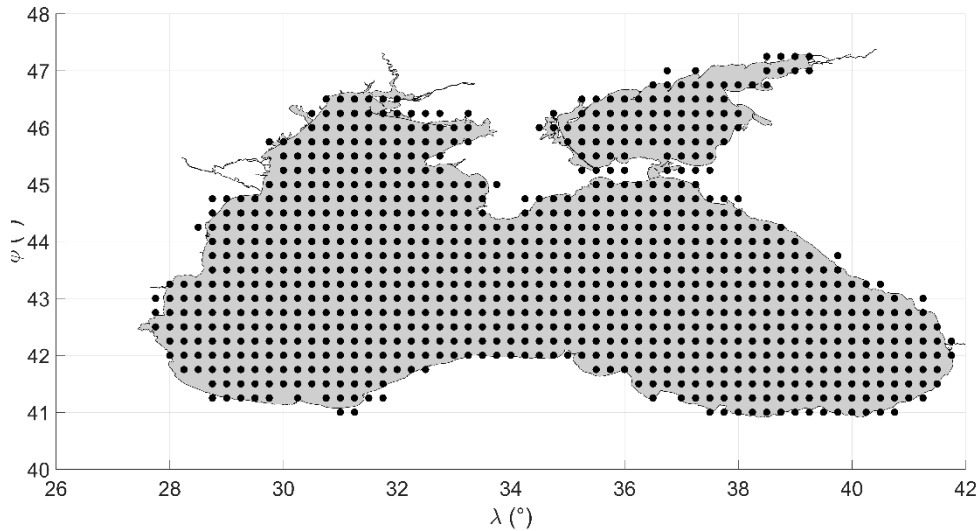
region, and the rate of change did not exceed 10%. In addition, it has been determined that the mean spectral peak energy tends to increase in the spring and summer and decrease in the winter and autumn seasons throughout the Black Sea.

**Keywords:** Spectral Peak Energy, Innovative Trend Analysis, Mann-Kendall, ERA5, Black Sea

## GİRİŞ

Deniz durumunun anlaşılmasında, deniz yapılarının tasarımı ve planlanmasında en önemli faktörlerden biri dalga iklimidir. Deniz dalgalarının rastgele olması dalga iklim parametrelerinin tanımlanması istatistiksel veya spektral analiz ile mümkün olmaktadır [1]. Dalga spektrumu, rüzgar nedeniyle oluşan rastgele dalgaları dolayısıyla da deniz durumunu tanımlamakta ve belirli frekans aralığında dalga enerjisinin dağılımını göstermektedir. Dalga spektrumunun maksimum yüksekliğe ulaştığı tepe noktası spektral pik enerji değerini ( $E_{maks}$ ) ve bu noktaya denk gelen frekans ise pik periyodu ( $T_p$ ) tanımlamaktadır. Spektral pik enerjiye karşılık gelen pik frekansta ya dalga yüksekliği çok büyüktür ya da çok dalga vardır [2]. Deniz durumu esas olarak dalga enerji spektrumundan tahmin edilmektedir ve doğrudan spektrumun şekline bağlıdır. Güçlü rüzgar olayları sırasında, dalga spektrumu maksimum dalga enerjisinin görüldüğü spektral pik noktasında sivri bir şekle sahip olma eğilimindedir [3]. Spektral pik enerji, özellikle yapının rezonans frekansında meydana geldiğinde, kıyı ve deniz yapılarına oldukça büyük hasar verebilmektedir [4].

Araştırmacılar küresel ve bölgesel ölçekte iklim değişikliğinin dalga iklimi parametrelerine doğrudan veya dolaylı etkilerini çeşitli eğilim analizi yöntemleri kullanılarak incelemiştir [5-10]. Mevcut ve gelecekteki deniz/kıyı yapılarının durumunun değerlendirilmesi yönünden, iklim değişikliğinin dalga iklimi üzerindeki etkilerinin irdelenmesi önemli bir konudur. Bunun yanı sıra, son zamanlarda ortaya çıkan Yenilikçi Eğilim Analizi (YEA) ile dalga iklimi üzerine yapılan çalışmalar kısıtlıdır. Verileri hem görsel olarak yorumlamaya elverişli olması hem de verilerin düşük ve yüksek değerlerinden oluşan alt kategorilerine ayrılarak detaylı bilgiler sağlaması yenilikçi yöntemlerin [11-16] kullanımını ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 1 - ERA5 yeniden analiz modeline ait sayısal ağ noktaları

Çalışma alanı olarak seçilen Karadeniz, yarı-kapalı bir havza olmasından kaynaklı feç mesafesi açık denizlere göre sınırlı kalırken çevresindeki kara bölgelerinin iklim ve atmosferik koşullarından da etkilenmektedir [7, 17]. Karadeniz üzerindeki ERA5 yeniden analiz verilerine ait 1979-2020 periyodunu kapsayan 42 yıllık dalga spektrum verileri Copernicus Climate Change Service (C3S) İklim Veri Deposu'ndan (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) temin edilmiştir. Dalga spektrumları 0,03453 Hz – 0,54775 Hz aralığında değişen 30 frekans aralığı, 24 yön, 0,25°x0,25° mekansal ve 1 saatlik zamansal çözünürlüğe sahiptir. Şekil 1'de ERA5 yeniden analiz verilerinin sayısal ağ noktaları sunulmuştur. ERA5 dalga spektrumundan ortalama pik enerjiler elde edilerek Mann-Kendall testi ve Geliştirilmiş Görselleştirme ile YEA (GG-YEA) uygulanmıştır.

## AMAÇ

Spektral pik dalga enerjisinin uzun dönemli eğiliminin incelenmesi kıyılarına, mevcut ve gelecek kıyı/açık deniz yapılarına etkisini anlamak açısından oldukça önemlidir. Bu doğrultuda çalışmanın amacı, spektral pik enerjinin uzun dönemdeki eğilimlerinin bütüncül olarak ve alt sınıf (düşük ve yüksek) değerleri için klasik ve yenilikçi eğilim yöntemleri ile yıllık ve mevsimsel ölçekte incelenmesidir.

## YÖNTEM

### Mann-Kendall Testi

Mann [18] ve Kendall [19] tarafından geliştirilen parametrik olmayan Mann-Kendall yönteminde bir zaman serisinde artan ya da azalan yönde eğilim olup olmadığına sıfır hipotezi; “H<sub>0</sub>: eğilim yok” ile bakılmaktadır. Yöntemin uygulanacağı zaman serisinde ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ )  $x_i$  ve  $x_j$  veri çiftleri iki guruba ayrılmaktadır.  $n$  veri uzunluğunu,  $x_i$  ve  $x_j$  ise sırasıyla  $i$  ve  $j$  zamanlarındaki veri değerlerini gösterecek şekilde signum fonksiyonu (sgn) kullanılarak Mann-Kendall test istatistiği  $S$  aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$n \geq 10$  için  $t_i$   $i$  uzunluğundaki bir seride bağlı gözlemlerin sayısı ve  $p$  serideki bağlı grupların sayıları olmak üzere  $S$  değerinin varyansı aşağıda verilen şekilde bulunmaktadır:

$$\text{Var}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)]/18 \quad (2)$$

Serinin standart sapması belirlendikten sonra standart normal  $Z$  değeri şu şekilde bulunmaktadır:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , \quad \text{if } S > 0 \\ 0 & , \quad \text{if } 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , \quad \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Hesaplanan  $Z$  değeri, anlamlılık düzeyleri ile standart normal dağılımla karşılaştırılmaktadır. Mutlak hesaplanan  $Z$  değeri standart  $Z$  değerinden büyükse, sıfır hipotezi ( $H_0$ ) reddedilmekte ve eğilim istatistiksel olarak anlamlı denilmektedir. Aksi takdirde  $H_0$  kabul edilmekte bu da önemli bir eğilimin olmadığını göstermektedir. Bu çalışmada %50 ila %99,9 arasındaki güven aralıkları

için hesaplamalar yapılmış ve %50'nin altındaki güven seviyeleri önemli bir eğilim olarak kabul edilmemiştir. Düşük güven aralıklarına kadar inceleme yapılmasının sebebi hem eğilimin yönü hem de şiddeti ile ilgili bilgi edinebilmek içindir.

### Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi (GG-YEA)

Şen [11] tarafından önerilen YEA'nın yeni bir yaklaşımı olarak Güçlü [16] tarafından ortaya atılan GG-YEA yönteminde Pettitt değişim noktası testi uygulanarak veriler "Düşük Değerler" ve "Yüksek Değerler" olarak sınıflandırılmaktadır.

YEA tekniğinde olduğu gibi, yöntemin ilk uygulama aşamaları, n adet veri içeren  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  serisinin  $\{b_{1, \frac{n}{2}}\}$  ile  $\{b_{2, \frac{n}{2}}\}$  olmak üzere iki eşit bölüme ayrılmasıyla başlar ve  $\{s_1\}$  ile  $\{s_2\}$  olarak artan şekilde sıralanması ile devam eder. Yönteme ait süreçlerde kullanılan eşitlikler aşağıda gösterildiği gibidir:

$$\{b_{1, \frac{n}{2}}\} = \{a_1, a_2, \dots, a_{\frac{n}{2}}\} \quad (4)$$

$$\{b_{2, \frac{n}{2}}\} = \{a_{\frac{n}{2}+1}, a_{\frac{n}{2}+2}, \dots, a_n\} \quad (5)$$

$$\{s_1\} = \{\min(b_{1, \frac{n}{2}}), \dots, b_i, \dots, \max(b_{1, \frac{n}{2}})\} \quad (1 < i < n/2) \quad (6)$$

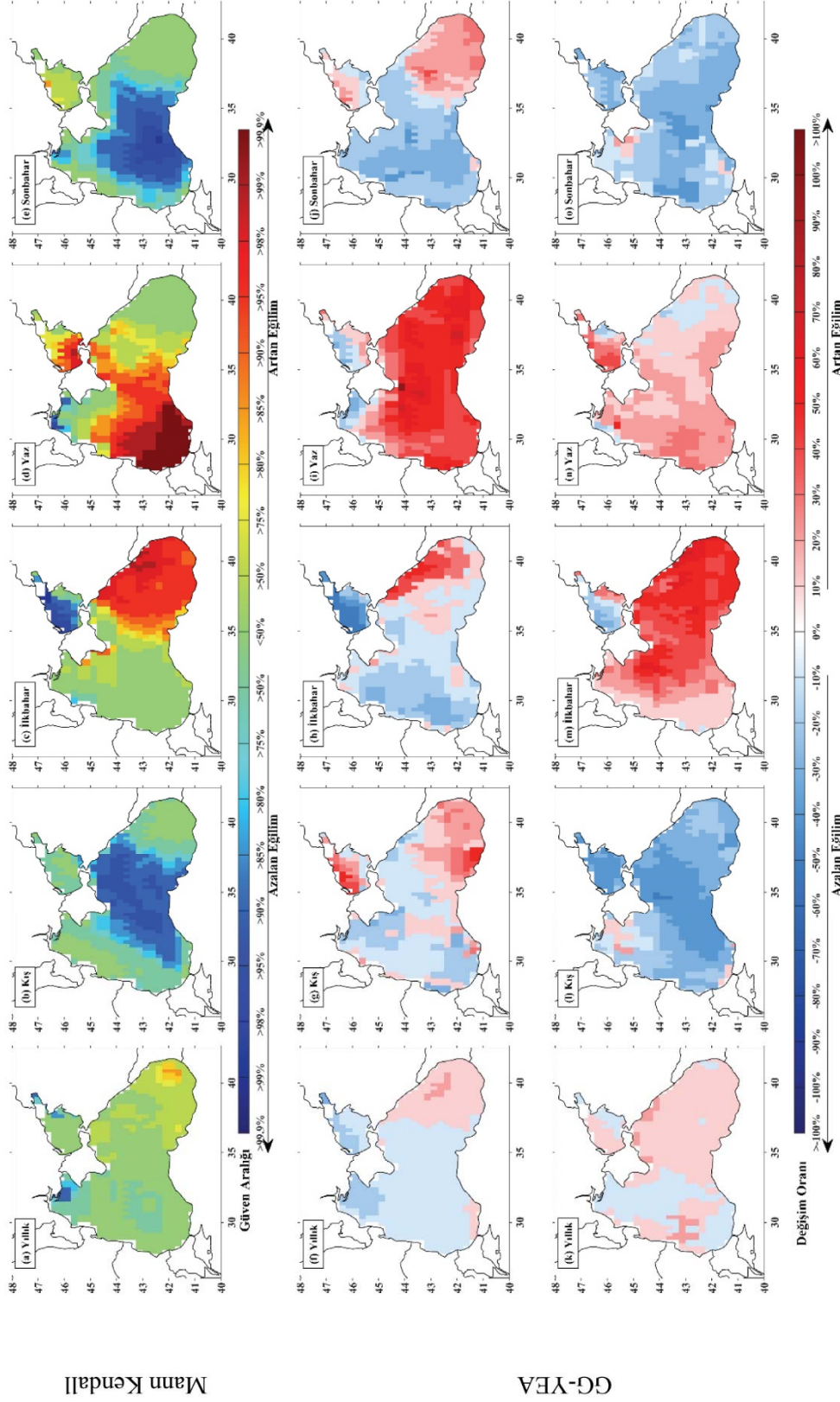
$$\{s_2\} = \{\min(b_{2, \frac{n}{2}}), \dots, b_j, \dots, \max(b_{2, \frac{n}{2}})\} \quad (7)$$

$\{s_1\}$ ,  $\{s_2\}$  ve  $\{\{s_2\} - \{s_1\}\}$  serileri yatay ekseninde  $\{1, 2, 3, \dots, n/2\}$  değerlerine karşı işaretlenir. Artan düzende sıralanmış  $\{s_1\}$  ve  $\{s_2\}$  serilerinin fark değerleri bulunduktan sonra, bu yeni  $\{\{s_2\} - \{s_1\}\}$  serisine Pettitt [20] tarafından önerilen Pettitt testi uygulanır ve değişim noktası bulunur. Değişim noktasının solundaki kısım "Düşük değerler kategorisi", sağ tarafı "Yüksek değerler kategorisi" olarak sınıflandırılır. Eğilimi tespit etmek için  $y=0$  çizgisi çizilir ve bu çizginin altında (üstünde) fark değerleri varsa azalan (artan) bir eğilim vardır. YEA yaklaşımında kullanılan 1:1 çizgisi yerine  $y=0$  çizgisi kullanılır. Eğilimin büyüklüğünü ifade eden yüzdelikler, Yüksek ve Düşük değerler kategorisi için sırasıyla  $100 \times (\text{Sol tarafın fark ortalaması}) / (\text{Sol tarafın ilk yarı ortalaması})$  ve  $100 \times (\text{Sağ tarafın fark ortalaması}) / (\text{Sağ tarafın ilk yarı ortalaması})$  olarak hesaplanır.

### SONUÇ

ERA-5 yeniden analiz dalga spektrumu veri setinden alınan ortalama spektral pik enerjiye yıllık ve mevsimlik Mann-Kendall ve GG-YEA testleri uygulanmıştır. Mann-Kendall testinde ortalama  $E_{\text{maks}}$  için %50 ile %99.9 arasında değişen güven seviyelerinde inceleme yapılmıştır. Eğilim analizlerinin sonuçları Şekil 2'de verildiği gibidir.

Yıllık ortalama pik enerjiler (Şekil 2a) için Gürcistan kıyılarında %80-85 güven aralığında bir artış eğilimi tespit edilmiştir. Ek olarak Batı Karadeniz'de (%50 güven seviyelerinde), Ukrayna kıyılarında ve Azak Denizi'nin Rusya kıyılarında %75-90 güven seviyelerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Mevsimsel ortalama pik enerjilerin tüm mevsimler için daha geniş ve bölgesel bir eğilim modeli gösterdiği görülebilir. Orta Karadeniz bölgesi kış ve sonbahar mevsimlerinde %85 güven seviyesinin üzerinde bir azalma eğilimi sergilemektedir (Şekil 2b ve 2e). İlkbaharda



Mann Kendall

GG-YEA

Şekil 2 - Ortalama pik enerjilerinin yıllık (a), mevsimlik (b-e) Mann-Kendall test sonuçları (üst satır) ile yıllık (f), mevsimlik (g-j) ortalama pik enerjilerinin yüksek değer kategorisi için (orta satır) ve yıllık (k), mevsimlik (l-o) ortalama pik enerjilerinin düşük değer kategorisi için GG-YEA sonuçları (alt satır)

Karadeniz’in doğu kesiminde ve yaz mevsiminde orta ve batı kesiminde %90 güven seviyesinin üzerinde bir artan eğilim tespit edilmiştir (Şekil 2c ve 2d). Ayrıca Türkiye'nin batı kıyılarının (İstanbul ve Trakya) yaz mevsiminde %99,9'luk güven seviyesinin üzerinde bir artış eğilimi göstermesi dikkat çekmektedir. Ek olarak Azak Denizi'nde yaz (ilkbahar) mevsiminde artan (azalan) eğilimler görülmektedir.

Ortalama spektral pik enerjilerin GG-YEA yöntemine göre yüksek ve düşük kategori için sonuçları sırasıyla Şekil 2f-2j ile Şekil 2k-2o üzerinde sunulmuştur. Yıllık ölçekte ortalama pik enerjiler genel olarak %10 değişim oranına sahiptir. Yüksek kategori ortalama pik enerji değerlerinin Doğu Karadeniz ile İstanbul kıyılarında artan, Azak Denizi dahil kalan alanlarda azalan eğilim hakimdir (Şekil 2f). Düşük kategori değerlerinde ise Karadeniz’in doğusunda ve batı kıyılarında ayrıca Azak Denizi’nde artan eğilim baskındır (Şekil 2k). Kışın yüksek ve düşük ortalama değerler için azalan eğilim türü görülmektedir (Şekil 2g ve 2l). Ancak yüksek ortalama pik enerjiler için Güneydoğu Karadeniz’de artan eğilime de rastlanmıştır. Ayrıca düşük ortalama pik enerjiler özellikle Karadeniz’in orta kesiminde yaklaşık %40 oranında değişmektedir. İlkbahar mevsiminde yüksek ve düşük ortalama pik enerjilerin eğilim türlerinin zıt olduğu tespit edilmiştir. Yüksek değerlerin yalnızca Doğu Karadeniz kıyı bölgesinde artan eğilim gösterdiği (Şekil 2h), düşük değerlerin ise tüm Karadeniz boyunca artan eğilime sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 2m). Yaz mevsiminde ilkbaharın aksine hem yüksek (Şekil 2i) hem de düşük (Şekil 2n) ortalama pik enerjiler tüm Karadeniz’de artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Burada yüksek değerlerin değişim oranı %50-60 seviyelerinde iken düşük değerlerin değişim oranı %10-20 bandında kalmaktadır. Sonbaharda hem yüksek hem de düşük ortalama pik enerjiler neredeyse tüm Karadeniz’de %10-20 azalan eğilime sahiptir (Şekil 2j ve 2o). Ancak yüksek değerler için Güneydoğu Karadeniz de %20 artan eğilim söz konusudur.

Spektral pik enerjilerin Karadeniz genelinde ilkbahar ve yaz mevsimlerinde artma, kış ve sonbahar mevsimlerinde ise azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Yenilikçi yöntem ile klasik Mann-Kendall yöntemi kıyaslandığında yenilikçi eğilim analizinin klasik yöntemle göre eğilim bulma konusunda daha hassas olduğu görülmüştür. Yenilikçi yöntem ile verilerin alt kategorilerde incelenmesi ile daha ayrıntılı bilgilere ulaşma imkânı yakalanmıştır. Geliştirilmiş Görselleştirme ile Yenilikçi Eğilim Analizi (GG-YEA) yaklaşımında pik enerjiler için değişim oranları yıllık ölçekte  $\pm\%10$ 'u aşmazken mevsimsel olarak %50'nin üzerinde değişim oranları belirlenmiştir. Böylece alt sınıflar için inceleme yapıldığında tüm seride görülemeyen değişimleri de belirleme durumu ortaya çıkmıştır. GG-YEA ile bazı bölgeler için spektral pik enerjinin yüksek ve düşük alt kategorilerinin birinde artma birinde azalma eğilimi görülmesine karşın Mann-Kendall testi ile bu bölgede eğilim tespit edilemediği dikkat çekmektedir. Ayrıca, GG-YEA ile her iki alt kategoride de aynı tür eğilim görüldüğünde Mann-Kendall testi ile belirlenen eğilimin güven düzeyinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Her iki analiz sonucuna göre artan eğilimin, Mann-Kendall için daha yüksek güven seviyelerinde gerçekleştiği, GG-YEA için daha büyük değişim oranlarıyla ifade edildiği ancak azalan eğilim oranlarında bu durumun geçerli olmadığı, böylece artan eğilimlerin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Karadeniz üzerindeki bu artış eğilimleri genelde tüm Karadeniz’i etkilediği, fakat özellikle Doğu Karadeniz’de daha şiddetli olduğu söylenebilir. Böylece fırtına kaynaklı kıyı hasarları ile ilgili risklerin bu bölgede giderek daha yüksek bir hale geldiği değerlendirilmiştir.

### **Kaynaklar**

1. S. Chakrabarti, Handbook of Offshore Engineering (2-volume set), Elsevier, 2005.
2. Y. Yüksel, E.Ö. Çevik, Coastal Engineering, Beta Publishing Co. (In Turkish), Istanbul, Turkey, 2009.



3. CEM, Coastal Engineering Manual Part II: Coastal Hydrodynamics (EM 1110-2-1100), (2012).
4. P. Kumar, H. Zhang, K.I. Kim, Spectral Density Analysis for Wave Characteristics in Pohang New Harbor, *Pure Appl. Geophys.* 171 (2014) 1169–1185. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0710-x>.
5. B. Aydoğan, B. Ayat, Spatial variability of long-term trends of significant wave heights in the Black Sea, *Appl. Ocean Res.* 79 (2018) 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.001>.
6. F. Islek, Y. Yuksel, C. Sahin, H.A.A. Guner, Long-term analysis of extreme wave characteristics based on the SWAN hindcasts over the Black Sea using two different wind fields, *Dyn. Atmos. Ocean.* 94 (2021) 101165. <https://doi.org/10.1016/J.DYNATMOCE.2020.101165>.
7. F. Islek, Y. Yuksel, C. Sahin, Spatiotemporal long-term trends of extreme wind characteristics over the Black Sea, *Dyn. Atmos. Ocean.* 90 (2020) 101132. <https://doi.org/10.1016/J.DYNATMOCE.2020.101132>.
8. A. Akpınar, B. Bingölbali, Long-term variations of wind and wave conditions in the coastal regions of the Black Sea, *Nat. Hazards* 2016 841. 84 (2016) 69–92. <https://doi.org/10.1007/S11069-016-2407-9>.
9. F. De Leo, A. De Leo, G. Besio, R. Briganti, Detection and quantification of trends in time series of significant wave heights: An application in the Mediterranean Sea, *Ocean Eng.* 202 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.107155>.
10. B. Hong, J. Zhang, Long-Term Trends of Sea Surface Wind in the Northern South China Sea under the Background of Climate Change, *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, Vol. 9, Page 752. 9 (2021) 752. <https://doi.org/10.3390/JMSE9070752>.
11. Z. Şen, Innovative trend analysis methodology, *J. Hydrol. Eng.* 17 (2012) 1042–1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556).
12. Z. Şen, Conceptual monthly trend polygon methodology and climate change assessments, *Hydrol. Sci. J.* 00 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1881099>.
13. Z. Şen, E. Şişman, İ. Dabanlı, Innovative Polygon Trend Analysis (IPTA) and applications, *J. Hydrol.* 575 (2019) 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.028>.
14. Y.S. Güçlü, E. Şişman, İ. Dabanlı, Innovative triangular trend analysis, *Arab. J. Geosci.* 13 (2020) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-5048-y>.
15. S. Alashan, An improved version of innovative trend analyses, *Arab. J. Geosci.* 11 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3393-x>.
16. Y.S. Güçlü, Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA, *J. Hydrol.* 584 (2020) 124674. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.124674>.
17. Z. Cherneva, N. Andreeva, P. Pilar, N. Valchev, P. Petrova, C. Guedes Soares, Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea, *Coast. Eng.* 55 (2008) 881–893. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2008.02.028>.
18. H.B. Mann, *Nonparametric Tests Against Trend* Author ( s ): Henry B . Mann Published by : The Econometric Society Stable, *Econometrica.* 13 (1945) 245–259. <http://www.jstor.com/stable/1907187>.

19. M. Kendall, Rank correlation methods, Griffin, London. (1975).  
<https://www.worldcat.org/title/rank-correlation-methods/oclc/3827024> (accessed April 12, 2021).
20. A.N. Pettitt, A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem, Source J. R. Stat. Soc. Ser. C (Applied Stat. 28 (1979) 126–135.

# Ölçeklendirilmiş Ocean Tec Dalga Enerji Dönüştürücüsünün Karadeniz'in Cide Kıyısındaki Performansı\*

Bilal BİNGÖLBALİ<sup>1</sup>, Ajab Gul MAJIDI<sup>2</sup>, Adem AKPINAR<sup>3</sup>

## ÖZET

*Bu çalışmada, Türkiye'nin Kastamonu ili Cide kıyılarında dört farklı derinlikte (24, 52, 70 ve 105 m) ve on farklı ölçekte boyutu küçültülmüş Ocean Tec Dalga Enerji Dönüştürücüsünün (DED) performansına odaklanılmıştır. Çalışma için kullanılan veri seti, 1979-2009 yılları arasında 31 yıllık CFSR rüzgarları ile çalıştırılan kalibre edilmiş iç içe geçmiş katmanlı dalga tahmin modeli SWAN çıktılarıdır. Performans analizi için öncelikle, DED'in güç matrisi Froude ölçeklendirme kriterleri kullanılarak on farklı ölçekte boyutu küçültülmüştür. Daha sonra, küçültülen güç matrisleri ile dalga durumu karakteristik matrisleri çarpılarak dikkate alınan tüm derinlikler için yıllık beklenen enerji ve kapasite faktörleri hesaplanmıştır. Cihazın optimum ölçeği (maksimum kapasite faktörü) belirlendikten sonra, orijinal ve optimum ölçekli Ocean Tec'in nominal gücü ( $P_n$ ), ortalama yıllık kapasite faktörü ( $C_f$ ), teorik güç ( $P$ ), teorik enerji ( $E$ ), nominal kapasitesi ( $R_f$ ) ve çalışma saatleri ( $O_h$ ) hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçta, dikkate alınan tüm derinlikler için 0,5'lik küçültmenin optimum ölçek değeri ( $\lambda_L$ ) olduğu görülmüştür. Optimum ölçeklendirilmiş Ocean Tec'in en yüksek yıllık ortalama  $C_f$  değeri 105 m derinlikte yaklaşık 125 MWh/yıl ile yaklaşık % 32 iken, tam ölçeklendirilmiş cihazın  $C_f$  değeri aynı derinlikte yaklaşık 769 MWh/yıl ile yaklaşık %18 olmuştur.*

**Anahtar Kelimeler:** Dalga Enerji Dönüştürücüsü, Ocean Tec, Optimum ölçek, Dalgadan enerji üretimi, Karadeniz

## ABSTRACT

### **Performance of Down-Scaled Ocean Tec Wave Energy Converter System in the Cide Coast Of The Black Sea**

*This study focuses on the performance of the Ocean Tec Wave Energy Converter (WEC) at four different depths (24, 52, 70 and 105 m) and ten different scales on the Cide coast of the Black Sea in Kastamonu, Turkey. The dataset used for the study is 31 years of data from 1979-2009 using*

---

1 Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa - bilalb@uludag.edu.tr

2 Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa - ajabgulmajidi@gmail.com

3 Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa - ademakpinar@uludag.edu.tr

*SWAN, a calibrated nested grid wave prediction model driven by CFSR winds. Firstly, the power matrix of the machine is downscaled at ten different scales using Froude scaling law. Then, wave condition characteristic matrices were obtained. Annual expected energy and capacity factors were determined using the reduced power matrices and wave condition characteristic matrices for all depths considered. After the optimum scale (maximum capacity factor) of the device was determined, the nominal power ( $P_n$ ), average annual capacity factor ( $C_f$ ), theoretical power ( $P$ ), theoretical energy ( $E$ ), nominal capacity ( $R_f$ ) and operating hours ( $O_h$ ) of the original and optimum scaled Oceantec were calculated and compared. Finally, it is seen that there is an optimum scale value ( $\lambda_L$ ) of 0.5 for all depths considered. The highest annual average  $C_f$  value of the optimally scaled Oceantec was 32% with 125 MWh/year at 105 m depth, while the  $C_f$  value of the fully scaled device was 18% with 769 MWh/year at the same depth.*

**Keywords:** *Wave energy converter, Oceantec, optimum scale, energy generation from waves, Black Sea.*

## GİRİŞ

Yenilenebilir enerji, sera gazı (GHG) emisyonlarının ve iklim değişikliğinin azaltılmasında küresel çapta hayati bir önem taşımaktadır. Geçtiğimiz on yılda Avrupa Birliği (AB), iklim değişikliği ile mücadele etmeyi ve AB'nin enerji güvenliğini artırmayı amaçlayan iklim ve enerji politikasına yönelik yaklaşım benimsemiştir. Açık deniz rüzgar ve dalga enerjisinden yararlanılabilecek bolca kaynak olmasına karşın, bu sistemlerin Türkiye'de enerji sistemine başarılı bir şekilde entegre edilmesi henüz başarılammıştır. Son çalışmalarda araştırmacılar bağımsız yenilenebilir enerjilerle ilgili temel zorlukları ele almak ve açık deniz yenilenebilir enerjisinin gelişimini teşvik etmek için DED enerji çiftliğine uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Geçmişten günümüze dalgalardan kinetik enerji elde edilmesi ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi için birçok dalga enerjisi dönüştürücüsü (DED) geliştirilmiştir. Bu DED'lerin bazıları dünyanın farklı bölgelerindeki denizlere kurulmuş ve ticari olarak kullanıma yönelik eğilimler yavaş yavaş başlamıştır. Ancak, Güneybatı Karadeniz'de ölçekli DED kurulumu konusunda, bu sistemlerin fizibilitesine ve teknolojinin uygun olup olmadığına odaklanan herhangi bir çalışma henüz yapılmamıştır. Sınırlı sayıda çalışma Karadeniz'deki dalga kaynağı analizini ve tam ölçekli DED'leri ele almıştır [1]. Bu mevcut çalışmalar, Avrupa Hava Tahmin Merkezi gibi operasyonel merkezler tarafından gerçekleştirilen projelerden elde edilen verileri kullanmıştır [2]. Ancak, bu çalışmalar çoğunlukla teorik veri analizi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

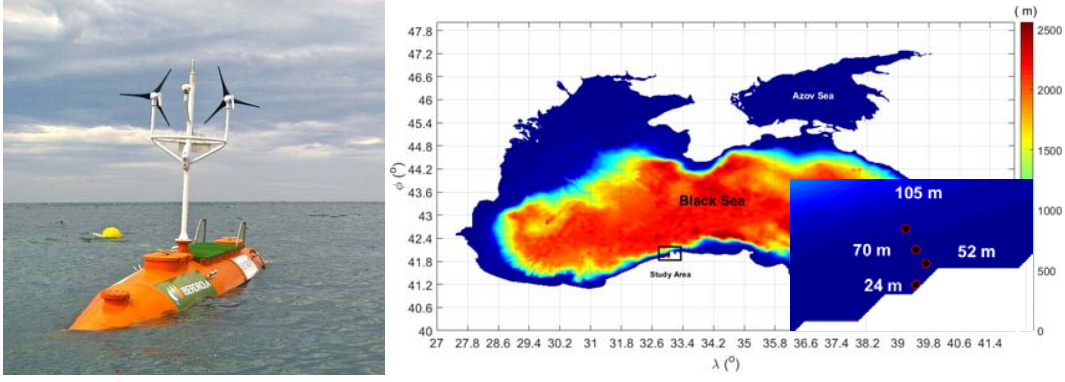
## AMAÇ

Bu çalışmada, Karadeniz'in güneybatı kıyısında Kastamonu ili yakınlarındaki Oceantec DED cihazının hem tam kapasiteli hem de ölçeklendirilmiş kapasitede performansı araştırılmıştır.

## ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin Kastamonu ili Cide sahilinde dört farklı derinlikte (24, 52, 70 ve 105 m) on farklı ölçekteki Oceantec teknolojisinin dalgalardan enerji dönüştürme performansına odaklanılmıştır (Şekil 1). Deniz dalgalarından elektrik enerjisi dönüşümü için iki veri setine ihtiyaç vardır. İlk veri seti, deniz durumunu temsil eden ve dalga tahmin modelinden elde edilen dalga yükseklikleri ( $H_{m0}$ ) ve dalga pik periyodundan ( $T_p$ ) oluşan karakteristik matrislerdir. İkinci veri seti ise cihaz üretim şirketi tarafından sunulan cihazın güç matrisidir. Güneybatı Karadeniz kıyısı boyunca tüm bu karakteristik matrisler için dalga parametrelerinin uzun vadeli (31 yıllık) tahminleri, Akpınar ve diğerleri [3] tarafından geliştirilen bir modelden her istasyon için çıkarılmıştır. Bu veri setinin üretimi için Simulating Waves Nearshore (SWAN) üçüncü nesil

kıyı dalga modeli [4], CFSR rüzgarları [5] ve üç aşamalı katmanlı ağ sistemi kullanılmıştır. Kaba sayısal ağ, daha ince ve yüksek çözünürlüklü bir alt sayısal ağdan oluşan SWAN dalga tahmin modeli ile ilgili veri üretilmiştir. Model ayrı olarak ölçümlerle kalibre edilmiş ve daha sonra kalibrasyonda kullanılmayan dalga ölçümleri ile doğrulanmıştır. Belirtilen bu veri setinden her konum için gerekli olan tüm dalga parametreleri, 2 saatlik bir zamansal çözünürlükte 31 yıllık bir süre için çekilmiştir.



Şekil 1 - Oceantec Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi (solda), Karadeniz'in batimetri haritası ve seçilen 4 istasyon (sağda)

## METODOLOJİ

Oceantec bir zayıflatıcı nokta emicidir ve 500 kW nominal güce sahip salınımlı su sütunu dalga enerjisi dönüştürücü sistemi prensibine dayanmaktadır[6]. Dalgalardan enerji elde edilmesi, mevcut yerel dalga iklimine ve mevcut DED'lerin güç matrisine bağlıdır. Bu nedenle, her istasyonda farklı dalga yüksekliklerinde ve farklı periyot aralıklarında dalgaların oluşma olasılıkları belirlenmiştir. Her istasyonun dalga iklimi bilgisini veren karakteristik matrisler, DED güç matrisleri ile eşleştirilerek bu istasyonlarda kurulabilecek Oceantec için elde edilebilecek dalga enerjisi çıktısı belirlenmiştir. Oceantec dalga enerji dönüştürücü sistemin güç matrisi (tam ölçek) Ek Tablo 1'de, 1979 yılına ait karakteristik matrisi Ek Tablo 2 de sunulmuştur. Ayrıca, bu cihazın enerji çıkışı, kapasite faktörü, nominal kapasite faktörü ve çalışma saatleri de hesaplanmıştır. Daha sonra, cihaz Froude ölçeklendirme yasasına [7] göre on farklı ölçekte boyutu küçültülmüş ve söz konusu parametreler hesaplanarak DED'lerin uygulanabilirliğinin bir göstergesi olarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. DED'in optimizasyonu için güç matrisi, yerçekimi ivmesi ve eylemsizlik kuvvetlerinin en önemli kuvvetler olduğu varsayılarak Froude kriteri uygulanarak ölçeklendirilmiştir. Ancak, küçültülmüş güç matrisini tahmin etmenin en doğru yolu, sayısal simülasyonlar ve yeni fiziksel model testleri ile cihazların üreteceği elektriği tahmin etmektir. Bir güç matrisinin üç değişkeni aşağıdaki gibi ölçeklendirilmiştir [8];

$$L_{DED} = \lambda_L L_{DED,d} \quad (1)$$

$$T_{DED} = \lambda_L^{0.5} T_{DED,d} \quad (2)$$

$$P_{DED} = \lambda_L^{3.5} P_{DED,d} \quad (3)$$

Burada  $\lambda_L$  ölçek faktörüdür.  $L_{DED,d}$ ,  $T_{DED,d}$  ve  $P_{DED,d}$  sırasıyla dönüştürülmüş uzunluk, zaman ve güçtür.

Bu cihazın çalışma saati, cihazın sıfırdan daha yüksek çalışabileceği toplam saattir. Bir DED sisteminin gücü (P) ve enerjisi (E) aşağıdaki [9] denklemlere göre hesaplanmaktadır.

$$P = \sum_{j=1}^{n_H} \rho_{ij} \times P_{ij} \quad (4)$$

$$E = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} \rho_{ij} \times P_{ij} \quad (5)$$

Burada;  $n_T$ , periyot sınıflarının sayısı,  $n_H$ , belirgin dalga yükseklik sınıflarının sayısı,  $f_{ij}$ , i. ve j. sınırlar arası için dalgaların oluşma frekanslarını ve  $P_{ij}$ , dikkate alınan DED sistemi için sunulan güç matrisinin i. ve j. sınıflarını temsil eden elektrik gücünü ifade etmektedir. Kapasite faktörü ( $C_f$ ) ve nominal kapasite faktörü ( $R_f$ ) [10] aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

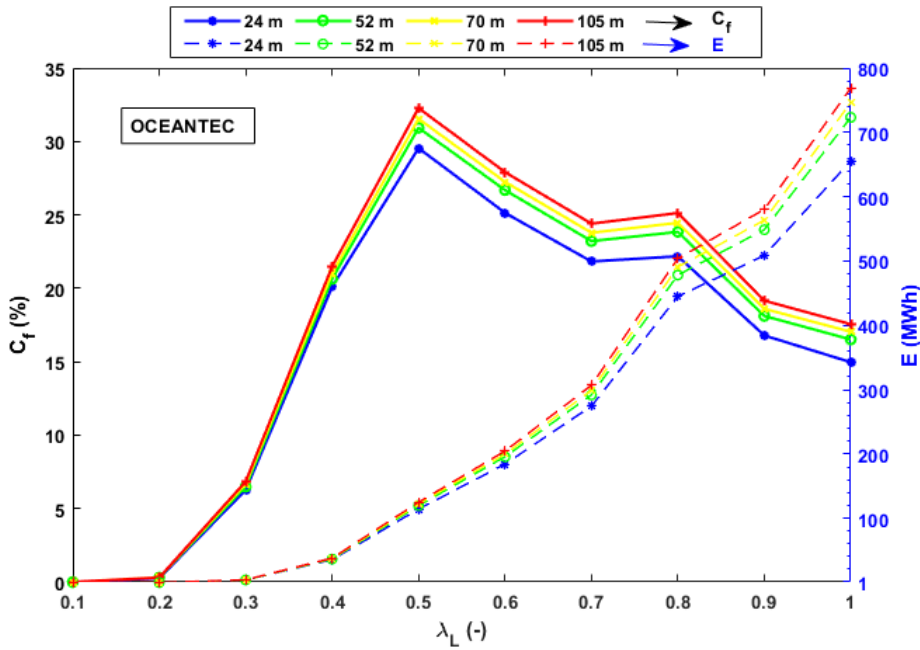
$$C_f = \frac{P}{P_n} \times 100 [\%] \quad (6)$$

$$R_f = \frac{i}{n} \times 100 [\%] \quad (7)$$

Burada, P cihazın yıllık ortalama güç üretimini,  $P_n$  cihazın nominal gücünü, i cihazın nominal gücünün %90'ından fazlasıyla çalıştığı saatleri ve n yılın toplam saatini gösterir.

## BULGULAR

Majidi ve diğerleri [11], Güneybatı Karadeniz'de 15 farklı orijinal DED sisteminin kurulması durumunda verimlilikleri üzerinde çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlar, Oceantec dalga enerjisi dönüştürücü teknolojisinin güneybatı Karadeniz'de en iyi performansı gösteren cihazlardan biri olduğunu göstermiştir [11]. Bu nedenle, bu çalışmada, cihazın seçilen bölgede en verimli çalışabileceği en optimum boyutunu belirlemek için cihaz on kat küçültülerek küçültülmüş DED sistemlerinin performansları belirlenmiştir. Seçilen dört derinlikte on farklı ölçek için bu cihazın yıllık ortalama enerji miktarları ve kapasite faktörleri Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2 - Oceantec'in 24, 52, 70 ve 105 m derinliklerdeki ortalama yıllık enerji miktarı (E, MWh, kesikli çizgiler, sağ y eksen) ve kapasite faktörü ( $C_f$ , %, sürekli çizgiler, sol y eksen)

Şekil 2'de, Oceantec'in dört derinlik için de optimum ölçeği (en yüksek kapasite faktörü)  $\lambda_L=0,5$ 'tir. Kapasite faktörü ve enerji çıkışı 105 m derinlikte en yüksektir ve su derinliği ile doğrudan bir ilişkisi vardır. Cihaz optimum ölçekte en yüksek kapasite faktörüne sahip olup 105 m derinlikte yaklaşık %32'dir ve  $\lambda_L=1,0$  olduğunda en yüksek ortalama yıllık enerji miktarı 105 m derinlikte yaklaşık 762 MWh'dir. Söz konusu konumlar için bu cihazın optimum ve tam ölçeğine ilişkin daha fazla detaylı karşılaştırma Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** - Farklı derinliklerde (24, 52, 70 ve 105 m) Oceantec teknolojisinin tam ve optimum ölçeklerinin nominal gücü ( $P_n$ ), ortalama yıllık kapasite faktörü ( $C_f$ ), beklenen gücü ( $P$ ), beklenen enerjisi ( $E$ ), nominal kapasitesi ( $R_f$ ) ve çalışma saatleri ( $O_h$ ).

Derinlik	24 m		52 m		70 m		105 m	
Koordinatlar ( $X_p, Y_p$ )	(33,031°, 41,944°)		(33,038°, 41,957°)		(33,031°, 41,965°)		(33,025°, 41,978°)	
Ölçek, $\lambda_L$	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5
$P_n$ (kW)	500	44	500	44	500	44	500	44
$C_f$ (%)	15	30	17	31	17	32	18	32
$P$ (kW)	75	13	83	14	85	14	88	14
$E$ (MWh)	655	114	723	120	746	122	769	125
$R_f$ (%)	0,08	0,51	0,25	0,80	0,36	0,97	0,49	1,22
$O_h$ (saat)	4072	7839	4192	7855	4240	7848	4297	7853

Tablo 1'e göre, Oceantec'in nominal gücü tüm sahalarda 500 kW'tan 44 kW'a düşmüştür. Cihazın ölçeği küçültüldükten sonra kapasite faktörleri artarken, enerji çıkışları tersine azalmıştır. Kapasite faktörü 105 m derinlikte %18'dan %32'ye yükselirken, enerji 769 MWh'den 125 kW'a düşmüştür. Seçilen en derin konumdaki  $R_f$  değeri optimum ölçek için %1,22 ve tam ölçek için %0,49'dur, bu da bu cihazın toplam sürenin sırasıyla %1,22 ve %0,49'unda nominal gücünün %90'ından daha fazla bir çıkışla çalışabileceği anlamına gelmektedir. Çalışma saatleri (tam yük saatleri,  $O_h$ ) adına, orijinal cihaz ortalama 4297 saat/yıl çalışabilirken, optimum ölçekte bu değer 7853 saat/yıla çıkmaktadır, bu da optimum ölçekli cihazın toplam sürenin %90'ında çalışabileceği anlamına gelmektedir.

## SONUÇLAR

Dalga enerjisi dönüştürücü sistemleri okyanuslardaki yüksek dalga gücü potansiyeli koşulları için tasarlanmıştır, bu nedenle düşük veya orta dalga koşullarında tam ölçekte verimli performans gösterememektedirler. Oceantec, daha az dinamik dalga iklimine sahip denizlerde daha iyi performans gösterebilen cihazlardan biridir. Bu çalışma, Kastamonu'da Cide kıyılarında dört farklı derinlikte (24, 52, 70 ve 105 m) Oceantec DED'in performansını ve optimum tasarım durumunda performansını belirlemiştir. Çalışma için kullanılan veri seti, CFSR rüzgarları ile SWAN versiyon 41.01AB kıyı dalga modeli ile üretilen 1979-2009 yılları arasındaki 31 yıllık uzun vadeli tahminlerdir. Cihaz, Froude ölçeklendirme kriterleri kullanılarak on kez ölçeklendirilmiştir. Çalışma alanında dikkate alınan tüm konumlar için Oceantec'in optimum  $\lambda_L$  değeri 0,5'tir. Optimum ölçeklendirilmiş Oceantec'in en yüksek yıllık ortalama  $C_f$  değeri 105 m derinlikte 125 MWh/yıl ile %32 iken, tam ölçeklendirilmiş cihazın  $C_f$  değeri aynı konumda 769 MWh/yıl ile %18 olmuştur. DED'in uygulanmasının uygunluğu, hayatta kalma, kurulum, bakım, bağlama, çevresel çatışmalar, şebeke/bağlantı noktaları, deniz trafiği, izin gereklilikleri gibi kriterlere dayanmaktadır. DED kurulumu için coğrafi bilgi sistemlerinin kullanılması hususları göz önünde bulundurularak uygun alanların belirlenmesi de tavsiye edilmektedir. Karadeniz gibi

ılımlı dalga koşullarına sahip denizlerde dalga enerjisi dönüştürücüleri ve açık deniz rüzgar enerjisi dönüştürücüleri (hibrit sistemler) kombinasyonlarının araştırılması da tavsiye edilmektedir.

### **Kaynaklar**

1. A.G. Majidi, B. Bingölbali, A. Akpınar, E. Rusu, Dimensionless Normalized Wave Power in the Hot-spot Areas of the Black Sea, E3S Web Conf. 173 (2020) 01001.
2. S. Gallagher, R. Tiron, E. Whelan, E. Gleeson, F. Dias, R. McGrath, The nearshore wind and wave energy potential of Ireland: A high resolution assessment of availability and accessibility, Renewable Energy. 88 (2016) 494–516.
3. A. Akpınar, B. Bingölbali, G.Ph. Van Vledder, Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds, Ocean Engineering. 126 (2016) 276–298.
4. N. Booij, R.C. Ris, L.H. Holthuijsen, A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, Journal of Geophysical Research: Oceans. 104 (1999) 7649–7666.
5. S. Saha, S. Moorthi, H.-L. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Woollen, D. Behringer, H. Liu, D. Stokes, R. Grumbine, G. Gayno, J. Wang, Y.-T. Hou, H. Chuang, H.-M.H. Juang, J. Sela, M. Iredell, R. Treadon, D. Kleist, P. Van Delst, D. Keyser, J. Derber, M. Ek, J. Meng, H. Wei, R. Yang, S. Lord, H. van den Dool, A. Kumar, W. Wang, C. Long, M. Chelliah, Y. Xue, B. Huang, J.-K. Schemm, W. Ebisuzaki, R. Lin, P. Xie, M. Chen, S. Zhou, W. Higgins, C.-Z. Zou, Q. Liu, Y. Chen, Y. Han, L. Cucurull, R.W. Reynolds, G. Rutledge, M. Goldberg, The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, Bull. Amer. Meteor. Soc. 91 (2010) 1015–1058.
6. A.G. Majidi, Güney Batı Karadeniz'de mevcut ve ölçeklendirilmiş dalga enerji dönüştürücülerden enerji üretimi, Yüksek Lisans Tezi, BUÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye
7. S. Bozzi, G. Besio, G. Passoni, Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis, Coastal Engineering. 136 (2018) 130–146.
8. C. Iuppa, L. Cavallaro, E. Foti, D. Vicinanza, Potential wave energy production by different wave energy converters around Sicily, Journal of Renewable and Sustainable Energy. 7 (2015) 061701.
9. J. Morim, N. Cartwright, M. Hemer, A. Etemad-Shahidi, D. Strauss, Inter- and intra-annual variability of potential power production from wave energy converters, Energy. 169 (2019) 1224–1241.
10. M. Majidi Nezhad, D. Groppi, F. Rosa, G. Piras, F. Cumo, D.A. Garcia, Nearshore wave energy converters comparison and Mediterranean small island grid integration, Sustainable Energy Technologies and Assessments. 30 (2018) 68–76.
11. A.G. Majidi, B. Bingölbali, A. Akpınar, Power Production Performance of Different Wave Energy Converters in the Southwestern Black Sea, International Journal of Energy and Power Engineering. 14 (2020) 6.



**EKLER**

**Ek Tablo 1 -** Oceantec dalga enerji dönüştürücü sistemin güç matrisi (tam ölçek)

**Oceantec Güç Matrisi (kW)**

		<b>T<sub>pik</sub> (sn)</b>												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>H<sub>m0</sub> (m)</b>	1	85	87	59	39	25	16	10	7	5	3	2	2	1
	1,5	191	196	133	89	57	36	23	15	10	7	5	3	3
	2	339	348	234	158	101	64	41	27	18	12	9	6	4
	2,5	500	500	364	245	158	101	65	42	28	19	13	10	7
	3	500	500	500	337	228	145	93	61	41	28	19	14	10
	3,5	500	500	500	420	309	196	127	83	55	38	26	19	13
	4	500	500	500	500	401	258	166	109	72	49	34	24	18
	4,5	500	500	500	500	500	326	210	138	92	62	43	31	22
	5	500	500	500	500	500	383	259	170	113	77	54	38	27
	5,5	500	500	500	500	500	389	308	205	137	93	65	46	33

**Ek Tablo 2 -** 1979 yılına ait karakteristik matris

**Karakteristik Matris 1979**

		<b>T<sub>pik</sub> (sn)</b>												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>H<sub>m0</sub> (m)</b>	1	328	541	100	45	22	3	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	17	93	150	68	25	8	0	0	0	0	0	0	0
	2	10	15	5	87	38	8	3	0	2	0	0	0	0
	2,5	1	4	0	7	69	9	1	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	9	21	1	0	0	0	0	0	0
	3,5	0	0	0	0	2	12	5	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	6	0	1	0	0	0	0
	4,5	0	0	0	0	0	0	5	0	7	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0





# ULAŞTIRMA

E-Skuter Şarj İstasyonu Yerlerinin Seçimine İlişkin Bir Yöntem <i>Şimal Eker, Selim Dündar</i> .....	563
E-Skuterlerin Bağdat Caddesi Trafiğine Etkilerinin İncelenmesi <i>Selim Dündar, Ecem Şentürk Berktaş, Milas Ceren Höke, İrem Merve Ulu</i> .....	577
Türkiye'deki Tarihi Kent Merkezlerinde Bisikletli Ulaşım: Sorunlar ve Çözüm Önerileri <i>Gökçe Aydın, Engin Aktürk, Büşra Aktürk</i> .....	593
Bataryalı Elektrikli Otobüsler İçin Kablosuz Şarj İstasyonlu Durakların Belirlenmesi <i>İlyas Cihan Aksoy, Mehmet Metin Mutlu, Yalçın Alver</i> .....	603
Toplu Taşıma Akıllı Kart Verileri ile Yolculuk Transfer Duraklarının Kestirimi <i>Fehmi Can Özer, Hediye Tüydeş Yaman</i> .....	615
İşıksız Kavşaklarda Sürücüsüz Taşıtlarla Ağır Taşıt Etkileşimlerinin İrdelenmesi <i>Serhan Tanyel, İlgin Gökaşar, Selim Dündar, Ali Topal, Burak Şengöz</i> .....	621
Kesintisiz Akımlarda Bağlantılı Otonom Trafikte Makine Öğrenimi ile Gecikme Tahmini <i>İlgin Gökaşar, Kaan Aytakin</i> .....	629
SNS Kaza-Olay Tespit Algoritmasının Bağlı Otonom Araç Trafiğindeki Performansının Değerlendirilmesi <i>İlgin Gökaşar, Sarp Semih Özkan, Alperen Timuroğulları</i> .....	637
İnsansız Teslimat Robotlarının İstanbul'da Pilot Bölge Uygulamalarının Değerlendirilmesi <i>İlgin Gökaşar, Mehmet Akıncılar</i> .....	645
Geogrid Takviyeli Yapı Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi <i>Buğra Sinmez</i> .....	653
Tren Gecikmelerinin Doğru Tahmin Edilmesinde Verinin Önemi <i>Mehmet Şirin Artan, İsmail Şahin</i> .....	663
Yüksek Hızlı Demiryolları: Dünya ve Türkiye Perspektifi <i>İsmail Şahin</i> .....	677



## E-Skuter Şarj İstasyonu Yerlerinin Seçimine İlişkin Bir Yöntem

Şimal EKER<sup>1</sup>, Selim DÜNDAR<sup>2</sup>

### ÖZET

*Bu çalışma kapsamında, e-skuterler için, araçların şarj edilebilmesine de olanak sağlayan park yerlerinin seçimine ilişkin bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmanın örnek bölgesi olarak seçilen, İstanbul'un Maltepe İlçesi'nin Dragos Mahallesi'nde saha çalışmaları gerçekleştirilerek, e-skuter talebi ve talebin değişimi incelenmiş, bu bilgiler ışığında, şarj istasyonu noktalarının seçimine ilişkin bir model geliştirilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak bölgede, kullanıcılar için erişilebilir ve sürdürülebilir şarj istasyonu noktaları belirlenmiştir. Ayrıca kullanıcıları, e-skuterleri bu şarj istasyonlarına park etmeye yönlendirmek amacıyla çeşitli teşvikler (kullanım ücretinde indirim, çeşitli kampanyalar gibi) uygulanması gibi öneriler sunulmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** E-skuter, mikromobilité, yer seçimi.

### ABSTRACT

#### **A Method for E-Scooter Charging Station Site Selection**

*Within the scope of this study, a method has been developed for the site selection of parking spaces for e-scooters that also allow charging of vehicles. Field studies were carried out in Dragos Region of Maltepe District of Istanbul, which was chosen as the sample region of the study, the demand and the change in demand for e-scooters were examined. In the light of this information, a model for the selection of charging station points was developed. Using the data obtained, accessible and sustainable charging station locations for users were determined in the region. In addition, suggestions are offered such as applying various incentives (such as discounts on usage fees, various campaigns) in order to direct users to park e-scooters at these charging stations.*

**Keywords:** E-scooter, micromobility, location search.

---

1 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - seker.998@gmail.com

2 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - selim.dundar@okan.edu.tr

## **GİRİŞ**

Kentlerde artan araç trafiği ve trafikte kaybedilen zaman nedeniyle ulaşım ihtiyacını karşılamaya yönelik yeni arayışların ortaya çıkmasıyla kullanılmaya başlanan mikromobilite araçları aynı zamanda yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik ile çalışabilmeleriyle daha temiz ulaşım olanağı da tanımaktadır. Şarj edilebilir akülere sahip olan elektrikli skuterlerin kullanımı her geçen gün daha çok yaygınlaşmaktadır.

Paylaşımlı hareketlilik; kullanıcıların ihtiyaç duydukları ulaşım seçeneklerine erişim elde etme amacıyla, kısa mesafelerde ulaşım hizmeti vermeyi hedeflemektedir [1]. Paylaşımlı hareketlilik temel olarak ortak kullanılan araçların (bisiklet, skuter, araba gibi), seçilen bölgelerde park edilip, kullanılmaya başlanarak esnek bir varış-kalkış sistemi ile çalışan, kullanıcıların araçları kullandıkları süre boyunca ücret ödemesi yaptıkları bir sistemdir.

Sürdürülebilir kentsel hareketlilik planları içinde yer alan paylaşımlı hareketlilik kavramı, öncelikle araç ve bisiklet paylaşımı olarak ulaşım sistemleri içerisinde yer almıştır. [2]. Daha sonra e-skuterlerin ortaya çıkışı ile paylaşımlı ulaşım hareketlilik kapsamına e-skuter de eklenmiştir. Paylaşımlı e-skuter kullanıcılara ucuz, rahat, esnek ve eğlenceli bir ulaşım olanağı sunmaktadır. Paylaşımlı e-skuter hizmeti veren firmalar kullanıcının mobil cihazına indirdiği bir uygulama sayesinde kendisine en yakın bölgede bulunan e-skuterlerin konumlarını bir harita üzerinde kullanıcıya göstermektedir. Kullanıcı kendisine en yakın e-skutere gittikten sonra araçtaki QR kodunu taramakta, aracın kilidini açmakta ve ardından sürüşe başlamaktadır.

E-skuter yolculukları genel olarak banliyölerden şehir merkezine gidip gelmenin ötesinde kısa ve orta mesafelerde son mil ya da son kilometre ulaşım türü olarak değerlendirilmektedir. Son mil ya da son kilometre otobüs ya da metro gibi bir toplu taşıma durağından son varış noktasına kadar olan yolculuğu ifade etmektedir.

Paylaşımlı e-skuterler genelde topla-şarj et-dağıt ilkesine göre şarj edilmektedir. Nadiren de olsa bazı firmaların e-skuterlerinde batarya değişimi ilkesiyle çalıştığı gözlemlenmiştir. Batarya değişimi yapılan e-skuterler için değişimi yapılan bataryaların atıklarının doğaya zarar verdiği bilinmektedir. E-skuterlerin sürdürülebilir bir ulaşım türü olarak değerlendirilebilmesi için uzun ömürlü bataryaların kullanılması ve şarj edilebilir olması gerekmektedir [3].

Türkiye’de paylaşımlı e-skuter hizmeti firmalar arasında önde gelen dört tanesinin topla-şarj et-dağıt ilkesiyle hizmet verdiği görülmektedir. Toplanan e-skuterler güç kaynağına yerleştirilerek (kablolu ya da kablosuz temas ile) şarj edilir. E-skuterleri, e-bisikletleri doğrudan fotovoltaik paneller kullanan şarj istasyonlarından şarj etmek, güç dönüşüm aşamalarını azaltır ve bisikletçilerin, e-skuter sahiplerinin güç adaptörünü getirmesini gerektirmez, sadece bir DC kablosu gerektirir ve şarj etmek oldukça kolaydır.

## **AMAÇ**

Bu çalışma kapsamında öncelikle e-skuterlerin topla-şarj et-dağıt ilkesi kullanılmaksızın, doğrudan sahada şarj edilebilmelerine olanak sağlamak amacıyla tasarlanacak şarj istasyonlarının yer seçimine ilişkin bir yöntem geliştirilmiştir. Bu sayede şarjı biten taşıtların sahadan toplanması ve şarj edildikten sonra tekrar sahaya getirilmesi için harcanan zaman, işgücü ve enerjiden tasarruf sağlanabilecektir. Daha sonra, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi kullanarak e-skuterlerin şarj edilmesine olanak sağlayan bir şarj istasyonu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylece e-skuter taşıtlarının şarj süreçlerinin daha temiz ve daha sürdürülebilir olması amaçlanmıştır.

## YÖNTEM

### Çalışma Bölgesi

Maltepe, İstanbul'un Anadolu yakasında Marmara Denizi'ne kıyısı olan bir ilçedir. Kadıköy, Kartal, Sancaktepe ve Ataşehir İlçeleri ile komşu olan Maltepe nüfus bakımından İstanbul'un dokuzuncu, Anadolu Yakası'nın dördüncü büyük ilçesi konumundadır. Demiryolu ve karayolu ulaşımına da sahip olan Maltepe'nin tarihi Bizans'a kadar dayanmaktadır. 2021 TÜİK verilerine göre Maltepe'nin nüfusu 525566 kişidir. [4]. Bu da kilometrekare başına yaklaşık 9459 kişilik bir nüfus yoğunluğu oluşturmaktadır. Maltepe İlçesi'nin konumu Şekil 1'de görülmektedir.

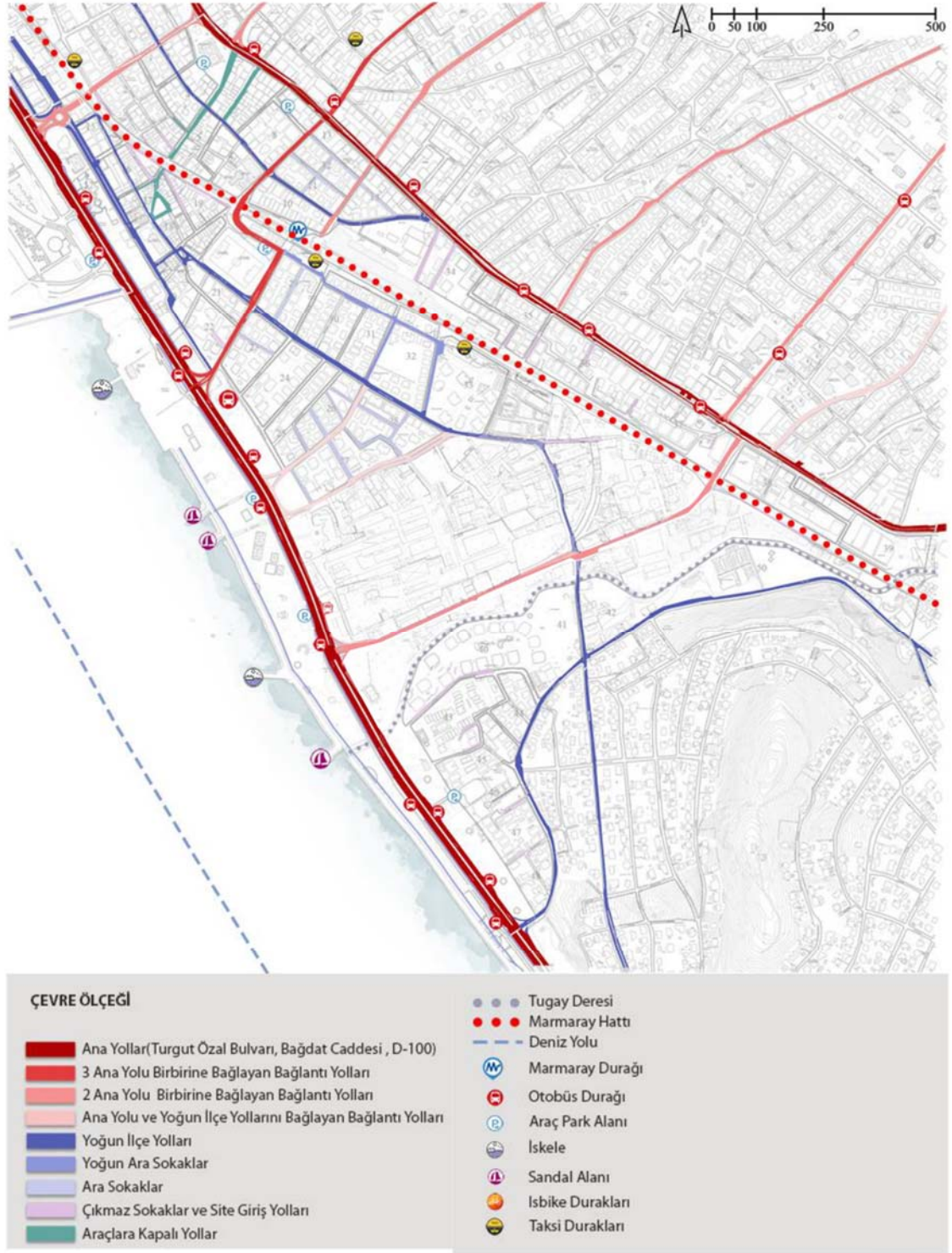
Maltepe İlçesi'nin örnek çalışma bölgesi olarak, yaya ya da mikromobilité sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen yolculukların daha fazla olduğu Turgut Özal Bulvarı ve Bağdat Caddesi çevresinde bulunan kesim seçilmiştir. Her iki cadde de doğu-batı ekseninde uzanmaktadır. Bölgede doğu-batı yönü ana aks özelliği taşırken, kuzey-güney yönünde ise bu aksları besleyici hatlar bulunmaktadır. Şekil 2'de çalışma bölgesinin ulaşım olanakları, Şekil 3'te yol genişlikleri, Şekil 4'te ise taşıt dolaşımı analizi sunulmaktadır.



Şekil 1 - Maltepe İlçesi'nin konumu

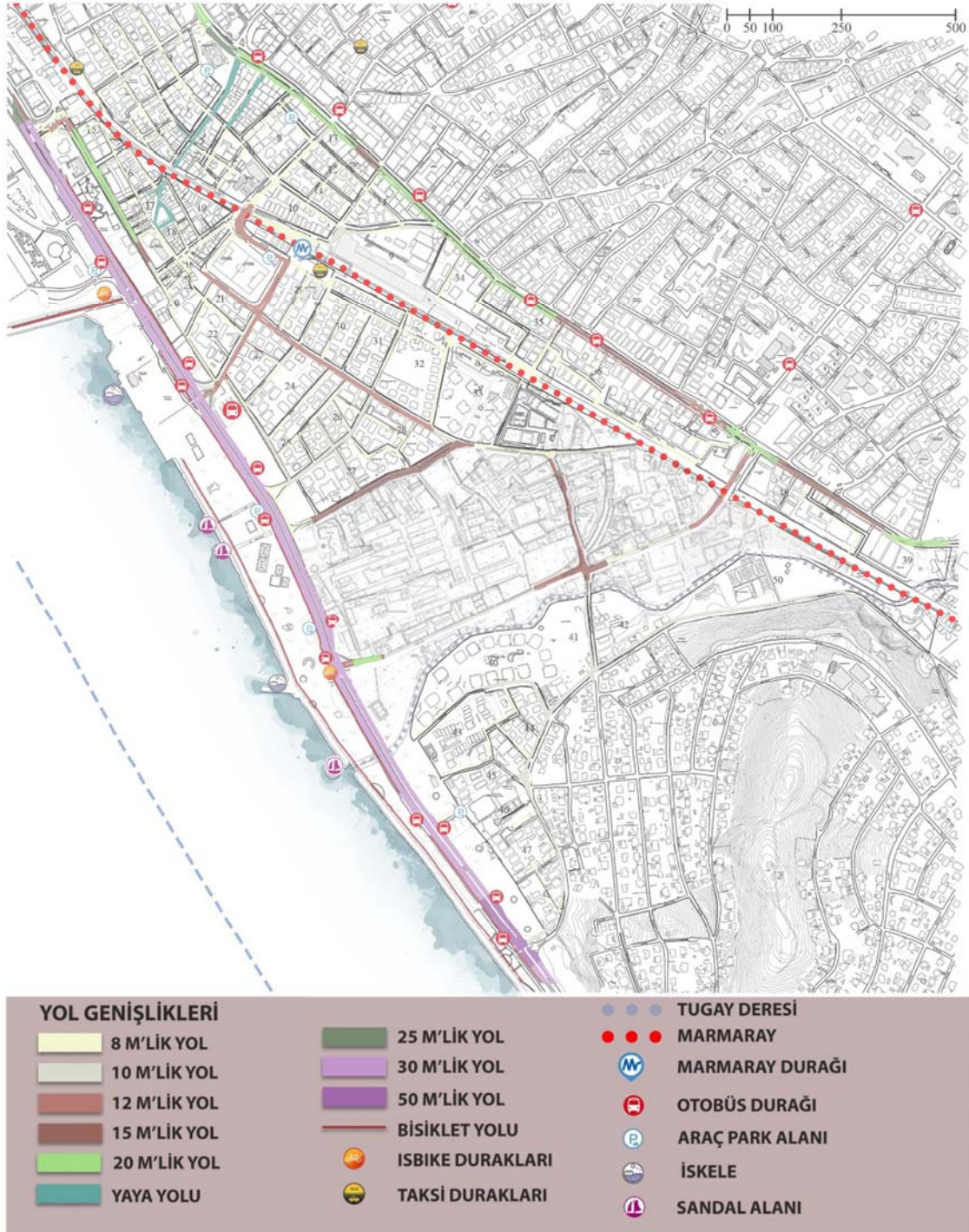
### Veri Toplama ve Değerlendirme

Belirlenen çalışma bölgesinde, 4 Nisan - 24 Nisan 2022 tarihleri arasında; 21 günlük bir analiz sonucunda e-skuterlerin buldukları noktalar, e-skuter paylaşım hizmeti veren firmaların mobil uygulamaları üzerinden incelenmiştir. Bu noktalar belirlenirken öncelikle hafta içi ve hafta sonları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte gündüz ve gece saatleri için de ayrı incelemeler gerçekleştirilmiştir. Gündüz inceleme yapılan saat aralıkları 09.00-19.00, gece inceleme yapılan saat aralıkları da 00.00-03.00 olarak belirlenmiştir. 21 gün sonucunda belirlenen saat dilimlerinde her gün e-skuterlerin bulunduğu konumlar paylaşımlı e-skuter hizmeti veren firmaların mobil uygulamalarından saptanmıştır (Şekil 5). Daha sonra dijital bir harita üzerinde her bir e-skuterin bulunduğu konum bir nokta olarak işaretlenmiştir. Sonrasında işaretlenen noktaların biriktiği yerlerde, e-skuter sayısına bağlı olarak boyutu değişen yoğunluk daireleri oluşturulmuştur (Şekil 6).

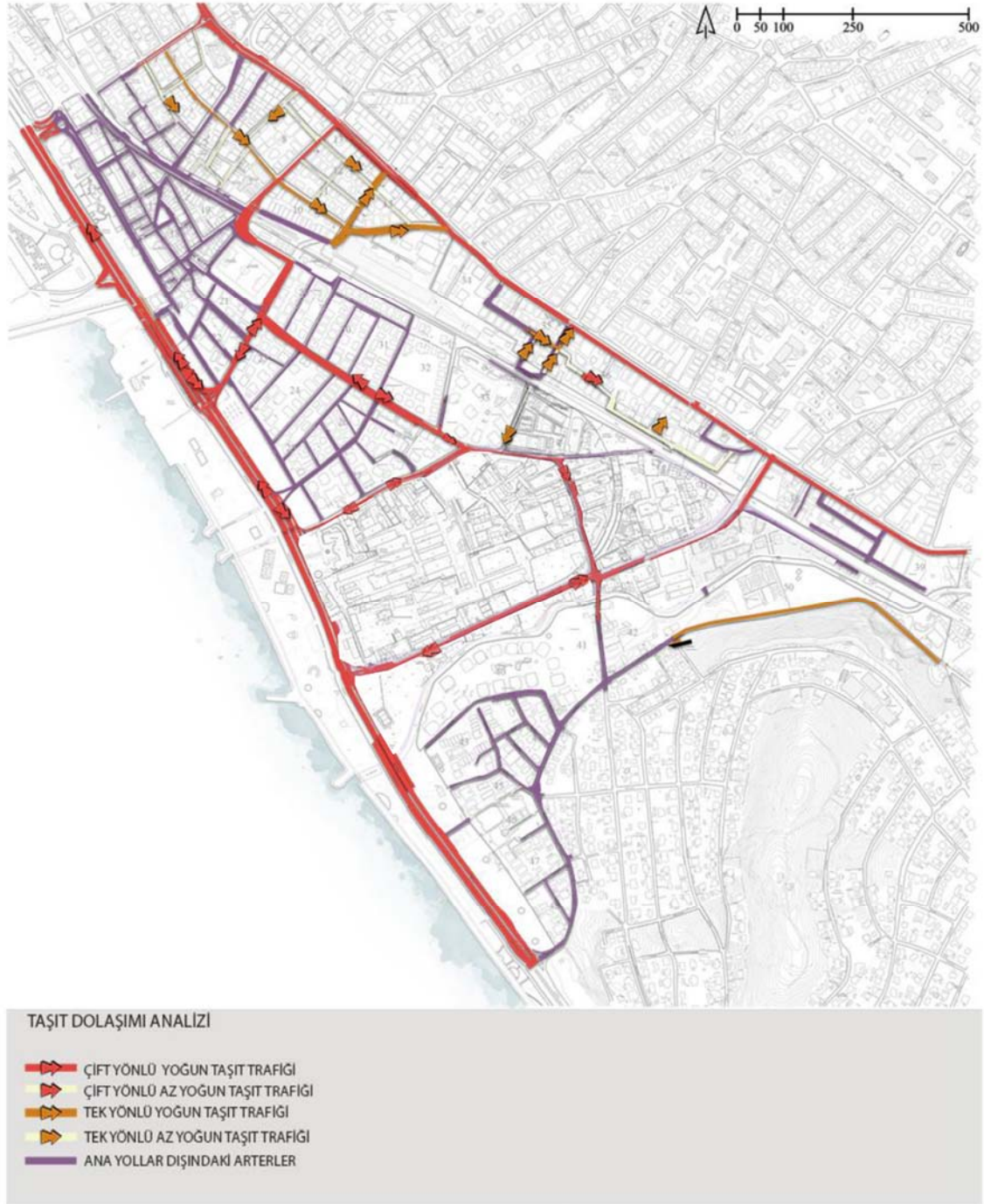


Şekil 2 - Çalışma bölgesinin ulaşım olanakları

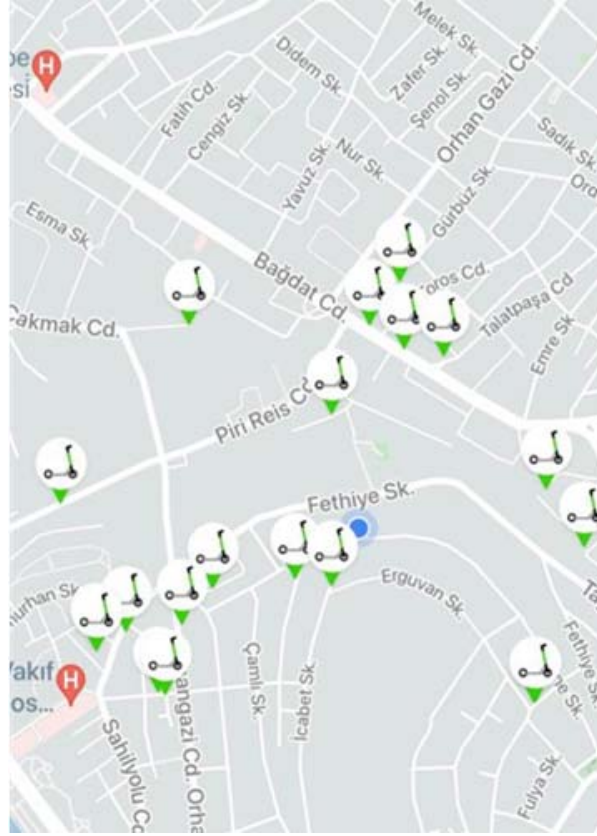




Şekil 3 - Çalışma bölgesindeki yol genişlikleri



Şekil 4 - Çalışma bölgesinin taşıt dolaşım analizi

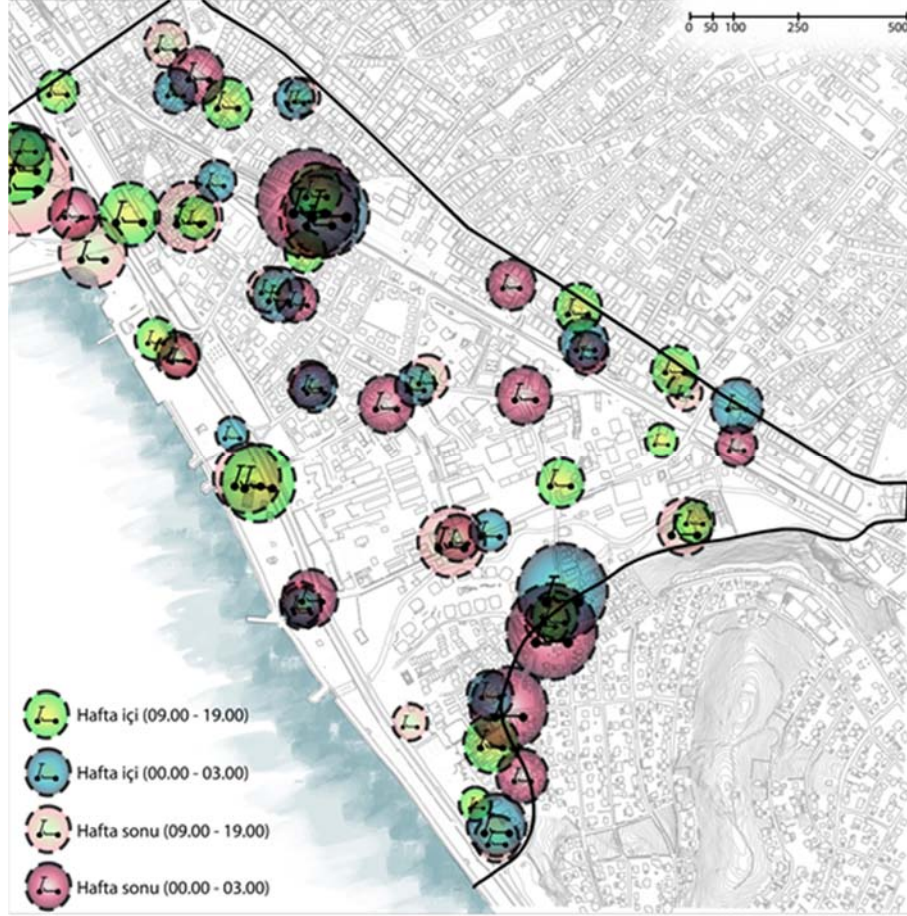


Şekil 5 - Paylaşımlı e-skuter hizmeti veren bir firmanın uygulamasından 11.04.2022 tarih ve 01:36 saatinde alınan ekran görüntüsü



Şekil 6 - Hafta içi, gündüz saatlerinde e-skuterlerin biriktiği noktaları gösteren yoğunluk haritası

Hafta içi gündüz, hafta içi gece, hafta sonu gündüz ve hafta sonu gece saatleri için çıkarılan yoğunluk haritaları daha sonra tek bir harita üzerinde birleştirilerek, Maltepe-Dragos bölgesinde 21 günlük süreçte e-skuterlerin biriktiği ana bölgeler elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7 - Çalışma bölgesinde 21 günlük çalışma süresinde elde edilen genel yoğunluk haritası

### Şarj İstasyonu Noktalarının Saptanması

Çıkarılan genel yoğunluk haritasının incelenmesinden sonra kullanıcıların e-skuterleri bırakmayı tercih ettiği bölgelerde şarj istasyonu noktası oluşturulabilecek alanlar incelenmeye başlamıştır. Noktalar belirlenirken e-skuter yoğunluğu haritasının yanında yapılan diğer incelemeler (ulaşım olanakları, sosyal donatılar, eğitim tesislerine, sağlık tesislerine, dini tesislere ve spor tesislerine erişilebilirlik) göz önüne alınmıştır. Kullanıcıların şarj istasyonlarına erişilebilirlikleri ve arazi kullanımı istasyon noktalarının belirlenmesinde önemli iki etken olmuştur. İncelemeler sonucunda çalışma bölgesinde 4 ayrı konumda şarj istasyonu yapılmasının uygun olacağı saptanmıştır. Şarj istasyonu olarak seçilen konumlar Şekil 8'de görülmektedir.

Birinci şarj istasyonunun konumu sahilde, Maltepe Sahili Dolgu Alanı'nın başlangıcı olan bölgede belirlenmiştir. Seçilen alanda aynı zamanda bisikletlerin de park alanı olduğu çevresinde ise araç otoparklarının bulunduğu görülmüştür. Şarj istasyonunun özellikle doğu batı sahil aksı boyunca, Maltepe Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi öğrencilerine ve çevresindeki konut bölgelerine hizmet edeceği düşünülmüştür.

İkinci şarj istasyonunun konumu Marmaray Hızlı Tren İstasyonu durağı yanı olarak belirlenmiştir. Önemli bir ulaşım alternatifi olan trene ulaşmak amacıyla e-skuterlerin bu bölgede

özellikle son kilometre yolculukta çok sık kullanıldığı tespit edilmiş olup kullanıcıların e-skuterleri burada şarj istasyonuna bırakarak yolculuklarına devam etmeleri amaçlanmıştır. İstasyonun yine bu noktaya yakın bir mesafede bulunan Maltepe Hasan Polat Stadyumu ve çevredeki konut bölgelerinde yaşayan e-skuter kullanıcılarına hizmet edeceği de düşünülmüştür.



Şekil 8 - Saptanan e-skuter şarj istasyonu konumları

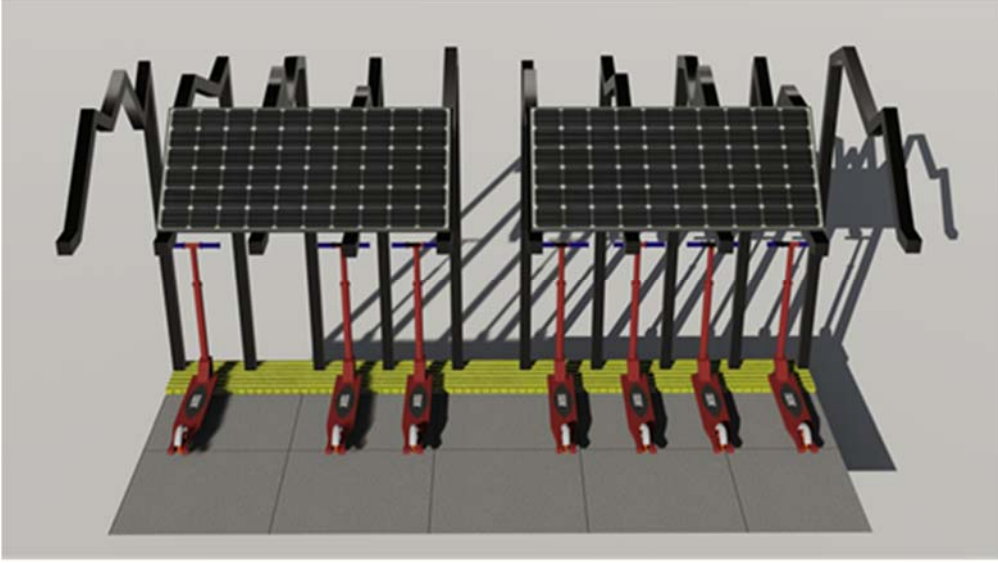
Üçüncü şarj istasyonunun konumu alanın kuzeyinde, yoğun bir aks olan Bağdat Caddesi'nde bir benzin istasyonu önü olarak belirlenmiştir. Bu şarj istasyonunun konumu hem kuzey-güney hem de doğu-batı akslarında, çevresindeki konut bölgelerine ve çevredeki eğitim kuruluşlarına hizmet edeceği düşünülmüş olarak belirlenmiştir.

Dördüncü şarj istasyonu ise alanın güney doğusunda sahil kesiminde Dragos-Sahil Yolu Bağlantı Yolu'nda bulunmaktadır. Belirlenen şarj istasyonunun konumu e-skuter kullanıcıları için sahil yolu aksı üzerinde bulunmakla birlikte, yakın bir konumda bulunan Bezmialem Vakıf Üniversitesi Dragos Hastanesi'ne ve Dragos'taki konutlara hizmet etmesi amaçlanmıştır.

### Güneş Enerjisi ile Çalışan E-skuter Şarj İstasyonu Tasarımı

Çalışma kapsamında e-skuterlerin temiz, doğal ve sürdürülebilir bir enerji türü olan güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirerek şarj edilmesi amaçlanmıştır. Bu şarj istasyonlarında amacına uygun güneş paneli, şarj istasyonu tipi (kablolu - kablosuz), güneş panellerini taşıyabilecek güçte bir malzeme seçimi gibi çeşitli ölçütler bulunmaktadır. Daha uzun süreli ve

daha ergonomik bir kullanım amaçlandığı için kablosuz şarj sistemi seçilmiştir. Bu sayede kullanıcılar şarj istasyonu sınırları içinde e-skuterlerini istedikleri noktada şarj etme olanağına sahip olabilmektedir. Kablosuz şarj sisteminde bir e-skuter yaklaşık olarak 200 W enerji harcamaktadır [2]. Şarj istasyonu için iki adet 98x100x5 cm boyutlarında ve yaklaşık 29 kg ağırlığındaki güneş panelleri tercih edilmiştir. Taşıyıcı sistem malzemesi olarak bu özelliklere sahip güneş panellerini taşıyabilecek ve yeniden kullanılabilir ya da dönüştürülebilir olması nedeniyle sürdürülebilir bir malzeme olan çelik seçilmiştir. Güneş panellerinin yerleştirilme açısı İstanbul için önerilen 39 derece [5] olarak saptanmıştır. Elektriği çağırması adına farklı kırılma açılarına sahip, zikzak-kırıklı düzensizliğe sahip bir tasarım tercih edilmiştir. Şekil 9'da tasarlanan güneş enerjisi ile çalışan e-skuter şarj istasyonu görülmektedir.



**Şekil 9** - Tasarlanan güneş enerjisi ile çalışan e-skuter şarj istasyonu



**Şekil 10** - Birinci konuma yerleştirilmiş elektrikli şarj istasyonu tasarımı

Belirlenen şarj istasyonu konumlarına güneş enerjisi ile çalışan e-skuter şarj istasyonu konumlandırılırken en yüksek verimi elde etmek için bu konumlarda güneş panellerinin güney ve güney-batı yönlerinde olmasına özen gösterilmiştir. Maltepe Sahili dolgu alanı başlangıcı da olan

birinci şarj istasyonu güney yönlü yerleştirilmiştir (Şekil 10). Burada panellerin güneşe yönelmesi amaçlandığı için istasyon kaldırıma ters olarak yerleştirilmiştir. Bu durumda e-skuterlerin yeşil alana denk gelmesi nedeniyle istasyondan rahatlıkla çıkarılabilmesi için önünde 1 metrelik bir alan oluşturulmuş ve bu alanın yeşil alan içindeki yaya yoluna bağlantısı tasarlanmıştır. Maltepe Marmaray tren istasyonu durağına, şarj istasyonu yine güneş panelleri güney-batıya yönlenecek şekilde, yaya hareketlerini etkilememesi amacıyla duvar kenarına konumlandırılmıştır (Şekil 11). Üçüncü şarj istasyonu noktası olan Bağdat Caddesi'nde benzin istasyonu önüne yerleştirilen şarj istasyonu da önündeki geniş kaldırıma bakacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 12). Dragos sahil yolu bağlantı noktasında bulunan yeşil alanda dördüncü şarj istasyonu güneş panelleri güney yönlü ve kullanıcıların e-skuterleri alıp sert zeminde sürüşlerine devam edebilecekleri şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 13).



Şekil 11 - İkinci konuma yerleştirilmiş elektrikli şarj istasyonu tasarımı



Şekil 12 - Üçüncü konuma yerleştirilmiş elektrikli şarj istasyonu tasarımı



**Şekil 13** - Dördüncü konuma yerleştirilmiş elektrikli şarj istasyonu tasarımı

## SONUÇ

Kent içinde durak niteliği taşıyacak olan bir e-skuter şarj istasyonunun yerleştirilmesi gereken konum belirlenirken birçok etken göze alınmalıdır. Bu tipte bir çalışma için öncelikle bir örnek çalışma bölgesi seçilmeli ve kentin dokusu incelenmelidir. Çeşitli incelemeler (kentin tarihi ve ulaşım yapısı, arazi eğimi, eğitim ve sağlık tesislerinin konumları, sosyal donatıların (alışveriş merkezi, spor tesisleri, varsa imgesel bir yapı vb.) konumları ve erişilebilirliği gibi) ortaya sunulduktan ve değerlendirildikten sonra e-skuterlerin yoğun olarak bırakıldıkları konumlar belirlenmelidir. Bunun için bir zaman aralığı boyunca incelemeler gerçekleştirilip, bu süreçteki farklı zaman dilimlerine ait veriler toplanmalıdır. Tüm elde edilen veriler bir arada değerlendirilerek kentin bir parçası olacak olan e-skuter şarj istasyonu konumları belirlenmelidir. Uygun bir tasarımın yapılmasının ya da seçilmesinin ardından seçilen noktalara en uygun (panellerin güneşlenme süresi ve yönüne dikkat ederek, kullanıcıların erişim kolaylığını ön planda tutarak, alanı doğru yöneterek ve çevresindeki hareketliliği olumsuz etkilemeyecek) biçimde yerleştirilmelidir. Kullanıcıların taşıtları gelişigüzel park etmelerinin önüne geçmek ve şarj istasyonlarını kullanmaya teşvik etmek amacıyla çeşitli özendirilmelerin yapılması da faydalı olabilir. Örneğin araçlarını bu noktalara park eden kullanıcıların daha düşük ücret ödemesi değerlendirilebilir. Bu sayede, topla-şarj et-dağıt yönteminin işgücü, zaman ve enerji kaynaklı çeşitli olumsuzluklarının da önüne geçilebilir. Araç park noktası olarak şarj istasyonlarının kullanılması tamamen kullanıcı tercihine bırakılmayarak, zorlayıcı bir unsur olarak da uygulanabilir. Ancak bu uygulama e-skuter paylaşım hizmeti veren tüm firmalar tarafından uygulanmadığı durumda, bu uygulamayı yapmayan firmaların lehine bir üstünlük doğmasını da sağlayabilir.

Kentlerimizde mikromobilité sistemlerini destekleyecek ulaşım planları göz önüne alındığı koşulda, özellikle elektrikle çalışan bisiklet ve skuterlerin şarj olanakları için istasyonların oluşturulması ve uygun bir teknoloji ya da yapıyla donatılmaları en azından bu sistemler için daha temiz, çevreci ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi ortaya koymak için yararlı olacaktır.



### **Kaynaklar**

1. Khande, M.S., Patil, A., Andhale, GC., Shirsat, R.S., “Design and Development of Electric Scooter,” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2020, 07(05), 359-364.
2. Ertoy Sarıışık, B., Yalçın Ercoşkun, Ö., “Dünyada ve Türkiye’de Mikro Hareketlilikte E-Scooter Sistemleri,” Eksen Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2021, 2(1), 72-94.
3. Şahin, U., Türeci, Ö., “Martı,” BPT Dergi, 2021, 1, 71-73.
4. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2021, Erişim adresi: <https://www.tuik.gov.tr/> Son erişim: 17.05.2022.
5. <https://www.aydinlatma.org/81-il-icin-onerilen-gunes-paneli-egim-acisi.html> Son erişim: 17.05.2022.



## E-Skuterlerin Bağdat Caddesi Trafikğine Etkilerinin İncelenmesi

Selim DÜNDAR<sup>1</sup>, Ecem ŞENTÜRK BERKTAŞ<sup>2</sup>, Milas Ceren HÖKE<sup>3</sup>, İrem Merve ULU<sup>4</sup>

### ÖZET

*İstanbul'un Kadıköy İlçesi'nin önemli arterlerinden birisi olan Bağdat Caddesi çok tercih edilen alışveriş ve rekreasyon alanlarından olması sebebiyle e-skuter kullanıcıları tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Bağdat Caddesi üzerinde toplanan trafik talep ve sinyal süresi verileri kullanılarak PTV VISSIM programında trafiğin mevcut durumu modellenmiştir.*

*E-skuterlerin trafikte bulunma oranları ile taşıt taleplerindeki değişimler kullanılarak farklı senaryolar oluşturulup analizler yapılmış ve trafik koşullarının nasıl değiştiği incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarının karma trafik koşullarında e-skuterlerin davranışlarının nasıl olması gerektiği konusunda bir fikir vermesi beklenmektedir. Bu sayede e-skuter üreticilerinin içinde buldukları toplum ve trafik koşullarına daha uygun araçlar üretebilmeleri beklenmekte ve toplumun bundan fayda sağlaması hedeflenmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** E-skuter, mikromobilité, trafik mühendisliği, PTV VISSIM.

### ABSTRACT

#### **Investigation of E-Scooters' Effects on Bagdat Avenue Traffic**

*Bagdat Avenue, one of the important arteries of Kadıköy District of Istanbul, is frequently used by e-scooter users as it is one of the most preferred shopping and recreation areas. Within the scope of this study, the current situation of the traffic was modeled in the PTV VISSIM microsimulation software by using the present traffic demand and signal timing data collected on Bagdat Avenue.*

*Using the rates of e-scooters in traffic and the changes in vehicle demands, different scenarios were created and analyzed, and how the traffic conditions changed was examined. The results of the study are expected to give an idea about how e-scooters should behave in mixed traffic conditions. In this way, it is expected that e-scooter manufacturers will be able to produce vehicles*

---

1 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - selim.dundar@okan.edu.tr

2 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - ecem.senturk@okan.edu.tr

3 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - ceren.hoke@okan.edu.tr

4 İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul - irem.ulu@okan.edu.tr

*that are more suitable for the society and traffic conditions they are in, and it is aimed that the society will benefit from this.*

**Keywords:** *E-scooter, micromobility, traffic engineering, PTV VISSIM*

## **GİRİŞ**

Son yıllarda gündelik hayatımıza giren elektrikli skuterler (e-skuterler) taşıt paylaşım firmalarının piyasaya girmesiyle giderek daha popüler bir ulaşım türü haline gelmiştir. Motorlu taşıt kullanımına kıyasla daha çevreci bir yapıya sahip olduğu algısı bulunan e-skuterler özellikle kısa mesafelerde gençler tarafından önemli bir ulaşım alternatifi olarak kullanılmaktadır.

E-skuter kullanımına olan talep artmasına rağmen, bu taşıtların neden olduğu bazı olumsuzluklar da bulunmaktadır. Bunların başında özellikle kavşak kesimlerinde motorlu taşıtlarla ve yayalarla girdikleri tehlikeli etkileşimler nedeniyle karayolu trafik güvenliğini düşürmesi gelmektedir. Bunun yanı sıra, motorlu taşıtlardan çok daha düşük işletme hızlarına sahip olduklarından (örneğin Türkiye’de izin verilen en yüksek hız 25 km/sa’dır [1]) trafik akımının homojenliğini bozmakta ve trafik akım özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Mikromobilitate taşıtlarının karayolu trafik akımına bu olumsuz etkilerinin boyutlarının detaylı bir biçimde incelenmesi, bu sistemler için sosyal fayda/maliyet analizlerinin gerçekleştirilebilmesini sağlayacaktır. Bu amaçla, çeşitli ince boyutlu benzetim (mikrosimülasyon) yazılımları kullanılarak, şehir için trafiğin modellenmesi ve farklı düzeylerde mikromobilitate taşıt talebi eklendiğinde karşılaşılabilecek farklılıkların incelenmesi faydalı olacaktır.

E-skuter hizmetleri, paylaşımlı bisiklet ve paylaşımlı araba gibi uygulamaları olan diğer paylaşımlı mobilitate araçlarının aksine, sabit bir istasyon olmadan serbest bir hizmet sunduğundan kullanıcılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. E-skuter kullanıcıları araçlarını istenen alana bırakabilme avantajına sahiptir; ancak, bu durum trafik kazaları ve yaya kullanım ortamlarının olumsuz etkilenmesi gibi kentsel bazı sorunlara neden olabileceğinden dezavantajları da vardır [2,3]. E-skuterlerin kullanım talebi olmayan alanlardan talebin yüksek olması beklenen alanlara taşınması etkin kullanım sağlanması açısından etkili bir çözüm sağlayabilir. Bu çözüme ulaşabilmek için belirli kentsel alanlarda e-skuter talep oranlarının belirlenmesi/tahmin edilmesi önem taşımaktadır.

Paylaşımlı e-skuter verilerinin kullanıldığı daha önceki çalışmalarda, temel seyahat özellikleri [4,5,6,7] analiz edilmiş ve talebi etkileyen faktörler (cinsiyet, yaş, eğitim düzeyi, gelir düzeyi, nüfus yoğunluğu, arazi kullanım çeşitliliği, şehir merkezine uzaklığı, toplu taşıma erişilebilirliği, bisiklet yolu ve kavşak yoğunluğu gibi) ve etkileri belirlenmiştir [8,9,10,11].

## **AMAÇ**

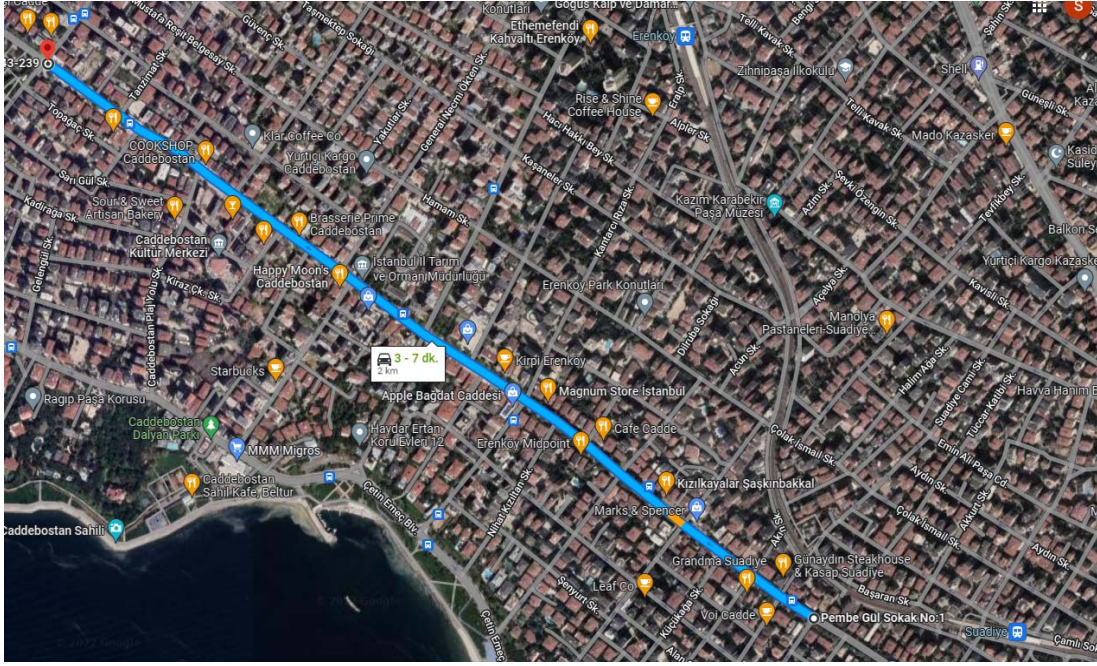
Bu çalışma kapsamında e-skuterlerin kent içi trafiğine ve özellikle de trafik akımının sınır koşullarına olan etkileri PTV VISSIM ince boyutlu benzetim programı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın bulguları kullanılarak, e-skuterlerin trafiğe olan etkilerinin en olumlulanması için önerilerde bulunulmuştur.

## **YÖNTEM**

E-skuterlerin kent içi trafiğine etkilerinin incelenmesi için İstanbul ilinin Anadolu Yakası’nda bulunan Bağdat Caddesi örnek bölge olarak seçilmiştir. Bağdat Caddesi, doğuda Maltepe İlçesi sınırlarından başlayarak, batıda Kızıltoprak Senti’ne kadar uzanmakta olan yaklaşık 7 km uzunluğunda bir caddedir. Cadde üzerinde çok sayıda mağaza ve dükkan bulunduğu gibi,

yakınlarında da çok sayıda yeşil alan ve eğlence tesisi bulunmaktadır. Cadde üzerindeki konut ve dükkan fiyatları ve kiralari yüksek düzeyde olduğundan genellikle gelir düzeyi yüksek kesimin ikamet ettiği bir bölgedir. Ancak her kesimden insan cadde ve çevresini alışveriş ve gezinti amaçlı kullanmaktadır.

E-skuterlerin trafiğe olan etkilerinin incelenmesi için, caddenin tek yönlü araç trafiğine izin verilen, 3 şeritli, bisiklet yolu içermeyen ve yaya ile e-skuter talebi daha yüksek olan Şaşkınbakkal-Göztepe arasındaki yaklaşık 2 km uzunluğundaki kesimi seçilmiştir. Bu kesime ilişkin uydu görüntüsü Şekil 1’de görülmektedir.



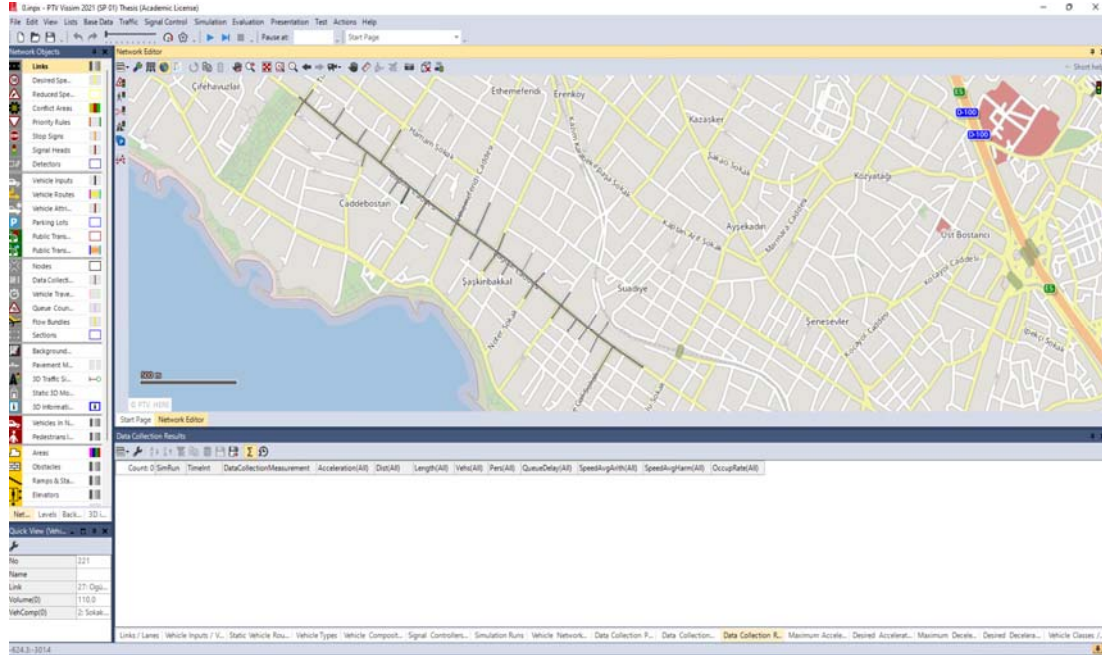
Şekil 1 - Bağdat Caddesi üzerindeki çalışma bölgesi [12]

Bağdat Caddesi trafiğinin özelliklerinin incelenmesi amacıyla sıradan bir hafta içi günü olan 30 Mart 2022 günü, e-skuter kullanımının da yüksek olduğu zaman aralığı olan 15:00-17:00 saatleri arasında trafik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, anayolun yanı sıra her bir sokaktan Bağdat Caddesi’ne katılan saatlik trafik hacimleri ölçülmüştür. Ölçülen trafik hacimleri Tablo 1’de görülmektedir. Ayrıca, kavşak kesimlerinde düz giden ve dönüş yapan taşıt oranları ve bu kesimde bulunan 9 adet trafik sinyalinin faz diyagramları da incelenmiştir.

Daha sonra Bağdat Caddesi ve üzerindeki trafiğe ilişkin elde edilen veriler PTV VISSIM 2021 ince boyutlu benzetim yazılımında modellenmiştir. Öncelikle yazılımın kendi içinde bulunan harita özelliği kullanılarak, Bağdat Caddesi’nin Şaşkınbakkal-Göztepe arasındaki kesimi ve bu kesimi kesen sokaklar şerit sayıları ve şerit genişlikleri göz önüne alınarak çizilmiştir. Daha sonra, Tablo 1’de görülen trafik hacimleri göz önüne alınarak, Bağdat Caddesi ve cadde ile kesişen her bir sokaktan gelen saatlik trafik talepleri yazılıma tanımlanmıştır. Bağdat Caddesi, Ethem Efendi Caddesi ve Ömerpaşa Sokak üzerine hatlı otobüsler de işlediğinden, bu üç kesimden sisteme katılan taşıtların bileşimi %97 otomobil, %2 ağır taşıt ve %1 otobüs, diğer sokaklardan sisteme katılan taşıtların bileşimi ise %99 otomobil ve %1 ağır taşıt olarak tanımlanmıştır. Cadde üzerinde 50 km/sa hız sınırı bulunduğundan tüm araç tipleri için tercih edilen hız değeri 50 km/sa olarak tanımlanmıştır. Daha sonra caddenin incelenen kesiminde bulunan 9 adet trafik ışığının sinyal fazları yazılıma ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Tablo 1 - Ölçülen trafik hacimleri

Cadde/Sokak Adı	Saatlik Trafik Hacmi (tş/sa)
Bağdat Caddesi	2500
Pembegül Sokak	110
Mücahit Sokak	30
Akın Sokak	145
Kazım Özalp Sokak	250
Noter Sokak	360
Köşk Sokak	145
Nihat Kızıltan Sokak	70
Abdülkadir Noyan Sokak	290
Şerafettin Sokak	70
Ethemefendi Caddesi	300
İskele Sokak	430
Oğün Sokak	110
Ömerpaşa Sokak	500
Sarıgül Sokak	70
Tanzimat Sokak	145
Hulusi Behçet Caddesi	720
Tütüncü Mehmet Efendi Caddesi	500



Şekil 2 - PTV VISSIM’de geliştirilen benzetim modeli

Trafiğin ölçülmesinin (kalibrasyonunun) gerçekleştirilmesi ve veri toplanması için saha çalışması sırasında da gözlemlenen Ethemefendi Caddesi ile İskele Sokak arasındaki kesimdeki her bir şeride birer adet veri toplama noktası (Data Collection Point) eklenmiştir. Benzetim yazılımı 4500 saniye boyunca çalıştırılmış, ilk 900 saniye modelin ayarlanma dönemi (warm-up period) olarak tanımlandığından 900-4500. saniyeler arasında, 60'ar saniye aralıklarla hacim, hız, gecikme ve işgaliye (occupancy) verileri toplanmıştır. Benzetim modeli üzerinde 10 farklı rastgele alt senaryo (random seed) tanımlanmış ve her senaryo için veri toplama noktalarından toplanan saatlik hacim değerlerinin sahada gözlenen değerlere en azından %95 oranında uyumu sağlanarak benzetimin ölçülmesi ve doğrulaması (validasyonu) sağlanmıştır. Ölçülmesi ve doğrulaması tamamlanan PTV VISSIM benzetim modeline ilişkin ekran görüntüsü Şekil 2'de görülmektedir.

Geliştirilen benzetim modeli üzerinde sistemin başarımı (performansı) her bir şeritte bulunan veri toplama noktası üzerinden toplanan dakikalık trafik hacim değerlerinin birleştirilerek, saatlik değerlere dönüştürülmesi ve saatlik ortalama hızların elde edilmesi ile değerlendirilmiştir. Ancak her bir alt senaryonun sonuçlarının ayrı ayrı değerlendirilmesi yerine 10 alt senaryodan elde edilen değerlerin ortalaması göz önüne alınarak değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Tek bir genel trafik senaryosu kullanılarak başarımlar değerlendirilmesi yeterli olmayacağından ölçülmüş model temel alınarak, Tablo 1'de görülen saatlik trafik talebi değerleri değiştirilerek, 8 ayrı senaryo daha geliştirilmiştir. Geliştirilen senaryolara ilişkin bilgi Tablo 2'de görülmektedir. Bu senaryolarda Bağdat Caddesi'ndeki ve/veya diğer tüm yollardaki trafik talep değerleri ya yarıya indirilmiş ya da iki katına çıkarılmıştır. Sonrasında veri toplama noktaları kullanılarak her bir senaryo için bir saat boyunca, birer dakikalık aralıklarla her bir şeritteki hacim ve hız değerleri ölçülmüş ve trafik akımının temel bağıntısı olan

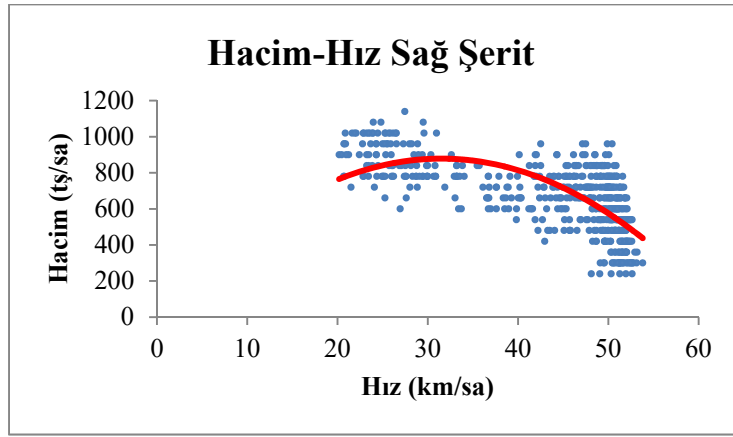
$$hacim = hız \times yoğunluk \quad (1)$$

ilişkisi kullanılarak, yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

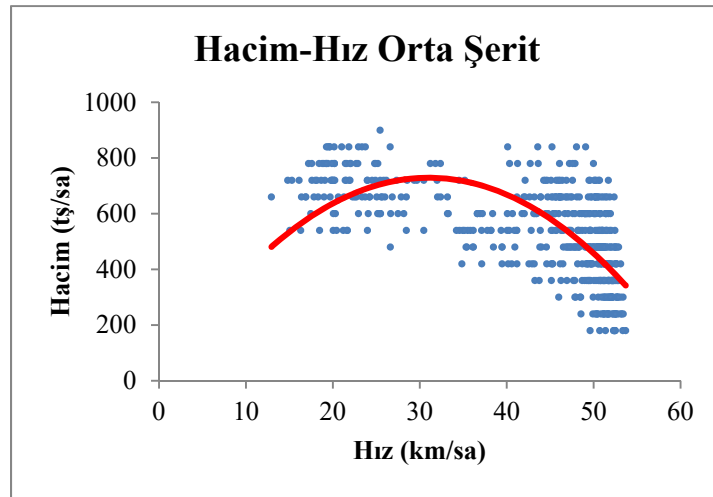
**Tablo 2 - PTV VISSIM'de incelenen örnek senaryolara ilişkin katsayılar**

Senaryo	Anayol (Bağdat Caddesi) Saatlik Trafik Hacim Katsayısı	Yan Sokak/Caddeler Saatlik Trafik Hacim Katsayısı
Temel Senaryo (Senaryo 1)	1	1
Senaryo 2	1	2
Senaryo 3	1	0.5
Senaryo 4	0.5	1
Senaryo 5	0.5	2
Senaryo 6	0.5	0.5
Senaryo 7	2	1
Senaryo 8	2	2
Senaryo 9	2	0.5

Daha sonra, 9 senaryonun tümünden elde edilmiş 1'er dakikalık hacim, hız ve yoğunluk değerleri kullanılarak, her bir şerit için ayrı ayrı hız-hacim, hacim-yoğunluk ve hız-yoğunluk ilişkileri Microsoft Excel yazılımı kullanılarak çizdirilmiştir. Çizdirilen hız-hacim grafikleri şekil 3-5, hacim-yoğunluk grafikleri şekil 6-8 ve hız-yoğunluk grafikleri ise şekil 9-11'de görülmektedir. Çizdirilen grafikler üzerinden her bir şeritteki sınır koşulları olan en yüksek hacim ( $q_{maks}$ ), tıkanıklık yoğunluğu ( $k_t$ ) ve serbest akım hızı ( $u_s$ ) elde edilmiştir. Bu değerlerin doğrudan grafiklerden elde edilebilmesi için eğilim çizgileri çizilerek, değişkenler arasındaki bağıntı oluşturulmuştur. Hız-yoğunluk arasındaki ilişki doğrusal, hacim-yoğunluk ve hacim-hız arasındaki ilişki ise 2. derece olarak tanımlanmıştır. Bu ilişkinin doğrudan Excel'den okunabilmesi amacıyla şekil 3-5 arasında görülen hacim-hız grafikleri literatürdeki örneklerinin aksine, hacim düşey, hız ise yatay eksende gösterilerek çizdirilmiştir. Her bir şeritten elde edilen sınır koşulları Tablo 3'de görülmektedir.

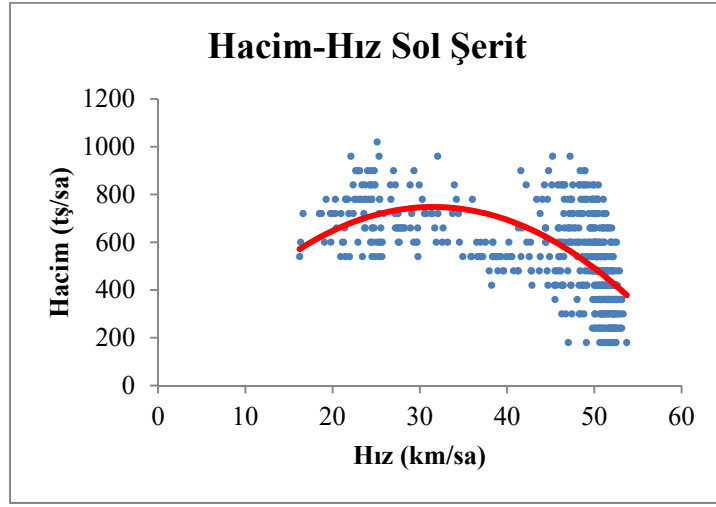


şekil 3 - Sağ şerit için elde edilen hacim-hız grafiği

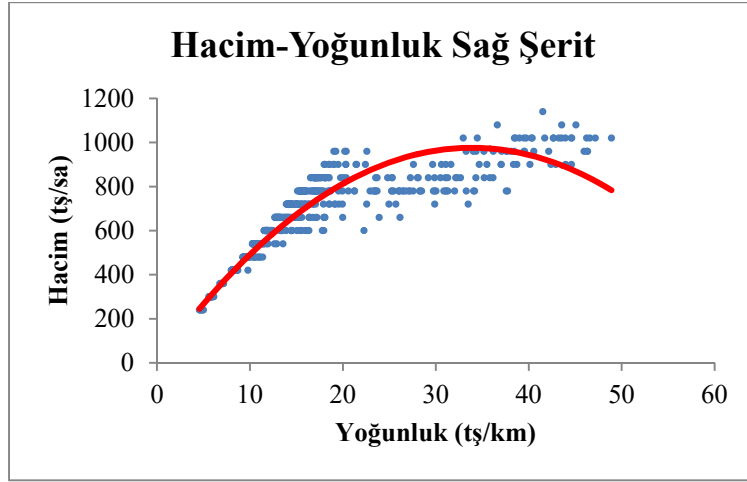


şekil 4 - Orta şerit için elde edilen hacim-hız grafiği

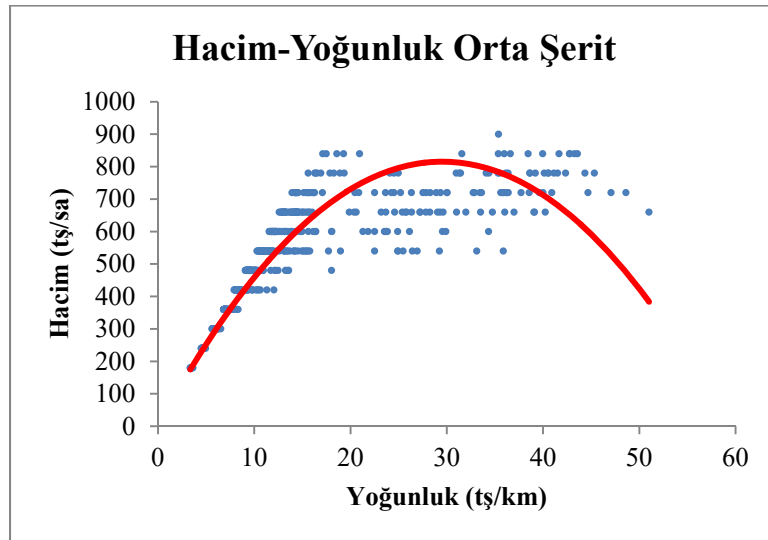




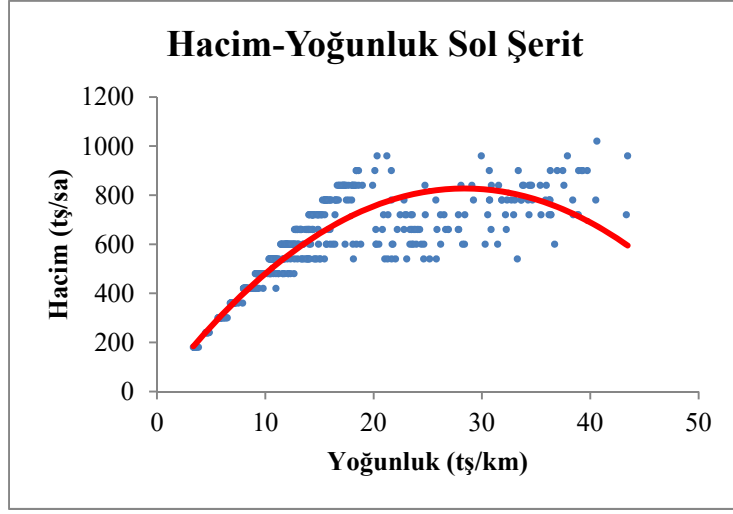
Şekil 5 - Sol şerit için elde edilen hacim-hız grafiği



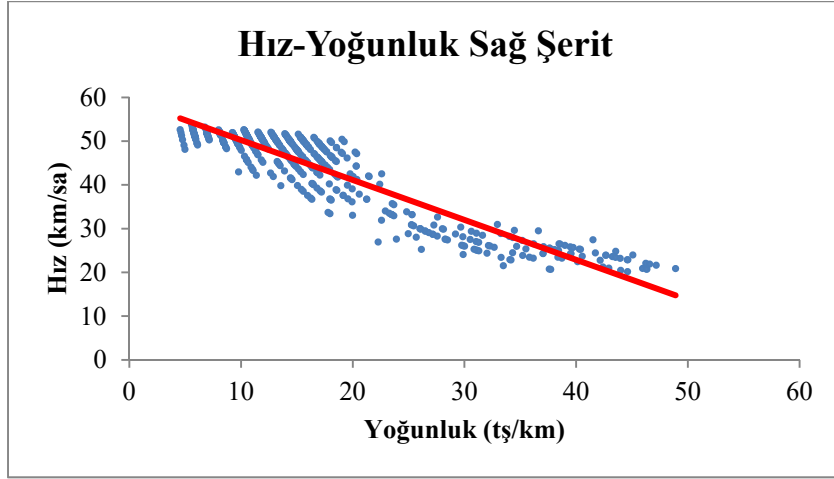
Şekil 6 - Sağ şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



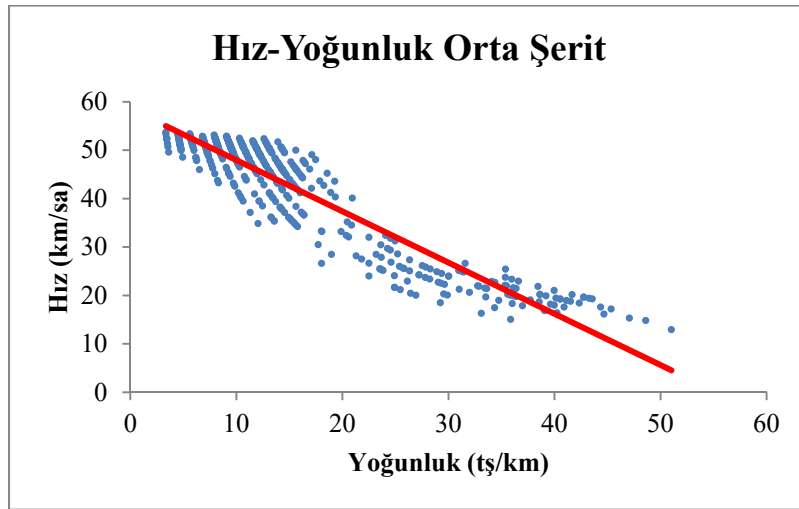
Şekil 7 - Orta şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



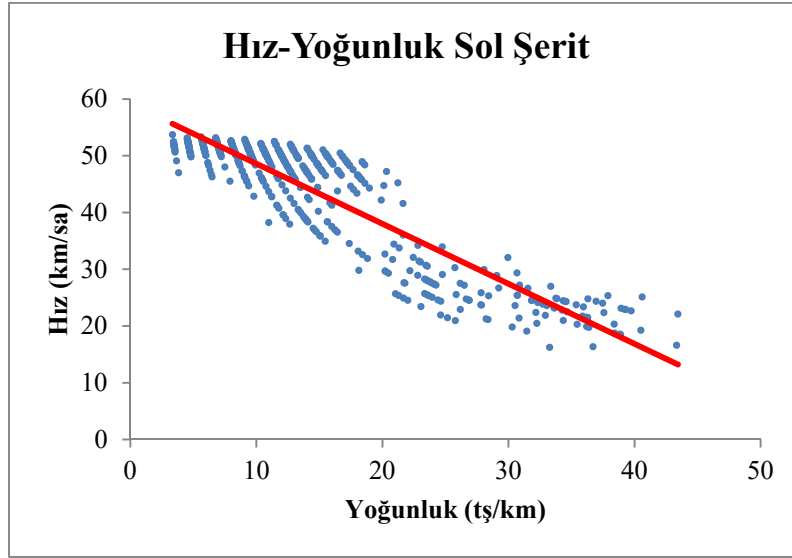
Şekil 8 - Sol Şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



Şekil 9 - Sağ Şerit için elde edilen hız-yoğunluk grafiği



Şekil 10 - Orta Şerit için elde edilen hız-yoğunluk grafiği



Şekil 11 - Sol şerit için elde edilen hız-yoğunluk grafiği

Tablo 3 - Şeritlerden elde edilen sınır koşulları

Şerit	En yüksek hacim $q_{maks}$ (tş/sa)	Tıkanıklık yoğunluğu $k_t$ (tş/km)	Serbest akım hızı $u_s$ (km/sa)
Sağ	965.73	65.06	59.37
Orta	808.78	55.28	58.52
Sol	827.68	55.95	59.17

Tablo 3’de görüldüğü üzere, sınır koşullarının tümü için en yüksek değerler sağ şeritte meydana gelmektedir. Bu genel beklentin aksine bir durum olması nedeniyle özellikle incelenmesi gereken bir sonuç oluşturmaktadır. Bu sonucun ana sebebinin özellikle veri toplama noktasının bulunduğu kesimde, caddenin sol tarafında bulunan sokaklara katılım ve ayrımların olduğu düşünülmektedir. Cadde üzerinde farklı kesimlerde veri toplama noktaları uygulandığı takdirde çok daha detaylı çözümler (analizler) gerçekleştirilebilir. Sol şerit ise yine her üç sınır koşulu için de orta şeride kıyasla az da olsa daha yüksek sınır koşulları sağlamaktadır. Bunun nedeninin de orta şeritten ve orta şeride gerçekleşen şerit değişiklikleri olduğu gözlenmiştir.

E-skuterlerin trafiğe etkilerinin incelenmesi amacıyla ölçülenmiş ve doğrulanmış benzetim modeline e-skuterler eklenerek sınır koşulları tekrar incelenmiştir. PTV VISSIM üzerinde ön tanımlı bulunan araçlar arasında e-skuterler bulunmadığından, bu taşıtlar bisikletler temel alınarak yeni bir araç tipi olarak tanımlanmıştır. Piyasada gerek paylaşımlı e-skuter, gerekse ticari e-skuter olarak çok sayıda farklı taşıt tipi ve modeli bulunmasına karşın, bu modellerin ortalama özellikleri temel alınarak araç özellikleri tanımlanmıştır. Buna göre, e-skuterlerin uzunluğu 1200, genişliği de 600 mm alınmıştır. En yüksek hızlanma ivmeleri  $3.7 \text{ m/s}^2$ , tercih edilen hızlanma ivmeleri  $1.4 \text{ m/s}^2$ , en yüksek yavaşlama ivmeleri  $9.0 \text{ m/s}^2$ , tercih edilen yavaşlama ivmeleri  $7.0 \text{ m/s}^2$  olarak tanımlanmıştır. Taşıtların hız sınırı olarak, yasal hız sınırı olan  $25 \text{ km/sa}$  değeri tanımlanmıştır. E-skuterlerin trafikte yalnızca sağ şeridi kullanmalarına izin verilmiştir.

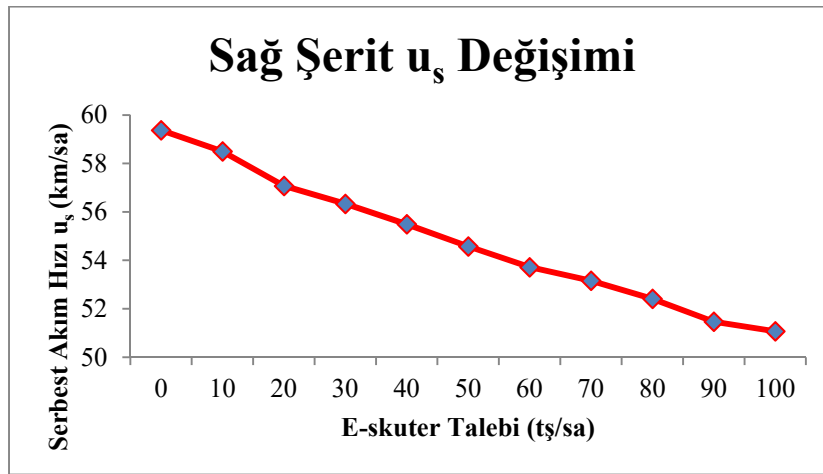
Geliştirilen 9 senaryonun her biri için Bağdat Caddesi, Ethemefendi Caddesi ve Ömerpaşa Sokak’daki trafik talep değerlerine  $10'$ ar artışla,  $100 \text{ tş/sa}$ 'lik değere ulaşıncaya kadar e-skuterler eklenmiş, her bir senaryo  $10$  alt senaryo için tekrar çalıştırılmış ve her bir senaryo için  $10$  farklı

e-skuter talep düzeyi için şerit bazlı dakikalık trafik hacmi, ortalama hız ve yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Her bir e-skuter talep düzeyi için hız-hacim, hacim-yoğunluk ve hız-yoğunluk grafikleri çizdirilerek, sınır koşulları elde edilmiştir.

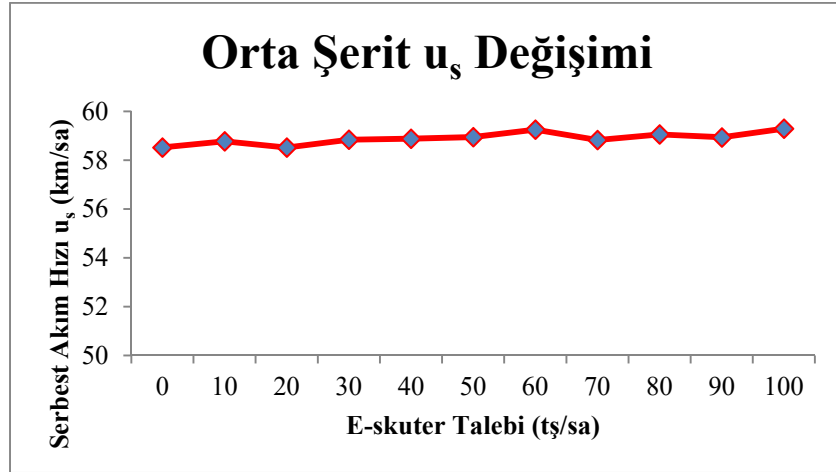
## SONUÇ

Trafikteki e-skuter talebinin değişimine bağlı olarak, her bir şeritteki serbest akım hızının değişimi Şekil 12-14, tıkanıklık yoğunluğunun değişimi Şekil 15-17, en yüksek hacim değerinin değişimi ise Şekil 18-20'de görülmektedir. Trafikteki e-skuter talebinin artmasıyla, sağ şeritteki serbest akım hızı gitgide düşüş göstermekteyken, orta ve sol şeritlerdeki serbest akım hızında artış eğilimi görülmektedir. Benzetim ortamında e-skuterlerin trafiğin yalnızca sağ şeridini kullanmalarına izin verilmesi ve en yüksek hızlarının, diğer motorlu taşıtlar için izin verilen en yüksek hıza kıyasla daha düşük olması nedeniyle bu sonuç şaşırtıcı değildir. Tıkanıklık yoğunluğu ise sağ şeritte daha belirgin olmak üzere, her şeritte artan bir eğilim göstermektedir. En yüksek hacim değeri incelendiğinde ise e-skuter talebinin artması, bu taşıtların en yüksek hızlarının düşük olması nedeniyle, sağ şeritten daha az sayıda taşıtın geçebildiğini, dolayısıyla bu şeridin kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir. Buna karşın e-skuter talebindeki artışa bağlı olarak orta şeritte daha fazla, sol şeritte ise daha az olmak üzere en yüksek hacim değeri artış göstermektedir. Özellikle orta şeritteki artışın nedeninin, sağ şeritteki e-skuterlerin yavaşlatıcı etkisinden kurtulmak isteyen taşıtların şerit değiştirerek, orta şeridi kullanmaya yönelmeleri olduğu görülmektedir.

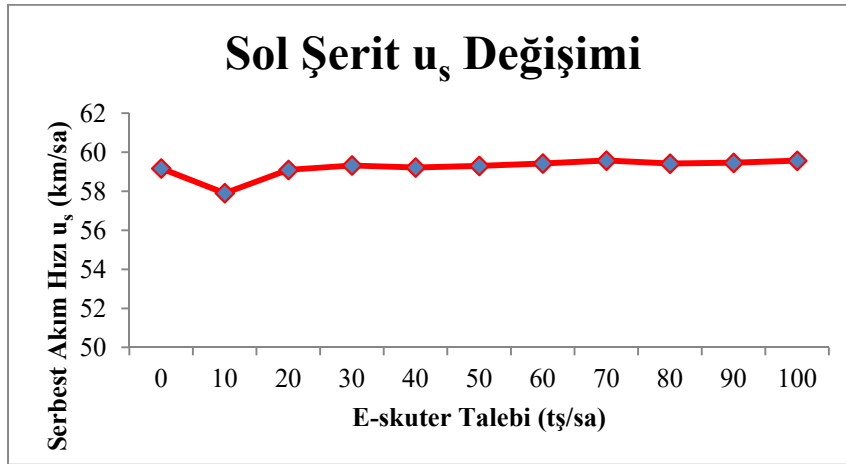
Benzetim sonuçları, e-skuter talebinin artmasının trafik akımını ve trafik akım değişkenlerini genel olarak olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, e-skuterlerin özellikle diğer motorlu taşıtlara kıyasla daha düşük en yüksek hızlara sahip olması ve hızlardaki bu farklılıkların trafik akımının homojenliğini önemli ölçüde azaltmasıdır. Ancak 10tş/sa'lik bir e-skuter talep düzeyinde özellikle tıkanıklık yoğunluğu ve en yüksek hacim değerlerinde artış görülmüştür. Bu artışın temel nedeninin mevcut olan sisteme yeni taşıt türünün eklenmesi olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, motorlu taşıt sürücülerinin özellikle taşıt takip davranışlarında da farklılıklar yarattığı ve zaman ile uzunluk cinsinden takip aralıklarını büyüttüğü gözlemlenebilmektedir. Bu durum özellikle şerit kapasitelerini düşüren bir etken olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında, benzetim ortamında sürücü davranışlarına ilişkin bir değerlendirme gerçekleştirilmemiş, değerlendirme tamamen taşıt boyutları ve hızları üzerinden gerçekleştirilmiştir.



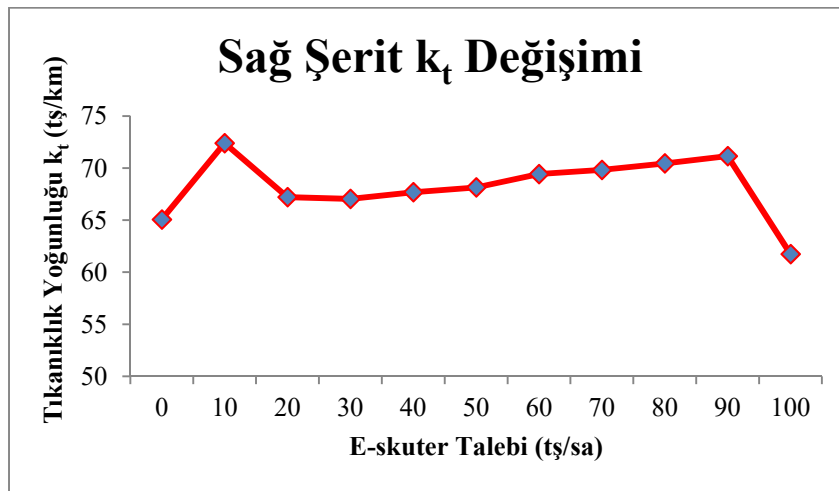
Şekil 12 - Sağ şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



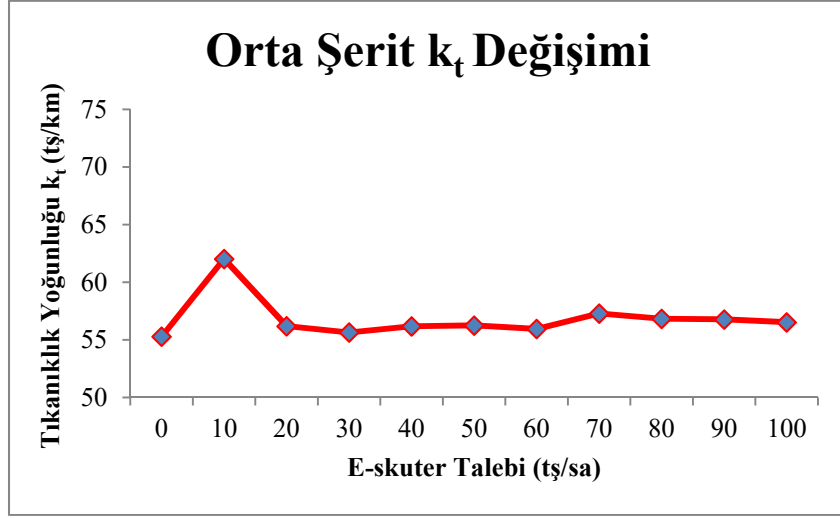
Şekil 13 - Orta şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



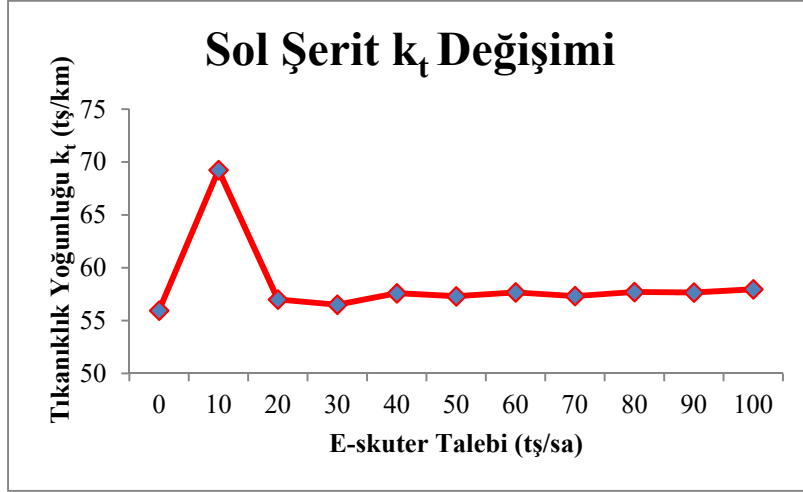
Şekil 14 - Sol şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



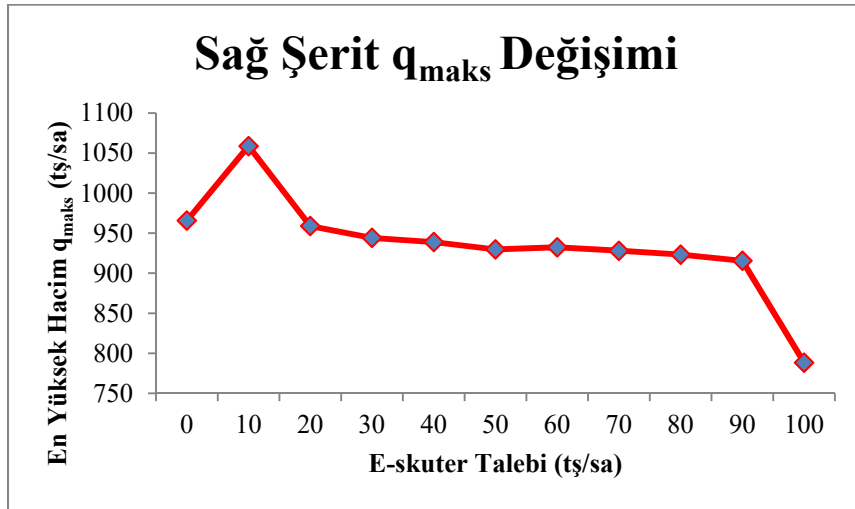
Şekil 15 - Sağ şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



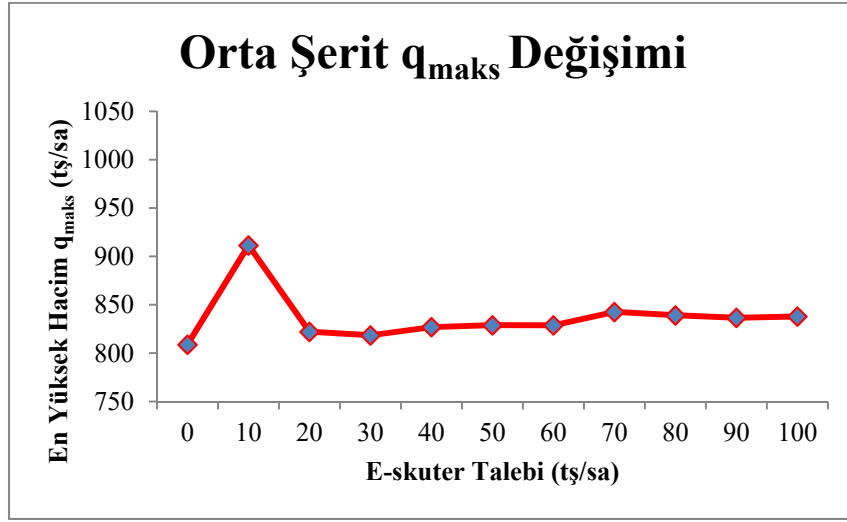
Şekil 16 - Orta şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



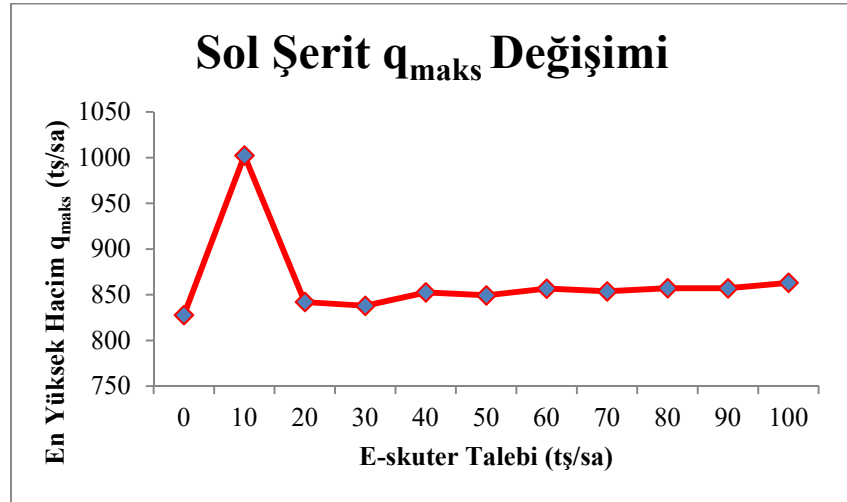
Şekil 17 - Sol şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



Şekil 18 - Sağ şeritte e-skuter talebine bağlı olarak en yüksek hacmin değişimi



Şekil 19 - Orta şeritte e-skuter talebine bağlı olarak en yüksek hacmin değişimi



Şekil 20 - Sol şeritte e-skuter talebine bağlı olarak en yüksek hacmin değişimi

Geliştirilen benzetim modelinin bazı kısıtları da bulunmaktadır. Bunların başında daha önce de belirtildiği üzere, sürücü davranışlarının göz önüne alınmamış olması gelmektedir. Sürücülerin özellikle motorlu bir taşıtı ve e-skuterleri takip ettikleri durumlardaki davranışlarının farklılık göstermesi beklenebilmektedir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda sürücü davranış özelliklerinin de incelenmesi ve modellenmesi benzetimden daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Benzetim modelinin bir diğer kısıtı cadde boyunca bulunan otobüs duraklarının benzetimde modellenmemiş olmasıdır. Otobüslerin duraklara giriş ve çıkışlarında, e-skuterlerin kullanımına izin verilen sağ şeridi kullanmalarının bu şeridin başarımını etkileyecek bir unsur olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde cadde boyunca işletilen dolmuşlar da durak bölgeleri dışında da yolcu-indirip bindirebilmektedir. Ayrıca cadde boyunca farklı zaman ve trafik koşullarında, en sağ, sağ ile orta, en sol ve orta şeritler araçlar tarafından kısa ya da uzun süreli park amacıyla kullanılabilir. Ancak benzetim modelinde herhangi bir parklanma durumu

tanımlanmamıştır. Bu koşulların da benzetim modeline katılması, benzetimin gerçeğliğini arttıracak bir diğer unsur olacaktır.

Benzetim modelinde e-skuterlerin yasada izin verildiği şekilde [1] yalnızca yolun sağ şeridini kullanmalarına izin verilmiştir. Ancak yapılan gözlemlerde e-skuter kullanıcılarının bu kesimde orta ve sol şeridi de kullanabildikleri, nadiren de olsa trafik akımına ters yönde taşıt kullanabildikleri ve çoğunlukla yasal olmamasına rağmen kaldırımdan yolculuk etmeyi tercih ettikleri görülmüştür. Bu koşulların da benzetime katılması kuşkusuz benzetimin gerçeğçiliğini arttıracak ancak karmaşıklığını da aynı ölçüde arttıracak bir unsur olacaktır. Gerçeğleştirilen çalışma kapsamında gerçeğçilik ve basitlik arasındaki ödünleşmede basitlik yönü ağır basan bir değerlendirme gerçeğleştirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda gerçeğçilik yönü ağır basan modeller ile çok daha karmaşık koşullarda e-skuterlerin etkilerinin değerlendirilmesi daha faydalı olabilir.

Gerçeğleştirilen çalışmada e-skuterlerin yalnızca trafik akımına olan etkileri incelenmiştir. Ancak değerlendirilmesi gereken bir diğer önemli konu da, bu taşıtların karayolu trafik güvenliğine olan etkileridir. Bu taşıtlar özellikle kavşak kesimlerinde hem taşıtlar hem de yayalarla girdikleri etkileşimlerde, karayolu trafik güvenliğini önemli ölçüde azaltabilmekte, hatta ölümlü ve yaralanmalı kazalara dahi neden olabilmektedir. Gelecekteki çalışmalarda e-skuterlerin karayolu trafik güvenliğine etkileri üzerine odaklanılması ile daha faydalı bulgular ortaya konabileceği düşünölmektedir.

#### **Kaynaklar**

1. T.C. Resmi Gazete, Elektrikli Skuter Yönetmeliği, 14.04.2021. Sayı: 31454.
2. Fang, K., Agrawal, A.W., Steele, J.; Hunter, J.J., Hooper, A.M., Where Do Riders Park Dockless, Shared Electric Scooters? Findings from San Jose, California; Mineta Transportation Institute Publication, San Jose, CA, ABD, 2018.
3. James, O., Swiderski, J.I., Hicks, J., Teoman, D., Buehler, R., “Pedestrians and E-scooters: An Initial Look at E-scooter Parking and Perceptions by Riders and Non-riders,” Sustainability 2019, 11, 5591.
4. Liu, M., Seeder, S., Li, H., “Analysis of E-scooter Trips and Their Temporal Usage Patterns,” ITE J. 2019, 89, 44–49.
5. Dias, G., Arsenio, E., Ribeiro, P., “The role shared E-Scooter systems in urban sustainability and resilience during the COVID-19 mobility restrictions,” Sustainability 2021, 13, 7084.
6. James, O., Swiderski, J.I., Hicks, J., Teoman, D., Buehler, R., “Pedestrians and E-scooters: An Initial Look at E-scooter Parking and Perceptions by Riders and Non-riders,” Sustainability 2019, 11, 5591.
7. Zou, Z., Younes, H., Erdoğan, S., Wu, J., “Exploratory Analysis of Real-time E-scooter Trip Data in Washington, DC,” Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2020, 2674, 285–299.
8. Bai, S., Jiao, J., “Dockless E-scooter Usage Patterns and Urban Built Environments: A Comparison Study of Austin, TX, and Minneapolis, MN,” Travel Behav. Soc. 2020, 20, 264–272.
9. Caspi, O., Smart, M.J., Noland, R.B., “Spatial Associations of Dockless Shared E-scooter Usage,” Transp. Res. Part D Transp. Environ. 2020, 86, 102396.
10. Hosseinzadeh, A., Algomaiah, M., Kluger, R., Li, Z., “E-scooters and Sustainability: Investigating the Relationship Between the Density of E-scooter Trips and Characteristics of Sustainable Urban Development,” Sustain. Cities Soc. 2021, 66, 102624.



11. Lee, M., Chow, J.Y., Yoon, G., Yueshuai He, B., “Forecasting E-scooter Competition with Direct and Access Trips by Mode and Distance in New York City,” arXiv 2019, arXiv:1908.08127.
12. <https://yandex.com.tr/harita>. Son erişim: 28.06.2022.



## Türkiye'deki Tarihi Kent Merkezlerinde Bisikletli Ulaşım: Sorunlar ve Çözüm Önerileri

Gökçe AYDIN<sup>1</sup>, Engin AKTÜRK<sup>2</sup>, Büşra AKTÜRK<sup>3</sup>

### ÖZET

Tarihi kent merkezlerinde, ulaşımın otomobil odaklı olması koruma ve erişilebilirlik sorunlarına yol açmaktadır. Maalesef ülkemizde birçok tarihi kentsel peyzaj içinde yürümek, park eden taşıtlar ve yoğun motorlu taşıt trafiği nedeniyle konforlu değildir. Yüksek motorlu taşıt yoğunluğu geleneksel dokunun algılanmasını zorlaştırmakta ve bu alanları değersizleştirmektedir. Ayrıca motorlu taşıtların egzoz salımları insan sağlığına ve geleneksel yapı malzemelerine zarar vermektedir. Dolayısıyla, tarihi kent merkezlerinde sürdürülebilir ulaşım modellerinin, bisikletli ve yaya ulaşım altyapılarının geliştirilmesi gerekmektedir. Türkiye'deki mevcut bisiklet yolu yönetmeliği, tarihi kent merkezlerinde bisiklet altyapısını geliştirme konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, mevcut bisiklet yönetmeliği, bu bakış açılarıyla irdelenecek ve tarihi kent merkezlerinde bisiklet altyapısının geliştirilebilmesi için, yönetmeliğe yönelik çözüm ve iyileştirme önerilerinde bulunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Bisikletli ulaşım, tarihi çevre, sürdürülebilir ulaşım, koruma, geleneksel mimari.

### ABSTRACT

#### ***Bicycle Transportation in the Historical City Centers of Turkey: Problems and Solution Recommendations***

Car oriented transport in historical city centers is problematic. Parked vehicles and dense motor vehicle traffic obstruct walking in such areas. High traffic density hinders perceiving traditional texture and devalues these areas. Moreover, motor vehicles' exhaust emissions are harmful to human health and traditional construction materials. Applying sustainable transportation models and improving bicycle and pedestrian transportation infrastructures is necessary. Current bicycle way regulation in Turkey is insufficient in this respect. In this study, the current regulation is examined with this viewpoint. Solutions and improvement schemes are proposed such that developing the bicycle infrastructure in historical city centers will be possible.

**Keywords:** Bicycle transportation, historical environment, sustainable transportation, conservation, traditional architecture.

---

1 Aksaray Üniversitesi, Aksaray - gokceaydin@aksaray.edu.tr

2 İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul - engin.akturk@ibb.gov.tr

3 İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul - busra.akturk@bilgi.edu.tr

## **GİRİŞ**

Sürdürülebilirlik, “bugünün ihtiyaçlarını yarının ihtiyaçlarının karşılanmasını tehlikeye atmadan karşılamak” olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımın içinde, sürdürülebilirlik 3 ana başlıkta ele alınmaktadır: ekonomik, çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik [1]. Kent içi ulaştırma, bu üç ana başlığın üçüyle de etkileşim halindedir ve sürdürülebilirlik bağlamında ele alınmalıdır. Ancak, günümüzdeki uygulamalar, bu konuda maalesef yeterli performansı gösterememektedir. Kentlerin plansız büyümesi ve gelişmesi, kent sakinlerinin yolculuk etmesi gereken mesafelerin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, yaya ulaşımının, bisiklet ulaşımının ve toplu taşımının popülerliğini azaltmakta; otomobil ulaşımının popülerliğini arttırmaktadır [2]. Nitekim otomobil ulaşımı, uzun yıllardır, fosil yakıt tüketiminin belirgin miktarda arttığı alanların arasında yer almaktadır [3]. Otomobil ulaşımı, hem enerji verimliliğinin düşüklüğü bakımından (çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik), hem sebep olduğu hava kirliliğinin yüksekliği bakımından (çevresel sürdürülebilirlik), hem de arazi kullanımının büyüklüğü bakımından (ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik) sürdürülebilir ulaştırma türleri arasında yer almaktan çok uzaktır. Sürdürülebilir ulaşım bakımından, en yüksek performansa sahip olan ulaşım türlerinin yaya ulaşımı ve bisiklet ulaşımı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, dünya genelindeki pek çok kentte, yaya ulaşımı ve bisiklet ulaşımı cazip kılmak, otomobil ulaşımından caydırmak yolunda politikalar benimsenmekte ve uygulanmaktadır. Bunların arasında, otomobilsiz ve / veya yayalaştırılmış alanların artırılması, bisiklet yolu ağlarının oluşturulması, yaya ve bisiklet rotalarının toplu taşıma ağına entegre edilmesi, trafik eğitimi gibi politikalar bulunmaktadır [4]. Dünyadaki uygulamalar ve literatürde yapılan vurgular, bisiklet ulaşımının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Ülkemizdeki tarihi kent merkezlerinde, bisikletli ve yaya ulaşımına yönelik politikalar yetersizdir. Ülkedeki tarihi kent merkezlerinin önemli bir kısmında, halen yoğun motorlu taşıt trafiği, kaldırımlarına park etmiş taşıtlar ve yetersiz yaya altyapısı nedeniyle yürümek oldukça zordur. Bu durum ulaşımı sürdürülebilir kılmadığı gibi, yüksek motorlu taşıt yoğunluğu kentlerimizdeki geleneksel dokunun algılanmasını zorlaştırmakta ve gün geçtikçe bu alanları değersizleştirmektedir.

2863 sayılı yasada kültür varlığı “Tarih öncesi ve tarihi devirlere ait bilim, kültür, din ve güzel sanatlarla ilgili bulunan veya tarih öncesi ya da tarihi devirlerde sosyal yaşama konu olmuş bilimsel ve kültürel açıdan özgün değer taşıyan yer üstünde, yer altında veya su altındaki bütün taşınır ve taşınmaz varlıklardır” şeklinde tanımlanmıştır [5]. Kentsel peyzaj içinde taşınmaz kültür varlıklarının oluşturduğu korunmuş ve korunmaya değer yapılar ve sokakların oluşturduğu tarihi dokular tarihi kent merkezlerini oluşturmaktadır. Günümüzde birçok tarihi kent merkezi kentsel sit alanı olarak tanımlanmıştır ve söz konusu yasa ile korunmaya çalışılmaktadır [6]. Kentsel sit alanlarında yapıların tekil varlıklarından çok birlikte oluşturdukları tarihsel doku büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, kentsel sit alanlarında koruma imar planları yapılmakta; mevcut yapıların korunması, yeni yapılaşmanın sınırlandırılması ile tarihi kentsel peyzajın sürdürülebilirliği sağlanmaya çalışılmaktadır [7].

Günümüzde birçok tarihi kent merkezi ticari merkez olma özelliğini sürdürmektedir. Bu durum, söz konusu kentsel alanlar için rant baskısı oluştururken, diğer yandan, bu alanları kent içi hareketliliğin odak noktası durumunda tutmaktadır. Kent merkezlerindeki tarihi alanların üzerindeki hareketlilik ve rant baskısı bu alanları korumayı zorlaştırırken, yaşamın ve bu alanların işlevlerinin devam etmesi korumayı kolaylaştıran bir etkidir. Bu alanlarda oluşan kentsel hareketliliği sürdürülebilir ulaşım yöntemleri ile çözmek bu alanların korunmasına katkı sunarken, bu bölgelerde yaşayan ve çalışan insanların yaşam standartlarının yükselmesini sağlayacaktır.



sokaklardan geçişi sırasında oluşturduğu titreşimler çevrede bulunan tarihi yapılarda hasarların oluşmasına sebep olabilmektedir [11,12].

### **Tarihi Kent Merkezlerinde Bisikletli Ulaşımın Durumu**

03.11.2015 Tarihli ve 29521 sayılı Resmî Gazete ’de “Şehir İçi Yollarda Bisiklet Yolları, Bisiklet İstasyonları ve Bisiklet Park Yerleri Tasarımına ve Yapımına Dair Yönetmelik” yayınlanmıştır [13]. Yönetmelik ile kent içi bisiklet altyapısına standartlar getirilmesi amaçlanmıştır. Yönetmelikte yollarda izin verilen azami hızlara ve şerit sayılarına göre bisiklet yolu, bisiklet şeridi ve paylaşımlı bisiklet yollarının uygulama esasları belirlenmiştir. Tarihi kent merkezlerindeki yolların önemli bir kısmında azami hız sınırı 50 km/sa veya altı olduğu için, bu çalışmada, yönetmeliğin bu hız sınırına göre olan uygulama esasları dikkate alınmıştır. Yönetmelikte, paylaşımlı bisiklet yolları için azami hız sınırının 50 km/sa olması ve aynı yöne en az iki şeridin olması şart koşulmuştur. Bisiklet şeritleri için ise taşıt yolunun sağında ve taşıt yolunun gidiş yönüne doğru tek yönlü olarak uygulanabileceği ve şeridin en az 175 cm açıklığa sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrılmış bisiklet yollarının uygulama esasları, yönetmelikte yol seviyesi ve kaldırım seviyesi olmak üzere iki ayrı şartname ile sunulmuştur. Yol seviyesindeki yollar için bisiklet yolunun 75 cm genişliğinde emniyet bandı veya 10 cm yüksekliğinde ve 60 cm genişliğinde bir refüj ile ayrılması belirtilmiştir. Bisiklet yolunun kaldırım kotunda olduğu durumlarda ise taşıt yolu ile yaya kaldırım kotundan 60 cm güvenlik aralığı bırakılması gerekmektedir. Yolda araç parklanması yapılıyorsa, güvenlik aralıklarının 100 cm’ye kadar çıkartılması şart koşulmuştur. Bisiklet yolu tek veya çift yönlü olarak düzenlenebilmektedir. Yönetmelikte bisiklet parkurları, bisiklet patikaları ve kırsal bisiklet bantlarına dair standartlar belirtilmiş olsa da tarihi kent merkezlerinde bu yolların yapılma olasılığı olmadığı için bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.

Tarihi kent merkezlerinde korunmuş sokak dokularının oluşturulduğu dönem koşulları nedeniyle sokak en kesitleri dardır. Çoğu sokak yaya kaldırımı ve tek şeritli taşıt yolundan oluşmaktadır. İki şeride yeterli genişliği bulunan sokaklarda ise şeritlerden biri parklanma cebi olarak kullanılmaktadır. Mevcut bisiklet yönetmeliğindeki bisiklet şeridi ve bisiklet yolu uygulama esaslarına göre tarihi sokak dokusu içinde bisiklete yönelik altyapı uygulamalarını yapmak neredeyse imkânsızdır. Örneğin 7 metrelik en kesite sahip bir sokakta her iki tarafta 150 cm’lik uygun kaldırım genişliği bırakıldığında taşıt yolu ile ayrılmış bisiklet yolu yapılması mevcut standartlara göre mümkün olmamaktadır. Taşıt yolunun sağındaki bisiklet şeridi uygulamalarında ise emniyet ekiplerince yeterli denetim yapılmadığı için şerit kısa sürede motorlu taşıtların parklanma alanına dönüşmektedir. Diğer yandan, bu yollar, yönetmeliğe göre yeterli şerit sayısını sağlamadığı için paylaşımlı bisiklet yolu olarak da tanımlanamamaktadır. Tarihi kent merkezlerinde kent içi hareketliliği sürdürülebilir olarak çözebilecek olan mikromobilite (bisiklet, elektrikli bisiklet, scooter, elektrikli scooter, paten, kayak vb.) taşıtların güvenli bir şekilde kullanabileceği bisiklet altyapısını, mevcut bisiklet yolları yönetmeliği ile çözmek ve yaygınlaştırmak zor gözükmektedir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın yayınladığı *Bisiklet Yolları Kılavuzu ve Şehir İçi Yollarda Bisiklet Yolları, Bisiklet İstasyonları ve Bisiklet Park Yerleri Tasarımına ve Yapımına Dair Yönetmeliği* [13], bisikletin aktif bir rol oynadığı sürdürülebilir ulaşım politikalarına göre mevcut ulaşımı geliştirmek veya değiştirmeye odaklanmak yerine mevcut motorlu taşıt odaklı altyapıya bisikletli ulaşımı uyarlamaya çalışmaktadır.

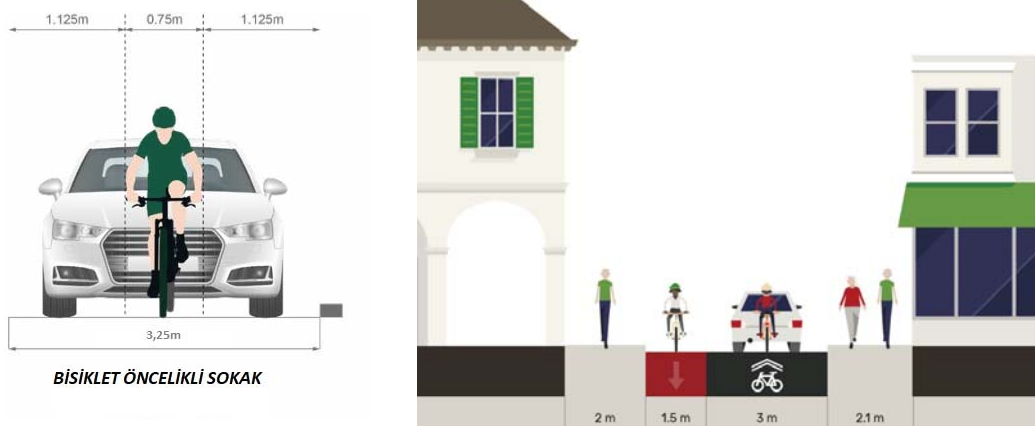
2022 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Dairesi Başkanlığı tarafından düzenlenen *Tarihi Yarımada Laleli Keşif ve İnfografik Atölyesi’nde* araştırmacıların yaptığı alan çalışmalarında, bölgenin araç trafiğine katılmasıyla beraber mikromobilite araçlarının kullanımın arttığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, atölye kapsamında yapılan anketler ile semtte çalışan ortalama her iki kişiden biri, güzergâhları üzerinde bisiklet altyapısının olması durumunda bisiklet

veya scooter kullanabileceklerini belirtmişlerdir [14]. Dolayısıyla bisiklet altyapısının yaygınlaşması ile bisiklet kullanımını artabilecek ve tarihi kent merkezlerdeki motorlu taşıt trafiği azalabilecektir.

Bisiklet altyapısını tarihi kent merkezlerinde ve mevcut imarlı alanlarda mevcut yönetmeliğin standartlarına göre yaygınlaştırmak için radikal kararların alınması ve büyük yatırımlar yapılması gerekmektedir. Ülkemizde bisiklet kültürü yeni yeni oluşmakta ve bisikletli ulaşım yeni gelişmektedir. Günümüze dek alışlagelmiş ulaşım tercihlerinin değişimine yönelik radikal kararlar almak yerel yönetimler için oldukça zorlayıcıdır. Bunun yanında, sürdürülebilir ulaşım yöntemlerinin gelişmesi, tarihi çevrenin korunması ve daha yaşanabilir kentsel mekânlar için bisiklet altyapısının yaygınlaşması gerekmektedir. Bunun için mevcut Bisiklet Yolları Kılavuzu ve Şehir İçi Yollarda Bisiklet Yolları, Bisiklet İstasyonları ve Bisiklet Park Yerleri Tasarımına ve Yapımına Dair Yönetmeliği'nin uygulama esaslarının çeşitlendirilmesi ve tarihi kentsel alanlarda özel çözümlere olanak sağlayabilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla birçok Avrupa kentinde uygulandığı gibi farklı bisiklet yolu ve şeridi uygulamalarının yönetmelik bünyesine katılması sağlanabilir. Tarihi kent merkezlerinde, yol kesitlerinin dar olduğu sokaklarda aşağıdaki uygulamaların yönetmelik bünyesine alınması bisikletli ulaşımı yaygınlaştıracaktır.

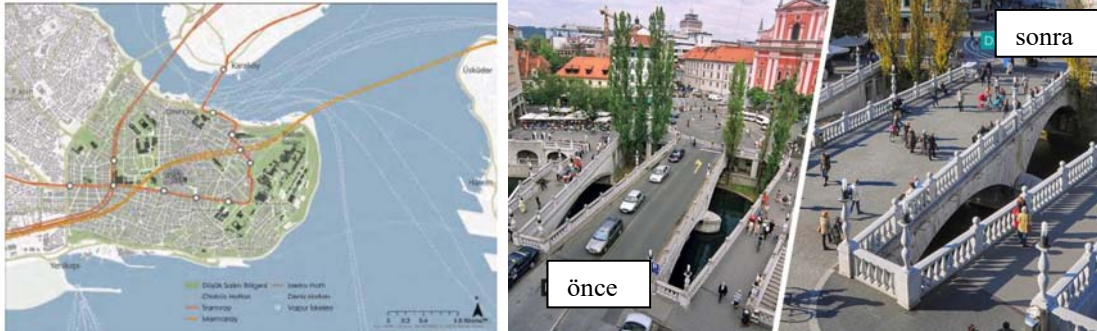
- Özellikle enkesit genişliğinin dar olduğu tarihi kentsel alanlarda “bisiklet ve yaya öncelikli sokak” tanımı getirilebilir. Bu sokaklarda hız sınırı 30 km/sa'e düşürülebilir, motorlu taşıt sürücülerinin bisikletli ve yayalara her zaman öncelik vermesini sağlayacak kurallar ve gerekli altyapı şartları getirilebilir. Bu şekilde düzenlenmiş sokaklar tarihi kent merkezlerinde daha çok yayanın ve bisikletlinin daha rahat ve güvenli hareket etmesini sağlayacaktır [15].
- Tarihi kent merkezlerinde sokakların enkesitlerinin yetersizliği nedeniyle birçok sokak ve cadde tek yönlü olarak çalışmaktadır. Tek yönlü işleyen bu yollarda bisikletlinin iki yönlü hareketine izin verecek uygulamalar birçok ülkede yapılmaktadır. Bu uygulamalarda, yolun taşıt trafiğinin akış yönüne göre sol tarafına bir bisiklet şeridi ayrılarak bisikletlinin ters yönde ilerlemesi sağlanmaktadır. Trafik akış yönündeki şerit ise bisiklet paylaşımlı olarak tasarlanmaktadır (Şekil 2). Böylece tarihi kentsel alanda bisikletlilerin hareket özgürlüklerinin artması sağlanmaktadır [15].



**Şekil 2** - Solda bisiklet ve yaya öncelikli yol [14], sağda tek yönlü yolların bisikletlilerin iki yönde de kullanması

- Tarihi kentsel peyzaj alanlarının motorlu taşıt trafiğine kapatılarak yayalaştırılması, bu alanları tekrar insan ölçeğine getirmekte, kentsel mekân kalitesini artırmakta, insanların

sosyalleşmesini ve tarihi dokunun daha okunabilir olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, söz konusu alanların yayalaştırılması sürdürülebilir ulaşım modellerinin yaygınlaşmasını da mümkün kılacaktır [16]. Tarihi kent merkezlerinde, aktif ulaşım türleri olan yürüyüş ve bisikletin türel dağılımdaki payını arttırmak için öncelikle bu alanlara motorlu taşıt girişini kısıtlamak gerekmektedir. İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı’nda (SHKP) Tarihi Yarımada’da bulunan Eminönü semti Düşük Salınım Bölgesi (DBG) olarak kabul etmiştir ve ulaşım kaynaklı karbon salınımını azaltmayı hedeflemiştir (Şekil 3). Bu amaca ulaşmak için, taşıt trafiğini azaltmak için kısıtlamalar ve ücretler getirmek, çevreci taşıtların kullanımını arttırmak ve kentsel alanın yayalar ve bisikletliler için yeniden düzenlemek eylemlerini önermektedir [17]. 2016 yılında Avrupa Yeşil Başkenti seçilen Slovenya’nın Lübliana kenti tarihi kent merkezinin büyük bir kısmını motorlu taşıt trafiğinden arındırmıştır (Şekil 3). Yaklaşık 300 bin nüfusu olan bu Avrupa kentinde, 102.504 m2 alan motorlu taşıt trafiğinden tamamen arındırılmış, 66.784 m2 alanda ise taşıt trafiği sınırlandırılmıştır. Toplamda 17 hektarlık yayalaştırılmış alanla birlikte 306 km’lik bisiklet altyapısı ile yolculukların 2/3’ünün aktif ulaşım türleri ile yapılması hedeflenmektedir. Bunun yanında, 80 istasyonu ve 820 bisikletli bir paylaşımlı bisiklet ağına sahip olan kentte, paylaşımlı bisikletler, hem yerli halk hem de turistler tarafından yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [18]. Lübliana tarihi kent merkezinde yayalaştırılmış sokakları yayalar, bisikletliler ve skuter kullanıcıları ortak kullanmaktadır. Söz konusu sokaklarda, bisikletliler için özel yol ve işaretler olmamasına rağmen bisikletliler yavaş sürüş yapmakta veya bisikletlerini elde taşımaktadır. Bu durum sıkı bir denetim ve kural olmasa bile, toplumun ortak yaşama kültürünün gelişmiş olmasının, kamusal alanların daha adil bir biçimde kullanılmasına imkân sağladığını göstermektedir.



**Şekil 3** - Solda SKHP’de İstanbul Tarihi Yarımada Düşük Salınım Bölgesi (DSB) olarak seçilen Eminönü bölgesi [17], sağda Lübliana’da tarihi kent merkezinde taşıt trafiğinin kısıtlanması [19].

- Tarihi kentsel dokuya sahip olan alanlarda yapılacak kentsel müdahaleler, tarihi dokunun bütünlüğüne ve algılanabilirliğine zarar vermeyecek nitelikte olmalıdır. Bu nedenle, bisiklet yolları, paylaşımlı bisikletler, paylaşımlı bisiklet istasyonları ve mikromobilité araçlarının park alanlarının konumlandırılmasında, tasarımında ve malzeme seçiminde tarihi kentsel doku ile uyuma önem verilmelidir. Türkiye’de tarihi kentsel dokunun olduğu sokak ve caddelerde yol kaplamasının taş olduğu görülmektedir. Planlanacak olan bisiklet yollarının kaplamasının sokağın özgün kaplamasına uygun olarak inşa edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, bisiklet yolu veya şeridi sürücüler ve yayalar tarafından fark edilebilir ve mikromobilité araçlarının sürülmesine uygun olmalıdır. Bisikletlilere ayrılmış alanın fark edilir olması için, yol döşemesinde tarihi çevre ile uyumlu renkte taşlar kullanılabilir. Farklı renk ve dokudaki taşlar veya tuğlalar yolun bordürü olarak döşenebilir. Bisiklet yolu yol zeminine yerleştirilen metal rozetler veya taş üzerine yapılacak baskılar ile belirtilebilir (Şekil 4). Diğer yandan, bisiklet yolunu betimleyen düşey işaretlendirmeler tarihi dokuda tabela kirliliğine sebep olacağından,



olabildiğince yatay işaretlendirmeler ile bisiklet yolu ve şeridi belirtilmelidir. Bisikletlilerle ilgili tabelalar mevcut trafik levha direklerine eklenebilir. Mevcut bisiklet yolları yönetmeliğine, tarihi çevrede bisiklet altyapısı uygulama esasları eklenebilir.



Şekil 4 - Sol ve ortada Lizbon'da taş kaplama yüzey üzerine bisiklet işaretlemesi, sağda Lizbon'da taş kaplama ile asfalt bisiklet yolu kompozisyonu.

- Taşıt trafiğine kapalı, yayalaştırılmış sokaklarda mikromobilité araçlarının kullanımı, yayalar için tehlikeli olabilir. Bu nedenle, bu alanlarda bisiklet ve skuterlere el ile sürülme zorunluluğu getirilebilir. Mikromobilité araçlarının kentsel mekânlarda yarattığı bir diğer sorun da uygunsuz parklanma sorunudur. Kamusal alanda gelişigüzel park edilmiş bisiklet ve skuterler yayaların ve özellikle engelli bireylerin hareketlerini engelleyebilmektedir. Bu nedenle, bu araçların park edilebileceği park alanları oluşturulmalıdır. Ancak bu park alanlarının yer seçimi ve tasarımı tarihi kent merkezleri için önemlidir. Bisiklet park alanlarında bisiklet ve skuterleri kilitlemek için kullanılan park elemanları birer kent mobilyasıdır ve tarihi kent merkezindeki dokuya uygun olarak tasarlanmalıdır. Tarihi dokunun bütünlüğünü bozacak, algıda tarihi dokuyla yarışacak abartılı tasarım ve uygunsuz renklerden kaçınılmalıdır. Tarihi kent merkezlerinde ve turistik potansiyeli yüksek olan yerlerde istasyonlu bisiklet paylaşım sistemleri yerine istasyonsuz paylaşım sistemleri kentsel mekânı daha verimli kullanmayı ve bu alanlarda yeni altyapı gereksinimini azaltmayı sağlayabilir. İstasyonsuz bisiklet ve skuter paylaşım sistemlerinin parklanma yapacağı alanlar önceden planlanmalı ve servis sağlayıcı şirketlerin coğrafi çitleme (geofencing) ile sadece bu alanlarda parklanmasına izin vermesi sağlanmalıdır. Bu konu, bisiklet yönetmeliği, elektrikli skuter yönetmeliği ve karayolları trafik kanununda yapılacak düzenleme ile garanti altına alınmalıdır. Diğer taraftan yanlış parklanan paylaşımli mikromobilité araçlarının toplanmasıyla ilgili yasal düzenlemelere de ihtiyaç bulunmaktadır. Örneğin Paris'te istasyonsuz paylaşımli bisiklet ve skuter araçları kullanılmaktadır. Bu kentte, yerel yönetimin yanlış yere park etmiş mikromobilité araçlarını toplama yetkisi bulunmakta ve servis sağlayıcı şirketlerin araçlarını belirlediği park alanlarını kullanmasını zorunlu tutmaktadır. Paris'te bir kişinin 5 dakika içinde bir paylaşımli mikromobilité aracına ulaşabildiği takdirde bu taşıtları tercih ettiği görülmektedir [20]. Bu nedenle, tarihi kent merkezlerinde sürdürülebilir ulaşım modellerinin kullanılması için yaygın bisiklet park alanlarının düzenlenmesi hayati önem taşımaktadır.
- Tarihi kentsel alanlarda özgün yol kaplamaları genellikle taştır. Ancak taş kaplamalı yollarda derin derzler ve farklı kotlardaki taşlar mikromobilité araçlarının sürüş konforunu azaltmakta, hatta bu araçların devrilmelerine sebep olabilmektedir [21]. Bu nedenle, Arnavut kaldırımı gibi derin derzli ve düzgün olmayan yüzeyli sokak dokusunda, bisikletlilere ayrılmış alanda derzlerin daha küçük olmasına, tesviyesinin ve işçiliğinin iyi olmasına dikkat edilmelidir.

Tarihi kent merkezleri aynı zamanda yaya hareketliliğinin de yoğun olduğu kentsel alanlardır. Bu alanlarda yapılacak mikromobilité düzenlemeleri, yaya erişimi, konforu ve güvenliğini olumsuz yönde etkilememelidir. Bu alanlarda yol kaplamasının asfalt veya beton yerine taş veya tuğla olması, skuter ve bisiklet kullanıcılarının daha düşük hızlarla ilerlemesini sağlayacaktır. Bisiklet yolu veya şeridinin farklı doku veya renk ile yaya yolundan ayrılması, yaya sirkülasyonu ile mikromobilité sirkülasyonunun daha az çakışmasını sağlayacaktır. Kiralık e-skuter ve e-bisikletlerin coğrafi çitleme (geofencing) ile tarihi kent merkezlerinde hızları azami hızları sınırlandırılabilir [22].

## SONUÇ

İklim değışikliğı sürecinde sürdürülebilirlik kavramı dünyanın önemli bir gündemi haline gelmiştir. Birleşmiş Milletler 17 sürdürülebilir kalkınma hedefi koymuştur. Bu hedeflere ulaşılmasında kentlerde sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesi önemli bir alanı oluşturmaktadır. Sürdürülebilir ulaşım modellerinden biri olan bisikletli ulaşım ise tarihi kent merkezlerinin yeniden insan ölçeğine gelmesi için geliştirilmesi ve teşvik edilmesi gereken bir ulaşım modelidir.

Türkiye’de tarihi kent merkezleri ilgili koruma yasaları ile yaşatılmaya çalışılmaktadır. Ancak söz konusu koruma yasaları tarihi dokunun bütünlüğünü ve silüetini bozacak yapılaşmaya kısıt getirirken, tarihi dokunun bütünlüğünü bozan, yapılarla fiziksel ve kimyasal olarak zarar veren motorlu taşıt trafiğinin kısıtlanmasına dair bir öneri getirmemektedir. Diğer yandan, mevcut bisiklet yönetmeliğinde standartları sunulan bisiklet altyapısını tarihi kent merkezlerindeki sınırlı genişlikteki yollara uygulamak neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle bisiklet yönetmeliğindeki yol tanımlamaları yurtdışındaki örneklerde olduğu gibi genişletilmeli ve detaylandırılmalıdır. Tarihi kent merkezlerinde bisikletli ulaşımaya yönelik özel çözümlere yönetmeliğin izin vermesi sağlanmalıdır.

Tarihi kent merkezlerinde sürdürülebilir ulaşım modellerinden olan bisikletli ulaşımın geliştirilmesi için tarihi çevre koruma ve ulaştırma uzmanlarının disiplinler arası çalışmaları ve katılımcı bir planlama anlayışıyla sürdürülebilir ulaşım modellerine göre bu alanlara özel çözümler üretilmelidir.

## Kaynaklar

1. “What is sustainability?” McGill University Technical Report, <https://www.mcgill.ca/sustainability/files/sustainability/what-is-sustainability.pdf>, Son erişim tarihi: 29.06.2022.
2. Banister, D., “The Sustainable Mobility Paradigm”, Transport Policy, Vol. 15, November 2007, pp 73-80.
3. “Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future” Birleşmiş Milletler Raporu <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, Son erişim tarihi: 29.06.2022.
4. Buehler, R., Pucher, J., and Altshuler, A., “Vienna’s path to sustainable transport”, International Journal of Sustainable Transportation, Vol. 17(4), October 2016, pp 257-271.
5. 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu, Kabul tarihi: 21.07.1983, Yayımlandığı Resmi Gazete: Tarih: 23/7/1983 Sayı : 18113, Yayımlandığı Düstur : Tertip : 5 Cilt : 22 Sayfa : 444. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.2863.pdf>.

6. Ahunbay, Z. 2009, Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon, YEM Yayın, İstanbul.
7. 25.01.2017 Tarihli ve 681 Sayılı Kentsel Sitler, Koruma ve Kullanma Koşullarına Dair İlke Kararı. Erişim Adresi: <https://teftis.ktb.gov.tr/yazdir?95016AAA9BA71DE2112A25938C520B41>. Son Erişim Tarihi: 03.07.2022.
8. Bisiklet Yolları Yönetmeliği, 12.12.2019, sayı: 30976. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191212-1.htm> Son erişim tarihi: 03.07.2022
9. Erder, C. 2020, Tarihi Çevre Algısı, YEM Yayın, İstanbul.
10. Kucukkaya, A.G. (1999). Deterioration on Historic Buildings Due to Air Pollution and Some Difficulties During Their Restoration Works. In: et al. Large Scale Computations in Air Pollution Modelling. NATO Science Series, vol 57. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4570-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4570-1_19)
11. Palermo M, Baraccani S, Girardi M, Pellegrini D and Azzara RM (2020) Editorial: Urban Vibrations & Their Effects Upon Built Heritage: Measurements, Characterization, & Simulations. Front. Built Environ. 6:588758. doi: 10.3389/fbuil.2020.588758;
12. Piyush Basekar, Devang Vaghela, Mehul Katakiya, Impact Of Traffic Vibration On Heritage Structures, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, vol. 3(3), 2015: 2348 – 7550.
13. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı- Şehir İçi Yollarda Bisiklet Yolları, Bisiklet İstasyonları ve Bisiklet Park Yerleri Tasarımına ve Yapımına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete Tarih: 03.11.2015, Sayı: 29521.
14. URL <https://kultur.istanbul/laleli-kesif-ve-kentsel-infografik-atolyesi-calismalarini-sonuclandirdi/> (Son erişim tarihi: 29.06.2022).
15. Cycle Infrastructure Design, 2020, Local Transport Note 1/20, July 2020, TSO (The Stationery Office), part of Williams Lea, United Kingdom, ISBN 978 0 11 553713 4.
16. Tarakçı Eren, E., Düzenli, T., Akyol, D., Kent Merkezinde Caddelerin Yayalaştırılması: Trabzon Kahramanmaraş Caddesi Örneği, MEGARON, 2018, 3 (3), 480-491. doi: 10.5505/MEGARON.2018.17362.
17. İstanbul Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planı, İstanbul Büyükşehir Belediye Başkanlığı, Ulaşım Dairesi Başkanlığı, Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü, 2022, ss 86-89
18. Ljubljana Cycling Account 2020-2021, City of Ljubljana, 2022, pp 6-11
19. URL <https://traveltomorrow.com/why-ljubljana-is-europes-most-liveable-city/>, son erişim tarihi: 14.10.2022
20. A sound launch for micromobility services in the UK: The challenge of parking, Momentum Transport Consultancy, 2020, pp 32-34
21. Zhang, W., Buehler, R., Broaddus, A. ve Sweeney, T. What type of infrastructures do e-scooter riders prefer? A route choice model., Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol 94, 2021: 102761
22. Liazos, A., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K. ve Bakogiannis, E, Geofence Planning for Electric Scooters, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol 102, 2022: 103149



# Bataryalı Elektrikli Otobüsler İçin Kablosuz Şarj İstasyonlu Durakların Belirlenmesi

İlyas Cihan, AKSOY<sup>1</sup>, Mehmet Metin, MUTLU<sup>2</sup>, Yalçın, ALVER<sup>3</sup>

## ÖZET

Kentiçi ulaşımda bataryalı elektrikli otobüsler sürdürülebilir toplu taşıma için en uygun seçeneklerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, bataryalı elektrikli otobüsler kısıtlı sürüş mesafelerine sahip olmaları nedeniyle, gün içinde enerjileri tükenerek hizmet dışı kalmaktadırlar. Bu çalışmada, otobüslerin duraklarda yolcu indirme/bindirme esnasında kablosuz şarj teknolojisinden faydalanarak, gün boyu gereken enerji ihtiyaçlarını sağlayabilmeleri için, toplu taşıma ağı üzerindeki mevcut durakların hangilerine şarj cihazı yerleştirileceğini belirleyen bir karma-tamsayı program geliştirilmiştir. Geliştirilen karma-tamsayı program Dal Sınır Yöntemi kullanılarak çözülmektedir. Şarj cihazlarının yerleştirileceği duraklar, otobüslerin hizmete gün boyu kesintisiz devam edebilmesini sağlayan kısıtlar altında tanımlı olan yatırım maliyeti minimizasyonu amaç fonksiyonu için belirlenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli toplu taşıma ağ tasarımı, bataryalı elektrikli otobüs, şarj istasyonlu durakların belirlenmesi, sürdürülebilir ulaşım.

## ABSTRACT

### **Optimal Selection of Bus Stops to be Equipped with Wireless Charging for Battery Electric Buses**

Battery electric buses seem to be one of the most suitable option for sustainable public transport systems in urban areas. However, battery electric buses go out of service during operation due to their limited driving range. In this study, a mixed-integer program that determines the stops to be equipped with a wireless charging device to supply the required energy to buses is developed. The developed mixed-integer program is solved using Branch and bound algorithm. Stops that wireless charging devices will be equipped are determined considering the objective function that aims to minimize the investment cost subject to constraints that ensure the buses operate all day without interruption due to energy shortage.

---

1 Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman - icihanaksoy@kmu.edu.tr

2 Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın - metin.mutlu@adu.edu.tr

3 Ege Üniversitesi, İzmir - yalcin.alver@ege.edu.tr

**Keywords:** Electric transit network design, battery electric bus, determining charging stops, sustainable transportation

## GİRİŞ

Son yıllarda tüm dünyada nüfus, taşıt sayısı ve hareketlilikteki hızlı artış; trafik sıkışıklığı, hava ve gürültü kirliliği, trafik kazaları gibi ulaşım kaynaklı problemlerin artışı tetiklemiştir. Özellikle kentsel bölgelerde ortaya çıkan ulaşım kaynaklı problemleri azaltmak için, toplu taşıma sistemleri etkili bir çözüm yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Toplu taşımanın daha cazip hale getirilerek türel dağılımdaki payının artırılmasına yönelik planlama çalışmaları, özel taşıt ile yapılan yolculukların sayısını azaltarak ulaşım kaynaklı problemlerin hafifletilmesinde büyük rol sahibidir.

Toplu taşıma türü tercihinin artırılması, ulaşım kaynaklı problemler için her ne kadar kıymetli bir çözüm yolu olsa da yüksek egzoz emisyonu sebebiyle özellikle kentsel bölgelerde halk sağlığını tehdit etmektedir. [1], toplu taşımanın diğer türlere göre daha sürdürülebilir olmasına karşın, fosil yakıtlı geleneksel otobüslerin egzoz emisyonunun, tüm taşıtların toplam egzoz emisyonunun %34'ünü oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir ve çevreci kentler yaratabilmek için araştırmacılar tarafından odaklanılan güncel odak noktalarından biri ise sürdürülebilir ve çevreci toplu taşıma ağlarıdır. Tüm dünyada ulaşım kaynaklı sera gazı salınımını azaltmak için, Kyoto Protokolü ve sıfır emisyonlu taşıt düzenlemeleri gibi çalışmalar yapılmış olup, emisyonu azaltmak adına alternatif bir yakıt olan doğalgazlı otobüslerin kullanılması teşvik edilmiştir. Ancak, yakıt olarak doğal gazın kullanımı sera gazı oluşumunu tamamıyla ortadan kaldırmadığı için elektrikli otobüsler sürdürülebilir ve çevreci bir toplu taşıma sistemi elde etmek için en uygun seçenek olarak görülmektedir [2]. Aynı şekilde, [3] çalışmalarında yakıt masrafları, sağlık problemleri ve iklim değişikliği ile ilgili kaygıların, karar vericileri elektrikli otobüslerin kullanımı için teşvik ettiğini belirtmektedir.

Elektrikli otobüsler sürdürülebilir, çevreci ve sessiz çalışma avantajları ile kentsel alanlar için idealdir. Tablo 1'de farklı elektrikli otobüs modellerine ait batarya kapasitesi ve şarj gücü özellikleri verilmektedir. [4] elektrikli otobüslerin ortalama enerji tüketimlerinin 1,35 kWh/km olduğunu belirtmektedir.[5] ise, elektrikli otobüslerin kilometre başına ortalama 1,65-1,84 kWh enerji tükettiğini ve bu tüketimin ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışması ile kilometre başına 2,35 kWh'e kadar çıktığını ifade etmektedir. Bu değerler dikkate alındığında, özellikle düşük batarya kapasitesine sahip otobüslerin sürüş mesafeleri yetersiz kalmakta ve gün içerisinde enerjilerinin bitmesi beklenmektedir.

**Tablo 1 - Örnek elektrikli otobüsler ve elektriksel özellikleri [6]**

Taşıt Türü	Üretici firma	Pil Kapasitesi (kWh)	Şarj Gücü (kW)
12 metre otobüs	PRIMOVE	60-90	200
12 metre otobüs	EBusco	242-311	125
12 metre otobüs	Hengtong	61-78	400
12 metre otobüs	New Flyer	200-300	500
Shuttle	Balqon	312	40-100
Shuttle	Motiv	80-120	60
Trolleybüs	ABB	38	40/200/400

[7], elektrikli otobüsler için şarj stratejilerini şu şekilde sınıflandırmaktadır;

- Fırsat şarj stratejisi: Hızlı şarj etme yöntemi olarak da adlandırılmakta olup, piller otobüslerin işletim sırasında genellikle terminal duraklarındaki ve ara duraklardaki bekleme sürelerinde, kablosuz pantograf veya kaplama altı indüksiyon sistemleri ile şarj edilir. Otobüslerin şarj edilebilir süreleri düşük olduğundan dolayı, yüksek şarj gücü gereklidir.
- Hareket halinde şarj stratejisi: otobüslerin geçtiği yolların bir bölümü, elektrik şebekesine bağlı bir havai hat ile donatılır, böylece piller sürüş esnasında şarj edilir. Havai hattın olmadığı yollarda ise, gerekli enerji pillerden tedarik edilir.
- Merkezlerde şarj stratejisi: Piller sadece şarj merkezlerinde, genellikle kablo ile şarj edilir. Bu şarj teknolojisine sahip otobüsler için, en yüksek menzil yaklaşık olarak 200-300 kilometredir. Merkezlerde şarj etmek genelde gece boyu şarj ya da yavaş şarj olarak da adlandırılmaktadır.

Merkezlerde şarj stratejisinde, gün içerisinde enerji ihtiyacı doğan elektrikli otobüsler yeterli enerji ihtiyacını sağlayabilmek için, hizmet dışı kalarak enerji tedarik etmektedir. Ancak bu durum, toplu taşıma sefer kalkış çizelgesinde kesintilere sebep olmakta ya da toplu taşıma hizmetinin kesintisiz sağlanabilmesi için elektrikli otobüslerin hizmet dışı kaldığı şarj sürelerinde, yerlerine başka bir elektrikli otobüsün hizmete alınması sebebiyle geleneksel otobüslere nazaran daha büyük bir filo gerektirmektedir. Bu yönüyle elektrikli otobüs teknolojisi tüm dünyada kendini kabul ettirmekte zorlanmaktadır. Elektrikli otobüslerin uygulanabilirliğini kısıtlayan bu problemi ortadan kaldırmak için, hizmetin gün boyu kesintisiz devam edebileceği şekilde, yeterli enerji ihtiyaçlarının sağlanması gerekmektedir. Bu bağlamda, fırsat şarj stratejisi, elektrikli otobüslerin terminal duraklarda sefer kalkış bekleme süreleri boyunca veya ara duraklarda yolcu indirme/bindirme süreleri boyunca hızlı bir şekilde bataryalarını doldurmaya imkân tanımaktadır [8].

[9] ulaşım ile ilgili yönetim, tasarım ve planlama konularının tümü Kentsel Ulaşım Ağ Tasarım Problemleri (KUATP) olarak adlandırılmaktadır ve bu başlığı Toplu Taşıma Ağ Tasarım ve Çizelgeleme Problemi (TTATÇP) ve Yol Ağ Tasarım Problemi (YATP) olarak iki alt başlığa ayırmaktadır. TTATÇP, toplu taşıma sisteminin hizmete açılmadan önce ele alınması gereken birbirine bağlı bir dizi problemler bütünüdür ve tüm problemlerin eşzamanlı olarak ele alınması en uygun çözüm yöntemidir. Ancak, problemin karmaşık yapısından dolayı bu alt problemleri ayrı ayrı çözmek daha gerçekçi bir yöntemdir [10]. Birbirine bağlı bu alt problemler, rotaların tasarımı, frekans belirleme, zaman çizelgeleme, taşıt çizelgeleme ve sürücü çizelgeleme aşamalarından oluşmaktadır [11]. Elektrikli otobüslerin ortaya çıkması ile birlikte, TTATÇP'ne ek olarak, elektrikli otobüsler için enerji tedarik problemini de meydana getirmektedir. Elektrikli otobüslere enerji tedarikini gerçekleştirmek için statik veya dinamik şarj cihazlarının konumlandırılması problemi Şarj İstasyonu Yerleştirme Problemi (ŞİYP) olarak adlandırılmaktadır [8]. Kombinatoriyal yapıda ve NP-Zor (NP-Hard) sınıfına ait olan ŞİYP'leri için en uygun karar değişkenlerini, özellikle büyük boyutlu problemler için, kesin çözüm yöntemleriyle elde etmek günümüz hesaplama teknolojileriyle oldukça zor ve zaman tüketicidir.

Son yıllarda elektrikli otobüslere olan ilginin artması ile, ŞİYP de toplu taşıma çalışmaları arasında yer bulmaya başlamıştır. [12] ve [8] çalışmalarında, elektrikli otobüsler ile işletilen toplu taşıma ağları için geliştirdikleri çift seviyeli modelde, üst seviyede rotaları belirlerken, alt seviyede ise karma-tamsayı programlama ile şarj cihazlarının yerleştirileceği durakları belirlemektedir. Bu çalışmalarda ağ tasarımı sadece bir saatlik toplu taşıma hizmeti için yapılmış olup, otobüslerin duraklardaki şarj olma sürelerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. [13], [14] ve [15] çalışmaları ise, elektrikli otobüslerin enerji tedarikini toplu taşıma ağından bağımsız olarak konumlandırılmış şarj merkezlerinde gerçekleştirdiklerini varsaymışlar ve her bir rotanın kendisine en yakın aday şarj merkezine yönlendirileceğini kabul etmişlerdir. [16] ve [17] çalışmaları, hızlı şarj teknolojisi ile şarj cihazlarının yerleştirileceği durakları karma-tamsayı programlama ile belirlemektedir. Otobüslerin duraklarda şarj olma sürelerinin durak türlerine

göre değiştiğini varsaymışlardır. [18] elektrikli otobüsleri şarj etmek amacıyla şarj cihazlarının yerleştirileceği durakları belirlemek için, karma-tamsayılı programlama kullanmanın yanında Çoklu Geri İzleme ve Açgözlü algoritmalarından faydalanmışlardır.

Bu çalışmada, seferleri çizelgelenmiş ve taşıtların seferlere ataması yapılmış bir toplu taşıma ağındaki elektrikli otobüslerin, enerji ihtiyacı için hizmet dışı kalmasına gerek kalmadan, gün boyu işleme devam edebilecek şekilde yeterli enerji ihtiyaçlarının tedarik edilmesi için, duraklarda şarj stratejisini benimseyen şarj altyapısının oluşturulması için bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli geçmiş çalışmalara ek olarak, ağdaki her bir otobüsün gün boyu enerji durumunu dikkate almakla beraber, şarj cihazlı duraklarda enerji tedarik süresi toplu taşıma atamasından elde edilen yolcu iniş/biniş sayılarına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Toplu taşıma ağı üzerindeki mevcut duraklar arasından seçilecek olanlara yerleştirilecek şarj cihazları, seçilen duraklara bağlı yatırım maliyetinin minimizasyonu doğrultusunda belirlenmektedir. Şarj istasyonlarının yerleştirileceği durakların belirlenmesi için geliştirilen karma-tamsayılı program, Dal Sınır Yöntemi ile çözülmektedir. Testler, 10 rotaya sahip, 183 otobüs ile günlük 955 otobüs seferi gerçekleştirilen Mandl Test Ağı üzerinde gerçekleştirilmektedir.

## YÖNTEM

Otobüslerin gün boyu enerji durumlarının oluşturulabilmesi için, linkler üzerinde harcanan enerji miktarlarının ve kablosuz şarj cihazı ile donatılmış duraklara geldiklerinde tedarik edilen enerji miktarlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, otobüslerin linklerdeki enerji tüketimi, linklerin uzunluğuna ve linklerin kat edildiği seyahat sürelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Link seyahat süresinin enerji tüketim modeline dahil edilmesinin sebebi; gün içerisinde farklı zamanlardaki link seyahat sürelerinin, gün içerisinde değişen yolculuk talebinin yollarda meydana getirdiği değişken sıklığına bağlı olarak değişmesidir. Bu sayede, otobüsün ilgili link üzerindeki seyahat süresine bağlı ısıtma/soğutma sistemleri ve duraklamalardan kaynaklı enerji kayıplarının da hesaba katılması amaçlanmıştır. Otobüslerin duraklardaki enerji tedarikleri ise, duraklarda bekleme, yani yolcu indirme/bindirme sürelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel programa ait semboller dizini Tablo 2’de verilmektedir.

**Tablo 2 - Semboller dizini**

---

$S$ :	Duraklar kümesi
$L$ :	Linkler kümesi
$R$ :	Rotalar kümesi
$K$ :	Seferler kümesi
$B$ :	Otobüsler kümesi
$B^r$ :	$r$ rotasında işletilen otobüsler kümesi
$K^{r,b}$ :	$r$ rotasında $b$ otobüsü ile işletilen seferler kümesi
$I^r$ :	$r$ rotasındaki durak sıraları kümesi
$s$ :	Durak indeksi
$l$ :	Link indeksi
$r$ :	Rota indeksi

---

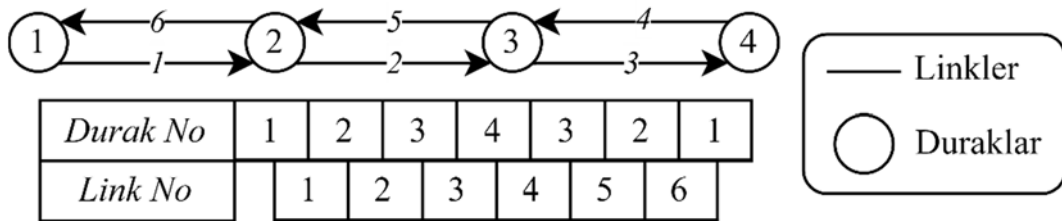


---

$SOC_{min}$ :	İzin verilen minimum batarya doluluk oranı
$SOC_{max}$ :	İzin verilen maksimum batarya doluluk oranı
$BC$ :	Batarya kapasitesi ( $kWh$ )
$CP$ :	Şarj gücü ( $kW$ )
$c_1$ :	Linklerde kilometre başına harcanan enerji ( $kWh/km$ )
$c_2$ :	Linklerde seyahat edilen dakika başına harcanan enerji ( $kWh/dk$ )
$C_s$ :	Durak $s$ 'yi kablosuz şarj istasyonu ile donatma maliyeti ( $TL$ )
$\tilde{t}$ :	Duraklarda inen/binen yolcu başına geçen süre ( $sa$ )
$d^{r,i}$ :	$r$ rotasındaki $i$ ve $i + 1$ sıradaki duraklar arasındaki linkin uzunluğu ( $km$ )
$t^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ ve $i + 1$ sıradaki duraklar arasındaki linkin seyahat süresi ( $dk$ )
$\hat{n}^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ durak sırasındaki durakta binen yolcu sayısı
$\check{n}^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ durak sırasındaki durakta inen yolcu sayısı
$t_c^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ durak sırasındaki durakta şarj olma süresi ( $sa$ )
$\delta^s$ :	Eğer durak $s$ 'ye şarj istasyonu yerleştiriliyorsa 1, aksi halde 0
$E^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ durak sırasındaki duraktan ayrıldığı andaki enerji durumu ( $kWh$ )
$e^{r,b,k,i}$ :	$r$ rotasındaki $b$ otobüsünün $k$ seferinde $i$ ve $i + 1$ sıradaki duraklar arasındaki linkte harcanan enerji miktarı ( $kWh$ )

---

Linkler üzerinde harcanan enerji miktarlarının hesaplanabilmesi için, ağdaki tüm otobüslerin tüm seferlerinin durak ve link bazında zaman çizelgesinin ve ağdaki tüm linklerin uzunluklarının bilinmesi gerekmektedir. Otobüslerin şarj cihazlı duraklara geldiklerinde tedarik edilen enerji miktarlarının hesaplanabilmesi için, toplu taşıma talebinin ağı atanması sonucu ortaya çıkan her bir otobüsün her bir seferinin tüm duraklardaki inen/binen yolcu sayılarının elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 1'de örnek bir  $r$  rotasına ait düğüm ve link sırası verilirken, Tablo 3'te,  $r$  rotasına hizmet veren bir  $b$  otobüsünün tüm seferleri için gün boyu duraklar ve linkler bazında zaman çizelgesi ile duraklarda inen/binen yolcu sayıları verilmektedir.



Şekil 1 - Örnek bir  $r$  rotasının güzergâh bilgileri

**Tablo 3** - Örnek bir  $r$  rotasının  $b$  otobüsüne ait gün boyu çizelge ve yolculuk aktivitesi

Otobüs Sefer No	1							2						
Durak No	1	2	3	4	3	2	1	1	2	3	4	3	2	1
Durak Sıra No	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Durağa Varış Zamanı (dk)	360	368	374	384	391	400	403	405	416	425	438	448	460	466
Durakta İnen Yolcu Sayısı	15	8	11	7	0	1	0	7	6	9	8	3	1	0
Durakta Binen Yolcu Sayısı	0	3	2	6	12	9	10	0	1	2	10	4	9	8

Bu çalışmada problemi sadeleştirmek adına bazı varsayımlarda bulunulmuştur: (1) otobüsler güne bataryaları tamamen dolu olarak başlar, (2) otobüslerin ardışık iki durak arasında harcadığı enerji, iki durak arasındaki linkin uzunluğuna ve iki durak arasındaki değişken seyahat süresine bağlı olarak ortalama tüketim değerleri ile hesaplanmaktadır, (3) sefer çizelgeleri oluşturulurken, seferlerin duraklardaki yolcu indirme/bindirme süreleri hesaba katılmamıştır, (4) otobüsler terminal duraklarda ve ara duraklarda yolcu indirme/bindirme süreleri boyunca şarj olma imkânına sahip olmakla beraber, ardışık iki sefer arasındaki bekleme sürelerinde şarj olma imkânına sahip değildirler, (5) otobüsler ardışık iki seferleri arasında, terminal durağa çok yakın bir depo alanında beklemekte olup, terminal durak ile bu depo alanı arasındaki yolculuklarda enerji tüketilmediği varsayılmaktadır, (6) bir durağı şarj cihazı ile donatmanın maliyeti kendine en yakın trafoya olan uzaklık ile ilişkilidir.

Problemin çözümüne ait matematiksel program şu şekildedir;

$$Z = \sum_{s \in S} \delta^s \times C^s \quad \forall s \in S \quad (1)$$

$$t_c^{r,b,k,i} \leq \delta^s \times \max\{\hat{n}^{r,b,k,i}, \check{n}^{r,b,k,i}\} \times \tilde{t} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (2)$$

$$t_c^{r,b,k,i} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (3)$$

$$E^{r,b,k,i+1} = E^{r,b,k,i} - e^{r,b,k,i} + t_c^{r,b,k,i+1} \times CP \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (4)$$

$$E^{r,b,k,i} \geq e^{r,b,k,i} + BC \times SOC_{min} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (5)$$

$$e^{r,b,k,i} = d^{r,i} \times c_1 + t^{r,b,k,i} \times c_2 \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (6)$$

$$E^{r,b,k,i} \leq BC \times SOC_{max} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (7)$$

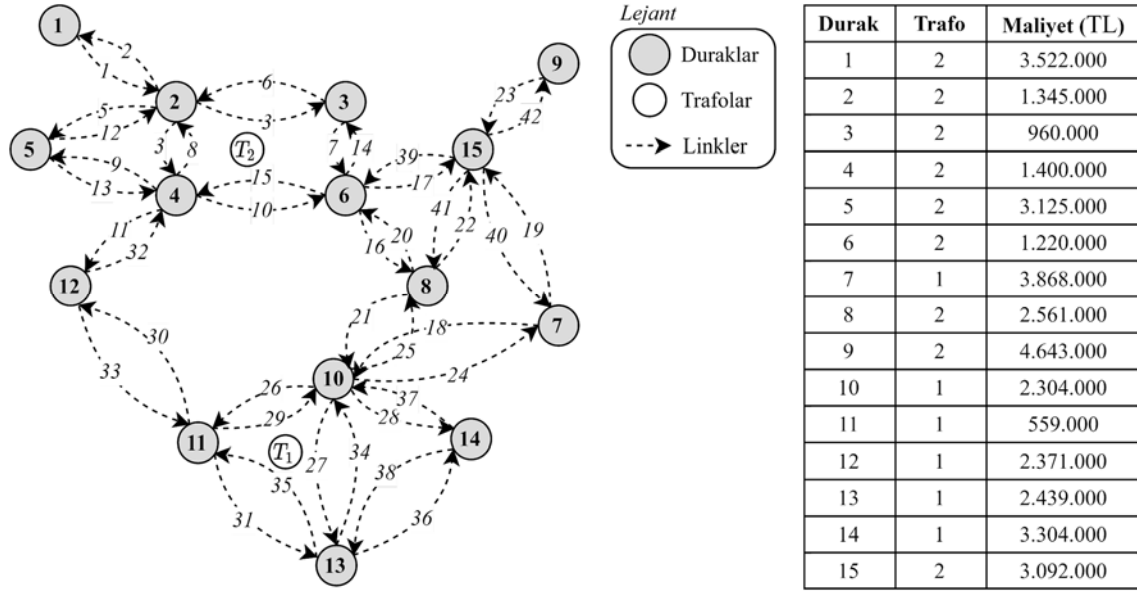
$$E^{r,b,1,1} = BC \times SOC_{max} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r \quad (8)$$

Matematiksel programda Denklem 1 ile verilen amaç fonksiyonu, şarj cihazlarının tesis edileceği duraklara bağlı yatırım maliyetinin minimizasyonunu ifade etmektedir. Denklem 2’de verilen kısıt, eğer bir durağa şarj cihazı tesis edildiyse, otobüslerin bu duraktaki şarj süresinin yolcu indirme/bindirme süresinden fazla olmasını engellerken, Denklem 3’te verilen kısıt ise, şarj süresinin negatif bir değer almamasını sağlamaktadır. Denklem 4, linklerde tüketilen ve duraklarda şarj ile kazanılan enerji dışında enerji değişimi olmadığını ifade eden, enerjinin korunumu kısıtıdır. Denklem 5 ile verilen kısıt bir duraktaki otobüsün takip eden durağa vardığında, en az izin verilen minimum enerji miktarına sahip olacak kadar enerjiye sahip olmasını sağlamaktadır. Denklem 6 otobüslerin enerji tüketim modelidir. Denklem 7 ile verilen kısıt, otobüslerin herhangi bir anda izin verilen maksimum enerji durumunu geçmemesini

sağlarken, Denklem 8 ise, bu çalışmada otobüslerin hizmete başlamadan önce gece boyunca bataryalarını doldurdıkları varsayıldığı için, birinci seferlerinin birinci duraklarındaki enerji durumunun tamamen dolu olduğunu ifade etmektedir.

## SAYISAL UYGULAMA

Geliştirilen optimizasyon modeli literatürde sıklıkla kullanılmış olan, 15 düğüm ve 21 çift yönlü (toplam 42) linke sahip olan Mandl Test Ağı için, [19] çalışmasında en iyi çözüm olarak üretilmiş olan 10 rotalı toplu taşıma ağı üzerinde uygulanmıştır. Ağ görseli ve ağ üzerine yerleştirilmiş hipotetik iki trafonun konumlarına göre duraklara şarj cihazı yerleştirmenin maliyetleri Şekil 2’de ve rotalara ait detaylar ise Tablo 4’te verilmektedir.



Şekil 2 - 10 rotalı Mandl Ağı (sol) ve duraklara göre şarj cihazları yatırım maliyetleri (sağ).

Tablo 4 - Kullanılan rotaların düğüm ve link sırası

Rota	Düğüm Sırası	Link Sırası
1	1-2-3-6-8-10-11-13-11-10-8-6-3-2-1	1-2-3-7-16-21-26-31-35-29-25-20-14-6-2
2	9-15-7-10-11-12-1-10-7-15-9	23-40-18-26-30-33-29-24-19-42
3	7-15-8-6-3-2-4-5-4-2-3-6-8-15-7	19-41-20-14-6-4-9-13-8-3-7-16-22-42
4	2-4-6-8-10-11-13-14-13-11-10-8-6-4-2	4-10-16-21-26-31-36-38-35-29-25-20-15-8
5	13-14-10-8-6-3-2-4-2-3-6-8-10-14-13	36-37-25-20-14-6-4-8-3-7-16-21-28-38
6	1-2-5-4-12-4-5-2-1	1-5-13-11-32-9-12-2
7	11-10-7-15-6-3-2-1-2-3-6-15-7-10-11	29-24-19-39-14-6-2-1-3-7-17-40-18-26
8	5-4-6-8-10-11-10-8-6-4-5	13-10-16-21-26-29-25-20-15-9
9	13-11-12-4-5-2-1-2-5-4-12-11-13	35-30-32-9-12-2-1-5-13-11-33-31
10	9-15-8-6-3-2-4-12-4-2-3-6-8-15-9	23-41-20-14-6-4-11-32-8-3-9-16-22-42

Tablo 5 hatlardaki gün boyu gerçekleşen toplam sefer sayısını ve ilgili hatları işletebilmek için gerekli toplam otobüs sayısını, Şekil 3 ise, 5 numaralı hatta çalışan 7 numaralı otobüsün gün boyu çizelgesini ve yolculuk aktivitesini vermektedir.

Optimizasyonda kullanılan ağ değişkenlerine ait parametre değerleri Tablo 6'daki gibidir.

**Tablo 5 - Her bir hat için gerekli otobüs ve sefer sayısı**

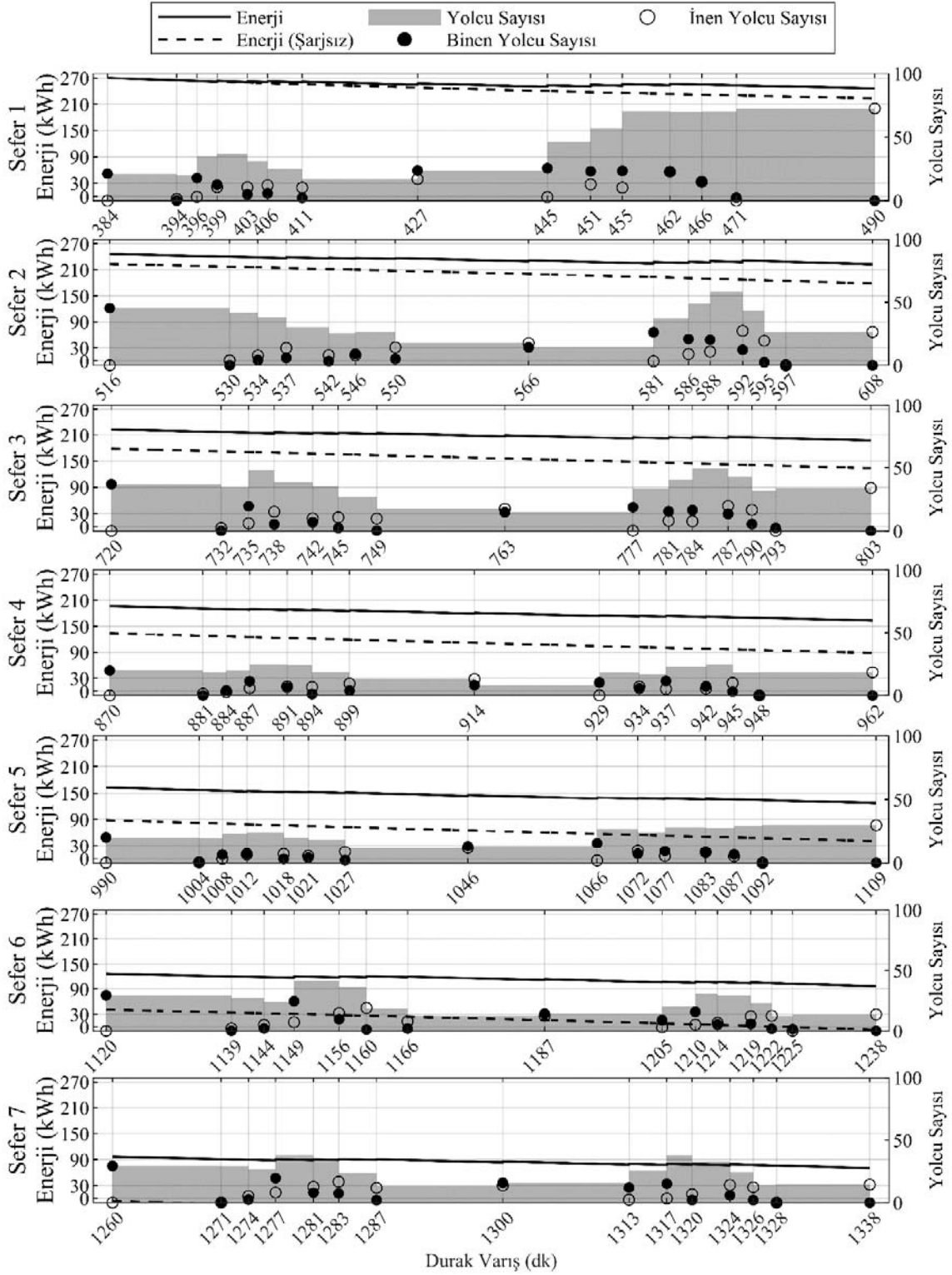
	Hatlar									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gerekli otobüs sayısı	28	22	10	19	20	12	25	19	16	12
Sefer sayısı	118	93	76	97	110	78	127	104	71	81

**Tablo 6 - Parametre değerleri**

$SOC_{min}$ : %10	$c_1$ : 1,2 kWh/km
$SOC_{max}$ : %90	$c_2$ : 0,1 kWh/dk
$BC$ : 300 kWh	$\tilde{t}$ : 2 sn (0,0005 sa)
$CP$ : 250 kW	

**Tablo 7 - 10 rotasındaki 3 otobüsünün gün boyu çizelgesi**

Durak No		9	15	8	6	3	2	4	12	4	2	3	6	8	15	9
Durak Sıra No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 1	384,0	393,6	396,4	399,2	403,4	406,2	411,0	427,0	445,0	451,0	455,4	462,0	466,4	471,2	490,4
Binen Yolcu Sayısı		21,17	0,00	17,75	12,53	4,92	5,77	2,19	23,73	25,51	23,13	23,45	22,21	15,18	2,39	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	1,32	2,97	10,58	10,43	12,02	10,14	16,86	2,80	12,74	10,12	22,72	14,73	0,00	72,49
Enerji Durumu (kWh)		270,00	264,24	262,76	263,02	262,25	262,44	261,57	257,26	253,00	253,82	255,44	256,13	254,49	252,81	246,09
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 2	516,0	530,4	533,8	537,2	542,3	545,5	550,3	566,3	581,3	585,5	588,1	592,0	594,6	597,2	607,6
Binen Yolcu Sayısı		45,38	0,00	4,09	5,95	3,23	9,10	5,02	14,11	26,18	20,80	20,15	12,18	2,35	0,14	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	3,83	7,69	13,66	7,90	8,03	14,11	17,56	3,18	8,82	10,80	27,30	19,35	0,00	26,49
Enerji Durumu (kWh)		246,09	239,85	238,31	238,67	237,46	237,20	236,88	231,72	227,85	228,52	229,86	231,46	230,00	228,54	222,70
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 3	720,0	732,0	735,0	737,8	742,0	744,8	749,0	763,0	777,0	780,9	783,5	787,4	790,0	792,6	803,0
Binen Yolcu Sayısı		36,80	0,00	19,45	5,25	6,86	2,25	0,22	14,65	18,70	15,43	16,31	13,27	5,42	2,32	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	2,23	5,98	15,06	9,82	10,62	9,71	17,43	0,26	8,04	7,62	19,77	16,52	0,00	33,90
Enerji Durumu (kWh)		222,70	216,70	215,20	215,81	214,96	214,95	214,08	209,10	204,30	204,25	205,06	205,61	204,15	202,69	196,85
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 4	870,0	881,2	884,0	886,8	891,3	894,3	898,8	913,8	928,8	933,6	936,8	941,6	944,8	948,0	961,6
Binen Yolcu Sayısı		19,89	0,00	4,02	11,34	6,33	1,22	3,87	8,22	10,31	5,51	11,51	7,37	3,19	0,24	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	1,46	2,89	5,84	7,19	6,77	9,52	13,00	0,14	7,06	5,14	5,54	10,01	0,00	18,46
Enerji Durumu (kWh)		196,85	190,93	189,45	189,55	188,30	187,74	186,81	181,11	175,05	173,75	173,82	172,57	171,05	169,53	163,37
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 5	990,0	1004,4	1008,0	1011,8	1017,5	1021,3	1027,0	1046,0	1066,0	1072,3	1076,5	1082,8	1087,2	1091,6	1109,2
Binen Yolcu Sayısı		20,32	0,00	6,45	7,49	3,12	4,02	2,02	13,29	15,69	7,16	9,43	8,23	6,68	0,41	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	0,35	3,14	6,66	7,03	5,53	8,83	11,89	1,87	9,96	5,40	8,48	5,08	0,00	30,10
Enerji Durumu (kWh)		163,37	157,13	155,57	155,03	153,64	152,82	151,68	145,63	139,80	138,76	138,45	137,20	135,56	133,92	127,36
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 6	1120,0	1139,2	1144,2	1148,8	1155,7	1159,9	1166,2	1187,2	1205,2	1210,3	1213,7	1218,8	1222,0	1225,2	1238,0
Binen Yolcu Sayısı		29,31	0,00	2,00	24,45	9,71	1,11	1,94	14,30	8,89	15,77	5,26	5,95	1,68	1,42	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	2,14	5,06	7,26	14,70	18,99	7,87	12,50	3,04	5,23	6,76	12,12	12,46	0,00	13,65
Enerji Durumu (kWh)		127,36	120,64	118,94	120,67	120,22	121,24	119,90	113,79	107,22	107,10	106,50	105,88	104,36	102,84	96,76
Ayrılış Zamanı (dk)	Sefer 7	1260,0	1271,2	1274,0	1276,8	1280,7	1283,3	1287,2	1300,2	1313,2	1317,1	1319,7	1323,6	1326,0	1328,4	1338,0
Binen Yolcu Sayısı		29,33	0,00	2,40	19,72	7,95	7,38	1,97	16,01	12,07	15,28	2,04	5,78	2,00	0,41	0,00
İnen Yolcu Sayısı		0,00	0,09	5,20	8,10	12,81	16,85	11,87	13,83	2,28	3,29	6,83	14,25	12,40	0,00	14,54
Enerji Durumu (kWh)		96,76	90,84	89,36	90,62	90,21	91,09	90,54	85,47	79,84	79,78	79,27	79,05	77,61	76,17	70,41



Şekil 3 - 10 rotasındaki 3 otobüsünün gün boyu enerji ve yolcu sayısı durumu

Matematiksel programın Dal Sınır Yöntemi ile çözümü için MATLAB Mixed Integer Linear Programming araç kutusundan faydalanılmıştır. Çözümler 16 GB RAM belleğe ve 3.6 Ghz Intel

Core i7 işlemciye sahip bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Karma-tamsayı programın Dal Sınır Yöntemi ile çözümü yaklaşık 7,5 saatte tamamlanmaktadır.

Matematiksel programın Dal Sınır Yöntemi ile çözümü sonucunda şarj cihazlarının yerleştirildiği duraklar 1, 2, 3, 4, 6, 11, 12 ve 13 olarak belirlenmiştir. Bu çözüme bağlı olarak ortaya çıkan yatırım maliyeti ise 13.816.000 TL'dir. Tablo 7, 10 numaralı hatta çalışan 3 numaralı otobüsün gün boyu zaman çizelgesi doğrultusunda, yolculuk aktivitesini ve şarj cihazlarının yerleştirilmesi sonucu duraklardan ayrıldığı andaki enerji durumunu vermektedir.

Duraklarda şarj istasyonu olması ve olmaması durumları için enerji seviyelerinin karşılaştırılması amacıyla, Tablo 7'de verilen otobüsün gün boyu gerçekleştirdiği seferler boyunca şarj istasyonu olması ve olmaması durumlarındaki enerji seviyeleri, inen/binen ve taşınan yolcu sayıları Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te, şarj istasyonları olmaması durumunda otobüsün izin verilen enerji seviyesinin (%10) altına düşerek gün boyu hizmet sunamayacağı; buna ek olarak yolcu sayısının otobüs yolcu kapasitesinin altında kalarak toplu taşıma atama modelinin beklendiği şekilde kapasite kısıtına uygun şekilde çalıştığı görülmektedir.

## **SONUÇ**

Bu çalışmada, bataryalı elektrikli otobüslerin gün boyu verimli kullanımı adına, duraklarda kablosuz şarj teknolojisinden faydalanarak elektrikli otobüslerin gün boyu enerji ihtiyaçlarını sağlayabilmek için, şarj cihazlarının yerleştirileceği durakların belirlenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen karma-tamsayı programı çözebilmek için Dal Sınır Yöntemi kullanılmıştır.

Geliştirilen program için Dal Sınır Yöntemi kullanılarak bir çözüm elde edebilmek, ufak ölçekli bir ağ için bile yaklaşık 7,5 saat sürmektedir. Bu nedenle, problemin çözümü için çok daha kısa sürelerde optimale yakın çözüm verebilen metasezgisel algoritmalar ile elde edilen sonuçların Dal Sınır Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması gelecek çalışmalar için yüksek bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, geliştirilen enerji tüketim modeline, otobüslerin içindeki yolcu yükü etkisinin de eklenerek çalışmanın geliştirilmesi gelecek çalışmalar açısından faydalı olacaktır.

## **Kaynaklar**

- 1 Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z. M., Ye, B., Miao, L., Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid, *Transportation Research Part C*, Vol. 107, 2019, pp 423-443.
- 2 Mposdra, A., Iliopoulou, C., Kepaptsoglou, K., Vlahogianni, E., Tyrinopoulos, Y., Rapid transit network design for on-line electric vehicles, *Advances in Transportation Studies: an International Journal Section*, Vol. 46, 2018, pp 19-30.
- 3 Noel, L., McCormack, R., A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus, *Applied Energy*, Vol. 126, 2014, pp 246-255.
- 4 Gao, Z., LaClair, T., Daw, C., Smith, D., Franzese, O., Simulations of the fuel economy and emissions of hybrid transit buses over planned local routes, *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, Vol. 7(1), 2014, pp 216-237.
- 5 Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up, *Sustainable Bus*, 20 Mart 2020.
- 6 Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T., Liu, C., Li, J., Birky, A., Ward, J., Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service, *Energy*, Vol. 122, 2017, pp 588-600.

- 7 Göhlich, D., Fay, T., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., Zhang, X., Design of urban electric bus systems, *Design Science*, Vol. 4, 2018, e15.
- 8 Illiopolou, C., Kepaptsoglou, K., Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles, *Transportation Research Part D*, Vol. 77, 2018, pp 178- 197.
- 9 Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., Rashidi, H., A review of urban transportation network design problems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 229(2), 2013, pp 281–302.
- 10 Magnanti, T. L., Wong, R. T., *Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms*, *Transportation Science*, Vol. 18(1), 1984, pp 1–55.
- 11 Ceder, A., Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior, Elsevier Ltd., İngiltere, 2007, 626 pp.
- 12 Illiopolou, C., Tassopoulos, I., Kepaptsoglou, K., Beligiannis, G., Electric Transit Route Network Design Problem: Model and Application, *Transportation Research Record*, Vol. 2673(8), 2019, pp 275-283.
- 13 Liu, Y., Feng, X., Zhang, L., Hua, Q., Li, K., A pareto artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective electric transit network design problem, *Transportmetrica A: Transport Science*, Vol. 16(3), 2020, pp 1648-1670.
- 14 Liu, Y., Feng, X., Ding, C., Hua, Q., Ruan, Z., Electric Transit Network Design by an Improved Artificial Fish-Swarm Algorithm, *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, Vol. 146(8), 2020, 0402007.
- 15 Liu, Y., Feng, X., Yang, Y., Ruan, Z., Li, K., Solving urban electric transit network problem by integrating Pareto artificial fish swarm algorithm and genetic algorithm, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2020, In Press.
- 16 Kunith, A., Mendelevitch, R., Kuschmierz, A., Göehlich, D., “Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network”, *EVS29 Symposium*, Montreal:Canada, 2016, 19-22 Haziran.
- 17 Kunith, A., Mendelevitch, R., and Göehlich, D., “Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems”, *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 11, 2017, pp 707-720.
- 18 Wang, X., Yuen, C., Hassan, N., Wu, W., Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, 2017, pp 128-139.
- 19 Arbex, R. O., da Cunha, C. B., Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm, *Transportation Research Part B*, Vol. 81, 2015, pp 355-376.





## Toplu Taşıma Akıllı Kart Verileri ile Yolculuk Transfer Duraklarının Kestirimi

Fehmi Can ÖZER<sup>1</sup>, Hediye TÜYDEŞ YAMAN<sup>2</sup>

### ÖZET

Akıllı toplu taşıma sistemlerinin bir parçası “akıllı kart” olarak da bilinen otomatik ödeme sistemleridir. Akıllı kart sistemlerinin bir katma değeri ise toplu taşıma biniş noktalarının zamansal/mekânsal verilerini saklayabilmeleridir. Belli hatlar veya zaman diliminde transferlerin belirlenmesine imkân tanıyarak toplu taşımada zincirleme şekilde yapılan yolculukların tahmin edilmesine imkân yaratabilmektedir. Bu çalışmada Konya Büyükşehir Belediyesi Toplu Taşıma akıllı kart verilerini geliştirilen “zincirleme yolculuk tahmin” algoritması ile inceleyerek sıklıkla aktarma yapılan duraklarının belirlenmesine odaklanılmıştır. Algoritmanın ilk adımında her kullanıcının günlük ardışık işlemleri arasındaki zaman farkları hesaplanarak aktarmalı/aktarmasız yolculuklar belirlenmiştir. İkinci adımında aktarma yapılan durakların zamansal ve mekânsal dağılımına göre kentsel hareketlilik örüntüleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zincirleme Yolculuk Metodu, Akıllı Kart Verisi, Toplu Taşıma.

### ABSTRACT

#### **Estimation of Transfer Stops with Public Transport Smart Card Data**

Automated Fare Collection Systems, also known as smart card systems, are part of intelligent public transportation. One of its benefits aside from fare collection is storing temporal/spatial data. This data enables us to estimate the chained trips by estimating transfers on particular lines or periods. In this study, the smart card data of Konya City is examined by the developed "Trip Chaining Estimation" algorithm and focused on determining the frequently transferred stops. In the first step, the time differences between the consecutive daily transactions of each user are calculated, and their transfer/direct trips are determined. In the second step, urban mobility patterns were obtained according to the temporal and spatial distribution of the transfer stops.

**Keywords:** Trip Chaining Method, Smart Card Data, Public Transportation.

---

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ozer.can@metu.edu.tr

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - htuydes@metu.edu.tr

## **GİRİŞ**

Akıllı toplu taşıma (TT) sistemlerinin bir parçası “akıllı kart” olarak da bilinen otomatik ödeme sistemleridir. Akıllı kart sistemlerinin bir katma değeri de toplu taşıma biniş noktalarının konumsal ve mekânsal verilerini de saklayabilmeleridir. İlk amaçları ücret toplamak olsa da akıllı kart verileri, her düzeyde (planlama ve politika, operasyonlar ve kontrol) karar verme için kullanılacak ayrıntılı trafik ve operasyonel bilgiler sağlama kapasitesini kanıtlamıştır. Özellikle otobüsle yapılan TT hizmetlerinde yolcular akıllı kartlarını yalnızca TT araçlarına binişte kullandıkları için seyahatlerin sadece biniş bilgileri elde edilebilmekte; diğer taraftan akıllı kart kullanımındaki örüntülere göre belli hatlar veya zaman diliminde, transferlerin (aktarmaların) de belirlenmesine imkân tanıyarak aslında toplu taşımada zincirleme şekilde yapılan aktarmalı yolculukların da tahmin edilmesine imkân sağlayabilmektedir.

## **AMAÇ**

Bu çalışmada TT akıllı kart verilerini, geliştirilen “zincirleme yolculuk tahmin” algoritması ile inceleyerek sıklıkla aktarma yapılan durakların belirlenmesine odaklanılmıştır. Algoritmanın ilk adımında her kullanıcının bir gündeki ardışık işlemleri arasındaki zaman farkları hesaplanarak kullanıcıların günlük aktarmalı/aktarmasız yolculukları belirlenmiştir. İkinci adımında aktarma yapılan durakların zamansal ve mekânsal dağılımına göre kentsel hareketlilik örüntüleri elde edilmiştir.

## **METODOLOJİ**

Zincirleme yolculuk metodunun [1], [2], [3] ilk adımında her kullanıcının bir gündeki ardışık işlemleri arasındaki zaman farkları hesaplanarak ve elde edilen zaman farklarına dayalı olarak her bir işlem kaydına bir yolculuk numarası ve etap numarası atanmıştır [4]. Her yeni gün için, bir akıllı kart kullanıcısının yolculuk ve etap numaraları birden başlar ve gün sonuna kadar her bir kayıt ile artabilir veya aynı kalır. Gün içerisinde her bir yeni yolculuğun etap numarası birdir ve günün ilk yolculuğu değilse yolculuk numarası bir önceki yolculuğun numarasından bir fazladır.

Yolculukların etaplara ayrılmasında dikkate alınan değişkenlerden biri binişler arasındaki zaman farkıdır [5]. Konya Büyükşehir Belediyesi (KonBB) toplu taşımada yolcuların aktarma yapabilmesi için koyduğu azami süre olan 90 dakika bu çalışmada da temel alınmıştır. Eğer, bir akıllı kart kullanıcısına ait aynı gün içerisindeki ardışık işlemler arasındaki zaman farkı 90 dakikanın altında ise, bir sonraki biniş bir transfer yolculuğu olarak kabul edilerek aynı yolculuğun bir diğer etabı olarak değerlendirilmiştir. Ardışık binişler arasındaki zaman farkı 90 dakikanın üzerinde ise, bir sonraki biniş bir önceki binişten bağımsız olarak düşünülerek bir önceki binişin yolculuk numarası bir arttırılarak bir sonraki yolculuğa atanmıştır.

Tablo 1’de 2018 Ekim ayına ait biniş verileri üzerinde yapılan analizler sonucu günlük en fazla yolculuk sayısına sahip akıllı kart kullanıcısının ayın 10’undaki bütün biniş kayıtları gösterilmektedir. Geliştirilen zincirleme yolculuk metodu sonuçlarına göre kullanıcının gün içerisinde 6 farklı yolculuk yaptığı tespit edilmiştir. Günün ilk yolculuğu binişler arasındaki zaman farkının 60.73 dakika olması nedeniyle 2 etaptan oluştuğu saptanırken diğer 5 yolculuğun tek etaptan oluştuğu görülmektedir.

Bir akıllı kart kullanıcısının bir gün içinde yaptığı bütün binişlerin sırasıyla kaydedilmesi ve zamansal-mekânsal bütünlüğün (ilk binilen TT hattı rotasının ikinci binilen durak noktasına en yakın duraklarının) incelenmesi ile yolculuk yapısı ve varsa olası etapları belirlenmesi aşamasında binilen hattan olası iniş durakları tahmin edilmiştir. Bu kısımda algoritma aynı yolculuğun ardışık etapların hat bilgileri kıyaslayarak yolcunun bir hattan diğerine geçiş yaparken büyük olasılıkla bir sonraki biniş durağına en yakın durakta ineceğine yönelik varsayımında

bulunarak transfer iniş durağını saptamaktadır. Transfer iniş durağı saptanırken, bir sonraki binış durağına maksimum 800 metre uzaklıkta olması koşulu aranmıştır [6].

**Tablo 1 - Gün içerisinde en çok yolculuk yapan akıllı kart kullanıcısı**

Kart No	Hat No	Ayın Gün	Zaman	Zaman Farkı (dk)	BDurak No	Yolculuk No	Etap No
6898	100	10	08:39:56	-	T5d	1	1
6898	10	10	09:40:40	60.73	27a	1	2
6898	10	10	11:22:51	102.18	1815d	2	1
6898	10	10	13:29:48	126.95	1524a	3	1
6898	10	10	15:50:15	140.45	1815d	4	1
6898	100	10	17:50:52	120.62	T30a	5	1
6898	100	10	19:36:10	105.30	T5d	6	1

Tablo 2’de, bir akıllı kart kullanıcısının gün içerisinde yaptığı 15 transfer gösterilmektedir. Bazı binış durakları (BDurakNo), kayıtlardaki veri kaybı sebebiyle elde edilememesine rağmen, tüm yolculuk ve etap numaraları saptanmıştır. Gün içerisinde sadece bir yolculuk gerçekleştirdiği görülen bu kullanıcının, yolculuğunun ikinci etabında 10 numaralı hatta ait bir araçtan inip 1060 numaralı hatta 19d numaralı durakta aktarma yapmıştır. 19d numaralı durağı, 10 numaralı hatta en yakın durak 2415a durağı olmasına rağmen aralarındaki mesafenin 1482.99 metre olması nedeniyle, 2415a numaralı durak transfer iniş durağı (İDurakNo) olarak kaydedilmemiştir.

**Tablo 2 - Transfer Duraklarının Saptanması**

Kart No	Hat No	Ayın Günü	Zaman	Zaman, Farkı (dk)	BDurak No	İDurak No	Trmesafe (m)	Yolculuk No	Etap No
189432	10	23	07:50:05	-	-	-	-	1	1
189432	1060	23	07:58:38	8.55	19d	2414a	1.68	1	2
189432	1250	23	08:55:02	56.40	2414a	2428a	6.38	1	3
189432	241	23	09:32:18	37.27	2429a	-	-	1	4
189432	270	23	10:02:25	30.12	-	-	-	1	5
189432	100	23	10:21:15	18.83	T31d	T1d	0.0	1	6
189432	100	23	11:27:15	66.00	T1d	T21d	0.0	1	7
189432	100	23	12:10:26	43.18	T21d	-	-	1	8
189432	260	23	12:46:35	36.15	2428a	2428a	2.42	1	9
189432	910	23	12:51:20	4.75	2428a	589a	2.36	1	10
189432	1240	23	13:08:40	17.33	589a	24d	0.0	1	11
189432	230	23	13:42:42	34.03	24d	419a	0.15	1	12
189432	1060	23	14:02:37	19.92	419a	2414a	0.0	1	13
189432	930	23	14:21:42	19.08	2414a	24d	2.77	1	14
189432	230	23	14:52:22	30.67	24d	557a	0.0	1	15
189432	230	23	15:10:19	17.95	557a	2429a	2.89	1	16

Tablo 2’de bulunan bir başka örnekte, 3 ve 4 numaralı etaplar arası zaman farkının 37,27 dakika olduğu görülmektedir. 241 numaralı hatta 2429a durağında binış yapan kullanıcı, indiği aracın bulunduğu hat olan 1250 numaralı hat üzerindeki duraklar arasında, 2429a numaralı hatta en

yakın durağın 2428a olduğu ve aralarındaki mesafenin 6.38 metre olduğu tespit edilmiştir. Transfer mesafesi, kabul edilebilir transfer mesafesi olarak seçilen 800 metrenin altında olduğu için 2428a durağı bu etap için transfer iniş durağı olarak kaydedilmiştir.

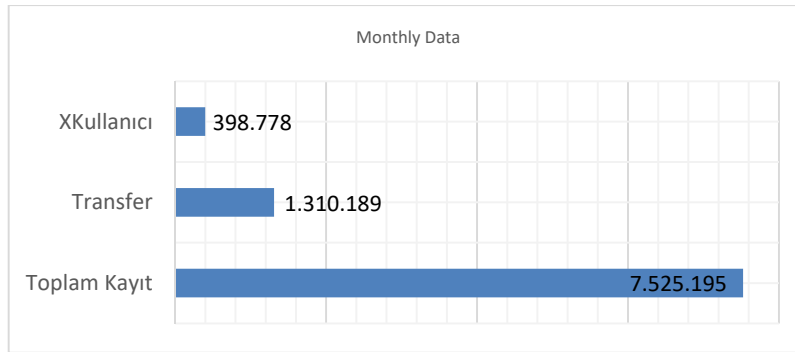
Yolculuk/Etap numarası ve transfer iniş durağı tespitinin ardından, yapılan bir başka analiz ise XKullanıcı tespitidir. Bu bildiriye, XKullanıcı terimi, bir yolcunun beraber seyahat ettiği kişiler için kendi akıllı kartı ile ödeme yapması durumunda, kendi ulaşım kayıtları dışında sisteme fazladan eklenen ulaşım kayıtları için kullanılmıştır. XKullanıcı kayıtlarının zincirleme yolculuk metodundan sonra tespit edilmesi, kullanıcı için fazladan oluşturulan etap numaralarının tespit edilebilmesi açısından önemlidir. XKullanıcı tespitinde kullanılan ölçüler ZamanFarkı (dk), HatNo ve BDurakNo değişkenleridir. Eğer ardışık kayıtlar arasındaki zaman farkı 5 dakikanın altında ve hat numaraları ile biniş yapılan durak numaraları aynı ise bu kayıtlar XKullanıcı olarak işaretlenir (Tablo 3).

**Tablo 3 - XKullanıcı Tespiti**

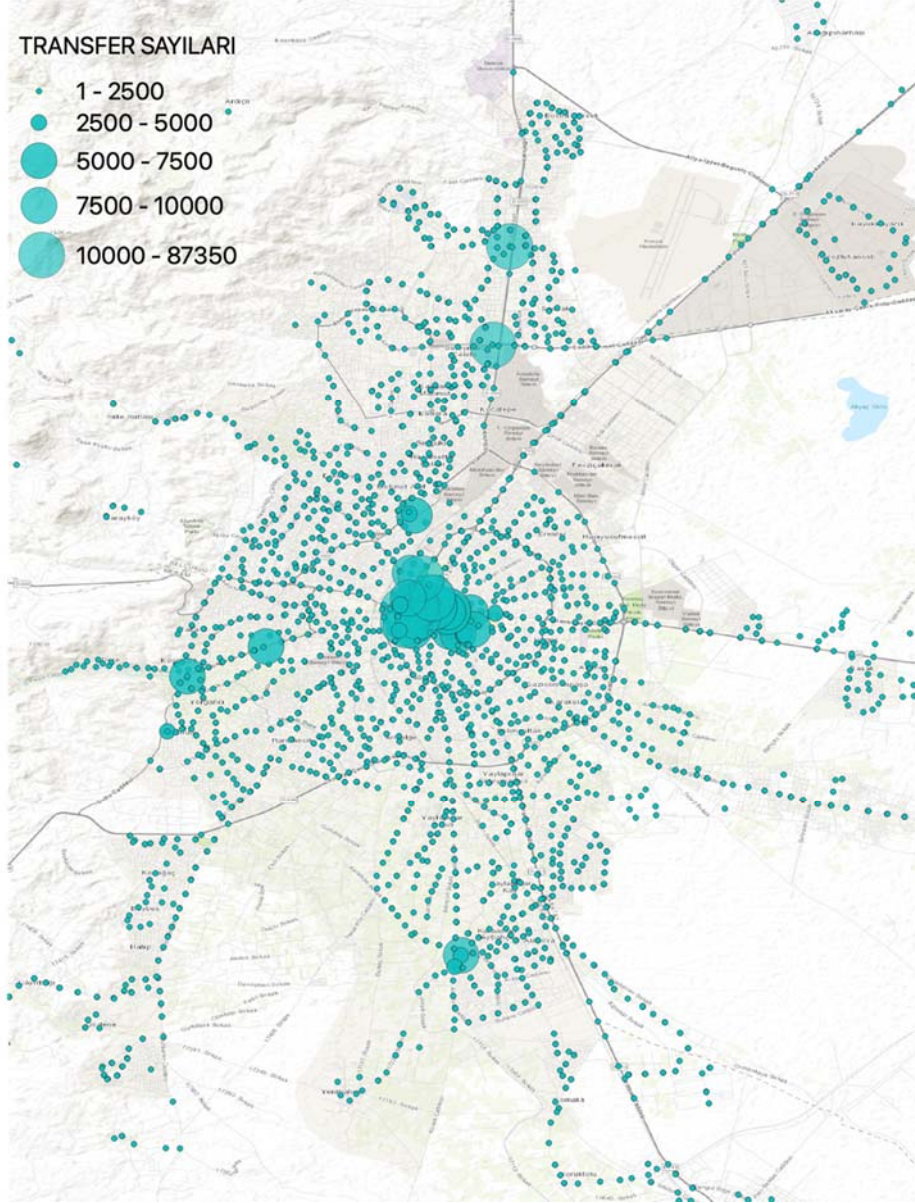
Kart No	Hat No	Ayın Günü	Zaman	Zaman Farkı (dk)	BDurak No	İDurak No	Trmesafe (m)	Yolculuk No	Etap No	XKullanıcı
266868	870	4	07:13:18	-	2414a	2414a	0.0	1	1	Yanlış
266868	870	4	07:13:31	0.22	2414a	2414a	0.0	1	2	Doğru
266868	870	4	07:13:33	0.03	2414a	2414a	0.0	1	3	Doğru
266868	870	4	07:13:38	0.08	2414a	2153a	0.0	1	4	Doğru
266868	280	4	07:46:35	32.95	2153a	2153a	0.0	1	5	Yanlış
266868	280	4	07:46:44	0.15	2153a	2153a	0.0	1	6	Doğru
266868	280	4	07:46:49	0.08	2153a	2153a	0.0	1	7	Doğru
266868	280	4	07:46:51	0.03	2153a			1	8	Doğru
266868	920	4	18:02:12	615.35	601a			2	1	Yanlış
266868	1240	5	07:28:44	-	13d	13d	0.0	1	1	Yanlış
266868	1240	5	07:28:46	0.03	13d	13d	0.0	1	2	Doğru
266868	1240	5	07:28:50	0.07	13d	13d	0.0	1	3	Doğru
266868	1240	5	07:28:54	0.07	13d			1	4	Doğru
266868	260	5	18:39:54	671.00	600a	600a	0.0	2	1	Yanlış
266868	260	5	18:40:01	0.12	600a	600a	0.0	2	2	Doğru
266868	260	5	18:40:03	0.03	600a	600a	0.0	2	3	Doğru
266868	260	5	18:40:06	0.05	600a			2	4	Doğru

Bu çalışmada Konya ili 2018 Ekim ayı TT akıllı kart verilerinin tamamı analiz edilmiştir. Tablo 4'te ise bir aylık TT akıllı kart verisinin XKullanıcı, Transfer ve Toplam sayıları gösterilmektedir. Konya ilinde, 2018 Ekim ayı içerisinde TT akıllı kartları kullanılarak toplam 7,525,195 kayıt üretilirken, bu kayıtların %17,4'ünü transferlerin oluşturduğu saptanmıştır. Toplam kayıtların %5,3 ise XKullanıcılara yani bir akıllı kart sahibinin yanında seyahat eden yolculara aittir.

**Tablo 4 - Aylık Akıllı Kart Toplu Taşıma Kayıtları**



Geliştirilen algoritma sayesinde tespit edilen transfer noktalarının şehir içindeki dağılımları Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu görseldeki durak bazlı transfer sayıları tüm kullanıcıların bir aylık verilerinin işlenmesi sonucu elde edilmiştir. Şekildeki sembol büyüklükleri transfer sayıları ile ilişkilendirilmiş olup, beklendiği üzere en fazla transferin şehir merkezindeki Alaeddin Tepesi çevresinden yapıldığı görülmektedir. Ayrıca şehrin kuzeyinde bulunan Selçuk Üniversitesi kampüsü önünde yapılan transferlerin fazlalığına, kampüs içerisine gidişte veya kampüsten çıkarken yapılan aktarmaların neden olduğu söylenebilir.



Şekil 1 - Bir Ay İçerisinde En Fazla Transfer Yapılan Duraklar

## SONUÇ

Bu çalışmada, TT akıllı kart verileri kullanılarak geliştirilen “zincirleme yolculuk tahmin” algoritması ile Konya ili içerisinde bir ay boyunca aktarma yapılan ve yapılmayan duraklar

kullanıcı bazlı olarak belirlenmiştir. Bu durakların mekânsal verilerinden yararlanılarak durak transfer sayılarını gösteren bir tematik harita hazırlanmıştır. Elde edilen transfer duraklarının konum ve zaman verilerinin birlikte dikkate alınmasıyla yapılan çalışmanın genişletilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, akıllı kart verisi yardımı ile elde edilen bu kestirimlerin, ileride yapılması planlanan TT projelerine altlık oluşturabileceği düşünülmektedir.

### **Kaynaklar**

- [1] M. Trépanier, N. Tranchant, and R. Chapleau, “Individual trip destination estimation in a transit smart card automated fare collection system,” *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2007, doi: 10.1080/15472450601122256.
- [2] J. J. Barry, R. Freimer, and H. Slavin, “Use of entry-only automatic fare collection data to estimate linked transit trips in New York city,” *Transportation Research Record*, no. 2112, pp. 53–61, 2009, doi: 10.3141/2112-07.
- [3] A. C. Diker, E. Nasiboğlu, and E. Nasibov, “Toplu Ulaşımında Akıllı Kart Verilerinin Analizi ile Yolcu Yoğunluğunun Tahmin Edilmesi,” *Big data*, p. 3.
- [4] D. Zhao, W. Wang, G. P. Ong, and Y. Ji, “An Association Rule Based Method to Integrate Metro-Public Bicycle Smart Card Data for Trip Chain Analysis,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4047682.
- [5] A. A. Alsger, M. Mesbah, L. Ferreira, and H. Safi, “Use of smart card fare data to estimate public transport origin-destination matrix,” *Transportation Research Record*, vol. 2535, pp. 88–96, 2015, doi: 10.3141/2535-10.
- [6] A. Alsger, B. Assemi, M. Mesbah, and L. Ferreira, “Validating and improving public transport origin-destination estimation algorithm using smart card fare data,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 490–506, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.05.004.

## Işıksız Kavşaklarda Sürücüsüz Taşıtlarla Ağır Taşıt Etkileşimlerinin İrdelenmesi

Serhan TANYEL<sup>1</sup>, İlgin GÖKAŞAR<sup>2</sup>, Selim DÜNDAR<sup>3</sup>, Ali TOPAL<sup>4</sup>, Burak ŞENGÖZ<sup>5</sup>

### ÖZET

Sürücüsüz araç teknolojilerindeki gelişmeler bu araçların trafik akımına dahil olması yakın gelecekte mümkün kılınacaktır. Sürücülü ve sürücüsüz araçların bir arada bulunduğu trafikte sürücüsüz araçların ağır taşıtlar ile etkileşimlerinin trafiğe etkisi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada, ışıksız kavşak bölgelerinde ağır taşıtlar ile sürücüsüz araçların etkileşimlerinin yakıt tüketimi, salınım ve gecikme açısından etkileri araştırılmıştır. Öncelikle sürücüsüz taşıtların kritik aralık kabul değerleri hesaplanmış, ardından SIDRA kavşak yazılımı üzerinde değişken sürücüsüz ve ağır taşıt oranlarının bu değerlere etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sürücüsüz araç oranlarının artması ve ağır araç oranlarının düşmesi ile gecikmelerin, CO<sub>2</sub> salınımının ve yakıt tüketiminin azaldığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Işıksız kavşaklar, Sürücüsüz taşıtlar, Ağır taşıtlar, CO<sub>2</sub> Salınımı, Gecikme

### ABSTRACT

#### **Investigation of Heavy Vehicle Interactions with Driverless Vehicles at Unsignalized Intersections**

Driverless vehicle advancements allow these vehicles to be integrated into the traffic flow. The interaction of driverless and heavy vehicles has grown in importance as a research topic. This interaction is investigated in this study in unsignalized intersection areas in terms of fuel consumption, emission, and delay. After calculating critical gap acceptance values for driverless vehicles, the effect of driverless and heavy vehicle ratios on these values is examined using SIDRA intersection software. The findings show that as autonomous vehicle rates rise and heavy vehicle rates fall, so do delays, CO<sub>2</sub> emissions, and fuel consumption.

**Keywords:** Unsignalized intersections, Driverless vehicles, Heavy vehicles, CO<sub>2</sub> Emission, Delay

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - serhan.tanyel@deu.edu.tr

2 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ilgin.gokasar@boun.edu.tr

3 Okan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - selim.dundar@okan.edu.tr

4 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - ali.topal@deu.edu.tr

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir - burak.sengoz@deu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Akıllı ulaşım sistemleri kentlerde hem trafik yönetiminde hem de kaza yönetiminde kullanılarak sürücü kaynaklı kusurları en aza indirmeye, araç asistanı ve sürüş destek sistemleri gibi teknolojik aletlerle daha etkin trafik yönetimi elde edilebilmektedir. Sürücüsüz taşıt teknolojisiyle beraber otomobil sektöründe trafik yönetimine farklı bir bakış açısı kazandırılmaktadır. Günümüzde sürücüsüz araçlar üzerine yürütülen çalışmaların bir bölümü otoyol trafik akımını incelemektedir [1, 2, 3, 4]. Bir diğer bölümü ise kavşaklardaki trafik akımını incelemektedir [5, 6, 7]. Bu çalışmalar da iki ana bölümde toplanabilmektedir. Literatürde bulunan ve kavşakları konu alan çalışmaların çoğunluğu ışıklı kavşaklar ile ilgilidir. Bu çalışmaların bir kısmı geleneksel sinyalizasyon sistemleri ile kavşak başarımı üzerineyken [7], diğer kısmı sanal trafik ışıklarıyla beraber V2V (araçtan-araca) [8,9] veya V2I (araçtan-altyapıya) teknolojisinin kullanıldığı kavşaklardaki başarım üzerinedir. Ek olarak, sürücüsüz araçların kavşak kapasitesine etkisini görmek amacıyla yapılan çalışmalar [1, 2, 10] da mevcuttur.

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak ışıksız kavşak sistemleri de gelişmektedir. Fakat, sürücüsüz taşıtların ışıksız kavşak sistemlerine dahil edilmesi durumunda trafik gecikmelerinin, CO2 salınımının ve yakıt tüketiminin ne şekilde değişeceği bilinmemektedir. Aynı zamanda, bu araçlar ile sürücülü araçların etkileşiminin ne derecede olumlu veya olumsuz olacağı hakkında da kesin bir bilgi yoktur.

### 1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, sürücüsüz araçların ışıksız kavşaklarda ağır taşıtlar ile birlikte bulunduğu durumlarda trafik gecikmesinin, yakıt tüketiminin ve CO2 salınımının ne yönde etkileneceğini görmektir. Böylelikle, sürücüsüz araçlar trafiğe tam anlamıyla adapte olduğunda ışıksız kavşak sistemlerinde kullanıldığında ne gibi kazanımlar elde edilebileceği öğrenilmiş olacaktır. Elde edilmesi hedeflenen bulgular için öncelikle sürücüsüz araçların kritik aralık kabul değerleri hesaplanmış, ardından SIDRA Kavşak Programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. KRİTİK ARALIK KABULÜ

Normal şartlarda, yanyoldan ışıksız kavşağa katılan bir sürücüsüz aracın kritik aralık kabul değeri sürücülü araçlara göre daha düşüktür. Aynı şekilde, takip aralık değerinin de daha az olması beklenmektedir. Sürücüsüz araçların trafiğe katılması ile bu değerlerin düşüşünün, ışıksız kavşaklarda gecikme azalışına ve kapasite artışına yol açması beklenmektedir. Fakat, bu beklentinin bulgular ile desteklenebilmesi için öncelikle sürücüsüz araçların kritik aralık kabul değerinin tanımlanması gerekmektedir. Yapılan bir çalışmada bu bağlamda bir tanım önerisinde bulunulmuştur [11]. Şekil 1’de verilen ışıksız kavşak sistemini oluşturmuşlardır ve bu sistem üzerinden kritik aralık hesaplaması yapmışlardır. Oluşturulan sistemde bir anayol ve bir yanyol bulunmaktadır. Şekil 1’de gösterilen C aracı yanyolda bulunurken anayol üzerinde bulunan LV taşıtları lider araç, FV taşıtları ise takip eden araç olarak isimlendirilmiştir.

C aracı ışıksız kavşaktaki kesişim bölgesine ulaştığında LV aracı bu bölgeyi yeni geçmektedir. C kesişim alanından çıktığı anda ise FV aracı bu alana yeni ulaşmaktadır.

$$T_k = t_a + t_{LV} + t_d \quad (1)$$

$T_k$  : C aracının kritik aralığı

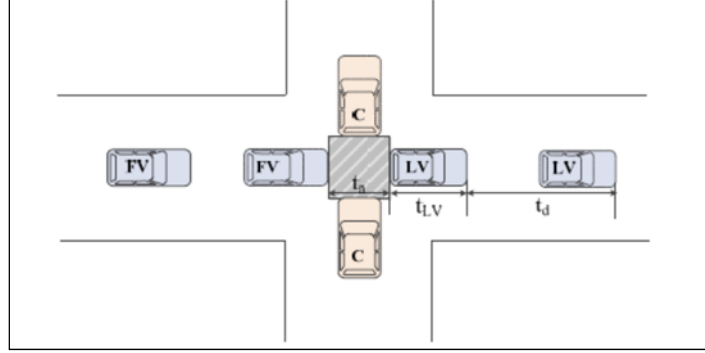
$t_a = a/V_m$  : Bir aracın “a” uzunluğunu geçme süresi

$t_{LV} = L_{LV}/V_m$  : Bir aracın lider araç uzunluğunu geçme süresi



$t_d = (a + L_{VC})/V_1$  : C aracının kesişim alanını geçme süresinde LV aracının aldığı yol

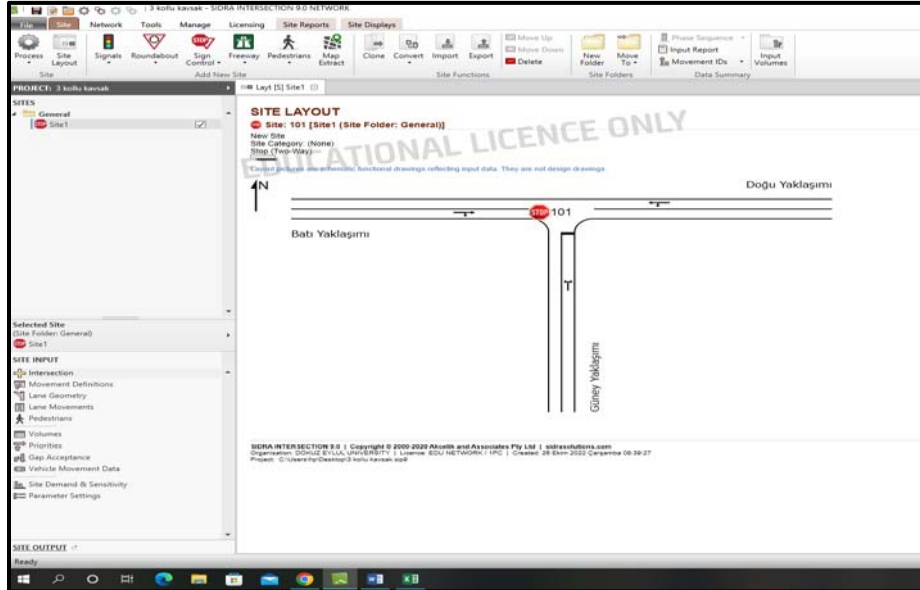
Denklem 1 kullanılarak kritik aralık kabul değeri hesaplanmaktadır. Bağıntılarda bulunan  $V_M$  değeri ana yolda ilerleyen araçların hızını (km/saat) belirtmektedir.  $V_1$  ise C aracının ulaşabildiği maksimum hızı (km/saat) belirtir.  $L_{LV}$  LV aracının uzunluğu(m);  $L_{VC}$  ise yan yoldaki C aracının uzunluğudur (m). Araç uzunluklarının ve kesişme bölgesi genişliğinin 5 metre olduğu varsayımı ile sürücüsüz araçların kritik aralık kabul değerleri değişken hızlar üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 1 - Sürücüsüz taşıtlar için kritik aralık hesabı

### 3. SIDRA

SIDRA ampirik ve analitik hesap yöntemlerini temel alan kullanıcılara daha geniş bir perspektif sunarak uygulama içerisinde hangi değişkenlerin ne kadar etkisi olacağını öngörebilmelerini sağlayabilen bir kavşak modellemesi programıdır. Bu nedenden ötürü bu çalışmada SIDRA 9 programı kullanılmıştır. Bu programda modelin verimli bir şekilde çalışması için geometrisinin doğru oluşturulması önem arz etmektedir. Aşağıdaki Şekil 2’de görüldüğü üzere 3 kollu bir kavşağın modellenmesi ağır araç etkisini gözlemlmek için yapılmıştır. Kavşak kollarının uzunluğu 500 metre kabul edilmiş; bu şekilde diğer kavşakların etkileri analiz dışında bırakılmıştır. Her kolda tek şerit bulunmakta olup şerit genişlikleri her kolda 3,00 metredir. Tüm şeritler paylaşımlıdır. Kollara ait trafik hacimleri Tablo 1’de verilmektedir.



Şekil 2 - 3 Kollu Kavşak Modeli

**Tablo 1** - Kavşağa Ait Başlangıç-Variş Matrisi (Birimler taşıt/saat'tir)

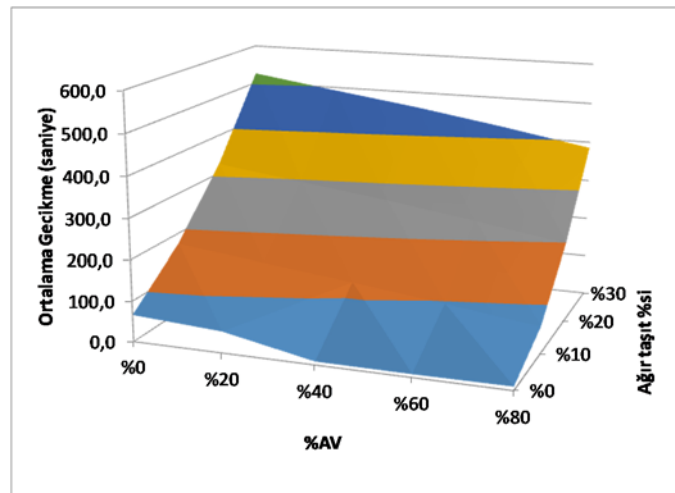
<b>Yaklaşım Kolu</b>	<b>Güney</b>	<b>Doğu</b>	<b>Batı</b>	<b>Toplam</b>
<b>Güney</b>		300	200	500
<b>Doğu</b>	150		500	650
<b>Batı</b>	150	500		650
<b>Toplam</b>	300	800	700	<b>1800</b>

SIDRA programında sürücüsüz taşıtların karakteristik özellikleri tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada sürücüsüz taşıtlara ait olan cesur sürüş stratejisi ( $t_r$ ) 0,5 saniye olarak belirlenirken varsayılan sürüş stratejisi ( $t_r$ ) 0,9 saniye olarak belirlenmiştir. Bu nedenden ötürü SIDRA programı yeni tanımlanmış taşıtların farklı karakteristik özelliklerini belirlenmesi için aralık kabul faktörü seçeneği kullanıma imkân tanımaktadır. Bu değer en çok 30 olabirirken en az 0,1 olabilmektedir. Bu çalışmada aralık kabul faktörü olarak Bölüm 2'de sürücüsüz taşıtlara ait modellenmiş kritik aralık kabul değerlerini normal sürücülerin aralık kabul değerlerine orantılanarak araştırmada kullanılmıştır. Sürücülerin kritik aralık kabul değerleri SIDRA tarafından önerilmiş olan kalibrasyon modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bun göre yanyoldan sola dönen sürücülerin kritik aralık kabul değerleri 5,23 saniye; sağa dönen sürücülerin ise 5,20 saniye bulunmuştur. Yapılan hesaplamalar sonucunda sürücüsüz taşıtların kritik aralık kabul değerlerinin sola dönüş manevrasında, insan sürücülerin aralık kabul değerlerinin %87'si; sağa dönüşlerde ise %92'si oranında olduğu anlaşılmaktadır. Ağır taşıt sürücülerinin ise her iki koşul için de %150 oranında bir değere sahip olacağı yine SIDRA programının kabulleri doğrultusunda alınmıştır.

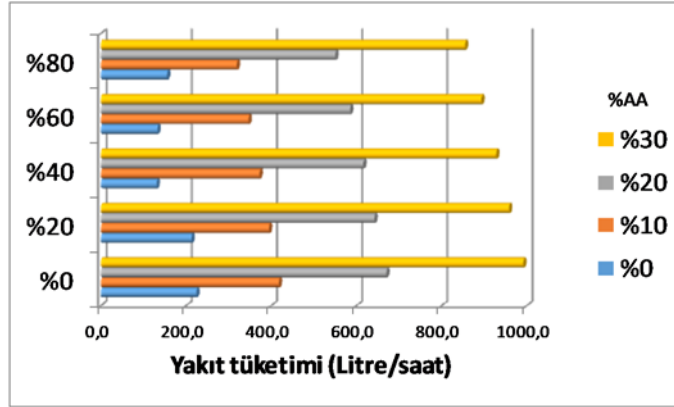
Çalışmada ağır taşıt oranının %0-30 aralığında, otomobil ya da hafif taşıtlar içindeki sürücüsüz araç oranının ise %0 ile %80 aralığında değiştiği kabul edilmiş ve analizler bu kabuller doğrultusunda yapılmıştır. sında değiştiği gözlemlenmiştir.

#### 4. BULGULAR

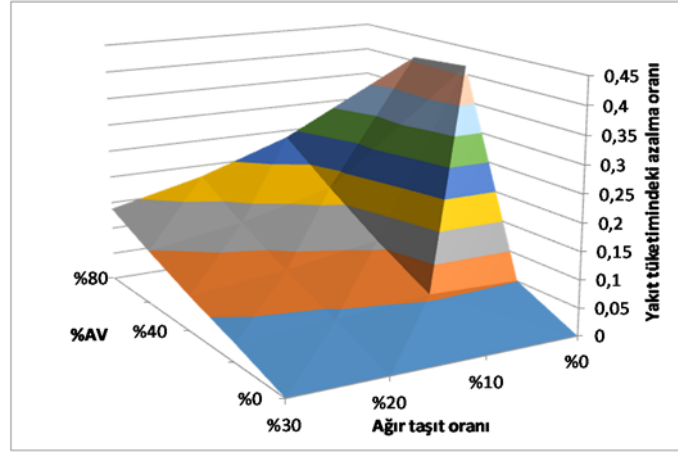
Aşağıdaki Şekil 3'te farklı ağır taşıt ve sürücüsüz yüzdeleri temelinde kavşaktaki araç başı ortalama gecikme değerlerine yer verilmiştir. Sürücüsüz taşıt oranı ile gecikme arasında ters orantı olduğu görülmektedir.



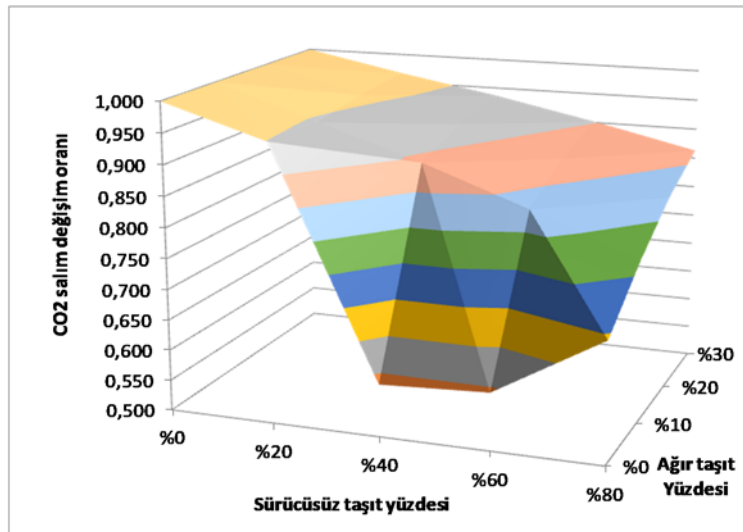
**Şekil 3** - Taşıtların Ortalama Gecikme Değerleri



Şekil 4 - Yakıt tüketimi değerleri



Şekil 5 - Yakıt tüketimindeki değişme oranları



Şekil 6 - CO<sub>2</sub> salım değerlerinin değişim oranları

Sürücüsüz taşıtların yakıt tüketimi ve üzerindeki etkileri incelendiğinde; sürücüsüz araçların trafikte yer alması durumunda yakıt tüketiminde azalmaya yol açtığı, ağır araçların olumsuz etkilerini de azalttığı açıkça görülmektedir (Şekil4 ve Şekil 5). Buna göre çalışmada sürücüsüz araçların petrol ve türevleri ile yakıt ihtiyacı ile giderildiği göz önünde bulundurulduğundan sürücüsüz araçların daha çok çevreci araçlar olduğu söylenebilir. Ancak Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, akım içindeki ağır araç oranı arttıkça, yakıt tüketiminin ve CO<sub>2</sub> salımının arttığı görülmektedir. Bu da, aslında trafik kompozisyonunun homojenliğinin ne denli önemli olduğunu gösteren bir bulgu olarak kabul edilebilir.

## **5. SONUÇ**

Bu çalışmada ışıksız kavşaklarda sürücüsüz araçlarla ağır taşıt araçlarının trafik üzerindeki etkisi çevre sonuçları açısından ve trafik gecikmesi üzerinden değerlendirilmiştir. Sürücüsüz taşıtların sisteme katılmasıyla, kavşak kapasite ve başarımlarının artması beklenmektedir. Literatürdeki çalışmalar, özellikle taşıtlar arasında (V2V) ve taşıtlar ile sistem arasında (V2I) haberleşme oranı arttıkça, kavşak başarımının da arttığını göstermektedir. Çalışma kapsamında yapılan analizler, trafikte sürücüsüz araçların oranının arttığı durumlarda yakıt tüketiminin azaldığı dolayısıyla CO<sub>2</sub> salımının da azaldığı göstermektedir. Ancak ağır taşıt oranının %20 değeri üzerine çıktığı durumlarda, trafiğin çevresel etkilerinin hızla ve önemli oranda arttığı anlaşılmaktadır. Sürücüsüz taşıtlar belirli oranda bir fayda sağlamakla birlikte ağır taşıt oranının belirli bir değerinden sonra bu fayda yetersiz kalmaktadır.

Çalışma, sürücüsüz taşıtlar ve SIDRA programı kapsamındaki kabuller ve varsayılan değerlerle sınırlıdır. Bundan sonraki çalışmalarda arazi gözlemleri ve sürücüsüz taşıtlar için daha gelişmiş analiz yöntemleriyle hesap yapılması hedeflenmektedir.

## **Teşekkür**

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik araştırma Grubu'nun desteklemiş olduğu 118M637 no.lu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## **Kaynaklar**

1. Kanaris, A., Ioannou, P., Ho, F.S., (1997) Spacing and Capacity Evaluations for Different AHS Concepts. Automated Highway Systems, Ioannou, P. (Ed.), Springer US, pp. 125-171.
2. Vander Werf, J., Shladover, S.E., Miller, M., Kourjanskaia, N., (2002) Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity. Transportation Research Record, 1800, pp. 78-84.1
3. Van Arem, B., van Driel, C.J.G., Visser, R., (2006) The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7 (4), pp. 429-436.
4. Kesting, A., Treiber, M., Schonhof, M., Helbing, D., (2008) Adaptive Cruise Control Design for Active Congestion Avoidance. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 16 (6), pp. 668-683.
5. Dresner, K., Stone, P., (2008) A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. Journal of Artificial Intelligence Research 31, pp. 591-656.

6. Li, Z., Chitturi, M., Zheng, D., Bill, A., Noyce, D., (2013) Modeling Reservation-Based Autonomous Intersection Control in VISSIM. *Transportation Research Record*, 2381, pp. 81–90.
7. Le Vine, S., Zolfaghari, A., Polak, J., (2015) Autonomous Cars: The Tension Between Occupant-Experience and Intersection Capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 52, pp. 1–14.
8. Ferreira, M., d'Orey, P.M., (2011) On the Impact of Virtual Traffic Lights on Carbon Emissions Mitigation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (1), pp. 284–295.
9. Sinha, R., Roop, P.S., Ranjitkar, P., (2013) Virtual Traffic Lights in a Robust, Practical, and Functionally Safe Intelligent Transportation System. *Transportation Research Record*, 2381, pp. 73–80.
10. Milakis, D., Snelder, M., van Arem, B., van Wee, B., Correia, G.H.A. (2015). *Development of Automated Vehicles in the Netherlands Scenarios for 2030 and 2050*. Hollanda: TUDelft.
11. Zhong, G.; Zhang, J.; Yin, T.; Nie, J. (2015) A Cooperative Management Strategy Designed for Unsignalized Intersections Under a Connected Vehicle Environment, *CICTP 2015 : Efficient, Safe, and Green Multimodal Transportation*.



## Kesintisiz Akımlarda Bağlantılı Otonom Trafikte Makine Öğrenimi ile Gecikme Tahmini

İlgin GÖKAŞAR<sup>1</sup>, Kaan AYTEKİN<sup>2</sup>

### ÖZET

Otoyollardaki kaza-olaylar, yol ağında trafik sıkışıklığına ve gecikmelere neden olmaktadır. Bu çalışmada, bağlantılı otonom araçların bulunduğu trafikte özellik mühendisliği ile zenginleştirilmiş sensör verileri üzerine makine öğrenme teknikleri kullanılarak gecikme tahmini yapan bir yöntem önerilmiştir. SUMO trafik benzetim yazılımı kullanılarak oluşturulan 3 şeritli, 10.500 metre uzunluğundaki modelden veriler elde edilmiştir. Bu modelin benzetiminde, her bir şeritte, 9 farklı bağlı otonom yüzdesi (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80), farklı kaza başlangıç zamanları, kaza süreleri ve kaza lokasyonları ile senaryolar oluşturulmuştur. Sonuç olarak elde edilen model, bir sonraki zaman dilimi içerisindeki trafik gecikmesini eğitim setinde 224.89 ve test setinde 247.77 ortalama karesel hatayla tahmin etmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bağlı otonom araçlar, kaza-olay, gecikme tahmini, makine öğrenmesi, SUMO.

### ABSTRACT

#### **Delay Prediction Using Machine Learning Algorithms for Connected Autonomous Traffic Flow in Uninterrupted Facilities**

Incidents in the roadways cause congestion and delays. In this study, a method for estimating traffic delays with connected autonomous vehicles using machine learning techniques on sensor data enriched with feature engineering is proposed. The 3-lane, 10,500-meter-long model created with SUMO traffic simulation software yielded data. In the simulation of this model, nine different percentages of connected autonomy (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80) as well as different accident onset times, accident durations, and accident locations within each lane were simulated. The resulting model had a mean square error of 224.89 in the training set and 247.77 in the test set when predicting the traffic delay in the next time slot.

**Keywords:** Connected autonomous vehicles, traffic incident, delay prediction, machine learning, SUMO.

---

1 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ilgin.gokasar@boun.edu.tr

2 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - caanaytekin@gmail.com

## 1. GİRİŞ

Trafiğin yoğun olduğu yollarda kaçınılmaz olarak kaza-olay durumları meydana gelmektedir. Yaşanan kaza-olaylara bağlı olarak yukarı ve aşağı akım yönündeki sürücüler trafik gecikmesi yaşamaktadırlar [1, 2]. Yaşanan gecikme, yol kapasitesi, trafik hacmi, kaza-olay şeridi, kaza-olaya olan mesafe vb. gibi çeşitli parametrelere bağlıdır [3,4]. Yaşanan gecikmenin özelliklerini anlamak için bu çalışmada, farklı konfigürasyonlarda çeşitli kaza-olay senaryolarının benzetimi yapılmıştır.

Literatürde trafik gecikme tahmini ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Çeşitli çalışmalarda, Webster modeli gecikme tahmininde kullanılmak üzere geliştirilmiştir [5]. Farklı bir çalışmada, trafik gecikmesini tahmin etmek için yeni geliştirilen kuyruk teorisi tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır [6]. Bu çalışmada önerilen modelde ise makine öğrenmesi ve özellik mühendisliği teknikleri kullanıldığı için literatürdeki çalışmaların çoğundan farklıdır.

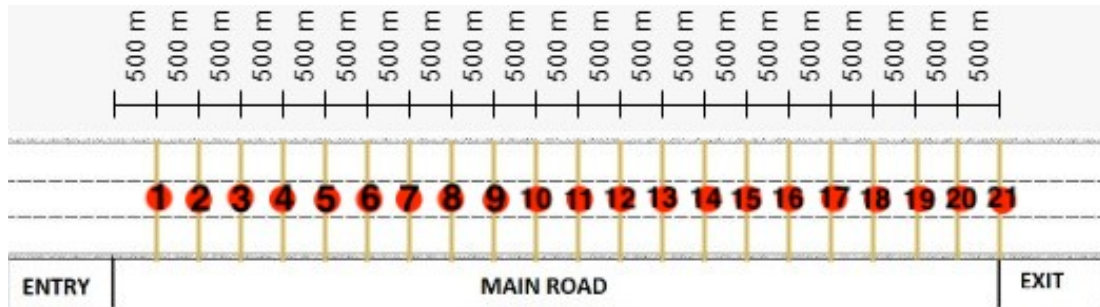
Bağlantılı otonom araçların (BOA) trafik akımında sürücülü araçlar ile birlikte kullanılması ve oluşturulan karma trafiğin sürdürülmesi, trafik gecikmesi tahmininde ve azaltılması konusunda büyük faydalar sağlama potansiyeline sahiptir. Literatürde BOA'ların trafik gecikmesi üzerindeki etkileri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bir çalışmada, BOA'ların trafik akımında %40 oranıyla mevcut olduğu durumlarda ortalama trafik gecikmesinde %50 ile %61 oranında azalma olduğu görülmüştür [7]. Farklı bir çalışmanın sonucunda ise BOA oranının %0 ile %60 arasında olduğu durumlarda trafik gecikmelerinde %60'a varan azalma görüldüğü tespit edilmiştir [8]. Bu çalışmanın yaklaşımının literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olmasının bir sebebi de gecikme tahmin modellerinin kullanılmasıdır. Trafik gecikmelerini artıran trafik koşulları önceden tahmin edilirse, duruma hazırlıklı olunması nedeniyle BOA'lar daha verimli ve etkin bir şekilde çalışabilir.

## 2. AMAÇ

Bu çalışmanın amacı, doğru bir trafik gecikmesi tahmin yöntemi sunabilmek için, özellik mühendisliği uygulanmış sensör verileri üzerinde makine öğrenimi kullanan bir gecikme tahmin modeli önermektir. Bu amaca, SUMO benzetim yazılımı ve makine öğrenme araçlarının kullanımı ile ulaşmak hedeflenmektedir. Aynı zamanda, gecikme tahmini modeli kapsamında bağlı otonom araçları, makine öğrenimini ve özellik mühendisliğini bir araya getirerek literatürdeki bir boşluğu doldurmak amaçlanmaktadır.

### 2.1. Veri Üretim Süreci

Bu çalışmada kullanılan veriler, SUMO mikroskobik trafik benzetim yazılımı kullanılarak sentetik olarak oluşturulmuştur. Üzerinde benzetim çalışmaları yapılan yol ağı Şekil 1'de mevcuttur.



Şekil 1 - Yol ağı.



Bu çalışmada, SUMO mikroskobik benzetim yazılımında kullanılan benzetim parametreleri ve senaryo değişkenleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1 - Benzetim değişkenleri**

Değişken	Değer
Benzetim Süresi	90 dakika
Azami Hız	110 km/h
Sensörlerin Veri Toplama Frekansı	15 saniye
Kaza-olay Benzetimi	Var, Yok
Kaza-olay Şeridi	Sağ, Orta, Sol (1, 2, 3)
Bağlantılı Otonom Araç Yüzdesi (%)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
Kaza-olay başlangıç zamanı (saniye)	[900,2700] arası rastgele
Kaza-olay süresi (saniye)	[600,1500] arası rastgele
Kaza-olay konumu (metre)	[4500,8000] arası rastgele

Benzetim çalışmasında bağlantılı otonom araçlar ve sürücülü araçlar olmak üzere iki tip araç bulunmaktadır. Bu türlerin her birinin kendilerine atanmış farklı modelleme parametreleri vardır. Parametreler ve atanan değerler aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2 - Araç tiplerinin karakteristik özellikleri**

Araç parametresi	Sürücülü Araç	Bağlantılı Otonom Araç
Azami ivme	2,7 m/s <sup>2</sup>	2,7 m/s <sup>2</sup>
Azami yavaşlama	4,5 m/s <sup>2</sup>	4,5 m/s <sup>2</sup>
Araç uzunluğu	4,5 m	4,5 m
Azami Hız	110 km/saat	110 km/saat
Hız Faktörü	0,9	0,9
Asgari Açıklık	1,5 m	1,5 m
Sigma	0,4	0,05
Hız Sapması	0,35	0,1

Veriler toplandıktan sonra her benzetim çalışmasının ilk ve son 15 dakikası ısınma ve soğuma periyodu olarak kabul edilir ve verisetinden atılmıştır.

### 3. METODOLOJİ

Bu çalışmada, bir sonraki zaman adımının gecikme tahmini bir regresyon problemi olarak modellenmiştir. Öncelikle yeni özellikler tasarlanıp, özellik mühendisliği yapılmış ve zenginleştirilmiş veriler, benzetime dayalı veri bölme yöntemi kullanılarak eğitim ve test setlerine bölünmüştür. Veriler bölüldükten sonra eğitim verilerine özellik seçimi uygulanmıştır. Farklı hiperparametrelere sahip farklı modeller, eğitim verileriyle seçilen özellikler üzerinde çapraz geçerlilik kullanılarak eğitilmiştir. Bu çalışmada, doğrusal regresyon, Bayesian ridge regresyonu,

lasso regresyonu, XGBoost ve rastgele orman yöntemi kullanılmıştır ve bu yöntemler işlenmiş veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Çapraz geçerlilik sonuçlarından en iyi performans gösteren model seçilmiştir. Seçilen model, tüm eğitim verileri kullanılarak eğitilmiştir ve test verisi kullanılarak değerlendirilmiştir.

### **3.1. Özellik Mühendisliği**

Bu çalışmada, özellik mühendisliği kullanılarak hedef özellik, gecikmeli sensör özellikleri ve bitişik sensör özellikleri oluşturuldu. ARIMA'ya benzer şekilde hedef özelliğın gecikmeli değerleri, SARIMAX'a benzer şekilde dışyapılı değişkenler kullanıldı ve ayrıca dışyapılı değişkenlerin gecikmeli değerleri eklendi.

Bu çalışmanın temel amacı, mevcut zaman dilimine kadar olan veriler kullanılarak gelecekteki (bir sonraki zaman adımı) gecikmeyi tahmin etmektir. Bu nedenle, yol ağı segmentlerinin seyahat zaman gecikmesi gereklidir. Seyahat süresi gecikmesi, aynı yol segmentinden serbest akım hızıyla geçen bir araca kıyasla bu yol bölümünde seyahat etmek için harcanan zamanın fazlalığı olarak tanımlanır. Her benzetim çalışması, her sensör ve her zaman adımı için hedef sütunu oluştururken bir sonraki zaman adımının hesaplanan gecikmesi kullanılır.

Zaman serisi analizine benzer şekilde, zamanla değişen dinamik etkileri yakalamak için gecikmeli özellikler oluşturulur. Akım, yoğunluk, ortalama hız, segment seyahat süresi ve bölüm seyahat süresi gecikmesi 1 ila 10 zaman adımı kadar geciktirilir ve her sensör metrik gecikme kombinasyonu için verilerde yeni bir sütun oluşturulur. Bitişik sensör özellikleri, gözlemlenen sensör üzerindeki yukarı ve aşağı akım yönündeki etkileri yakalamak için oluşturulur. Önceki ve sonraki sensörler için akım, yoğunluk, ortalama hız, segment seyahat süresi, segment seyahat süresi gecikmesi ve tüm bu özelliklerin gecikmeli değerleri oluşturulur. Kaza-olayla ilgili özellikler (Kaza varlığı, kaza süresi, BOA oranı, kazaya uzaklık, kaza şeridi), kaza-olayın konumu ve durumundan haberdar olmak için özellik alanına eklenir.

### **3.2. Benzetime Dayalı Veri Bölme**

Benzetim verileri, modeli eğitmek, model hiper parametrelerini ayarlamak ve eğitilmiş ve ayarlanmış modelin performansını değerlendirmek için kullanılır. Verilerin eğitim, ayarlama ve test için 3 kümeye bölünmesi gerekir. Bu çalışmada kullanılan veri setinde her bir veri noktası komşu zaman adımlarıyla ilişkilidir ve veri özellikleri benzetim konfigürasyonlarına bağlıdır. Bu duruma bağlı olarak veriler ayrık benzetim konfigürasyonlarına göre kaza şeridi, kaza varlığı ve trafikteki bağlı otonom araç oranı olmak üzere gruplara ayrılmaktadır.

### **3.3. Özellik Seçim Süreci**

Bu çalışmada korelasyon analizi, ortak bilgi kriteri ve düzenlenmiş ve standart rastgele orman özellik önemi olmak üzere 3 farklı özellik seçim metriği kullanılmıştır. Özellikler, ortak bilgi, korelasyon analizi, düzenlenmiş rastgele orman özellik önemi ve standart rastgele orman özellik önemi ile hesaplanan önem düzeyi puanlarına göre sıralanmıştır. Sıralamadan sonra önem metrikleri birleştirilir, bu metriklerden herhangi birinde 30. sıranın altında yer alan herhangi bir özellik eğitim verisi için seçilir.

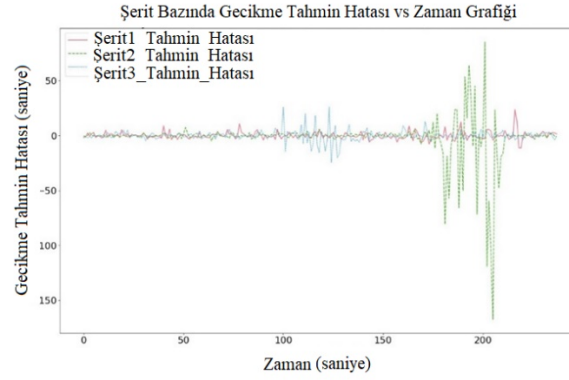
### **3.4. Çapraz Geçerlilik, Hiperparametre Ayarlama ve Model Seçimi**

Makine öğrenmesi modellerinin eğitiminde, ayarlanmasında ve performanslarının değerlendirilmesinde 5 tekrarlı 5 katlı çapraz geçerlilik metodolojisi kullanılmaktadır. Her model

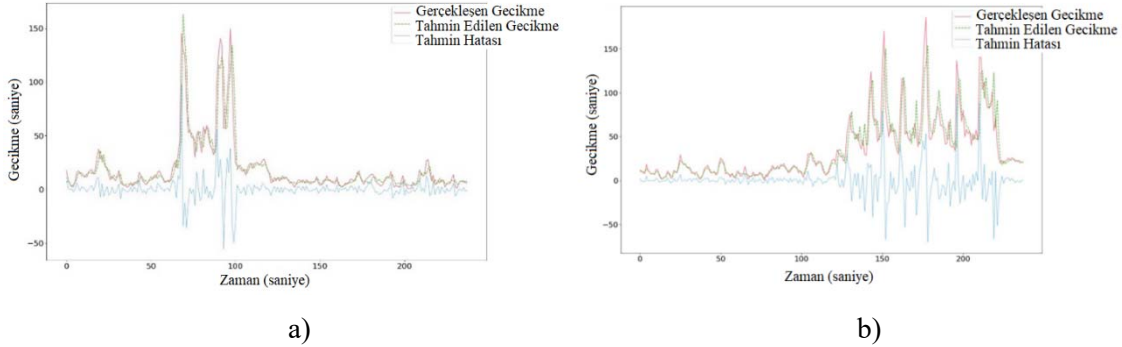
için önemli hiperparametreler belirlenir ve bu parametrelerin her biri için oldukça geniş bir arama alanı tanımlanır. Her model için en iyi sonucu veren hiperparametre değerleri saptandıktan sonra modeller bu hiperparametreler kullanılarak çalıştırılır. Her bir tekrarda her model için hataların karelerinin ortalaması hesaplanmıştır. Rastgele orman yöntemi diğer model ve hiperparametre kombinasyonları arasında en düşük karesel hata toplamı verdiği için en iyi model olarak seçilmiştir.

#### 4. BULGULAR

En iyi performans gösteren model belirlendikten sonra, bu model tüm eğitim veri kümesi ile bir kez daha eğitilmiştir. Nihai model, eğitim veri setinde 224,89 ve test veri setinde 247,77 ortalama karesel hata değeri göstermiştir. En yüksek tahmin hataları kaza-olayın 2.şeritte (orta şerit) gerçekleştiği senaryolarda görülmüştür. Farklı kaza-olay şeritlerindeki tahmin hataları arasındaki fark Şekil 2’de görülebilmektedir.



Şekil 2 - Farklı Kaza-olay Şeritleri için Gecikme Tahmini Hata Grafiği



Şekil 3 - Kaza-olay Süresine göre Gecikme Grafiği a) Kısa süreli kaza-olay (607 saniye) b) Uzun süreli kaza-olay (1492 saniye)

Kaza-olay süresinin etkisi, Şekil 3’te görülmektedir. Uzun kaza-olay durumunda karşılaşılan gecikme değerleri kısa kaza-olay durumuna kıyasla fazladır. Uzun süreli kaza-olay durumundaki yüksek varyans gecikme tahmin hatasını artırır.

Modelin kaza-olay bölgesi (aşağı akım bölgesi, kaza-olay bölgesi ve yukarı akım bölgesi) üzerindeki tahmin performansı Tablo 3’te analiz edilmiştir. Modelin kaza-olay bölgesinde daha büyük hatalar yaptığı, aşağı akım yönünde bulunan kısımda ise en düşük hataları yaptığı görülmektedir.

Tablo 3 - Farklı Bağlı Otonom Araç Oran Yüzdeleri için Kaza-olay Alanında, Öncesinde ve Sonrasında Sensör Metrikleri

Bağlı Otonom Araç Yüzdesi (%)	Konum	Akım (araç/saat)	Değişim (%)	Yoğunluk (araç/km)	Değişim (%)	Hız (km/saat)	Değişim (%)	Segment Seyahat Süresi (saniye)	Değişim (%)	Gecikme (s)	Değişim (%)	Ortalama Kareysel Hata
0	Yukarı Akım Yönü	1493,78	0,00	15,14	0,00	59,58	0,00	37,15	0,00	19,91	0,00	64,47
	Kaza-olay Bölgesi	1566,05	0,00	17,48	0,00	59,25	0,00	37,65	0,00	20,41	0,00	217,06
	Aşağı Akım Yönü	1404,03	0,00	10,73	0,00	69,73	0,00	26,96	0,00	9,72	0,00	9,36
10	Yukarı Akım Yönü	1450,76	-2,88	13,07	-13,65	65,35	9,69	33,94	-8,64	16,70	-16,12	55,11
	Kaza-olay Bölgesi	1529,08	-2,36	16,12	-7,77	62,82	6,01	35,89	-4,69	18,64	-8,66	214,99
	Aşağı Akım Yönü	1390,92	-0,93	10,32	-3,77	71,36	2,34	26,61	-1,31	9,37	-3,63	10,16
20	Yukarı Akım Yönü	1437,31	-3,78	11,69	-22,81	70,44	18,24	28,74	-22,65	11,50	-42,26	21,64
	Kaza-olay Bölgesi	1535,46	-1,95	16,10	-7,91	63,69	7,48	34,93	-7,22	17,69	-13,33	152,72
	Aşağı Akım Yönü	1398,99	-0,36	9,94	-7,38	74,71	7,14	25,24	-6,38	8,00	-17,70	12,52
30	Yukarı Akım Yönü	1397,65	-6,44	9,51	-37,18	76,37	28,19	24,70	-33,52	7,46	-62,54	13,60
	Kaza-olay Bölgesi	1512,27	-3,43	14,00	-19,92	70,78	19,45	28,20	-25,10	10,96	-46,30	52,12
	Aşağı Akım Yönü	1402,69	-0,10	9,58	-10,73	77,45	11,07	24,01	-10,94	6,77	-30,35	8,47
40	Yukarı Akım Yönü	1397,98	-6,41	9,07	-40,11	80,88	35,75	22,84	-38,52	5,60	-71,87	5,73
	Kaza-olay Bölgesi	1450,42	-7,38	11,49	-34,28	74,72	26,10	26,60	-29,36	9,36	-54,16	47,82
	Aşağı Akım Yönü	1406,05	0,14	8,97	-16,44	80,77	15,83	22,86	-15,22	5,62	-42,23	8,71
50	Yukarı Akım Yönü	1434,62	-3,96	12,32	-18,61	71,85	20,60	32,37	-12,86	15,13	-23,99	80,04
	Kaza-olay Bölgesi	1551,93	-0,90	16,49	-5,65	68,95	16,37	33,03	-12,28	15,79	-22,65	251,04
	Aşağı Akım Yönü	1384,87	-1,36	8,91	-16,98	82,24	17,94	22,59	-16,21	5,35	-44,97	8,77
60	Yukarı Akım Yönü	1445,04	-3,26	11,05	-27,03	78,80	32,27	26,83	-27,77	9,59	-51,82	46,80
	Kaza-olay Bölgesi	1551,26	-0,94	15,81	-9,58	72,13	21,72	31,50	-16,34	14,26	-30,14	205,23
	Aşağı Akım Yönü	1402,02	-0,14	8,77	-18,30	85,27	22,28	21,79	-19,17	4,55	-53,16	5,17
70	Yukarı Akım Yönü	1618,82	8,37	17,82	17,71	63,92	7,29	41,53	11,78	24,28	21,97	148,95
	Kaza-olay Bölgesi	1641,68	4,83	17,99	2,94	68,41	15,45	32,64	-13,31	15,40	-24,56	178,33
	Aşağı Akım Yönü	1474,96	5,05	10,07	-6,18	82,53	18,35	23,49	-12,87	6,25	-35,71	7,32
80	Yukarı Akım Yönü	1399,66	-6,30	9,79	-35,33	81,71	37,15	24,31	-34,57	7,07	-64,50	7,52
	Kaza-olay Bölgesi	1447,06	-7,60	13,17	-24,64	73,60	24,21	28,85	-23,38	11,61	-43,13	142,56
	Aşağı Akım Yönü	1366,39	-2,68	9,18	-14,41	84,56	21,27	23,13	-14,21	5,89	-39,43	5,23

## 5. SONUÇ

Trafik kaza-olayları istenmeyen aşırı trafik gecikmelerine yol açmaktadır. Bu çalışmada, SUMO trafik simülasyonunda farklı konfigürasyonlarda yürütülen senaryolar ile üretilen veriler kullanılarak bir gecikme tahmin modeli oluşturulmuştur. Elde edilen trafik gecikme modeli ile yol segmentlerinin gelecekteki seyahat süreleri tahmin edilip araçların trafik yoğunluğunun ve seyahat sürelerinin yüksek olduğu yol segmentlerinden uzaklaştırılıp trafik yükünü bütün yol ağına bölmek hedeflenmektedir. Böylelikle trafik gecikmeleri, gereksiz yakıt kullanımı, dolaylı olarak hava kirliliği ve sürücü gerginliği gibi durumların ömüne geçilebilecektir. Bu çalışmada yalnızca önceki ve sonraki sensörler bitişik sensör olarak alınmıştır, ancak daha sonraki çalışmalarda özellik setine daha fazla bitişik sensör dahil edilebilir. Böylelikle modelin doğruluğu ve verimliliği artırılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma, Boğaziçi Üniversitesi Araştırma Fonu (BAP) tarafından 15387 proje numaralı ve 19A04R2 proje kodlu ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK 1001) 120M574 hibe numaralı projeleriyle desteklenmiştir.

## Kaynaklar

1. Khattak, A., X. Wang and H. Zhang, “Incident Management Integration Tool: Dynamically Predicting Incident Durations, Secondary Incident Occurrence and Incident Delays”, IET Intelligent Transport Systems, Vol. 6, No. 2, 2012, pp. 204–214.
2. Islam, M. A., “A Literature Review on Freeway Traffic Incidents and Their Impact on Traffic Operations”, Journal of Transportation Technologies, Vol. 9, No. 4, 2019, pp. 504–516.
3. Weng, J. and Q. Meng, “Estimating Capacity and Traffic Delay in Work Zones: An Overview”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 35, 2013, pp. 34–45.
4. Ziouva, E. and T. Antonakopoulos, “CSMA/CA Performance Under High Traffic Conditions: Throughput and Delay Analysis”, Computer Communications, Vol. 25, No. 3, 2002, pp. 313–321.
5. Minh, C. C., T. H. Binh, T. T. Mai and K. Sano, “The Delay Estimation Under Heterogeneous Traffic Conditions”, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 8, 2010, pp. 1583–1595.
6. Baykal-Gursoy, M., W. Xiao, Z. Duan and K. Ozbay, “Delay Estimation for Traffic Flow Interrupted by Incidents”, 86th Annual Transportation Research Conf., Transportation Research Board, Washington, DC, Citeseer, 2006.
7. Al Islam, S. B., A. Hajbabaie and H. A. Aziz, “A Real-Time Network-Level Traffic Signal Control Methodology With Partial Connected Vehicle Information”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 121, 2020, p. 102830.
8. Guler, S. I., M. Menendez and L. Meier, “Using Connected Vehicle Technology to Improve the Efficiency of Intersections”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 46, 2014, pp. 121–131.



## SNS Kaza-Olay Tespit Algoritmasının Bağlı Otonom Araç Trafikindeki Performansının Değerlendirilmesi

İlgin GÖKAŞAR<sup>1</sup>, Sarp Semih ÖZKAN<sup>2</sup>, Alperen TİMURÖĞULLARI<sup>3</sup>

### ÖZET

Trafik kaynaklı gecikme gibi sorunların önüne geçebilmek için kazaların oldukça hızlı bir şekilde tespit edilip kaza yönetimine başlanması gerekmektedir. Bu noktada, kaza tespit algoritmalarının doğru ve hızlı bir şekilde çalışmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, SNS (Standard Normal Sapma) Kaza Tespit Algoritmasının 11 farklı otonom araç yüzdesi dahilinde nasıl performans gösterdiği incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları SUMO Trafik Benzetimi yazılımında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın performans ölçütleri olarak DR (tespit oranı), FAR (yanlış alarm oranı) ve MTTD (ortalama tespit süresi) seçilmiştir. Çalışma sonucunda SNS algoritması bağlı otonom araç yüzdesinin %100 olduğu durumlarda tespit oranının yüksek ve tespit süresinin kısa olduğuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: SNS Kaza Tespit Algoritması, Otonom Araç, SUMO.

### ABSTRACT

#### *Evaluation of the Performance of SNS Incident Detection Algorithm in Autonomous Vehicle Traffic*

To prevent delays, incidents should be detected quickly, and incident management must be started. Therefore, the importance of accurate and fast incident detection algorithms emerges. In this study, how the SND (Standard Normal Deviation) Incident Detection Algorithm performs with 11 different connected autonomous vehicle percentages is examined. The simulation studies were carried out using SUMO. DR (detection-rate), FAR (false-alarm-rate) and MTTD (mean-time-to-detect) were chosen as the performance criteria for the study. The results show that the detection rate is high and the detection time is short in cases where the SNS algorithm connected autonomous vehicle percentage is 100%.

Keywords: SND Incident Detection Algorithm, Connected Autonomous Vehicle, SUMO.

---

1 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ilgin.gokasar@boun.edu.tr

2 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - sarpsemihozkan@gmail.com

3 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - timurogullarialperen@gmail.com

## 1. GİRİŞ

Günlük hayatta birçok kişi ulaştırma faaliyetlerinden doğrudan veya dolaylı yoldan etkileşim halinde olabilmektedir. Bu faaliyetler kimi zaman hayatımızı kolaylaştırmasının yanında bazı zamanlarda zorlaştırabilmektedir. Trafik yoğunluğunun fazla olduğu yerlerde ya da olası diğer durumlarda bir yerden bir yere ulaşmak bir hayli zaman alabilmektedir. Bu durumların başında ise trafik kazaları gelmektedir. Trafik kazaları ulaştırma faaliyetlerini aksatabilmektedir. Bu durumdan en az zararlı atlatılmak için kazaların anlık tespit edilebilmesi o ulaşım ağındaki kullanıcılar bilgilendirilerek trafik daha verimli bir şekilde yönetilebilir. Bu da kaza tespit algoritmaları ile sağlanabilir. Standart Normal Sapma algoritması (SNS) bu algoritmaların en önemlilerinden biridir [1].

Standart Normal Sapma algoritması önceden belirlenen trafik kontrol değişkenlerinin durumunu incelemektedir. Eğer bu durumlarda ani bir değişiklik meydana gelirse, kaza var durumu uyarısını vermektedir. Bu algoritma, farklı trafik değişkenlerini kullanabilmektedir. Örneğin, yoğunluk, hız ve akım gibi makroskobik trafik değişkenlerindeki ani değişiklikleri inceleyerek kaza tespiti yapabilmektedir. Bu çalışmada, SNS algoritmasının farklı bağlı otonom araç yüzdeleriyle diğer kaza tespit algoritmalarıyla performans ölçüt birimleri kullanılarak kıyaslayarak SNS algoritmasının işlevselliği araştırılmıştır [2].

### 1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı SNS kaza tespit algoritmasının farklı kaza-olay senaryoları göz önünde bulundurarak tespit oranı (DR), yanlış alarm oranı (FAR) ve tespit süresi (MTTD) performans ölçütleri üzerinden bağlı otonom araçların varlığında performansını gözlemlemektir. Bu kaza-olay senaryoları otonom araç yüzdesi, kazanın meydana geldiği şerit ve kazanın süresi değiştirilerek oluşturulmuştur.

## 2. SNS STANDART NORMAL SAPMA ALGORİTMASI (SNS)

Standart Normal Sapma algoritması analiz çalışmalarından elde edilen verileri standart sapma ve ortalama değer ile beraber oluşturulabilen istatistiksel kaza tespit etme algoritmasıdır. Yol ağının normal seyirinde olağandışı bir durumun yol ağını büyük ölçüde etkileyeceği bir değişkenin ortalama değeri ve bu değerinin standart sapmasının öncül hesaplanmasının merkez limit teoremine yerleştirilmesi ile algoritma oluşturulur. Bu algoritmanın denklemi aşağıda yer verilmiştir.

$$SNS = \frac{x(j, t) - \bar{x}(j, t)}{s} > T_{SNS} \quad (1)$$

$x(j, t)$  :  $t$  anındaki ve  $j$  konumunda trafik kontrol değişkeninin değeri,

$\bar{x}(j, t)$  :  $t$  anındaki ve  $j$  konumunda trafik kontrol değişkeninin ortalama değeri,

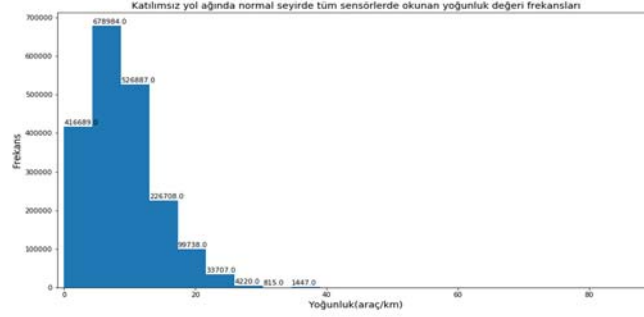
$s$  :  $t$  anındaki ve  $j$  konumunda trafik kontrol değişkeninin standart sapması,

$T_{SNS}$  : SNS algoritmasının eşik değeri.

Trafik yoğunluğu değeri ulaştırmada kullanılan en güvenilir değişkenlerden biri olduğu için yüksek doğruluk sonucu vereceği için bu çalışmada SNS algoritmasında değişken olarak kullanılmıştır. Trafik normal seyri katılımsız yol ağı üzerinde incelenmiş olup ve bu seyirin standart sapmaları ve ortalama değeri gözlem altında tutulmuştur. Bu değerlerin ortalama yoğunluk değerleri aşağıdaki Şekil 1'de yer verilmiştir. Katılımsız yol ağı kesintisiz ve akan bir



trafiğe sahip olduğundan dolayı normal seyirdeki ortalama yoğunluk değerleri nispeten düşük çıkabilmektedir.



**Şekil 1** - Yol ağında normal seyirde tüm sensörlerde okunan yoğunluk değeri frekansları



**Şekil 2** - Yol ağında tüm senaryo ve sensörlerde okunan yoğunluk değeri frekansları

**Tablo 1** - Yol ağının ortalama yoğunluk değerleri, standart sapmaları ve SNS eşik değerleri

Yol Ağı	Ortalama Yoğunluk Değeri (Araç/km)	Standard Sapma	SNS Eşik Değeri
Katılımsız	6,01	5,03	4,5

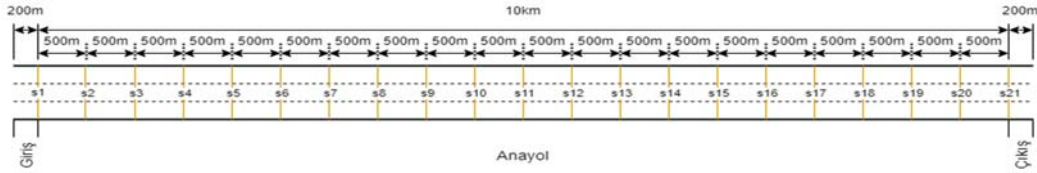
Yol ağının ortalama yoğunluk değerleri belirlendikten sonra eşik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Trafik ağında meydana gelen her problem yoğunlukta belirli bir artışa neden olacağından dolayı  $T_{SNS}$  değerindeki istatistiksel değişiklikler tek yönlü testler ile incelenmiştir. Eşik değeri belirlenirken aşağıda bulunan adımlar ile takip edilmiştir. Bu adımlarda kullanılan kazalı ve kazasız senaryolardaki yoğunluk değerleri Şekil 2’de verilmiştir.

1. Tüm senaryoları içeren veriseti oluşturuldu.
2. Tüm yoğunluk verileri SNS algoritması ile beraber entegre edilerek yeni kolon oluşturuldu.
3. Bu kolondaki yoğunluk dağılımları gözden geçirilerek görselleştirildi.
4. Dağılımlara bakılarak eşik değeri belirlendi. İnce ayarın yapılması için eşik değerinin iterasyonların veri seti ile çapraz kontrolü ile sağlandı.
5. İterasyon ve gözlem ile eşik değeri belirlendi.

Yukarıdaki adımlar sonundan ortaya çıkan yol ağının ortalama yoğunluk değeri, bu değerin standart sapması ve eşik değeri Tablo 1’de verilmiştir.

### 3. YÖNTEM

Bu çalışmada, ilk 200 metresi giriş son 200 metresi çıkış olmak üzere toplam uzunluğu 10.400 metre olan katılımsız yol ağı kullanılmıştır. Yol ağı aşağıdaki Şekil 3’te mevcuttur. Yol ağı üzerindeki analizler anayol ağı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Anayol üzerinde başlangıçtan itibaren 500 metre aralıklarla toplamda 21 tane sensör yerleştirilmiştir. Sensörler her benzetim adımında veri toplamaktadır ve topladıkları verilerin ortalamalarını 15 saniyede bir verisetine işlemektedir. Yol ağı 3 şerit olup yolun üst şeriti sol, alt şeriti sağ kalan şerit ise orta olarak adlandırılmıştır. Trafik ağına otonom ve sürücülü olmak üzere araçlar tahsis edilmiş olup bu araçların karakteristik özellikleri aşağıdaki Tablo 2’de mevcuttur. Tablo 3’te de yol ağında kullanılan trafik talepleri otonom araç yüzdeleri, kaza lokasyonu, kaza süresi, kaza zamanı, kaza kaldırılma süresi ve kaza şeridinin alabileceği değer aralıkları verilmiştir. Bu yol ağında yapılan benzetim çalışmaları 90 dakika sürmüş olup ilk 15 dakikalık ve son 15 dakikalık ısınma ve soğuma aralıkları analizlere dahil edilmeyerek %95 güven aralığını sağlayan tohum sayısında benzetim sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Benzetim çalışmaları SUMO Trafik Benzetim programı kullanılarak yapılmıştır. SUMO’nun açık kaynaklı bir yazılım olması ve python programlama dili kullanılarak sınırsız benzetim senaryosunun benzetimine olanak tanması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma dahilinde yapılan benzetimlerin SUMO üzerinden yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3 - Katılımsız yol ağı

Tablo 2 - Otonom ve sürücülü araç karakteristik özellikleri

	Otonom	Sürücülü
İvmelenme ( $m/s^2$ )	2,6	2,7
Yavaşlama ( $m/s^2$ )	4,5	4,5
Uzunluk (m)	4,5	4,5
Azami Hız (m/s)	30	30
Sigma (Sürücü Kusuru)	0,05	0,4
Hız Faktörü	0,9	0,9
Hız Sapması	0,1	0,35
Asgari Açıklık	1,5	1,5

**Tablo 3 - Benzetim çalışmasında kullanılan değişkenler**

Değişken	Değer
Otonom Araç Yüzdesi	[0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]
Trafik Talepleri	[1200, 1350, 1500]
Kaza Lokasyonu (m)	rand(4500, 8000)
Kaza Zamanı (s)	rand(900, 2700)
Kaza Kaldırılma Süresi (s)	rand(600, 1500)
Kaza Şeridi	Sağ, Orta, Sol

#### 4. PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ

**Tespit Oranı (Detection Rate, DR):** Kaza-olay tespit oranı modelin kazaları hangi oranda doğru tespit ettiği hakkında fikir verir:

$$DR = \frac{\text{Model tarafından tespit edilen kaza} - \text{olay sayısı}}{\text{Gerçekleşen kaza} - \text{olay sayısı}} \times 100 \quad (2)$$

**Yanlış Alarm Oranı (False Alarm Rate, FAR):** Yanlış alarm oranı modelim hatalı kaza-olay tespit sayısının toplam kaza-olay tespit sayısına bölünmesi ile yüzde olarak hesaplanmaktadır:

$$FAR = \frac{\text{Model tarafından tespit edilen hatalı kaza} - \text{olay sayısı}}{\text{Modelin tespit ettiği toplam kaza} - \text{olay sayısı}} \times 100 \quad (3)$$

**Ortalama Tespit Süresi (Mean Time to Detect, MTTD):** Ortalama tespit süresi, kazanın gerçekleştiği andan itibaren tespit edilen ana kadar geçen ortalama süreyi saniye cinsinden vermektedir.

$$MTTD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{tespit}^i - t_{kaza-olay}^i) \quad (4)$$

#### 5. BULGULAR

SNS algoritmasının performansının ölçülebilmesi için bir önceki bölümde verilen performans ölçüt parametreleri kullanılarak kaza süresi, şerit ve otonom araç yüzdesi (OAY) değerleri kullanılmıştır. Aşağıdaki Tablo 4'te SNS algoritmasının performans ölçütlerine göre genel durumu yer verilmiştir. Kaza tespit oranının (DR) %100'e ne kadar yakın olması uygulanan kaza-olay tespit algoritmasının yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu göstermektedir. Yanlış alarm oranının (FAR) 0'a ne kadar yakın olması da kazayı ne kadar yüksek oranda tespit ettiğini göstermektedir. Ortalama tespit süresi (MTTD) ne kadar düşük ise kazayı o kadar erken tespit ettiğini gösterir.

**Tablo 4 -** Yol ağı üzerindeki tüm benzetim senaryolarına uygulanan SNS algoritmasının sonuçları

	<b>DR</b>	<b>FAR</b>	<b>MTTD</b>
<b>SNS</b>	%136,69	%26,84	193,95

Tablo 5 göz önünde bulundurulduğunda kaza süresinin uzunluğu arttığında kaza tespit oranında iyileşmeler görüldüğü yanlış alarm oranında ise daha kötü sonuçlara yol açtığı ve ortalama kaza tespit süresinde ise artışlar olduğu görülmektedir.

**Tablo 5 -** Kaza-olay tespit algoritmalarının katılımsız yol ağına farklı kaza sürelerinde performansları

		<b>DR</b>	<b>FAR</b>	<b>FAR Değişimi (%)</b>	<b>MTTD</b>	<b>MTTD Değişimi (%)</b>
<b>SNS</b>	<b>Kısa Süreli Kaza</b>	%152,79	%20,58		149,99	
	<b>Orta Süreli Kaza</b>	%142,79	%25,22	%22,52	183,73	%22,49
	<b>Uzun Süreli Kaza</b>	%124,34	%35,50	%72,48	240,81	%60,55

Sağ şerit kazalarında en iyi kaza tespit oranı ve yanlış alarm oranı yakalanırken orta şerit kaza senaryolarında tespit oranı ve yanlış alarm oranı en kötü sonuç verdiği Tablo 6'da görülmektedir. Kaza tespit sürelerinde ise sağ şeritte daha erken tespit edilirken orta şerit kaza senaryolarında en geç tespit edilmektedir.

**Tablo 6 -** Kaza-olay tespit algoritmalarının katılımsız yol ağına farklı kaza şeritlerinde performansları

		<b>DR</b>	<b>FAR</b>	<b>FAR Değişimi (%)</b>	<b>MTTD</b>	<b>MTTD Değişimi (%)</b>
<b>SNS</b>	<b>Sağ Şerit Kazası</b>	%120,78	%13,18		117,20	
	<b>Orta Şerit Kazası</b>	%204,76	%42,81	%224,84	204,18	%74,22
	<b>Sol Şerit Kazası</b>	%139,71	%31,69	%140,44	154,08	%31,47

Tablo 7 incelendiğinde kaza tespit oranı en iyi otonom yüzdesi 100 olduğunda gösterirken düşük otonom yüzdelerinde kaza tespit oranı nispeten düşük olmaktadır. Ancak, yanlış alarm oranında ise otonom araç yüzdesi 100 iken nispeten daha kötü sonuç verirken düşük otonom yüzdelerinde daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Kaza tespit sürelerinde ise genellikle otonom araç yüzdesi artarken bu sürenin azaldığı görülmektedir. En iyi sonucu otonom araç yüzdesi 100 olduğunda vermektedir.

**Tablo 7 - Kaza-olay tespit algoritmalarının yol ağında farklı otonom araç yüzdelere göre performansları**

		DR	FAR	FAR Değişimi (%)	MTTD	MTTD Değişimi (%)
SNS	%0 OAY	%133,62	%24,88		200,10	
	%10 OAY	%134,85	%24,19	-%2,77	210,14	%5,02
	%20 OAY	%135,61	%23,75	-%4,54	205,28	%2,59
	%30 OAY	%134,96	%24,13	-%3,02	204,55	%2,22
	%40 OAY	%132,14	%25,71	%3,32	198,76	-%0,67
	%50 OAY	%135,12	%24,10	-%3,13	196,39	-%1,85
	%60 OAY	%135,48	%23,83	-%4,21	193,57	-%3,26
	%70 OAY	%131,42	%26,11	%4,94	193,90	-%3,10
	%80 OAY	%132,48	%25,50	%2,48	194,38	-%2,86
	%90 OAY	%133,02	%25,19	%1,23	195,41	-%2,34
%100 OAY	%130,84	%26,44	%6,25	191,78	-%4,16	

## 6. SONUÇ

SNS kaza tespit algoritmasının farklı otonom araç yüzdeleri, farklı kaza süresi ve farklı kaza şeritleri üzerinden tespit oranı (DR), yanlış alarm oranı (FAR) ve tespit süresi (MTTD) performans ölçütleri üzerinden performansı değerlendirilmiştir. SNS algoritması kaza-olay tespit oranında otonom araç yüzdesi 100, sağ şerit ve uzun süreli senaryolarda en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Yanlış alarm oranında düşük otonom araç yüzdelерinde, sağ şerit ve kısa süreli senaryolarda en iyi sonucu verdiği erişilmiştir. Kaza tespit sürelerinde ise otonom araç yüzdesi 100, sağ şerit kazası ve kısa süreli kaza senaryolarında kazayı en erken tespit ettiği görülmüştür. Otonom araç yüzdesi 100 olduğunda en iyi sonuçların elde edilmesi Tablo 2’de belirtilen “Sigma (Sürücü Kusuru)” parametresinin otonom araçlarda çok düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK 1001) tarafından 120M574 hibe numarasıyla desteklenen çalışmanın ürünüdür.

## Kaynaklar

1. Steg, L., and Gifford, R. Sustainable transportation and quality of life. Journal of Transport Geography, 13(1), 59–69, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.003>
2. Gokasar, I. (2018) . Kaza-olay algılama algoritmalarının mikroskobik benzetim ile modellenmesi ve değerlendirilmesi: D 100 Karayolu örneği, İstanbul . Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi , 1 (2) , 87-107, 2018 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/jitsa/issue/39569/469426>



# İnsansız Teslimat Robotlarının İstanbul'da Pilot Bölge Uygulamalarının Değerlendirilmesi

İlgin GÖKAŞAR<sup>1</sup>, Mehmet AKINCILAR<sup>2</sup>

## ÖZET

*Bu çalışma, moto kurye kazalarının önüne geçilmesi ve moto kurye faaliyetlerinin masa başı bir konuma getirilmesi amacıyla geliştirilen, "teleoperation" yöntemi ile internet üzerinden uzaktan kumanda edilen yarı-otonom kargo robotu ile yapılan pilot bölge saha uygulamasını irdelemektedir. Türkiye'de, İstanbul-Kadıköy Caddebostan bölgesinde gerçekleşen pilot bölge çalışması kapsamında insansız araçların şehre adaptasyonunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu da, teslimat robotlarının operasyonu sırasında yazılı kanallardan edinilen kullanıcı yorumlarıyla teslimat verileri ve saha personeli raporları görsel ve yazılı olarak işlenerek mevsimsel faktörler, yol ve kaldırım durumları, güvenlik ve vandalizm, kullanıcı etkileşimi, teslimat süreleri ve internet performansı gibi ölçütler etrafında yorumlanarak sağlanması planlanmıştır. Yardım masası görüşmeleri ve sosyal medya etkileşimleri neticesinde derlenen yorum ve kullanıcı geri dönüşlerinde, çalınma ve vandalizm nedeniyle Türkiye'nin bu tip araçlara uygun olmadığı en çok alınan dönüt olmuştur. Buna rağmen, pilot bölge çalışması esnasında araçlarda çalınma veya herhangi bir zarar verme durumuyla karşılaşılması ve teslimat sürelerinin ortalama paket servis teslimat süresi olan yarım saati yakalaması sebebiyle, teslimat robotlarının moto kurye yöntemine güvenli bir alternatif olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Ancak robotlar kata teslimat yapamadığı ve kullanıcılar teslim almak üzere aşağıya inme eğiliminde olmadıkları için kata çıkaracak refakatçi personel kullanılmış ve insan-robot işbirliğinde hybrid bir model kurgulanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Teslimat robotları, otonom araçlar, insansız araçlar, teleoperasyon, motokurye kazaları, paylaşım araçları.

## ABSTRACT

### *Evaluation of Unmanned Delivery Robot Pilot Area Applications in Istanbul*

*This study examines the pilot field application of a semi-autonomous cargo robot remotely controlled over the internet with the "teleoperation" method, which was developed to prevent motorcycle courier accidents and bring motorcycle courier activities to a desk position. The goal*

---

1 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ilgin.gokasar@boun.edu.tr

2 Bizero Mobility, İstanbul - akincilar@bizero.bike

*of the pilot study in the İstanbul-Kadıköy Caddebostan region in Turkey was to improve the adaptation of unmanned vehicles to the city. This shall be accomplished by visually and in writing interpreting user comments obtained from written channels during delivery robot operation, as well as delivery data and field personnel reports, and interpreting them around criteria such as seasonal factors, road and pavement conditions, security and vandalism, user interaction, delivery times, and internet performance. Most of the comments and user feedback compiled from helpdesk meetings and social media interactions focused on how such tools would not be appropriate in Turkey due to theft and vandalism. Despite this, it has been seen that delivery robots can be used as a safe alternative to the moto couriers, since there was no theft or any damage to the vehicles during the pilot area application and the delivery times caught half an hour, which is the average package delivery delivery time. However, since the robots cannot deliver to upper floor and users do not tend to go down to receive them, companion personnel were used to take them to the floor and a hybrid model was built in human-robot cooperation.*

**Keywords:** *Delivery robots, autonomous vehicles, unmanned vehicles, teleoperation, motorcycle accidents, shared vehicles.*

## **1. GİRİŞ**

### **1.1. Covid-19 Salgınıyla Beraber Teslimat Servislerinde Talep Artışı**

2021 yılında ülkemizde e-ticaret hacmi bir önceki yılın aynı dönemine göre %69 artışla 381,5 milyar ₺ seviyelerine yükselmiştir. Sipariş miktarı %46 artışla 2 milyar 297 milyon adetten 3 milyar 347 milyon adede çıkarken, ülkemizde 2021 yılında e-ticaret faaliyetinde bulunan 484.347 işletme bulunmaktadır. Bu işletmelerde siparişlerin %97'sinin temassız ödeme yöntemleriyle gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir [1]. Online alışverişlerin teslimatında ortalama süre 2017 yılında 5 gün iken, 2021 Covid-19 salgınından sonra 2021 yılı itibarıyla bu süre ortalama 2 güne kadar azalmıştır [2]. Koronavirüs salgını sonrası artan e-ticaret hacmine bağlı olarak teslimat sürelerinin düşmesiyle Türkiye'de kayıtlı moto kurye sayısı 200 bini aşmıştır [3]. Bu moto kuryelerin %45'i salgın döneminde işe başlamıştır [4].

### **1.2. Moto Kurye Teslimat Yöntemindeki Tehlikeler**

Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) yaptığı araştırmaya göre, ülkemizdeki moto kuryelerin %21,5'i sosyal güvencesi olmadan çalışmaktadır. Bu oran, Suriye kökenli göçmen moto kuryelerde %68,4'tür. Moto kuryelerin %21,3'ü ise motosiklet ehliyeti olmadan çalışmaktadır. Moto kuryelerin işe başlarken %26,1'inden herhangi bir belge talep edilmemiştir. Türk kuryelerin %31,3'ü, Suriyeli kuryelerin %65,8'i koruyucu ekipmanların hiçbirine sahip değildir. Araştırmaya katılan moto kuryelerin %59,3'ü iş kazası geçirmiş olup, iş kazası geçiren moto kuryelerin %65,1'i iş yerinde iş sağlığı ve güvenliği eğitimi almamıştır. İstatistiklere bakıldığında, Türkiye'de kuryelik sektörü çalışanları arasında 2011 yılında kayıtlara geçen iş kazası oranı binde 0,84 iken, 2020 yılında bu sayı binde 21,5'e yükselmiştir [4]. 2021 yılı verileri ve meslek örgütlerinin açıklamaları ışığında, salgın döneminde hayatını kaybeden moto kurye sayısının 300 olduğu belirtilmektedir [5]. Bu kapsamda, moto kurye faaliyetlerindeki riskleri düşürmek için uygulanabilecek sürüş eğitimi, ekipman kullanımı, sigortalı çalışma, çalışma süresinin azaltılıp teslimat sürelerinin artırılması [6] gibi çözümlerin yanı sıra moto kuryeliğin masa başı bir konuma getirilmesi amacıyla geliştirilen "teleoperasyon/uzaktan görüntülü kontrol" yöntemi mevcut sorunu çözmeye yönelik adımlardan biri olarak öne çıkmaktadır.



### **1.3. Teleoperasyon Yöntemi ile Robotik Teslimat Teknolojileri**

Teleoperasyon yöntemi, operasyon personellerini bilinmeyen ortamlardaki görevlere hazırlayıp çalışma koşullarının bireyler için tehlikeli ve elverişsiz olduğu ortamlarda robotik teknolojiler ile birlikte personelin güvenli bir şekilde çalışmasına olanak vermek amacıyla tasarlanmıştır [7]. Lojistik merkezlerinde forkliftlere [8]; askeri alanda iş makinalarına [9], drone ve kara araçlarına, uzay görevlerinde roverlara, su altı keşif araçlarına, insansız taksi projelerine [10] ve gaz kaçağının olduğu veya radyoaktif sızıntının olduğu alanlarda robotik köpeklere [11] entegre edilen teleoperasyon sistemleri, kablosuz iletişim altyapısını kullanırken canlı yayında düşük gecikme oranlarıyla görüntü olarak araçların kontrolünü ve operasyon faaliyetlerinin icrasını gerçekleştirmektedir.

### **1.4. Bir Teslimat Çözümü Alternatifi Olarak Teslimat Robotları**

Çalışmaya konu olan teslimat robotları, faaliyet gösterdikleri bölgeye göre tam otonom, yarı-otonom veya teleoperasyon (uzaktan insansız kumanda) yöntemlerinden birini ya da birkaçını kullanabilmektedir. Bu yöntemlerden teleoperasyon; özellikle akıllı şehre dönüşmemiş, şehir planlaması düzensiz olan bölgelerin komplike kavşak geçişlerinde ve araç etkileşimlerinde güvenli ve hızlı operasyona olanak vermektedir. Bu çalışmada, uluslararası literatürde kaldırım robotları (SADRs) ve yol robotları (RADRs) olmak üzere 2 farklı şekilde tasarlanan teslimat robotlarının teleoperasyon desteğiyle hybrid bir modelde yol alabileceği önerilmiştir. Örnekler açıklamak gerekirse; geniş kaldırımlarda öğrenilmiş navigasyonla giden robotların yol kesişimlerinde ve trafığe açık istikametlerde teleoperasyon yöntemi ile yoldan gitmesi mümkündür. Teslimat robotlarının tam otonom olarak faaliyet göstermesi akıllı şehirlere ve bağlantılı araç teknolojilerine ihtiyaç duysa da günümüzde kampüs, fabrika ve site içi güzergahlar ile üretim hatlarında bu robotların otonom olarak kullanımı daha yaygındır.

### **1.5. Lojistik Sektöründe Yeni Nesil İstidam Olanığı: Robot Operatörlüğü**

TÜİK verilerine göre Türkiye’de 10 milyonun üzerinde lisans mezunu bulunurken, 25 yaş üzeri vatandaşların %20’sinin lisans mezunu olduğu açıklanmıştır [12]. Bu verilere dayanarak, kayıtlı ve pandemi dönemiyle birlikte moto kuryelik mesleğini icra etmeye başlayan yaklaşık 90 bin kurye arasından lisans mezunu sayısının en az 18 bin olduğu tahmin edilmektedir. Bu kapsamda, çalışmamız eğitim seviyesi yüksek olup moto kuryelik mesleğini icra eden kişilerin teleoperasyon yöntemi ile masa başından robotları kumanda ederek teslimat görevlerini icra etmelerini hedeflemektedir. Bu çerçevede, LinkedIn, Facebook, Instagram, Getiriş gibi platformlardan açılan robot operatörlüğü iş ilanlarına 500’ü aşkın başvuru gerçekleştirilmiştir. Başvurular incelenerek İstanbul’da ikamet eden adaylar arasından pilot bölge uygulaması sırasında toplam 20 kişiye robot pilotluğu eğitimi ve sertifikası verilmiştir.

## **2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI**

Moto kuryelerin karşılaştığı trafik kazası riskini minimuma indirme, teslimat sektöründen kaynaklı karbon salınımını azaltma ve pandemi ile birlikte bulaş riskini azaltıp temassız ürün teslimatını sağlama amacıyla Ocak 2021 yılında Boğaziçi Üniversitesi Mobilite Laboratuvarı ve Bizero Mobilite şirketi işbirliğinde geliştirilmeye başlanıp Nisan 2021 itibariyle servis verebilir prototipi hazır olan insansız teslimat robotu PİKA (Paylaşımli İnsansız Kargo Aracı), Türkiye’nin önde gelen restoran zincirlerinden Pizza Restoranları A.Ş. işbirliğinde Mayıs 2021’de pilot bölge uygulamasına Caddebostan, Kadıköy, İstanbul’da başlamıştır. Mayıs 2021- Temmuz 2022 tarihleri arasında, pandemi süresince ve sonrasında operasyonuna Caddebostan bölgesinin yanında Sabancı Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi, ve Hygo-Nanosilver firması ile

dezenfeksiyon ürünleri dağıtımında Teknopark İstanbul gibi yerlerde de devam eden teslimat robotu PİKA'nın pilot bölge uygulama raporları saha personeli gözetiminde günlük bazda hazırlanmıştır. Bu raporlar temel alınarak, Türkiye'de ilk kez kullanıma giren insansız teslimat robotlarının çevrimiçi ürün siparişlerindeki pratik uygulamaları ele alınmıştır. Yapılan ilk saha araştırması olması nedeniyle, bu çalışma insansız teslimat robotlarının İstanbul'da kurye görevini gerçekleştirme noktasındaki performansına dair sonuçlar ve öneriler getirecektir.

### **3. PİLOT UYGULAMA**

#### **3.1. Uygulama Alanları**

Caddebostan, Bağdat Caddesi Coffy butik kahve işletmesi: 2 km yarıçap içerisinde Getir Yemek uygulaması üzerinden verilen siparişler robotla teslim edilmiştir. Ayrıca, Sabancı Üniversitesi Coffy butik kahve işletmesinde 2 km yarıçap içerisinde Getir Yemek uygulaması üzerinden verilen siparişler robotla teslim edilmiştir. Boğaziçi Üniversitesi kampüs içi kargo ringinde 1 km yarı çap içerisinde ana kapı ile yurtlar arasında paket götürme görevlerinde kullanılmıştır. Teknopark İstanbul'da 1 km yarı çap içerisinde kampüs içi dezenfeksiyon kitleri dağıtımında kullanılmıştır.

#### **3.2. Robot Özellikleri:**

Robotların markası BIZERO'dur. Bu robotların teknik özellikleri:

- İki tekerlekli, kendi kendine dengeleme yapabilen
- Yerli üretim
- 90 lt kargo hacmi, aktif 10 kg, maks. 30 kg taşıma, 100 kg çekme kapasitesi
- Şarj süresi: 2 saat
- 1 şarjla operasyon kapasitesi: 20 paket/40 km
- 2 km/s operasyon hızı, en fazla 5 km/s hız
- 15° maksimum eğim çıkabilen
- 4.5G internet altyapısı destekli uzaktan kamera ile kontrol edebilme, yakından bluetooth ile kontrol desteği
- Operasyon menzili: internet ile sınırsız, bluetooth ile 30 metre
- Toplam ağırlık: 20 kg
- Ölçüler: En: 55cm, Boy: 40cm, Yükseklik: 65 cm.

#### **3.3. Veriler:**

Uygulama alanlarındaki işletimler sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir:

- Toplam sürüş sayısı: 920 (Haziran 2021-Ocak 2022 + Nisan 2022-Temmuz 2022)
- Ortalama sürüş mesafesi: 1 km
- Maks. sürüş mesafesi: 1,9 km
- Ortalama teslimat süresi: 30 dk

- Çalışma koşulları: 5° C üzerindeki yağmurlu, aşırı rüzgarlı, karlı soğuk hava koşulları hariç ortamlarda
- Kullanılan internet altyapısı: Turkcell Superonline Superbox ve Vodafone mobil internet.
- Sipariş alma yarıçapı: 2 km.

#### 4. KARŞILAŞILAN SORUNLAR VE UYGULANAN ÇÖZÜMLER:

##### 4.1. Bağlantı Kopması/Gecikme:

Kapalı havalarda ve yoğun günlerde telekomünikasyon operatöründen kaynaklı gecikme oranları kritik seviyenin üzerinde seyrederek operasyonu aksatmıştır.

**Çözüm:** Robot sürüş bilgisayarına mobil veri ilave edilmiştir. Wifi'de kopukluk ya da gecikme olduğunda operasyona mobil veri kullanılarak devam edilmiştir.

##### 4.2. Kata çıkamama:

Her ne kadar motosikletle aynı hızda teslimat yapılabilse de teslimat süresi kısalmadığı için müşterilerin aşağıya inmek istemediği gözlenmiştir. Buna ek olarak, siparişlerin %10'undan daha azı giriş kat ve iş yerlerine olduğundan bu alanda robotların tek başına çözüm olamayacağı görülmüştür.

**Çözüm:** Robota eşlik eden yaya refakatçiler, tıpkı yürüyen kurye gibi robotu kontrol ederken adrese vardığında da kata teslimat yapmaktadır. Bu sayede yaya refakatçiler 2 km'nin altındaki teslimatlarda hayati riski ortadan kaldırırlarken ehliyet gereksinimi olmadığı için işletmelere maliyet avantajı sağlamaktadırlar. Ayrıca, robotla yapılan teslimatlar ilgi uyandırdığı için, robot teslimatı markalar için de reklam boyutu yüksek bir PR çalışmasıdır. Kurye tarafında ise, sırt çantası taşıma zorunluluğu ortadan kalktığından dolayı eklem rahatsızlıklarının önün geçildiği gibi teslimat görevinin robot ile birlikte motive edici bir hale geldiği gözlemlenmiştir.

##### 4.3. Yol Koşullarındaki Problemler:

Teslimat robotları kaldırım ve yol robotları olmak üzere ikiye ayrılır. Türkiye'nin coğrafi ve trafik şartları göz önünde bulundurularak tasarlanan PIKA robotu hybrid bir modelde hem kaldırımdan hem yoldan gidebilmektedir. Pilot bölge çalışması olarak yolları en nizami olan Caddebostan, Erenköy bölgesi ve Bağdat Caddesi seçilse de yapılan uygulamada yol sorunları şu şekilde gruplandırılabilir:

- a) Kaldırımların içinden ağaç geçmesi: Dar kaldırımlarda robotların yanı sıra insanların dahi geçişini zorlaştırmaktadır.
- b) Kaldırıma araç park edilmesi: Kaldırımda ilerlemeyi tamamen imkansız hale getirmektedir.
- c) Tek şeritli ve park alanı ayrılmamış dar caddelere/sokaklara araç parkı: Araçlarla birlikte yolun sağından gitmeyi olanaksız hale getirmektedir.
- d) Kentsel dönüşüm faaliyetleri ve metro inşaatları: Büyük ve geniş hafriyat araçlarının geçişi için robotların durup kenarda beklemesi gerekmektedir.
- e) Paylaşımli skuterlerin kaldırımlarda düzensiz parkları: Dar kaldırımlarda geçişi imkansız hale getirmektedir.

**Çözüm:** Robotların ağırlıklı olarak yoldan gitmesi önerilmektedir. Bunun dışında Bağdat Caddesi gibi geniş kaldırımlar belirli sayılardaki robotlar için uygun olsa da adet arttıkça yaya trafiğinin olumsuz etkileneceği açıktır. Yoldan giden robotlar için en az 25 km/s hıza ulaşma imkanı sağlanıp araç sürücülerinin göz hizasında reflektif işaret taşımaları gerekli hale gelmelidir.

#### **4.3. Oto Pilot Hataları:**

**a. Büyük araç etkileşimleri:** Pilot bölge çalışmasında otonom sürüş de denenmiş olup yol genişliğinin tutmadığı ara arterlerde özellikle büyük ve geniş araçlar geçerken (kentsel dönüşüm ve metro inşaatlarında dolayı oldukça yoğundu.) robotun hızı yeterli olmadığı için (5km/s) trafiği yavaşlatmamak ve sürüş güvenliğini engellemek için sağda bekleyip araçlara yol vermesi gerekmektedir. Ne yazık ki mevcut hiçbir otonom sürüş altyapısı buna uygun değildir.

**Çözüm:** Robot genişliğinin azaltılıp yüksekliğinin ve hızının artırılması (5km/s → 25km/s) planlanmaktadır.

**b. Trafik kurallarına uymayan sürücüler:** Oto pilot teslimat güzergahlarında en verimli şekilde Bağdat Caddesi'nin geniş kaldırımlarında çalışsa da kaldırımın bittiği sokak bağlantılarında araç dönüşleri esnasında araç sürücülerinin trafik ışıklarına uymadan geçmeye çalışmaları algoritmamızda hataya sebep olmuştur.

**Çözüm:** Olası araç etkileşimli kazaya karışmamak için trafiğe açık tüm yollarda ve trafik ışığı ve yaya geçişi bölgelerinde pilot kumandasının zaruri bir şekilde kullanılmasına karar verilmiştir.

#### **4.4. Kullanıcı Dönüşleri, ve Etkileşim Oranları:**

1,5 yıllık pilot bölge test çalışmasında standart teslimat süresinde teslim edildiğinde kahve ve ürünlerin sadece %1'lik kısmında sıcaklık kaybı ya da dökülme tespit edilmiştir. Bu sorunlu teslimatlarda %10 oranla kullanıcı tepkisiyle karşılaşılsa da alternatif teslimat yöntemleriyle kıyasla memnuniyet oranı 10 kat daha yüksektir. Adrese teslimat üzere geliştirilen robotlar amacını yerine getirmenin yanı sıra teslimat rotalarında günde yaklaşık 50 bin kişi ile etkileşime girmektedir. Bu kitleden önemli bir kısmı robotu gördükten sonra robot sahibi işletmeyi ziyaret etme eğilimdedir. Ek olarak robotun dönüş güzergahında robotu takip edip işletmeye kadar gelen kullanıcılara da rastlanmıştır. Bu kapsamda robotu kullanan işletmelerin gel al siparişlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

### **5. SONUÇ**

Geliştirilen teslimat robotu PİKA'nın pilot bölge uygulama çalışmaları esnasında toplum ve çevreye olan adaptasyonu dikkat çekmektedir. Akıllı cihazların evriminde modern zamanın işçisi konumunda sayılabilecek bu robotlarla çalışmaya başlamadan önce kuryelerin tepkisi, çalınma, hayvanların saldırıları gibi endişeler görülse de robotların hiçbirinin zarar görmediği, siparişlerin %99'unun zamanında ve dezenformasyon olmadan kullanıcıya ulaştırıldığı gözlemlendiğinden pilot bölge uygulamasının başarılı olduğu rahatlıkla söylenebilir. Öte yandan, robotlar kata teslimat yapamadığı için kullanıcıların standart teslimat süresinde (30 dk) ürünlerini teslim almak için aşağıya inme eğiliminde olmadıkları açıktır. Refakatçiyle birlikte gerçekleşen siparişler ile bu sorun çözülmüş olup insan-robot işbirliğinde hybrid bir model kurgulanmıştır. Geliştirilen bu hybrid çalışma modeli ile bu çalışmanın amacına uygun şekilde kuryelerin hayati riski sifıra yakın

seviyeye indirilirken, 1 km'nin altındaki rotalarda elektrikle çalışan karbon salınımı yaklaşık 10 gr/km olan robotlar sayesinde kilometre başına yaklaşık 90 gram karbon salınımı yapan kurye motosikletlerine [12] kıyasla karbon salınımı yaklaşık dokuzda bir oranında azalmıştır. Temassız teslimat konusunda ise amaca uygun bir çözüm oluşturmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

### **Kaynaklar**

1. <https://www.eticaret.gov.tr/dnnqthgzvawtdxraybsaacxtykawm/content/FileManager/Dosyalar/2021%20Y%C4%B1%C4%B1%20E-Ticaret%20B%C3%BClteni.pdf>
2. <https://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/e-ticaret/e-ticarete-hizli-teslimatin-yukselisi-devam-ediyor/670354>
3. [https://www.ntv.com.tr/ekonomi/turk-istenmotokurye-aciklamasi,jeEnJ\\_rHv0CaBvLVT4M-uQ](https://www.ntv.com.tr/ekonomi/turk-istenmotokurye-aciklamasi,jeEnJ_rHv0CaBvLVT4M-uQ)
4. [https://www.ilo.org/ankara/news/WCMS\\_831524/lang--tr/index.html](https://www.ilo.org/ankara/news/WCMS_831524/lang--tr/index.html)
5. <https://www.milliyet.com.tr/gundem/acele-et-baskisi-olune-goturuyor-6685261>
6. Gokasar, I., İ. Özer ve M. Akıncılar (2016). İstanbul'daki Motosiklet Kazalarında Beşeri Faktörlerin İncelenmesi. 7th International Symposium and Exhibition for Road Traffic Safety, Ankara, İstanbul
7. Abut, T., S. Soygüder (2019) Tek Serbestlik Dereceli Bir Teleoperasyon Sisteminde Kontrol Yöntemlerinin Performans Karşılaştırılması. Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi. 31 (2), 505-517.
8. <https://www.forbes.com/sites/edgarsten/2021/07/07/kenco-to-fill-forklift-driver-jobs-with-phantom-driverless-tech/?sh=396081137347>
9. <https://www.ensonhaber.com/ic-haber/insansiz-is-makineleri-afrin-yolunda>
10. <https://www.wired.com/story/designated-driver-teleoperations-self-driving-cars/>
11. <https://mashable.com/video/boston-dynamics-spot-chernobyl>
12. <https://tnmt.com/infographics/carbon-emissions-by-transport-type/>
13. <https://www.dogrulukpayi.com/bulten/turkiye-de-lisans-mezunu-sayisi-10-milyonu-asti>



# Geogrid Takviyeli Yapı Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

Buğra SİNMEZ<sup>1</sup>

## ÖZET

Raylı sistemlerin zemin problemlerine önlem olarak, zemin katmanına geosentetik takviyeler ile yapılar güçlendirilebilir. Bu sebeple, bu çalışmanın amacı, geogrid donatuların, yapı sisteminin bozulma oranını en aza indirmeye yardımcı olacak geogridin malzeme özellikleri ve yerleştirme konumuna odaklanarak bir yapının temel özelliklerini nasıl etkileyebileceğini araştırmaktır. Bu çalışma, yapı sistemi içindeki iki farklı konumda yer alan üç farklı geogridin farklı dikey yükler altında çalışıldığı sayısal simülasyon için üç boyutlu (3D) sonlu eleman modellemesi yapılmıştır. Dikey yüzey sapması, maksimum gerilme ve maksimum kayma gerilmesi gibi mekanik tepkiler değerlendirildi ve dört farklı (donatısız, geogrid donatılı) senaryo arasındaki dört dikey yük (yani 75, 100, 150 ve 200 kN) altında karşılaştırıldı. Sonuç olarak, geogrid takviyeli katmanların, takviye edilmeyen katmanlardan daha fazla deformasyona karşı direnç gösterdiği görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Geosentetikler, Geogrid, Sonlu Elmanlar Methodu, Dikey Yüzey Sapması, Dikey Stres ve Gerilme

## ABSTRACT

### **Modeling of Geogrid Reinforced Structure Behavior by Finite Element Method**

As a countermeasure to railway soil problems, geosynthetic reinforcements in the soil layer can strengthen structures. The goal of this study is therefore to investigate how a geogrid reinforcement layer can alter the essential characteristics of a structure, focusing on the geogrid material form and position location that can help minimize the level of structure system deterioration. This research consisted of a three-dimensional (3D) finite element model for numerical simulation in which three different geogrid forms situated at two different locations within the pavement system were studied under a range of vertical loads. Mechanical responses such as vertical surface deflection, maximum principle stress and strain, and maximum shear stress were evaluated and compared under four vertical load rates (i.e. 75, 100, 150 and 200 kN) between the four geogrid reinforcement scenarios. Consequently, the results of the analysis confirm that geogrid reinforced layers exhibit higher resistance to deformation than the non-reinforced layers.

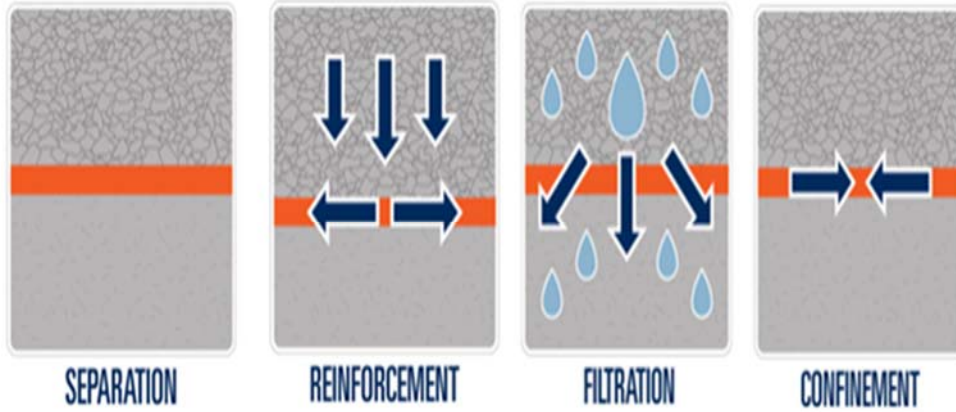
**Keywords:** Geosynthetics, Geogrid, Finite Element Method, Vertical Surface Deflection, Vertical Stress and Strain

---

<sup>1</sup> DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara - bugrasinmez@dsi.gov.tr

## 1.GİRİŞ

1900'lü yıllardan başlayarak artan inşaat faaliyetleri bazı yapısal sorunları da beraberinde getirmiştir. İnşa edilecek yerlerin her geçen gün azalmasıyla birlikte zemin koşullarının iyi olmadığı yerlerde dahi barajların, yapıların, yolların ve tüm inşaat faaliyetlerin yapılması, zemin iyileştirilmesini, güçlendirilmesini gerekli hale getirmiştir. İlk olarak 1958 yılında ABD'nin Florida eyaletinde sahil erozyonu kontrolü için kullanılan geosentetik malzemeler, alınan olumlu sonuç itibarı ile çeşitli zemin alanlarında kullanımı artarak bugün önemli bir malzeme haline gelmiştir. Günümüzde geosentetik malzemeler su bariyeri olarak hidrolik ve geoteknik uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [1]. Tanım olarak kısaca geosentetikler polimerik malzemelerden üretilmiştir. Geogrid, çevreleyen toprak, kaya, yeryüzü ve diğer çevre materyallerle temel ve takviye olarak işlev görmesini sağlamak için 6,35 mm'den (1,4 inç) daha büyük açıklıklara sahip entegre olarak bağlı elemanların düzenli bir açık ağı tarafından oluşturulan bir geosentetikdir (ISO/TS 13434) [2]. Bu malzemeler genellikle otoyollarda, demiryollarında, barajlarda, kanallarda, göletlerde, depolama bölgelerinde, muhafaza tesislerinde ve inşaat mühendisliğinin birçok uygulama alanında uygulanır [3]. Özellikle kırılğan altyapılarda, yüzeyi iyileştirmek veya daha kısa bakım döngüleri için verimli bir çözüm olabileceğini göstermektedir [4]. Yapı tasarımındaki geosentetikler ayırma, takviye, filtreleme, hapsetme, sertleşme, yanal drenaj, sızdırmazlık ve bariyer gibi bir takım fonksiyonlara sahiptir [5]. Şekil 1'de geosentetik malzemelerin fonksiyonları gösterilmiştir. Geogrid takviyesinin faydaları, çeşitli laboratuvar araştırmaları, sayısal simülasyonlar ve saha uygulama ile kanıtlanmıştır [6] [7] [8] [10]. Bununla ilgili dünya literatüründe birçok çalışma vardır.



Şekil 1 - Geosentetiklerin Bazı Fonksiyonlarının Gösterimi (Tencate 2019) [9]

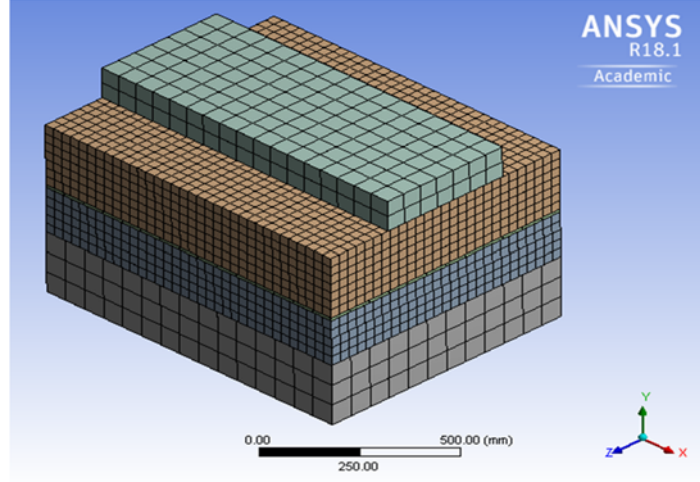
## 2. ANSYS'DE MODELLEME PROSEDÜRLERİ

ANSYS bilgisayar programı, sonlu elemanlar metodu kullanılarak, gerçek malzeme verileri üzerindeki teknik değerlerle bir model geometrisi oluşturuldu. Modelin gerçek malzeme koşullarıyla birebir örtüşmesi için toplamda 20480 eleman kullanıldı. Kullanılan elemanların gerçeğe yakın değerler verebilmesi için farklı boyut ve özelliklerde kullanılmıştır. Her bir kısım (sleeper, ballast, geogrid ve subballast) için farklı malzeme özellikleri ve boyutları gösterimi şekil 2'de gösterilmiştir.

Tasarım modeli toplam 65,75 cm yüksekliğinde olup bunun 10 cm'si sleeper, 35 cm'si balast ve 20 cm 'ide alt balast tabakasından oluşmaktadır. Üç farklı özellikte geogrid takviyesi modelde kullanılmıştır. Elastisite (E) (Young modülü) modülü, bulk modülü, Yoğunluk, poisson oranı gibi değerler her bir geogrid' te farklılık göstermektedir. Modelde kabul alınan balast ve alt balastın



elastisite modülleri sırasıyla 100 MPa ve 85 MPa dır. Yoğunlukları ise sırasıyla 2200 kg/m<sup>3</sup> ve 1800 kg/m<sup>3</sup> dür. Diğer taraftan modelde kullanılan üç farklı geogrid malzemelerin bazı özellikleri de tablo 1’ de gösterilmiştir. Yoğunluk, Elastisite modülü ve poisson oranı olarak en büyük sayısal değerler G3 geogrid takviyesine aittir.



Şekil 2 - Model Simülasyonu ( ANSYS 2018) [12]

Tablo 1 - ANSYS'de Modellenen Üç Farklı Geogridin Malzeme Özellikleri

Geogrid Type	G1	G2	G3
Yoğunluk (kg/ m <sup>3</sup> )	600	800	1100
Elastisite Modülü (MPa)	7	12	30
Poisson's Oranı	0.300	0.300	0.316

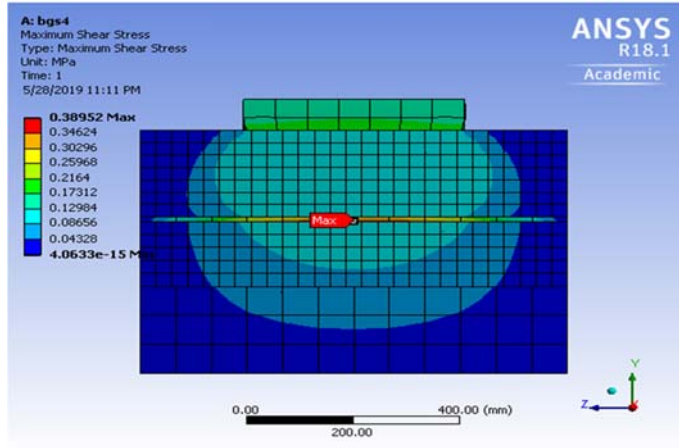
### 3. GEOGRİD TAKVİYELİ YAPININ RAKAMSAL ANALİZLERİ

Gerçek yükleme koşulları altında yapı sistemlerinde maksimum kayma gerilmesi, maksimum normal elastik gerilme ve dikey yüzey sapmasını doğru şekilde tahmin etmek, üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar (FE) modeli ile yapılabilir. Bu çalışmada, FE modelleme analizi açıklanmakta ve geogridin dikey yüzey sapmasını azaltmadaki etkinliğinin ve balastlı bir yapının kritik gerilmelerinin değerlendirildiği toplam 80 ayrı analiz değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca, geogrid uygulama konumunun (yani balast içindeki ve balast ile alt balast tabakaları arasındaki) etkisi, geogrid takviyesi olmayan bir modele göre değerlendirildi. Bu analizler ANSYS bilgisayar programında gerçekleştirilmiş ve zemin yapısının mekanik tepkileri dikey yüzey sapması, maksimum kayma gerilmesi ve maksimum asal gerilmesi açısından değerlendirilmiştir. Uygulanan modellerden çıkan sonuçlar karşılaştırılarak sonuçlar kısmına eklenmiştir.

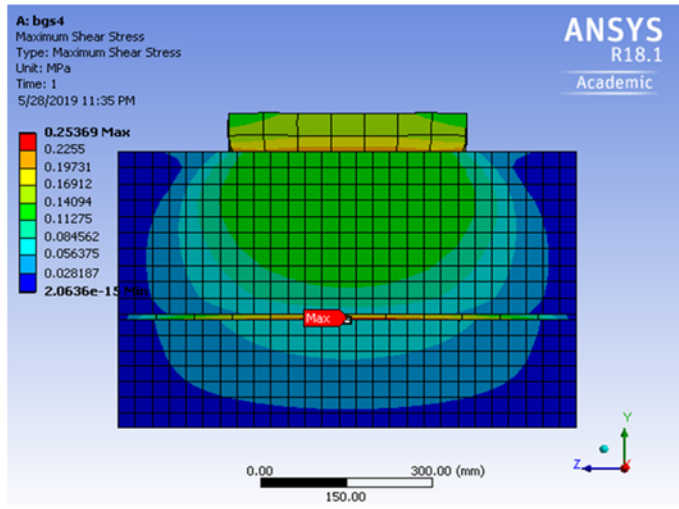
### 4. GEOGRİD TAKVİYELİ YAPILARDA KAYMA GERİLMESİ, ŞEKİL DEĞİŞTİRME VE DİKEY SAPMA ANALİZLERİ

#### 4.1. Maksimum Kayma Gerilmesi

75, 100, 150 ve 200 kN yük uygulaması altında dört tip tepki yani (maksimum asal gerilme, maksimum kayma gerilmeleri, elastik gerilme ve dikey yüzey sapması) analiz edilmiştir. Malzemenin kesitine paralel şekilde uygulanan kuvvete veya kuvvet bileşenine kesme kuvveti;

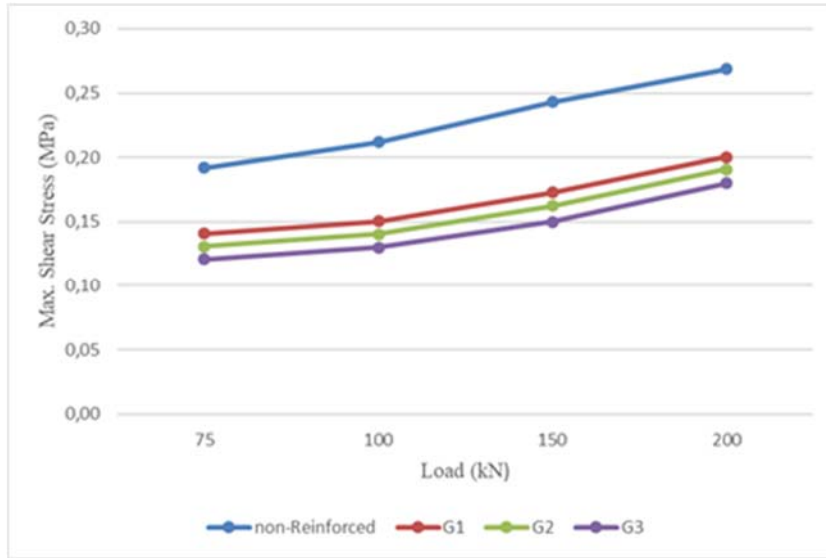


a)



b)

Şekil 3 - Balast Arasındaki Geogrid Takviyeli Modeldeki Maksimum Kayma Gerilmesi (a), Balast ve Alt Balast Arasındaki Geogrid Takviyeli Modelde Maksimum Kayma Gerilmesi (b)



Şekil 4 - Takviye Edilmemiş ve Geogrid Takviyeli Yapıda Balast Ara yüzündeki Donatının Maksimum Kayma Gerilmesi Üzerine Etkisi

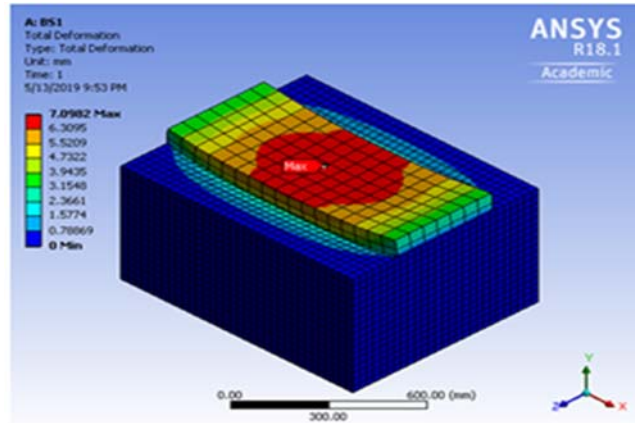
uygulanan kesme kuvvetinin birim alana etkisine ise kayma (kesme) gerilmesi denir ( $\tau = F/A$ ). Zeminin iyi ve uzun ömürlü çalışabilmesi için kayma gerilmesi parametresi önem arz etmektedir. Balastlı yapı modelimizin tepe noktasından 10 cm altına yerleştirilen geogrid malzemesi için maksimum kayma gerilmeleri farklı yükler altında değerlendirilmiş ve Şekil 3' de ki gibi sonuçlar elde edilmiştir. Bunlara ek olarak modelde 2. Uygulama yeri ise balastla alt ballast arasına geogrid uygulamasıdır, bu uygulama yeri modelimizin tepe noktasının 30 cm altındadır. Şekil 4'a da birinci uygulama yeri, Şekil 4'b de ise ikinci uygulama yeri ve modeli gösterilmiştir.

#### 4.2. Düşey Sehîm Analizi ( Deformasyon)

Belirli yük veya yükler altında uygulanan, yapıda ya da malzemede oluşabilecek deformasyon analizidir. Farklı yük ve farklı model uygulamaları karşılaştırılması amacıyla tasarlanan bu analiz bize en doğru yaklaşım sonucunu verecektir. Zeminlerin analizinde bu parametre çok önemlidir.

Uygulanan modellerde deformasyonu geogrid takviyesi olan modeller geogrid malzemelerin ayırma özelliğinden dolayı deformasyonu engellemiş ve yapı bütünüünün her tarafına iletilmesini sınırlandırmıştır, fakat geogrid takviyesi kullanılmayan modelde ise deformasyon modelin her yerine iletilmiştir.

75 kN, 100 kN, 150 kN ve 200 kN' luk yüklerde yapılan analizlerde geogrid takviyesi deformasyonu sönümlenmiş ve geogrid kullanılan yerden sonra herhangi bir deformasyon görülmemiştir. Modellerde maksimum deformasyon, yükün uyguladığı en üst kısımda gerçekleşmiştir. Kırmızı renk ile belirtilen yerlerde maksimum deformasyon mavi ile gösterilen yerlerde ise deformasyonun olmadığı, Şekil 5' de görülmektedir.

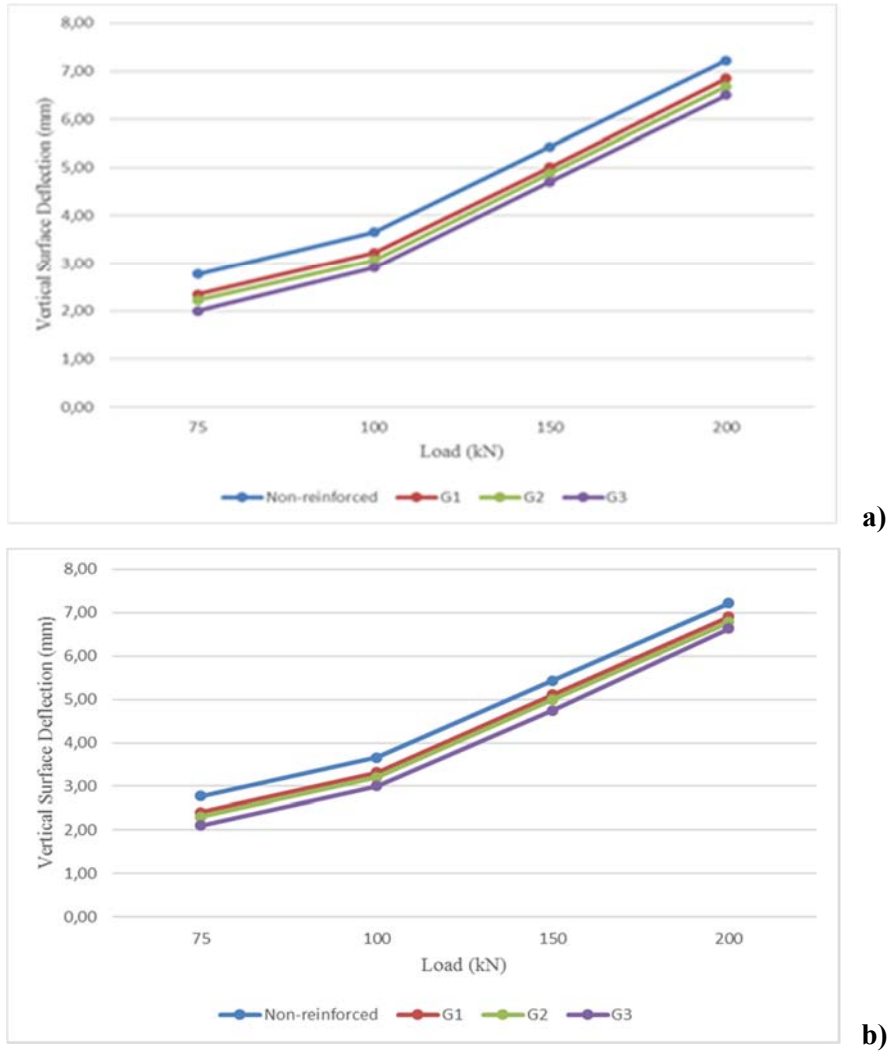


Şekil 5 - Maksimum Deformasyon (ANSYS 2018) [12]

Yapılan dört farklı modeller karşılaştırıldığında geogrid kullanılan G1, G2 ve G3 modelleri deformasyonu en aza indirmiş ve geogrid kullanılmayan modelde ise deformasyon en yüksek seviyede görülmüştür. Geogrid kullanılan G3 modeli ise deformasyonu en düşük seviyeye indirgemmiştir. Şekil 6' de uygulama yerine göre iki farklı sonuç grafikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6'da da görülebileceği gibi, dikey yüzey sapması tüm model senaryolarında ki gibi artan yük ile deformasyon doğrusal olarak artar.

200 kN' luk yük altında, balast arasında uygulanan modelde, maksimum dikey yüzey sapmasının takviyeli olmayan yapıda 7,22 mm olduğunu, ancak geogrid G3 ile güçlendirilmiş yapıda ise 6,63 mm'ye düşürüldüğü saptanmaktadır. Ayrıca, bu analizden elde edilen sonuçlar dikey yüzey sapmasının geogrid G1, G2 ve G3 takviyesi kullanılarak sırasıyla % 6.80, % 8.04 ve % 11.07 oranında azaldığını göstermektedir. Diğer taraftan balast ve alt balast arasında uygulanan modelde

ise takviyeli olmayan yapıda 7,43 mm sapma gerçekleştiğini görmekteyiz ve en düşük sapmanın gerçekleştiği geogrid G3 modelinde ise 6,8 mm sapma gerçekleşmiştir.



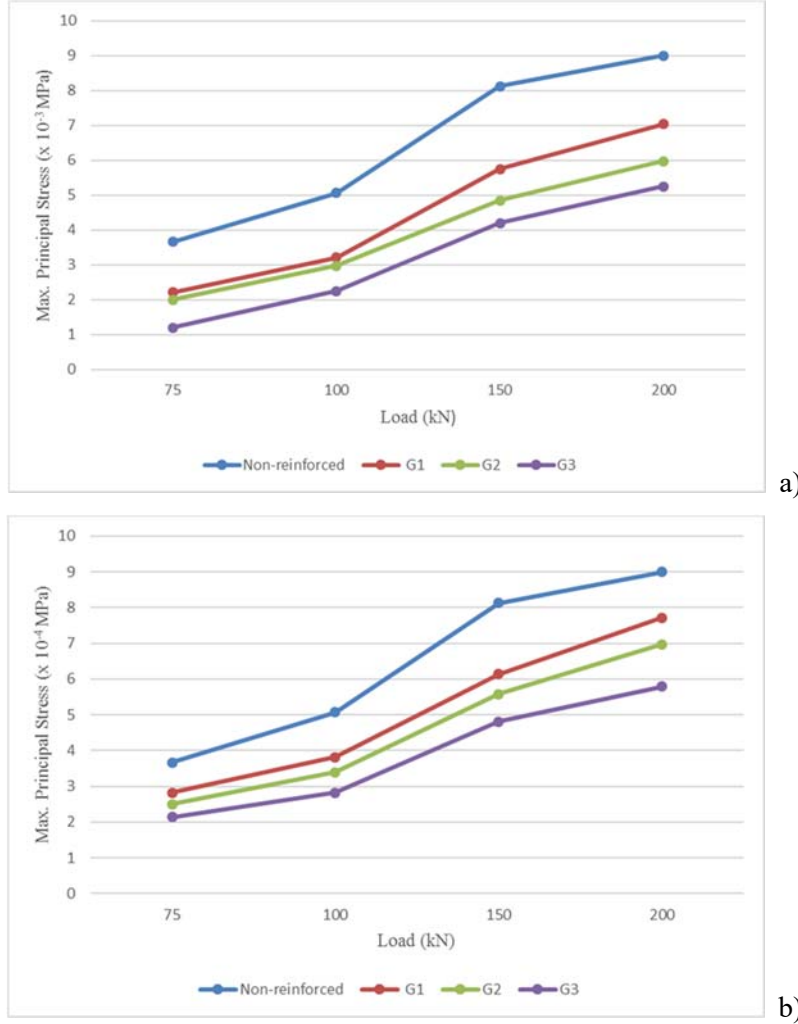
Şekil 6 - Farklı Yükler Altında Farklı Geogrid Takviyeli ve Takviyesiz Yapılarda Düşey Yüzey Sapma. Balast İçindeki Model (a), Balast ve Alt Balast Arasındaki Model (b)

#### 4.3. Maksimum Asal Gerilme Analizi

Yapılardaki maksimum asal gerilme, parçacık ayrılması ve yıpranma açısından yapının potansiyel bozulmasına yol açar. Bu çalışmada geogrid takviyesi olmayan ve geogrid takviyeli modelin karşılaştırılması yapılarak normal gerilme analizi yapılmıştır.

Analiz sonuçları, geogrid donatı içermeyen tasarımın, geogrid donatıya sahip yapılardan maksimum normal stresin daha fazla olduğunu göstermiştir. Şekil 7' de gösterildiği gibi, maksimum stresin geogrid takviyesi kullanılmayan yapılarda olduğu görülmüştür ve yapıdaki maksimum stres etkisinin geogrid malzemelerin düşürdüğü ve bu olumlu etkinin yapıların performansını iyileştirmek için yeterli olabileceğini göstermektedir. Geogrid takviyesiz modelde maksimum ana stres  $9 \times 10^{-3}$  MPa iken balast arasında kullanılan en düşük maksimum asal gerilmeye sahip G3 modeli  $5.1 \times 10^{-3}$  MPa' a sahiptir. Diğer uygulama yeri olan balast ve alt balast arasında ki modelde ise en düşük maksimum asal gerilme  $5.9 \times 10^{-3}$  MPa'dır. Elde edilen bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere geogrid takviyesi maksimum stresi azaltmaktadır ve uygulama

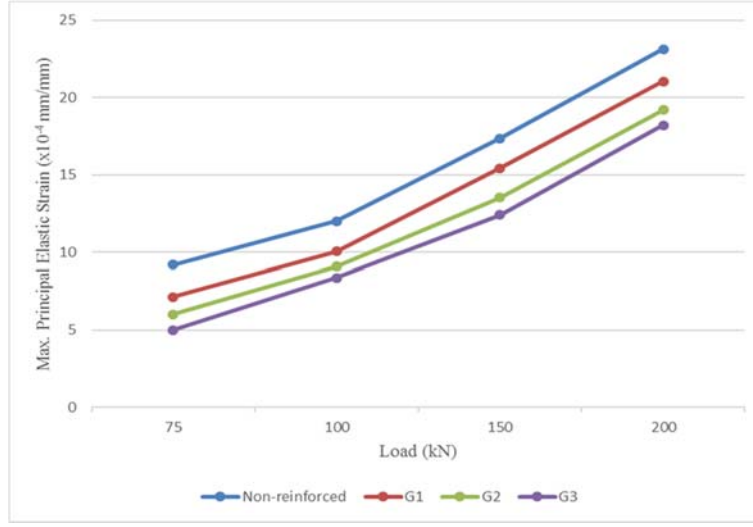
yeri olan balast arasında ise en iyi sonucu vermektedir. Geogrid takviyesini balast içinde kullanımı, balast ve alt balastta kullanımda %13,09 daha gerilmeyi azalttığı sonuçlardan görülmektedir. Geogrid takviyesi uygulamak ise takviyesiz modele göre %45,01 daha gerilmeyi azalttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7 - Farklı Yükler Altında Farklı Geogrid Takviyeli ve Takviyesiz Yapılarda Normal Stres. Balast Arasında Uygulama (a), Balast ve Alt Balast Arasında Uygulama (b)

#### 4.4. Maksimum Elastik Gerilme Analizi

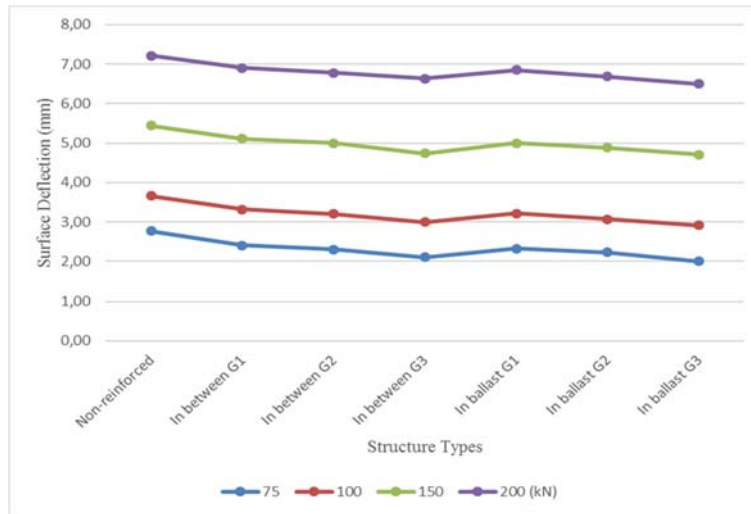
Elastik gerilme, yükün kaldırılması üzerine nesnenin geri tepeceği ve orijinal şekle geri döneceği gerilme değerleri için sınır olarak tanımlanır [11]. Yapılar nesnelere harici bir yüke maruz kaldığında, deformasyona uğrar. Yük, hesaplanan nesne yükünün elastik sınırına karşılık gelen yükü aşarsa, yükün kaldırılmasından sonra, nesne orijinal geometrik eski haline geri dönemeyiz. Sonlu elemanlar metodu yöntemiyle yaptığımız modelde şekil 8 de görüldüğü gibi geogrid takviyeli modellerde gerilme geogrid takviyeli olmayana göre elastik gerilmesi düşük seviyededir. Geogrid G3 takviyeli modelin gerilme seviyesini en önemli oranda düşürdüğü analizlerde görülmüştür. Geogrid kullanılmayan modelde 200 kN yük altında maksimum elastik gerilme  $24 \times 10^{-4}$  mm/mm iken G3 Geogrid kullanılan modelde maksimum elastik gerilme  $17 \times 10^{-4}$  mm/mm dir. Bu durumda uygulama yapılan yapılara geogrid takviyesinin kullanılması zorlanma özelliklerini geliştirdiğini gösterir.



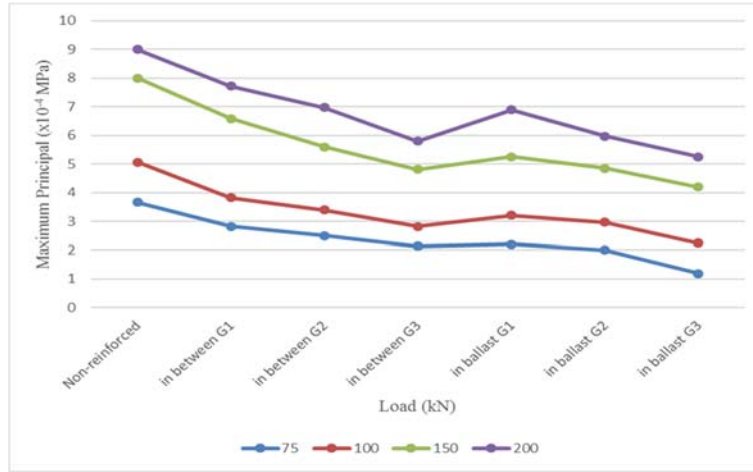
Şekil 8 - Farklı Yükler Altında Farklı Geogrid Türü Yapılarda Maksimum Elastik Gerilme

## 5. FARKLI YERLERDE KULLANILAN GEOGRİD TAKVİYELİ MODELLERİ KARŞILAŞTIRILMASI

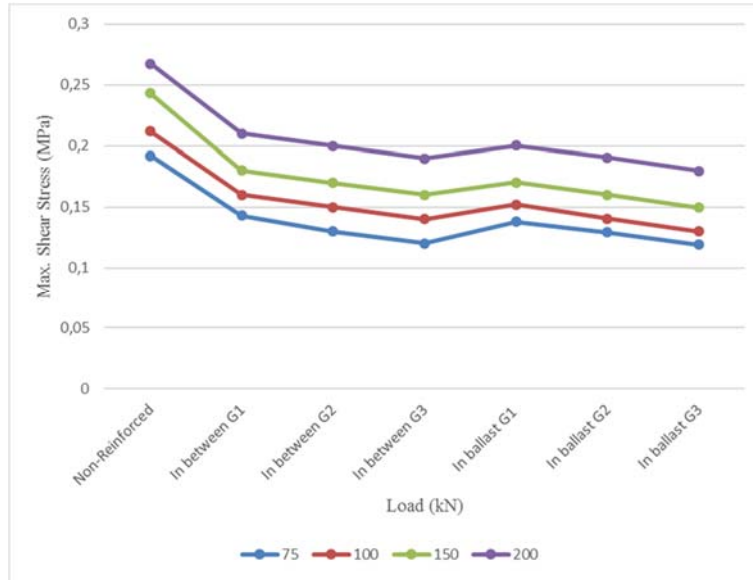
Analizlerimizde kullanılan farklı özellikteki geogrid takviyeli ve takviyesiz modelin, balast içinde ve balast ve alt balast arasında iki farklı yerde uygulamayı karşılaştırmak. Karşılaştırmalar yukarıdaki analiz sonuçlarının tek grafik halinde gösterilmesi şeklinde oluşturulmuştur. Şekil 9’da da görüldüğü üzere, model yapısında geogrid uygulamasının genellikle dikey yüzey sapmasını azalttığı ve geogridin balast tabakasına yerleştirildiğinde azalmanın daha çok olduğu görülmektedir. Şekil 10’ da ise maksimum kayma gerilmelerini tek grafik halinde göstermiş ve geogrid takviyeli olan modellerin kayma gerilmesini doğrusal bir şekilde azalttığı görülmektedir. Geogrid takviyesiz modelde ise en fazla kayma gerilmesi olduğu saptanmıştır. Şekil 11’de maksimum kayma gerilmesi balast içinde ve balast ve alt balast arasındaki yerlerde ki karşılaştırma grafiği gösterilmektedir. Model yapısında geogrid kullanımının maksimum kayma gerilimini azalttığı ve geogridin balast katmanına yerleştirildiğinde azalmanın daha çok olduğu saptanmıştır. Sonuçlar, geogrid G3 takviyesi kullanıldığında, balast ara yüzündeki maksimum kayma geriliminin %32 azaldığını göstermektedir.



Şekil 9 - Farklı Yerler ve Farklı Modellerde Oluşan Dikey Yüzey Sapmasının Karşılaştırılması



**Şekil 10** - Farklı Yerler ve Farklı Modellerde Oluşan Maksimum Kayma Gerilmesinin Karşılaştırılması



**Şekil 11** - Farklı Yerler ve Farklı Modellerde Oluşan Maksimum Kayma Gerilmesinin Karşılaştırılması

## 6 SONUÇLAR

Bu çalışma, yapı sistemi içindeki iki farklı konumda yer alan üç farklı geogridin farklı dikey yükler altında yapının daha sağlam hale geldiğini ve gelen yükleri söndürdüğünü göstermektedir.

- Yapıların zeminlerinin performansını artırmak için üç farklı geogrid türünün olası iki farklı alanda kullanımı araştırıldı. Analiz sonuçları geogrid takviyesinin dâhil edilmesinin yapı zeminlerinin performansını arttırdığını göstermiştir.
- Geogrid takviyesinin kullanılması düşey sehimini azaltmıştır. Geogrid takviyesi, stresi daha eşit bir şekilde yeniden dağıtmaya yardımcı oldu, bu da yapıların yüksek deformasyon ve başarısızlık gelişimini önleyebilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, balast içerisinde geogrid G1, G2 ve G3 takviyesinde dikey yüzey sapsmasının sırasıyla % 4.5, % 6.5 ve % 8.8 oranında azaldığını göstermektedir.

- Dikey yüzey sapmasını azaltmanın yanı sıra, geogrid donatı, maksimum kayma gerilmesini azaltır ve balast tabakasının altındaki maksimum ana gerilmeyi azaltır.
- Sonuçlar, geogrid G3 takviyesi olduğunda, maksimum ana gerilimin, maksimum yüzey düşey sehimin ve maksimum kayma geriliminin sırasıyla % 41.6, % 11.8 ve % 32.2 oranında azaldığını göstermektedir.
- Balast içindeki geogrid takviyesi, balast ve alt balast tabakası arasındaki geogrid takviyesinden daha kullanışlıdır. Yapılan dizayn yapısının dikey yüzey sapması, geogrid ballast içinde iken, balast ve alt balast katmanları arasındaki geogrid den yaklaşık %12 daha düşüktür.
- Ayrıca, model yapısının maksimum normal gerilimi, geogrid balast içindeyken, balast ve alt balast katmanları arasındaki geogrid den % 9.4 daha düşüktür.
- Bu çalışmada sunulan sonuçlar, çeşitli geogrid yerlerinin etkilerini karşılaştırmak için FE modelleme stratejisini kullanarak gerçek yapıların sayısal simülasyonunu içeren sonraki araştırmaların yolunu açmaya yardımcı olacaktır.
- Bu çalışmanın amacının geogridlerin performansını karşılaştırmak değil, balastlı kaplama yapılarındaki takviye etkilerini değerlendirmek olduğu belirtilmelidir.

### **Kaynaklar**

1. Sinmez, Bugra, and Sarper Demirdogen. "Geosynthetic barrier systems used in dams, ponds, and reservoirs of Turkey." *Innovative Infrastructure Solutions* 7.1 (2022): 1-11.
2. ASTM Standard D4439-18, (2018). Standard terminology for geosynthetics. ASTM international, west conshohocken, PA, 2018, DOI: 10.1520/D4439-18, www.astm.org.
3. Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (Vol. 1). Xlibris Corporation
4. Satyal, S. R., Leshchinsky, B., Han, J., & Neupane, M. (2018). Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(2), 190-205
5. Holtz, R. D. (2001). *Geosynthetics for soil reinforcement*. Seattle, Washington.
6. Tutumluer, E., Huang, H., Hashash, Y., & Ghaboussi, J. (2006). Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad track lateral stability. In *AREMA annual conference*, Louisville, KY.
7. Zornberg, J. G. (2011). Advances in the use of geosynthetics in pavement design. *Geosynthetics India*, 11, 23-24.
8. Holtz, R. D. (2001). *Geosynthetics for soil reinforcement*. Seattle, Washington.
9. Tencate (2019). Geosynthetics. Retrieved from <https://www.tencategeo.us/en-us/products/woven-geotextiles/mirafi-hp>
10. Sinmez, B. (2019). Characterization of Geogrid Reinforced Ballast Behavior Through Finite Element Modeling.
11. Richard, R. M., & Abbott, B. J. (1975). Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 101(4), 511-515.
12. ANSYS. (2018) *FLUENT user's guide*, release 18.1, ANSYS, Canonsburg, PA



## Tren Gecikmelerinin Doğru Tahmin Edilmesinde Verinin Önemi

Mehmet Şirin ARTAN<sup>1</sup>, İsmail ŞAHİN<sup>2</sup>

### ÖZET

Kentiçi ve şehirlerarası raylı sistemlerde gecikme bir hizmet kalitesi ölçütüdür. Gecikmelerin tahmini işletim planlamasında verimlilik ve güvenilirlik bakımından önemlidir. Bu çalışmada, plana göre işletilen bir demiryolundaki bir istasyonda tren gecikmelerinin değişimlerini incelemek ve tahmin etmek için bir Markov zincirleri modeli geliştirilmiş, bu modelin performansı (başarımı), aynı veriler kullanılarak geliştirilen bir yapay sinir ağları modeliyle sınanmıştır. Ayrıca, geliştirilen modellerin, kalibrasyon (eğitim) için kullanılan veri miktarına ve gecikme gruplarının (durumlarının) tanımına ne ölçüde duyarlı olduğu da incelenmiştir. Sonuçlar Markov zincirleri modelinin tahmin başarısı bakımından yapay sinir ağlarıyla benzer bir performans ortaya koyduğunu ve gecikme durumlarının sayısı arttıkça tahmin hatalarının azaldığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Markov zincirleri, stokastik modelleme, tren gecikmeleri, yapay sinir ağları.

### ABSTRACT

#### *The importance of Data in Precise Prediction of Train Delays*

Delay is a service quality measure in urban and intercity rail system. Predicting delays is important in operational planning due to efficiency and reliability. In this study, a Markov chain model is developed to analyze and predict delays variations in a railway station under scheduled operation, and model's performance is benchmarked with an artificial neural networks model developed using the same data. Furthermore, the sensitivity of the models is investigated against the amount of data and the definition of delay states. The results show that the prediction performance of the Markov model is comparable to that of the artificial neural networks model, and that the prediction errors decline with increasing number of delay states defined.

**Keywords:** Markov chains, stochastic modeling, train delays, artificial neural networks.

---

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - msartan@hotmail.com

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - sahin@yildiz.edu.tr

## **GİRİŞ**

Gecikmeler, plana göre işletilen demiryollarında işletim verimliliğini ve hizmet kalitesini olumsuz etkileyen başlıca unsurlardan biridir. Hem hizmet sunan hem de bu hizmeti alan bakımından muhtemel gecikmelerin önceden kestirilmesi, kısa vadeli planlama yapmaya olanak sağladığı için önem taşımaktadır. Literatürde tren gecikmelerinin tahmini için geliştirilmiş çok sayıda modelleme yaklaşımı mevcuttur. Sunulan tahmin modelleri, deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılabilir. Deterministik modeller, gelecekteki tren hareketleri hakkında tam bilgi sahibi olunduğunu kabul etmektedir. Öte yandan, stokastik modeller, tren hareketlerinin belirsizliğini modellemek için her bir tren hareketini bir olasılık dağılımı ile ilişkilendirmektedir.

Deterministik tahmin modelleri, tren trafiğini yoğunlukla düğüm (olay) ve bağlantı (süreç) grafikleri ile temsil edilen bir dinamik sistem olarak modellemektedir. Dikkate alınan olaylar, istasyon olaylarını içerir. Teorik hesaplarda kullanılan tahmin yaklaşımlarının yoğunluğunu, seyir ve/veya bekleme sürelerinin tahminleri oluşturmaktadır. İstasyonlar arasındaki kesim seyir süreleri, genellikle demiryolu taşıtlarının ve altyapının dinamik özelliklerine bağlı olan genel hareket denklemi kullanılarak hesaplanır. İstasyonda bekleme süreleri sabit değerler olarak kabul edilir. Bu tür deterministik tahmin modellerinin bir örneği İsviçre trafik kontrol sisteminde uygulanmıştır [1]. Kullanılan model ile her bir trenin konumu güncellendikten sonra, algoritma ile kritik yollar hesaplanarak grafikteki tüm olay zamanlarının tahminleri üretilir. Başka bir örnek [2], Japonya'da yüksek hızlı tren ağında bir tahmin sistemi için uygulanmıştır.

Deterministik tahmin modelleri ile geçmiş veriler kullanılarak istatistiksel analiz ve veri madenciliği teknikleri uygulanarak da tren hareketlerine ilişkin tahminler yapılabilir. Bu tür bir çalışma, süreç sürelerini başlangıç gecikmesi ve zirve saat gibi faktörlere bağlı olarak tahmin etmek için uygulanmıştır [3]. Bir başka örnekte, gerçek zamanlı tren gecikmelerinin belirlenmesi ve kesimlerdeki seyir sürelerinin tahmini üzerinde çalışılmıştır [4]. Yazarlar, akım aşağıda bir sonraki istasyona kadar olan seyir süresinin önerilen teknik kullanarak yüksek hassasiyetle tahmin edilebileceğini bildirmektedir. Gorman [5] tarafından karşılaşma, geçiş, öne geçme gibi faktörlerin fonksiyonu biçiminde bir ekonometrik model geliştirilmiş ve %4,6 mutlak ortalama yüzdesel hata (MAPE) ile nispeten iyi sonuçlar almıştır. [6]'da birincil ve ikincil gecikmelerin yayılımı, deterministik olarak incelenmiştir. [7]'de periyodik çizelgeler için deterministik gecikme yayılım algoritması sunulmuştur. Seyir halindeki tren hareketlerinin gerçekleşme zamanının tahmini için geçmiş verilere dayalı modelin sunulduğu bir çalışmada [8], istasyonlar arasındaki seyir süresinin gerçekleşen çatışmanın süresine bağlı olduğu gösterilmiştir. Sunulan model, bir çatışmanın meydana geleceğini öngörmekte ve çatışmanın süresine bağlı olarak trenin seyir süresini tahmin etmektedir. [9]'da tren varış gecikmelerini analiz etmek için makine öğrenme tekniklerini araştırmışlardır. [10] ve [11]'de makine öğrenme teknikleri kullanılarak dinamik bir tren gecikme tahmin sistemi geliştirilmiştir. Yazarlar, modellerinin gecikmeleri mevcut yaklaşımlardan daha iyi tahmin edebileceğini bildirmektedir. [12], tarifeli olmayan tek ve çift hatlı demiryollarında yük trenleri için bir gecikme tahmin tekniği sunmaktadır. Yazarlar gecikme tahmini için bir simülasyon modeli ve regresyon tekniği kullanmışlardır. Ayrıca bazı ağ karmaşıklıklarının üstesinden gelmek için basitleştirici toplulaştırma tekniği sunmuşlardır. Yaklaşımın geçerliliği gözlemlenen ve tahmin edilen gecikmelerin karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Diğer bir çalışmada [13] çoklu doğrusal regresyon (multiple linear regression, MLR) ve rassal orman regresyonu (random forest regression, RFR) yöntemleri kullanılarak yüksek hızlı trenler için veriye dayalı gecikme telafisi için tahmin modeli geliştirilmiştir. RFR modeli ile, tahmin doğruluğu açısından MLR'den daha iyi sonuçlar elde edilmekle birlikte, her iki modelin de iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Değerlendirme sonuçları, tahmin toleransı 3 dakika olduğunda, RFR modelinin tahmin doğruluğunun %90,9'a ulaşabileceğini, bu değer için ise MLR modelinde %84,4 olduğunu göstermektedir. Daha gelişmiş olan veriye dayalı deterministik yaklaşımlar ile, açıklayıcı değişkenler kullanarak seyir süresi değişimi büyük



Ayrıca önceki çalışmalarda Markov zincirleri modellerinin etkinliği geçmiş test verileriyle karşılaştırılarak gösterilmişti. Bunlara ek olarak, Markov zincirlerinin tahmin hataları, yapay sinir ağları modelinin tahmin hatalarıyla karşılaştırılarak güvenilirliği test edilmiştir.

## YÖNTEM

Markov süreci, Markovyen özelliğe sahip (hafızasız) stokastik süreçlere denir. Markovyen özellik, rastgele değişkenin gelecekteki durumlarına ilişkin olasılıkların, yalnızca hâlihazırdaki (mevcut) durumuna bağlı olma durumudur (1).

$$P(X_{t+1} | X_t, X_{t-1}, \dots, X_1, X_0) = P(X_{t+1} | X_t) \quad (1)$$

Burada  $P$ ,  $t$  zamanından/konumundan  $t+1$  zamanına/konumuna kadar durum değişim olasılığını temsil eden, rastgele değişken  $X$ 'in bir fonksiyonudur.  $X_0, X_1, \dots, X_{t-1}$  önceki durumlar ve  $X_t$  mevcut durumda rastgele değişkenin değeridir/durumudur.

Durum sayısı " $K$ " olmak üzere  $i$  durumundan  $j$  durumuna geçişlerin sayısı ( $n_{ij}$ ) olduğunda,  $i$  durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı  $n_i$  (2):

$$n_i = \sum_{j=1}^K n_{ij} \quad (2)$$

Bu durumda, maksimum olabilirlik çıkarımına göre  $i$ 'den  $j$ 'ye geçiş olasılığı  $p_{ij}$  (3):

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i \quad (3)$$

Geçiş olasılıkları (Markov) matrisi (4), durum sayısı kadar satır ve sütundan oluşan bir kare matristir. Bu matrisin  $(i,j)$  elemanı,  $p_{ij}$ , geçiş olasılığını temsil etmektedir. Markov matrisinin her bir satırının toplamı 1'e eşittir.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1K} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{KK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Başlangıçtaki durumu ( $q_j$ ) bilinen bir rastgele değişkenin başlangıç/mevcut durum vektörü,  $Q_0$  (5):

$$Q_0 = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_K] \quad (5)$$

Başlangıç durumu bilinen bir rastgele değişkenin seyir veya bekleme sürecinin sonundaki beklenen durumlarına ilişkin olasılıkları ( $e_j$ ) (6), başlangıç durum vektörü ile ilgili süreç için oluşturulan geçiş olasılıkları matrisinin çarpımından elde edilir ve bir vektör şeklinde gösterilir (7):

$$E_i = Q_0 \times P \quad (6)$$

$$E_i = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_K] \quad (7)$$

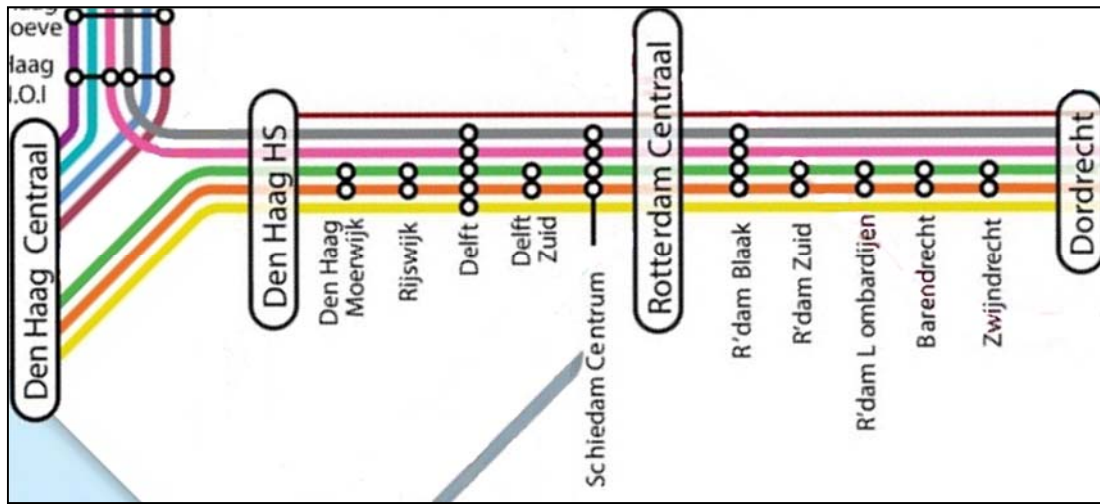
Bu çalışmada modellenen değişken (gecikme) sürekli bir değişkendir. Ancak gecikme, kesikli durumlu Markov zincirleri ile modellenmiştir. Bu nedenle, gecikme değerleri, belirli aralıklarda bulunması durumuna göre gruplandırılmıştır (gecikme durumu). Tanımlanan gecikme durumları (aralıkları) için gözlenen değerlerin ortalaması ilgili gecikme durumu için temsili gecikme değeri olarak kabul edilmiştir.  $j$  gecikme durumunun temsili değeri ( $f_j$ ) olmak üzere, tahmini gecikme, gecikme durumlarının temsili değerlerinin ( $f_j$ ) gecikme durumları için beklenen olasılıklar ( $e_j$ ) ile ağırlıklandırılıp toplanmasıyla elde edilmiştir (8).

$$d = \sum_{j=1}^K e_j \times f_j \quad (8)$$

## ÇALIŞMA BÖLGESİ ve VERİ TEMİNİ

### Çalışma Bölgesi

Hollanda demiryolu ağı, ağ kullanımı (kilometre başına yapılan yıllık tren-kilometre değeri) oldukça yüksek olan, dünyanın en işlek demiryolu ağlarından biridir. Ağ kullanımı yüksek olması genel olarak daha düşük bir dakikliğe yol açar. Çünkü bu tür ağlar aksaklıklara karşı oldukça duyarlıdır ve bu ağlarda yüksek bir gecikme yayılma olasılığı vardır [32]. Buna rağmen, Hollanda Demiryolları'nın verilerine göre, Hollanda'nın tüm hatlarında trenlerin %87'den fazlası (3 dakika toleransla) dakiktir [20]. Bu çalışmada yalnızca Dordrecht (Ddr) terminalinden Den Haag Centraal (Gvc) terminaline gitmekte olan kentiçi (SPR) trenlerin Barendrecht (Brd) istasyonuna varış ve Brd istasyonundan kalkış gecikmeleri incelenmiştir. İlgili ağ parçası Şekil 1'de gösterilmektedir.

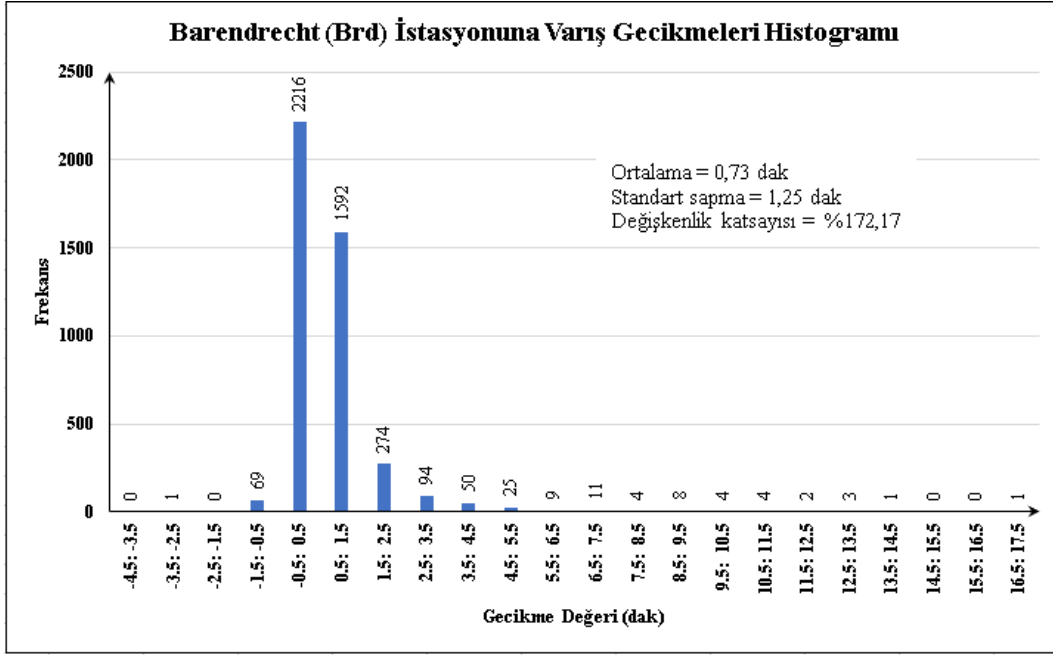


Şekil 1 - İncelenen demiryolu ağı parçası

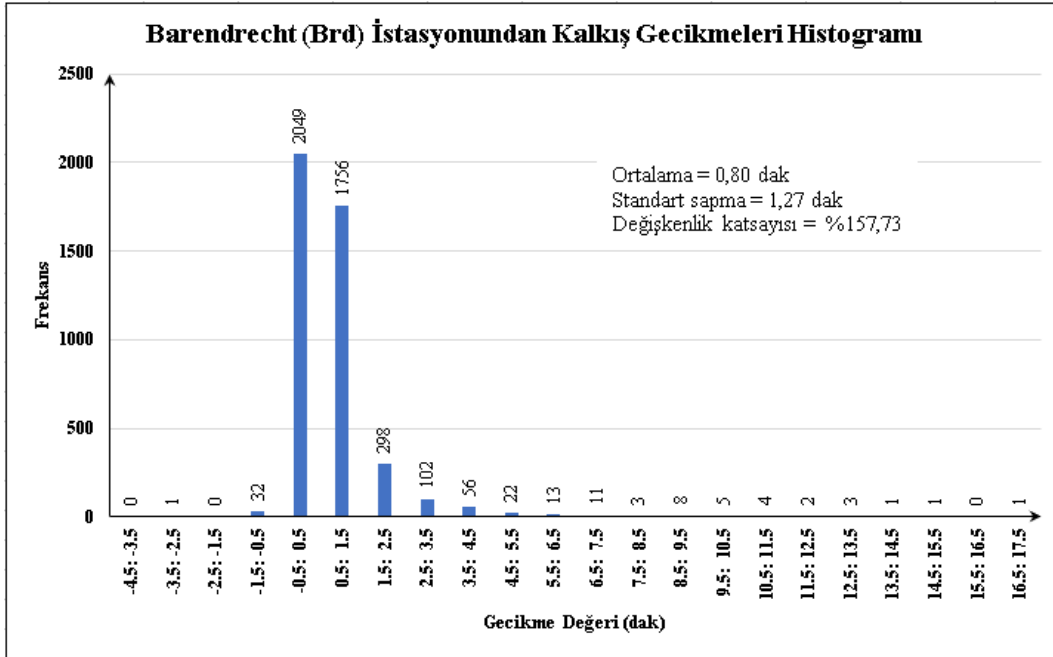
### Veri Temini

Güvenilir ve kaliteli veriler, analiz ve tahminlerin isabetli olması bakımından çok önemlidir. 4 Eylül 2017-8 Aralık 2017 tarihlerine (66 hafta içi güne) ait Hollanda demiryolu ağının tamamı için gecikmeye ilişkin gerçek zamanlı veriler, Informs'un düzenlediği RAS 2018'in (RAS Problem Solving Competition, 2018) internet sayfasından elde edilmiştir. Yarışmalar için

sağlanan veriler ve ilgili problemler, herkesin yayın ve araştırma çalışmalarında kullanabilmesi için açık erişime sunulmuştur.



Şekil 2 - Barendrecht (Brd) istasyonuna varış gecikmelerinin histogramı



Şekil 3 - Barendrecht (Brd) istasyonundan kalkış gecikmelerinin histogramı

Bu veriler tarih, tren numarası, tren türü, konum, tren hareketi türü, gerçekleşme zamanı ve planlanan zaman gibi bilgileri içermektedir. Var olan bu bilgilere ek olarak her veriye ilgili tren seyahatinin bir önceki tren hareketine, bir sonraki tren hareketine, ilk tren hareketine ve son tren

hareketine ait konum ve gecikme bilgileri Microsoft Excel yardımıyla işlenmiştir. Tüm veriler içinden yalnızca Ddr terminalinden Gvc terminaline gitmekte olan kentiçi (SPR) trenlerin Brd istasyonundaki varış ve kalkış verileri alınmıştır. Böylece 4368 veri çifti (varış ve kalkış gecikme çifti) elde edilmiştir.

Brd istasyonuna varış ve kalkış gecikmelerinin histogramları sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Gecikme değerleri -1,5 ile 4,5 dakika aralığında yoğunlaştığı için çalışma bu aralıkta gerçekleştirilmiştir. Diğer bir deyişle, -1,5 dakikadan küçük gecikme değerlerinin olduğu ve 4,5 dakikadan büyük gecikme değerlerinin olduğu veriler silinmiştir. Böylece kalan 4290 veri çifti ile çalışmaya devam edilmiştir.

## UYGULAMA

[28]'de tren gecikmelerinin daha hassas tahmini için Markov matrislerinin istasyon/kesim, yön ve tren türü bazında ayrı ayrı oluşturulması gerektiği gösterilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada yalnızca Ddr terminalinden Gvc terminaline gitmekte olan (bir yönde) kentiçi (bir tren türü için) trenlerin Brd istasyonundaki (istasyon bazında) varış ve kalkış verileri kullanılmıştır.

Gecikme değerleri -1,5 ile 4,5 dakika aralığında yoğunlaştığı için (Şekil 2 ve Şekil 3) çalışma bu aralıkta gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada modellenen değişken (gecikme) sürekli bir değişkendir. Ancak gecikme, kesikli durumlu Markov zincirleri ile modellenmiştir. Bu nedenle gecikme değerleri belirli aralıklarda bulunma durumuna göre gruplandırılmıştır (gecikme durumu). Gecikme durumları farklı şekillerde tanımlanabilir. Örnek olarak 3 seçenek Tablo 1'de verilmiştir. 1. seçenekte 1 dakika genişliğinde 6 gecikme durumu tanımlanmıştır. 2. seçenekte 2 dakika genişliğinde 3 durum, 3. Seçenekte 3 dakika genişlikte 2 durum tanımlanmıştır. Tanımlanan gecikme durumları için gözlenen değerlerin ortalaması ilgili gecikme durumu için temsili gecikme değeri olarak kabul edilmiştir.

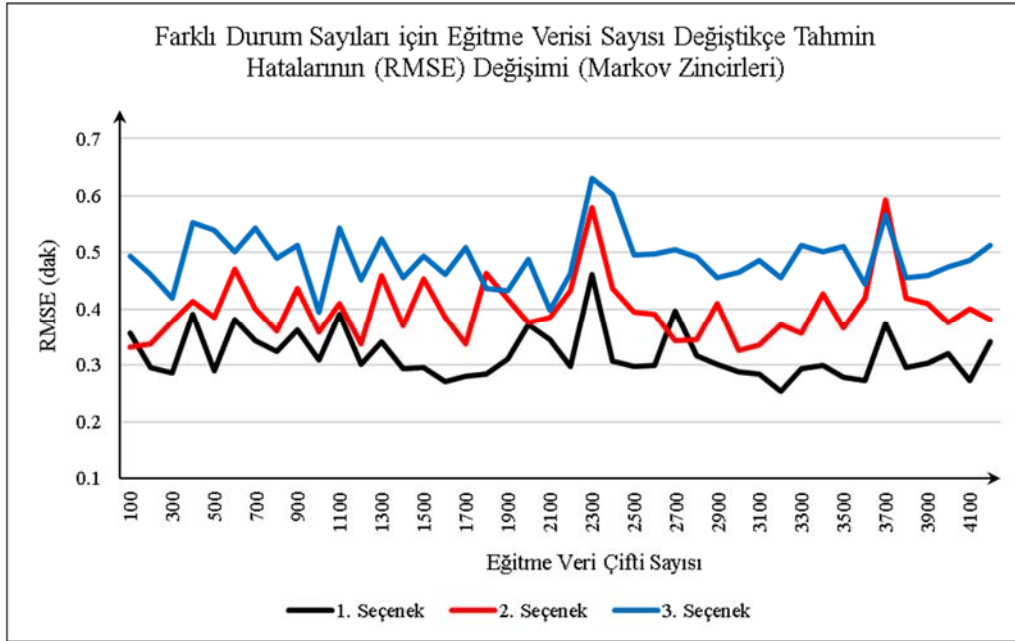
**Tablo 1 - Gecikme durumları ve temsili değerler**

	1. seçenek		2. seçenek		3. seçenek	
	Gecikme değeri aralığı ( dak)	Temsili değer (dak)	Gecikme değeri aralığı ( dak)	Temsili değer (dak)	Gecikme değeri aralığı ( dak)	Temsili değer (dak)
<b>Gecikme durumu 1</b>	-1,5 ile -0,5 arası	-0,66	-1,5 ile 0,5 arası	0,14	-1,5 ile 1,5 arası	0,46
<b>Gecikme durumu 2</b>	-0,5 ile 0,5 arası	0,16	0,5 ile 2,5 arası	1,00	1,5 ile 4,5 arası	2,36
<b>Gecikme durumu 3</b>	0,5 ile 1,5 arası	0,84	2,5 ile 4,5 arası	3,28		
<b>Gecikme durumu 4</b>	1,5 ile 2,5 arası	1,88				
<b>Gecikme durumu 5</b>	2,5 ile 3,5 arası	2,98				
<b>Gecikme durumu 6</b>	3,5 ile 4,5 arası	3,86				

Genel olarak veriye dayalı yöntemlerde daha çok sayıda eğitim verisinin kullanılması durumunda tahmin hatalarının azalacağı beklenir. Gerçek hayatta her zaman çok sayıda veri mevcut

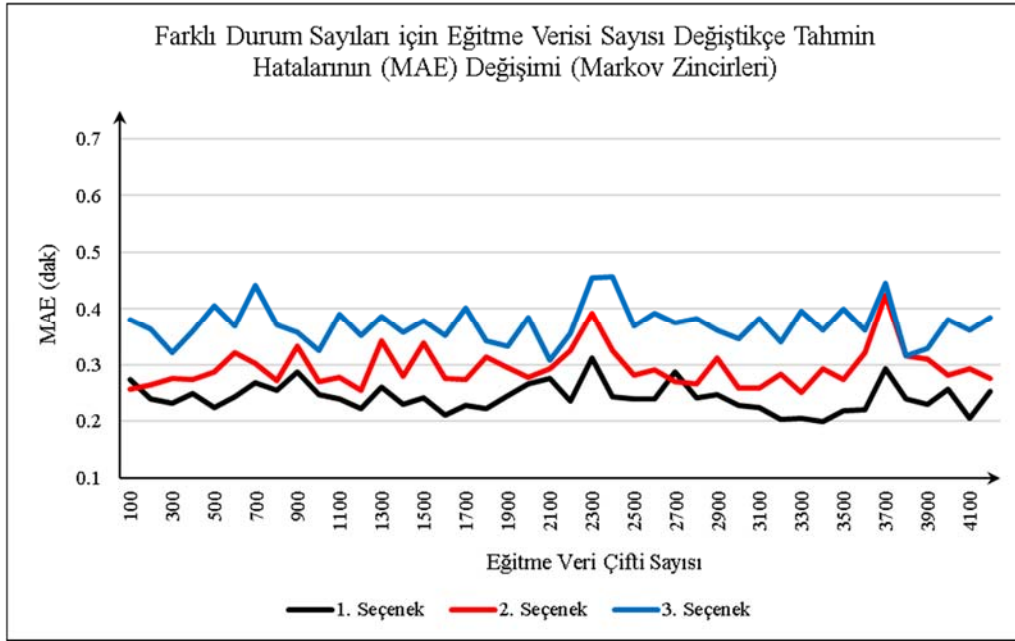
olmayabilir. Böyle durumlarda model eldeki veri ile kalibre edilir ve bir sonraki zaman dilimi için tahmin yapılır. Bu zaman dilimi içinde yeni veriler elde edildikçe model yeni veriler de kullanılarak yeniden kalibre edilip bir sonraki zaman dilimini tahmin etmek üzere güncellenir. Buna uygun olarak bu çalışmada Markov modelinin veri sayısına ne ölçüde duyarlı olduğunu araştırmak için mevcut 4290 veri çifti gerçekleşme zamanlarına göre sıralanmıştır. İlk 100 veri çifti kullanılarak oluşturulan Markov matrisi vasıtasıyla ikinci 100 verinin varış gecikmelerinden kalkış gecikmeleri tahmin edilmiştir. Daha sonra ilk 200 veri çiftiyle oluşturulan yeni bir Markov matrisi kullanılarak üçüncü 100 veri için tahmin yapılmıştır. Üçüncü tahmin grubunda ilk 300 veri çifti kullanılarak dördüncü 100 veri çiftinin kalkış gecikmeleri tahmin edilmiştir. Benzer şekilde 42. tahmin grubunda ilk 4200 veri kullanılarak son 90 veri için tahminleme yapılmıştır. Bu prosedür Tablo 1'deki 3 gecikme durumu seçeneği için ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece gecikme durumu sayısı arttıkça tahmin hatalarının nasıl etkilendiği araştırılırken aynı zamanda tahmin hatalarının veri sayısına ne kadar duyarlı olduğu da incelenmiştir. 3 gecikme durumu seçeneği için farklı eğitime veri çifti sayısına göre tahmin hatalarının (Root Mean Square Error, RMSE ve Mean Absolute Error, MAE değerlerinin) değişimi sırayla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre, tahmin hatalarının eğitime verisi sayısından etkilendiğine dair belirgin bir çıkarım söz konusu olmamıştır. Bu durumun, veri kalitesinin yüksek ve gecikme değişkenliğinin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5'te gecikme durumlarının sayısı arttıkça genel olarak tahmin hatalarının daha az olduğu açıkça görülmektedir.

Daha önceki çalışmalarımızda [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] Markov zincirlerinin etkinliği yalnızca test verileriyle karşılaştırılarak gösterilmiştir. Markov zincirlerinin tahmin performansının literatürde iyi bilinen yöntemlerden biriyle karşılaştırılması, Markov zincirlerinin güvenilirliği açısından gereklidir. Bu çalışmada Markov zincirleri, yapay sinir ağları ile karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin eşit şartlarda karşılaştırılması için yapay sinir ağları modelinde de Markov zincirlerinde kullanılan gecikme durumları ve temsili değerler (Tablo 1) birebir kullanılmıştır. Örneğin seçenek 1 (6 gecikme durumu) için Brd varış gecikmesinin hangi gecikme durumunda olduğunu gösteren 6 bağımsız değişken ( $x_1, x_2, \dots, x_6$ ) kullanılmıştır. Brd kalkış gecikmesi ise bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Buna dair 3 örnek veri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4 - Durum Sayısı Seçenekleri ve Veri Sayısı için Tahmin Hatalarının (RMSE) Değişimi





Şekil 5 - Durum Sayısı Seçenekleri ve Veri Sayısı için Tahmin Hatalarının (MAE) Değişimi

Tablo 2 - Yapay sinir ağları için bağımsız ve bağımlı değişken yapısı için örnekler (Seçenek 1 için)

Brd varış gecikmesi (dak)	Durum 1 (x <sub>1</sub> )	Durum 2 (x <sub>2</sub> )	Durum 3 (x <sub>3</sub> )	Durum 4 (x <sub>4</sub> )	Durum 5 (x <sub>5</sub> )	Durum 6 (x <sub>6</sub> )	Brd kalkış gecikmesi (dak) (y)
0,55	0	0	1	0	0	0	0,38
0,38	0	1	0	0	0	0	0,32
4,22	0	0	0	0	0	1	4,15

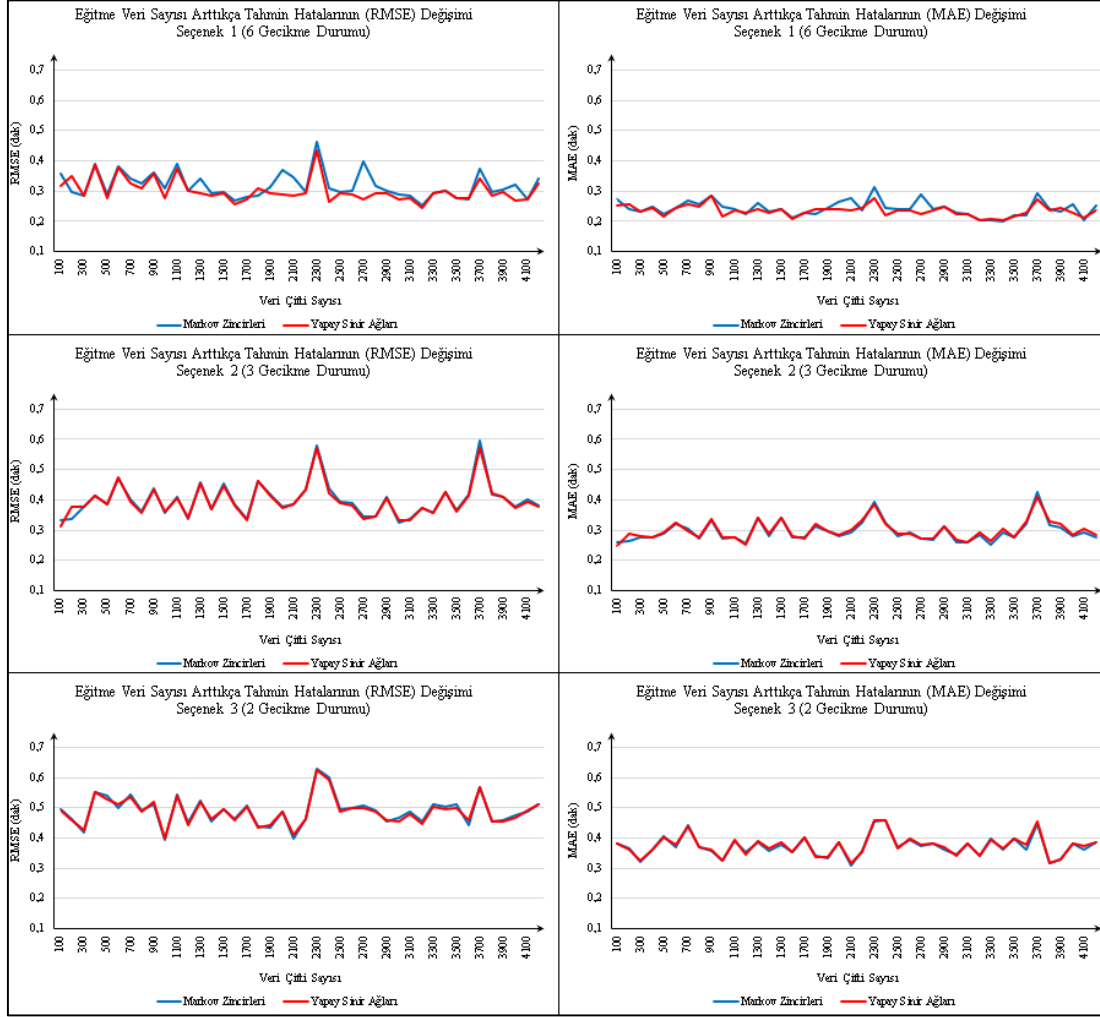
Tablo 3 - Yapay sinir ağları modellerinde optimize edilen parametreler

Hiper parametre	Olası değer/seçenek
Katman Sayısı	1 ile 3 arası
Aktivasyon Fonksiyonu	ReLU, Tanh, Sigmoid veya Yok
Veri Standardizasyonu	Evet ya da Hayır
İlk katman nöron sayısı	1 ile 300 arası
İkinci katman nöron sayısı	1 ile 300 arası
Üçüncü katman nöron sayısı	1 ile 300 arası

Markov zincirlerinde uygulanan 100'er veri artırılarak sonraki 100 verinin tahmin edilmesi işlemi, yapay sinir ağları için de 3 gecikme durumu seçeneği için ayrı ayrı uygulanmıştır. Yapay sinir ağları modelleri kalibre edilirken Matlab programının Regression Learner modülü kullanılmıştır. Aşırı öğrenmeye önlem olarak, modellerin kalibrasyonu sırasında 5 parçalı çapraz

doğrulama (cross fold validation) uygulanmıştır. Hiper parametreler, Bayesian yöntemle 30 iterasyonda optimize edilmiştir. Optimizasyon sırasında hiper parametreler için kullanılan seçenekler Tablo 3'te verilmiştir.

Yapay sinir ağları modellerinin tahmin hataları Markov modellerinin tahmin hatalarıyla beraber Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü üzere Markov modelinin tahmin başarısı yapay sinir ağlarının tahmin başarısıyla oldukça benzerdir.



Şekil 6 - Markov modelleri ve yapay sinir ağları modellerinin tahmin hatalarının karşılaştırılması

## SONUÇ

Şehirlerarası demiryollarında ve kentiçi raylı sistemlerde gecikme analizleri ve tahminleri, işletimin hizmet düzeyinin yükseltilmesi ve verimliliğinin artırılması için yapılması gereken çalışmalar arasındadır.

Bu çalışmada, daha önce tren gecikmelerinin tahmini ve analizi için geliştirdiğimiz Markov zincirleri modeli ilk kez farklı bir yöntemle (yapay sinir ağları) karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Markov zincirleri modelinin tahmin başarısı bakımından yapay sinir ağlarıyla benzer bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Bunun yanında Markov zincirlerinin yapay sinir ağları modellerine göre birtakım avantajları vardır. Örneğin, makine öğrenme tekniklerinin şeffaf

olmayan çalışma mekanizmasının aksine, Markov zincirlerinin modelleme aşamaları karmaşık olmayan pratik ve şeffaf süreçlerdir. Markov matrisleri tek başına ilgili istasyon/kesim/hat/ağ için gecikmenin değişim örüngelerini (paternlerini) ortaya koyabilme yeteneğine sahiptir. Markov matrisi ve bu matristen elde edilen kararlı durum olasılıkları, dakiklik ve çizelge sağlamlığı için çıkarımlar yapabilmek [29], mevcut tolerans sürenin yeterliliğini değerlendirmek [25], sürücü davranışlarını anlamlandırmak [28] ya da gecikmenin uzun vadedeki durumu hakkında öngörü yapabilmek için kullanılabilir. Oysa yapay sinir ağları ile bu türde her bir ek analiz için modeli yeniden yapılandırmak/kalibre etmek gereklidir.

Markov zincirlerinin yapay sinir ağlarına göre birtakım dezavantajları da mevcuttur. Yapay sinir ağlarının popülerliği, karmaşık modelleme süreçlerine rağmen paket programlar sayesinde daha hızlı bir şekilde kalibrasyona imkân sağlamıştır. Ayrıca Markov matrislerinde her satırda mutlaka en az bir veri olmak zorundadır. Gecikme durumları bunu sağlayacak şekilde tanımlanabilecek olsa da daha önce gözlemlenmemiş bir değer aralığında (örneğin bu çalışma için varış gecikmesinin 25 dakika olması durumunda) tahminleme yapılamamakta veya en yakın gecikme durumu üzerinden kaba bir değerlendirme yapılabilmektedir. Oysa yapay sinir ağları bu tür değerler için de tahminleme yapabilmektedir. Bu eksiklik Markov zincirleri adına çalışılması gereken araştırma konularından biridir.

Tren gecikmeleri sürekli bir değişkendir. Yapay sinir ağları ile sürekli değişkenler doğrudan modellerde kullanılabilir. Tren gecikmeleri gibi sürekli değişkenler, sürekli durumlu Markov zincirleri ile doğrudan kullanılabilir. Ancak bu çalışmada olduğu gibi kesikli Markov zincirleri ile modellenenler, gecikme değerlerinin gecikme durumlarına dönüştürülerek kullanılması gereklidir. Gecikme durumları için kullanılan temsili değerler bir miktar hataya sebebiyet vermektedir. Gecikme durumlarının nasıl tanımlandığına (durum sayısı ve genişliklerine) göre tahmin hataları değişebilir. Bu çalışmada 3 farklı gecikme durumu seçeneği için tahmin hatalarının nasıl değiştiği araştırılmıştır. Genel olarak gecikme durumu sayısı arttıkça tahmin hatalarının azaldığı görülmüştür. Bu durum daha dar gecikme durumları kullanıldığında temsili değerlerin kullanımından kaynaklanan hataların azalmasından kaynaklanmaktadır. Kesikli Markov zincirleri ile sürekli bir değişkenin modellenmesi durumunda, durum ve temsili değer kullanımından kaynaklı hataların azaltılması için yeni iyileştirici tekniklere ihtiyaç vardır. Gelecekte üzerine çalışacağımız başlıca konulardan biri budur.

Bu çalışmada araştırılan konulardan bir diğeri, Markov zincirlerinde tahmin hatalarının veri sayısına ne ölçüde duyarlı olduğudur. Elde edilen sonuçlar tahmin hataları ve eğitime verisi sayısı arasında belirgin bir ilişki bulunmadığını göstermiştir. Ancak bu durumun, veri kalitesinin yüksek ve gecikme değişkenliğinin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira benzer durum yapay sinir ağları modeli için yapılan denemelerde de gözlemlenmiştir. Oysa veriye dayalı tahmin yöntemlerinde, daha çok sayıda eğitime verisi kullanılmasının tahmin hatalarını azaltması beklenmektedir. Veri sayısı ile ilgili bu analizin başka bir hatta başka verilerle tekrar edilmesi ve bu sonucun teyit edilmesi gereklidir.

### Kaynaklar

1. Dolder, U., Krista, M., ve Voelcker, M. (2009). "RCS – Rail Control System – Realtime train run simulation and conflict detection on a net wide scale based on updated train positions" Proceedings of the 3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, 1-15.
2. Fukurami, K., ve Yamamoto, H. (2001). "A new diagram forecasting system for the Tokaido-Sanyo Shinkansen", Proceedings of the World Congress on Railway Research, 1-6.
3. Kecman, P. (2014). Models for predictive railway traffic management. [Doktora Tezi]. Delft University of Technology.

4. Hansen, I. A., Goverde, R. M. P., ve van der Meer, D. J. (2010). "Online train delay recognition and running time prediction", 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 1783-1788. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625081>
5. Gorman, M. F. (2009). Statistical estimation of railroad congestion delay. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(3), 446-456. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.08.004>
6. Müller-Hannemann, M., ve Schnee, M. (2009). Efficient Timetable Information in the Presence of Delays. *Robust and Online Large-Scale Optimization* (ss. 249-272). Springer.
7. Goverde, R. M. P. (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(3), 269-287. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.002>
8. Kecman, P., ve Goverde, R. M. P. (2013). "Adaptive, data-driven, online prediction of train event times", 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), 803-808. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728330>
9. Marković, N., Milinković, S., Tikhonov, K. S., ve Schonfeld, P. (2015). Analyzing passenger train arrival delays with support vector regression. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.004>
10. Oneto, L., Fumeo, E., Clerico, G., Canepa, R., Papa, F., Dambra, C., Mazzino, N., ve Anguita, D. (2017). Dynamic Delay Predictions for Large-Scale Railway Networks: Deep and Shallow Extreme Learning Machines Tuned via Thresholdout. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(10), 2754-2767. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2693209>
11. Oneto, L., Fumeo, E., Clerico, G., Canepa, R., Papa, F., Dambra, C., Mazzino, N., ve Anguita, D. (2018). Train Delay Prediction Systems: A Big Data Analytics Perspective. *Big Data Research*, 11, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2017.05.002>
12. Murali, P., Dessouky, M., Ordóñez, F., ve Palmer, K. (2010). A delay estimation technique for single and double-track railroads. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(4), 483-495. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.04.016>
13. Wen, C., Lessan, J., Fu, L., Huang, P., ve Jiang, C. (2017). "Data-driven models for predicting delay recovery in high-speed rail", 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 144-151. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047758>
14. Goverde, R. M. P. (2013). "Performance indicators for railway timetables", *Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 301-306.
15. Medeossi, G., Longo, G., ve de Fabris, S. (2011). A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 1(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.07.001>
16. Yuan, Jianxin, ve Hansen, I. A. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), 202-217. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.004>
17. Berger, A., Gebhardt, A., Müller-Hannemann, M., ve Ostrowski, M. (2011). Stochastic Delay Prediction in Large Train Networks. <https://doi.org/10.4230/OASICS.ATMOS.2011.100>
18. Corman, F., ve Kecman, P. (2018). Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 599-615. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.003>

19. Kecman, P., Corman, F., ve Meng, L. (2015). "Train delay evolution as a stochastic process", Proceedings of the 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis: RailTokyo2015, 19.
20. Yuan, J., ve Hansen, I. A. (2002). Punctuality of Train Traffic in Dutch Railway Stations. *Traffic And Transportation Studies* (2002), 522-529. [https://doi.org/10.1061/40630\(255\)73](https://doi.org/10.1061/40630(255)73)
21. Khadilkar, H. (2017). Data-Enabled Stochastic Modeling for Evaluating Schedule Robustness of Railway Networks. *Transportation Science*, 51(4), 1161-1176. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0703>
22. Carey, M., ve Kwieciński, A. (1994). Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4), 251-267. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90001-9)
23. Carey, M., ve Kwieciński, A. (1995). Properties of expected costs and performance measures in stochastic models of scheduled transport. *European Journal of Operational Research*, 83(1), 182-199. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0248-V](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0248-V)
24. Meester, L. E., ve Muns, S. (2007). Stochastic delay propagation in railway networks and phase-type distributions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.007>
25. Şahin, İ. (2017). Markov chain model for delay distribution in train schedules: Assessing the effectiveness of time allowances. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 7(3), 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.08.006>
26. Şahin, İ. (2019). "Markov Chain Model for Delay Prediction of Trains", RailNorrköping 2019, 20.
27. Olgay, İ., Suvar, U., Aksoy, B., Artan, M. Ş., ve Şahin, İ. (2019). "Kentiçi Raylı Sistemlerde Tren İşletimi Analizi", 13. Ulaştırma Kongresi, 27-36.
28. Artan, M. Ş. (2021). *Tren Gecikmelerinin Tahmini ve Dakiklik Analizi için Markov Zincirleri Modeli [Yüksek Lisans Tezi]*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
29. M. Ş. Artan and İ. Şahin, "Exploring Patterns of Train Delay Evolution and Timetable Robustness," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3101530>
30. Artan M. Ş., Şahin İ. (2021) "Time Dependent and Time Independent Markov Chain Models for Train and Timetable Performance Analysis", 100th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, Amerika Birleşik Devletleri.
31. Şahin İ., Artan M. Ş. (2021) "A Stochastic Model for Railway Network Reliability: Analysis of a Periodic Train Timetable", 8th International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), Stockholm, İsveç.
32. Vromans, M. J. C. M. (2005). *Reliability of railway systems [Doktora Tezi]*. Erasmus University Rotterdam.



# Yüksek Hızlı Demiryolları: Dünya ve Türkiye Perspektifi

İsmail ŞAHİN<sup>1</sup>

## ÖZET

Dünyadaki ilk yüksek hızlı demiryolu Japonya'nın Tokyo ve Osaka kentleri arasında 1964 yılında hizmete girmiştir. İlerleyen yıllarda birçok ülkede yüksek hızlı trenlerin işletildiği geleneksel (çelik ray üzerinde çelik tekerlek) yüksek hızlı hatlar inşa edilmiştir. Karayolu ve havayolu ulaştırma türlerinin artan yüksek dışsal maliyetleri, kent ve ülke yönetimlerini demiryolu yatırımlarına yöneltektedir. Türkiye'deki uygulamalar henüz yeni olup, hatlar 250 km/sa hıza göre tasarlanmaktadır. Bu çalışmada dünyadaki ve Türkiye'deki (geleneksel) yüksek hızlı demiryolu politikaları ve uygulamaları ele alınmakta, geçmiş deneyimlerden dersler çıkartılarak geleceğe dönük önerilerde bulunmaktadır. Ülkemizdeki konvansiyonel (karma) demiryolu hizmetlerinin yüksek hız politikalarından nasıl etkilendiği de inceleme konuları arasında yer almaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek hızlı demiryolu, ulaştırma politikası, karma tren trafiği, konvansiyonel demiryolu.

## ABSTRACT

### **High-Speed Railways: Perspective of the World and Turkey**

The first high-speed railway corridor inaugurated between Tokyo and Osaka in Japan in 1964. In the following years, high speed trains running over the traditional (steel wheel on steel rail) high speed lines were built in many countries. Due to ever-increasing social costs of highway and air transportation, the local and national administrations are forced to invest in the railways. Turkey has started to invest on high-speed rails in recent years, which have design speed of 250 km/h. This study investigates the high-speed rail policies and implementations conducted in the world and Turkey, drawing some lessons from the past experiences, and presenting some recommendations for future practices. The effects of high-speed rail policies adapted in Turkey on the conventional train services were also investigated.

**Keywords:** High-speed railways, transportation policy, mixed train traffic, conventional railways.

---

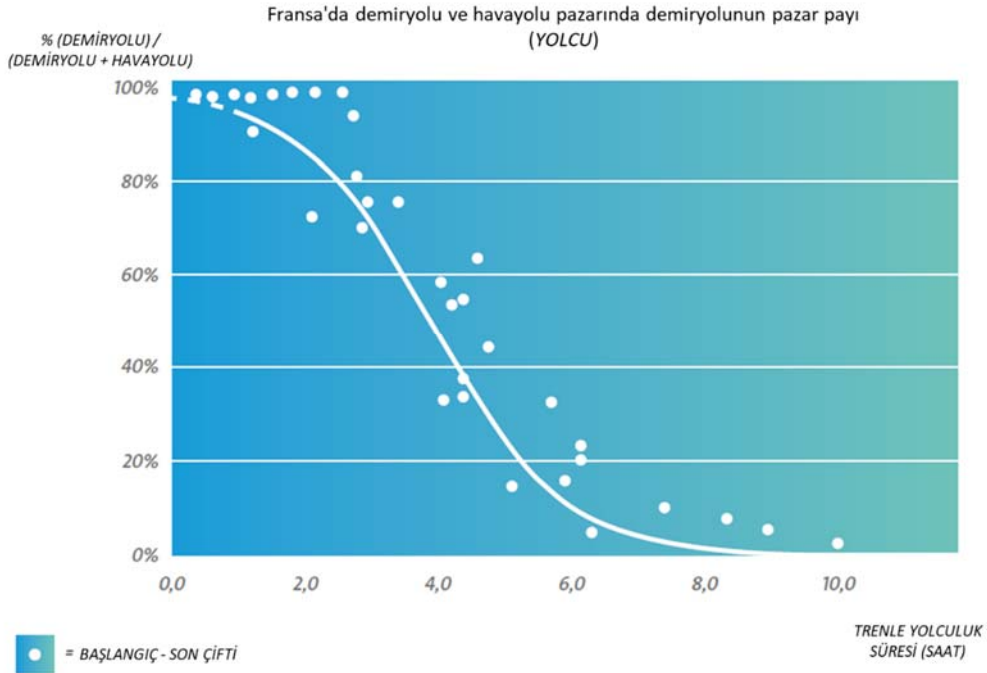
<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - sahin@yildiz.edu.tr

## GİRİŞ

Dünyada yüksek hızlı demiryolu seferleri 1964 yılında Japonya’da başlamış, ardından 1977 yılında İtalya ve 1981 yılında Fransa’nın yüksek hızlı trenleri raylar üzerinde süzölmeye başlamıştır. Ülkemizde ilk yüksek hızlı tren (YHT) Japonya’dan 45 yıl sonra 2009 yılında Ankara ve Eskişehir arasında hizmete girmiştir. Günümüzde dünyanın birçok ülkesinde yüksek hızlı demiryolu (YHD) bulunmaktadır. Bu hizmetlerin yaygınlaşmasının başlıca nedenleri; karayolu ana koridorlarında ve havalimanlarında yaşanan tıkanıklıklar ile bu ulaştırma türlerinin demiryoluna göre dışsal maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır. Yüksek hızlı demiryolu yatırımları yüksek maliyetlidir. Bu maliyetlerin beklenen faydaları getirmesi için koridor tercihleri ile tasarım (proje) standartlarının doğru seçilmesi gerekmektedir. Bunun için uygun ulaştırma politikalarının benimsenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, dünya deneyimlerinin ışığında ülkemizdeki yüksek hızlı demiryolu politikalarını gözden geçirmek ve öneriler geliştirmektir. İzleyen bölümde, çalışmanın amacı anlatılmıştır. Sonra, yüksek hızlı demiryollarının dünyadaki gelişimi ana hatlarıyla ele alınmış, ardından Avrupa Birliği’ndeki YHD politika ve uygulamaları incelenmiştir. Önceki bölümlerde verilen bilgilerin ışığı altında Türkiye’deki YHD yatırımları izleyen bölümde değerlendirilmiştir. Dünyadaki deneyimlerden yararlanarak YHD uygulamalarında benimsenmesi önerilen politikalar ve tasarım yaklaşımları sonuç bölümünde sunulmuştur.

## AMAÇ

Yüksek hızlı demiryolu ile diğer ulaştırma türleri arasındaki rekabette iki ölçüt öne çıkmaktadır: Kapıdan kapıya toplam yolculuk süresi ve toplam yolculuk ücreti. Hizmetlerin sık ve zamanında yapılması da gelecekteki yüksek hızlı demiryolu işletmeciliğinin güçlenmesine katkı yapacaktır. Şekil 1’de Fransa’da kapıdan kapıya yolculuk süresinin havayolu ile karşılaştırıldığında YHD pazar payına etkisi görölmektedir. Buna göre, 2 saatin altındaki tren yolculuklarında demiryolu

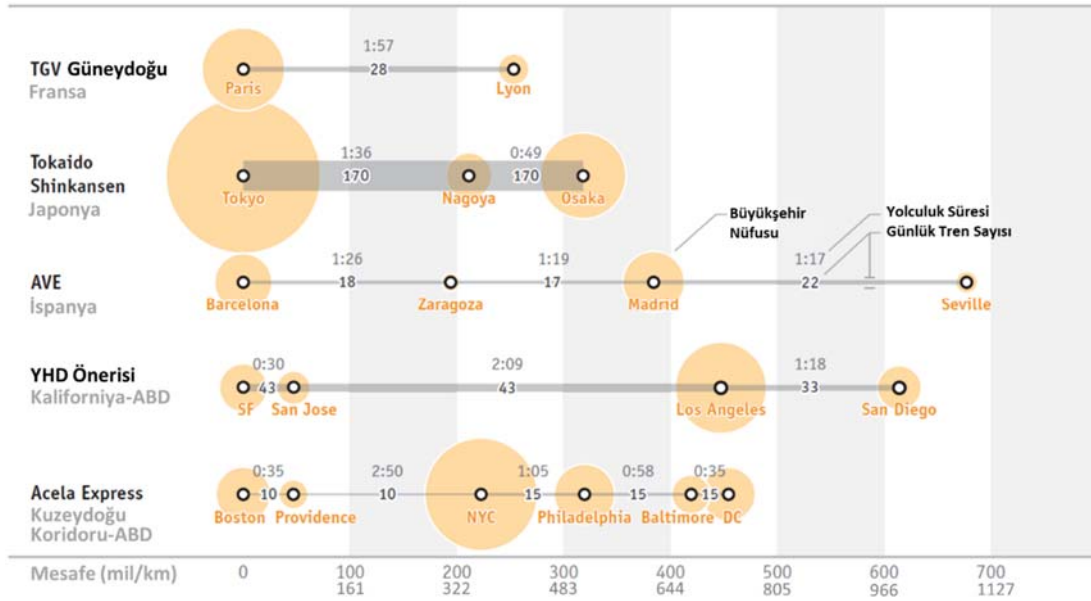


Şekil 1 - Kapıdan kapıya yolculuk süresinin YHD ve havayolu yolculuk paylarına etkisi



pazarın tamamına hâkim olmakta, havayolu rekabetten vazgeçmektedir. 2 ile 3,5 saat arasındaki yolculuklarda demiryolu baskın türdür. 3,5 ile 5 saat arasındaki yolculuklarda havayolu baskındır. 5 saatin üzerindeki yolculuklarda havayoluyla karşılaştırıldığında demiryolu marjinal tür olarak kalmaktadır [1]. Bildiğimiz kadarıyla Türkiye’de benzer bir karşılaştırma yapmaya izin veren veri bulunmamaktadır. Ancak, kentlerde uygun yüksek hızlı demiryolu ve havalimanı altyapıları bulunması durumunda, şekilde belirtilen sürelerle göre türel ayrımın başka ülkelerde de benzer olacağı kabul edilebilir. 150 ve 775 km seyahat aralığı genel olarak süre bakımından YHD’nin havayoluna üstünlük sağladığı uzunluk penceresidir (<https://transportgeography.org/>).

Dünyadaki bazı yüksek hızlı demiryolu koridorlarının uzunluk, yolculuk süresi ve hafta içi günlük tren sayıları bakımından karşılaştıran Şekil 2’de görüldüğü gibi, YHD koridorlarındaki trenler 1 ile 3 saat aralığındaki yolculuk sürelerinde sık sayılabilecek düzeyde hizmet vermektedirler [2].

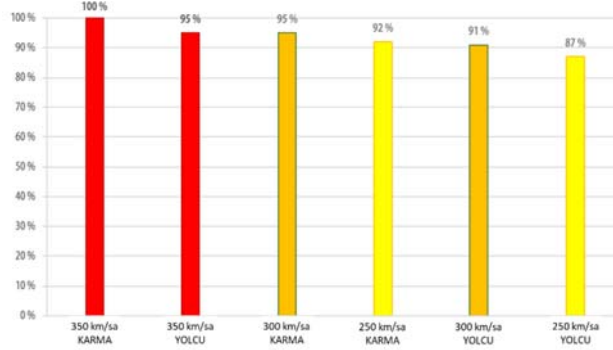


Şekil 2 - Bazı YHD koridorlarının karşılaştırılması

Avrupa yüksek hızlı demiryolu hatlarının bazılarında tasarım hızlarının oldukça altında ortalama hızlar uygulanmaktadır. Bu nedenle, tam yüksek hızlı bir demiryolu hattına gereksinim olup olmadığına proje bazında karar verilmelidir. Bu karar, tasarım hızları yüksek olduğunda yapım maliyetleri de yükseldiğinden önemlidir. Maksimum hızı 160 km/sa’e kadar olan hatlar, bu limitten daha yüksek hatlardan %5 daha az maliyetlidir. Bunun nedeni, yüksek hızlı hatlarda hat eksenleri arasında daha fazla açıklık bulunmasıdır. 160 km/sa’e kadar standart açıklık 4 metre; bu hızın üzerinde açıklık en az 4,5 m olmak zorundadır. Bu nedenle, tüneller daha geniş ve daha pahalı olacaktır. Diğer taraftan, Şekil 3’te tasarım hızı ve maliyet ilişkileri gösterilmektedir. “Karma” yüksek hızlı bir hattın maliyeti (yolcu ve yük trafiği birlikte), sadece yolculara ayrılan yüksek hızlı hattan daha yüksektir. Çünkü ilkinde eğim ve kurp yarıçapı kısıtlamaları güzergah esnekliğini azaltmakta, bu da daha fazla arazi kullanımını gerektirmektedir. Karma hatların bakım maliyetleri de yüksektir, çünkü altyapı daha fazla kullanılmaktadır.

Bir çalışmada, karma hatların sadece yolcuya ayrılan yüksek hızlı hatlardan %5 kadar daha pahalı, 250 km/sa hız limitine sahip yolcu hatlarından %13 daha pahalı olduğu gösterilmiştir [2]. Diğer taraftan, yüksek hızlı ve konvansiyonel yolcu ve yük hatlarının ayrılması durumunda, her iki hat türü için yapılan yatırım ve işletim harcamaları birlikte dikkate alınmalıdır. Bu durumda, toplam maliyetin artması kuvvetle muhtemeldir. Bu nedenle, YHD kararları verilirken, başlangıç ve son noktalar arasındaki trafik potansiyelinin yeterli düzeyde olmasına dikkat edilmelidir.

Yüksek hızlı demiryolu hatlarının yapım ve işletim maliyetleri yüksektir. Bu yatırımların orta ve uzun vadede verimli kalmaları için elde edilecek faydaların (özellikle yolculuk süresi tasarruflarının), planlama aşamasında dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, YHD yatırımlarına erken başlayan ülkelerin deneyim birikimlerinden yararlanarak ülkemizdeki YHD yatırımları için dersler çıkartılmaya çalışılacaktır.



**Şekil 3 - Yüksek hızlı hatlarda yapım maliyetleri**

## **YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARININ DÜNYADAKİ GELİŞİMİ**

Ülkeler yüksek hızlı demiryolu tercihlerini genellikle kendi gereksinimlerini karşılamak üzere yapmaktadırlar. Örneğin, Kore ve Tayvan kendi konvansiyonel demiryolu hatlarındaki ve karayollarındaki tıkanıklıkları azaltmak için YHD yapmaya karar vermişlerdir. Fransa, sadece yüksek hızlı trenlerin işletildiği ayrı YHD hatları inşa ederken, yolcuların seyahat sürelerini iyileştirmek için yolcu trenlerini yük hatlarından almış, böylece yük trenleri için de kapasite yaratmıştır. Almanya'nın yük trenleri için kapasite yaratmak gibi bir amacı yoktu, çünkü YHD hatları konvansiyonel yolcu ve yük trenleri ile ortaklaşa kullanılmak üzere inşa ediliyordu. Çin, YHD hatlarını ekonomik kalkınmayı tetiklemek ve yük trenleri için kapasite yaratmak için kullanıyordu. Bu gerekçeler ülkeden ülkeye farklılıklar göstermekte ve her ülke için aynı düzeyde etkili olmayabilmektedir [4].

Politik gücün merkezde toplandığı ülkelerde merkez ile çeperin bütünlüğünü sağlamaya önem verilirken (örneğin, Fransa), politik gücün dağıntık olduğu ülkelerde bölgesel öncelikler öne çıkmaktadır (örneğin, Almanya). Dünyadaki deneyimler, mevcut bir koridorda yüksek talep nedeniyle kapasite darboğazları yaşanıyorsa, yüksek hızlı demiryolu seçeneğinin, potansiyel ekonomik kazanımlar nedeniyle, dikkate alınabileceğini göstermektedir. Ancak, bu durumda, yolcuların bilet alabilecek ekonomik güce sahip olması gerekmektedir. Yeterli talep bulunmuyorsa, mevcut demiryolunun 200 km/sa seyir hızı için iyileştirilmesinin daha uygun olacağı önerilmektedir. Bu gibi durumlarda, yolcu ve yük trenlerinin birlikte işletildiği hatlar ekonomik fayda sağlayabilmektedir (örneğin, Almanya, İtalya ve Avusturya).

Yüksek hızlı demiryolları için kabul edilmiş uluslararası belirli bir standart yoktur. Yeni hatlarda 250 km/sa ve mevcutlarda 200 km/sa hız sınırını aşan hatlar genellikle yüksek hızlı demiryolu olarak sınıflandırılır. Avrupa ve Asya'da birçok ülke yolcular için (ayrı) yüksek hızlı hatlar inşa ederken, yük trafiğine hizmet veren (karma) sistemler de bulunmaktadır. Ülke ve bölgelere göre kayda geçen gelişmeler aşağıda özetlenmiştir [5].

### **Japonya: Yüksek Hızlı Demiryolunun Doğuşu**

İlk yüksek hızlı demiryolu 1964 yılında Japonya'da işletilmeye başlanmış olan ve Shinkansen ya da "kurşun tren" adıyla bilinen sistemdir. Günümüzde Japonya üç ana adasında bulunan 22 büyük

kentine hizmet veren yüksek hızlı demiryolu hatlarından oluşan bir ağa sahiptir. Yeni hatlar da geliştirilme aşamasındadır. Bu ağ dünyanın en kalabalık yüksek hızlı demiryolu olup, hafta içi günlerde ortalama 420.000 yolcuya hizmet vermektedir. Trenlerin 320 km/sa hıza ulaştığı hatlarda, 50 yılı aşan işletim süresince kaza nedeniyle hiçbir yolcu yaralanması veya ölümü meydana gelmemiştir (Şekil 4).



Şekil 4 - Japonya'nın E5 Serisi Shinkansen trenleri (maksimum hız 320 km/sa)

#### Avrupa: Uluslararası Yüksek Hızlı Demiryolu Ağı

Japonya'nın ardından yüksek hızlı demiryolu hizmeti vermeye başlayan ilk ülkelerden biri Fransa'dır. 1981 yılında Paris-Lyon arasında 200 km/sa hızındaki trenler işletilmeye başlanmıştır. Günümüzde 2800 km uzunluğa erişen Fransız yüksek hızlı demiryolu ağına (Lignes à grande vitesse, LGV), 320 km/sa hıza ulaşan TGV (Trains à grande vitesse) trenleri işletilmektedir.



Şekil 5 - Avrupa (yüksek hızlı) demiryolu ağı (<https://commons.wikimedia.org/>)

Bu şehirlerarası yüksek hızlı demiryolu hizmetleri ulusal tren işleticisi SNCF tarafından verilmektedir. Almanya, bazı kentlerini birbirlerine bağlayan Inter-City Express (ICE) yüksek hızlı trenlerini 1991 yılında işletmeye başlamıştır. Paris ve Londra'yı Manş Tüneliyle birleştiren Eurostar trenleri 1994 yılında hizmet vermeye başlamıştır. Fransa'nın ana kıtadaki öncü rolü ile birlikte İber Yarımadası, İngiltere ve Orta Avrupa arasındaki merkezi pozisyonu nedeniyle, Avrupa'daki diğer birçok yüksek hızlı demiryolu hattı hız, voltaj ve sinyalizasyonda Fransız standartlarına göre inşa edilirken, bunlardan ayrı olarak Almanya inşaatlarını kendi mevcut standartlarına göre yapmaktadır. Avrupa Birliği (AB) üye ülkeler arasındaki yüksek hızlı demiryolu bağlantılarını yaygınlaştırmak için finansal destekler vermektedir (Şekil 5).

Avrupa demiryolu işleticileri, sınır aşan YHD yolculuklarını koordine etmek ve teşvik etmek için 2007 yılında Railteam adlı bir konsorsiyum kurmuşlardır [5]. Trans Avrupa Taşımacılık Ağı (TEN-T: Trans-European Transport Network) geliştirmek Avrupa Birliği'nin bir hedefidir ve çoğu sınır aşan demiryolu hattı AB'den fon almaktadır.

### Çin: Dünyanın Geri Kalanını Arkada Bırakmak

Çin hükümetinin eli açık desteği nedeniyle, ülkedeki yüksek hızlı demiryolları son 15 yılda hızlı bir şekilde gelişmiştir. Çin, şimdiki YHD sistemini, Japonların Shinkansen sistemini model alarak, 1990'ların başlarında planlamaya başlamıştır. Çin yüksek hızlı demiryolu hizmetleri 2008 yılında, Beijing'den Tianjin'e (117 km) 250 km/sa ile 350 km/sa aralığındaki seyir hızıyla başlamıştır. Çin yüksek hızlı demiryolu ağının 2025 yılına kadar 38.000 km'yi aşması, uzun vadede 45.000 km'ye ulaşması, dünyanın diğer YHD hatlarının toplamından çok daha uzun olması beklenmektedir. Çin YHD sistemlerinin büyük bölümünü Japonya, Almanya, Fransa ve diğer ülkelerle ortak girişim şeklinde ithal etmiştir. Ancak son yıllarda, Çin kendi üretim kabiliyetini kazanmış ve başka ülkelerde YHD geliştirme sözleşmeleri imzalamıştır.

Konvansiyonel hatlarda yüksek hızlı demiryolu inşasının ardından, Çin 2006 yılında YHD tahsisli hatlar inşa etmek için ayırdığı bütçeyi artırmaya başlamıştır (2004 yılında 14 milyar dolardan 2009 yılında 88 milyar dolara). Bütün olarak, Çin 2020 yılına kadar 25.000 km YHD ağı inşa etmek için 300 milyar dolar ayırmıştır. Yeni hatların büyük bölümü mevcut ana hatların güzergahlarını takip etmekte ve sadece yolcu trafiğine hizmet vermektedir. Ulusal ağı bazı bölümleri, daha önce demiryolu bağlantısı olmayan kentleri birleştirirken, yolcu ve yük karma trafiğine hizmet verecektir. Tahsisli hatlarda yüksek hızlı trenler genellikle 300-350 km/sa hıza erişmektedir. Karma kullanımlı YHD hatlarında, yolcu trenleri 200-250 km/sa maksimum hıza çıkabilmektedir.

Çin'deki YHD atılımı iç hat havayollarında bilet ücretlerini inmeye ve özellikle 500 km'nin altındaki uzaklıklarda bölgesel uçuşları iptal etmeye zorlamış ve şehirlerarasındaki bazı kısa rotaları tamamen sonlandırmıştır. Çin'deki yüksek hızlı demiryolları iç hat havayollarının iki katından çok yolcu taşımaktadır.

### Ülkelere Göre Yüksek Hızlı Demiryolu Hatları

Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) kaynakları ile diğer bazı kaynaklarda ülkelerin YHD hizmetleri, yatırımları, planları ve maksimum hızları verilmektedir (Tablo 1).

**Tablo 1** - Ülkelere göre yüksek hızlı demiryolu hatları (1 Haziran 2021 itibarıyla, <https://uic.org/>)

Ülke	Hizmette (km)	Yapımı devam eden (km)	Planlanan (km)	Maksimum hız (km/sa)
Almanya	1.571	147	291	250-300
Çin	38.283	14.925	11.495	200-350
Fransa	2.735	-	1.725	300-320
Güney Kore	893	-	49	250-305
İtalya	921	327	-	250-300
İspanya	3.487	1.135	943	200-300
Japonya	3.041	688	346	240-320
Türkiye	724	1743	1944	200-250
<b>Dünya (toplamı)</b>	<b>56.129</b>	<b>22.562</b>	<b>51.786</b>	<b>200-350</b>

## AVRUPA BİRLİĞİ'NİN YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU POLİTİKA VE UYGULAMALARINDAN YANSIMALAR

Türkiye'nin Avrupa ile ekonomik, politik ve kültürel ilişkileri dikkate alındığında, Avrupa Birliği'nin yüksek hızlı demiryolu politikalarını gözden geçirmek yararlı olacaktır. AB Sayıştay'ı tarafından hazırlanan ana kaynakta [3], AB'nin ve üye ülkelerin YHD tercihlerine ilişkin ipuçları yakalamak, uygulama sonuçlarına ilişkin bulgular elde etmek ve bunlardan dersler çıkarmak mümkün olacaktır.

### AB Yüksek Hızlı Demiryolu Uygulamaları

Avrupa Birliği 2000 ve 2017 yılları arasında ana yüksek hızlı demiryolu altyapısına 23,7 milyar avro yatırım yapmıştır. Ancak, yüksek hızlı demiryolları için uzun dönemli gerçekçi bir AB planı bulunmamakta, bağlantıları güçlü olmayan ulusal hatlara verimsiz yamalar yapılmaktadır. Bunun başlıca nedeni olarak, Avrupa Komisyonu'nun, üye ülkeleri, üzerinde anlaşılan hatları inşa etmeleri için zorlayacak yasal bir araca ve güce sahip olmaması gösterilebilir.

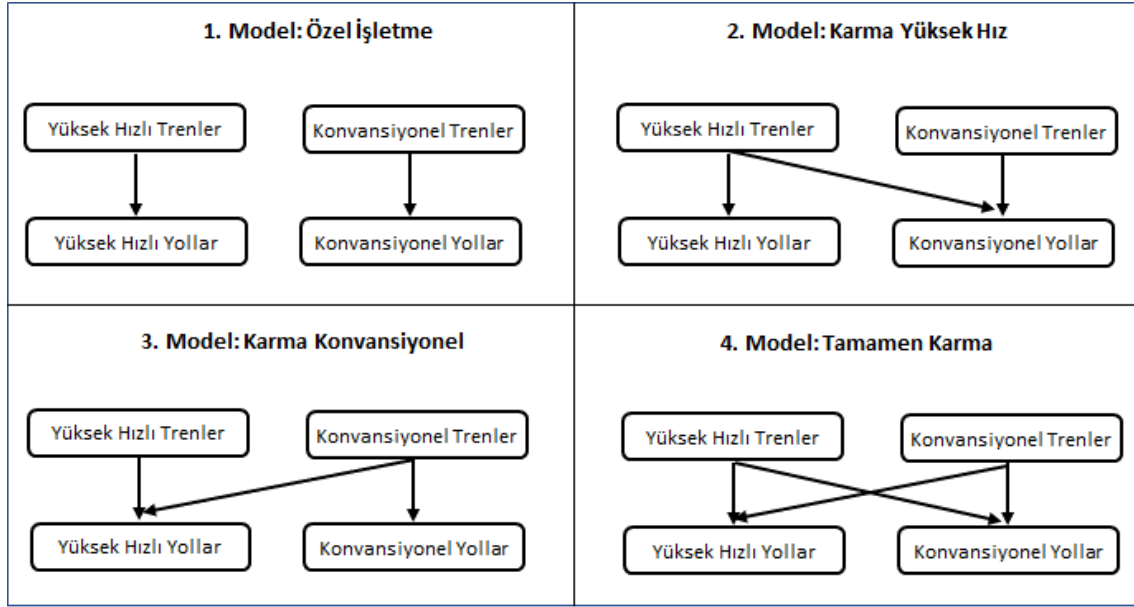
AB'deki YHD yatırımlarının genel görünümü şöyledir: Maliyet verimliliği düşük seviyede olabilmektedir, çünkü her yerde yüksek hızlı hatlara gereksinim yoktur; tamamlanan yedi hattan üçü beklenenin altında yolcu çekmekte, yani 2,7 milyar avro değerindeki AB ortaklık desteğini verimsiz harcanma riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır; incelenen 14 hattın dokuzunda yetersiz yolcu sayısına ulaşılmıştır; yolculuk süresinden tasarruf edilen her dakikanın maliyeti oldukça yüksektir (yılda 369 milyon avroya kadar çıkmaktadır); ortalama hız proje hızının %45'i kadardır; ayrıca maliyetlerin öngörülenin üzerine çıkması ve imalatlardaki gecikmeler istisna değil normal olaylardır. Dahası, Avrupa Sayıştay'ı 2010'da teknik ve idari engellerin kaldırılmasını istemiş olmasına karşın, ülkelerde hala 11.000 ulusal kural (düzenleme) bulunmaktadır.

Avrupa'da yüksek hızlı demiryolu 1974 yılında dünyadaki petrol krizinin ardından önemsenmeye başlanmıştır. Avrupa'nın enerji bağımlılığı ulusal hareketliliği tehdit etmiş, böylece bazı üye ülkeler, güvenli, hızlı, konforlu ve ekolojik bir ulaştırma türü olduğu için yüksek hızlı demiryolu hatları geliştirmeye karar vermişlerdir. İtalya, yüksek hızlı demiryolu hattı açan ilk Avrupa ülkesidir: Floransa – Roma hattı 1977'de açılmıştır. Hemen ardından 1981 yılında, Fransa kendi "Trains à Grande Vitesse" hatlarını açmıştır. Almanya'nın "Intercity Express" (IC) trenleri işletilen ilk yüksek hızlı hatları 1990'larda ve İspanya'nın "Alta Velocidad Española" (AVE) yüksek hızlı hizmetleri 1992'de işlemeye başlamıştır.

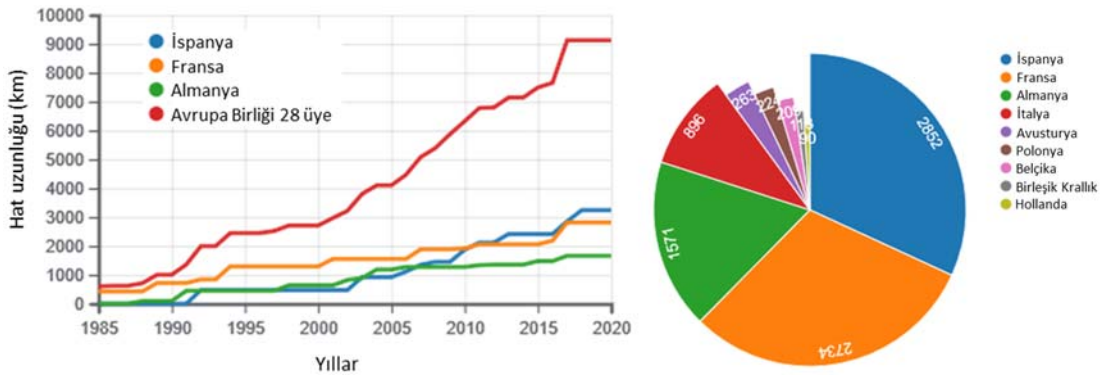
Günümüzde tek tip bir Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağı yoktur. Bunun yerine, farklı üye ülkelerde farklı işletim modelleri bulunmaktadır (Şekil 6). Örneğin, tren türlerine göre tanımlanan özel işletme modelleri, yüksek hızlı trenlerin konvansiyonel hatlarda işletildiği model (Fransa, İspanya ve İtalya'da), konvansiyonel trenlerin yüksek hızlı hatlarda işletildiği model ve tamamen karma yüksek hızlı hatlar modeli (Almanya, Avusturya ve İtalya'da iki kesimde) göze çarpmaktadır.

2020 sonu itibarıyla AB'de yaklaşık 9.000 km yüksek hızlı hat bulunmaktadır (250 km/sa ve üzeri). Planlanan hatlar tamamlandığında İspanya Çin'in ardından en uzun yüksek hızlı demiryolu ağına sahip ikinci ülke olacaktır. Şekil 7'de AB'deki ulusal yüksek hızlı demiryolu ağlarının yıllara göre büyümesi ve 2020 itibarıyla ülkelere göre hat uzunlukları görülmektedir.

Avrupa'da yüksek hızlı demiryolu kullanan yolcuların sayısı düzenli olarak artmaktadır: Talep 1990 yılında yaklaşık 15 milyar yolcu-km iken 2016'da 124 milyar yolcu-km'yi aşmıştır. 2015 yılında yüksek hızlı demiryolu hizmetleri, bu hizmetin bulunduğu üye ülkelerdeki tüm demiryolu yolculuklarının dörtte birinden (%26) fazladır [3].



Şekil 6 - Avrupa Birliği'nde yüksek hızlı demiryolu trafiği için işletim modelleri



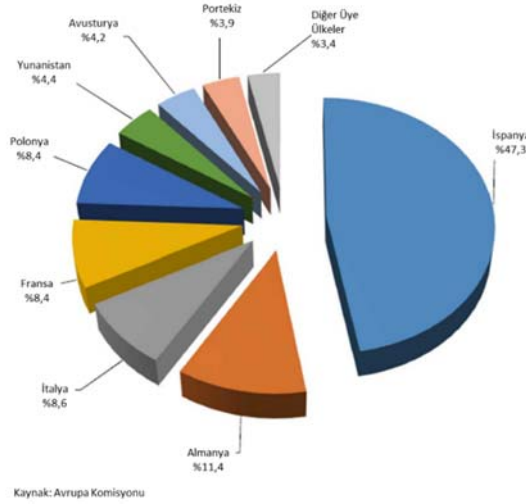
Şekil 7 - AB'deki üye ülkelerin YHD ağlarının büyümesi (250 km/sa ve üzeri)  
([https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed\\_rail\\_in\\_Europe](https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Europe))

### AB Yüksek Hızlı Demiryolu Politikaları

Trans Avrupa Taşımacılık Ağı (Trans-European Transport Network: TEN-T) programı akıllı, sürdürülebilir ve kapsayıcı büyüme için Avrupa'nın 2020 stratejisinde anahtar rol oynamaktadır. Bu strateji, ekonomik kalkınma, bölgesel rekabet, bölgesel ve sosyal bütünlük ve çevresel sürdürülebilirliği amaçlamaktadır. Ayrıca, demiryolu ağlarının birlikte işletilebilirliği (Technical Specifications for Interoperability, TSI; Directive 2016/797) için şartnameler hazırlamaktadır.

2011 yılında hazırlanan Ulaştırma Beyaz Kitabı (Transport White Paper) yüksek hızlı demiryolu için aşağıdaki yolcu trafiği hedeflerini koymuştur: 2030'a kadar yüksek hızlı demiryolu ağının uzunluğu üç katına çıkarılmalı, böylece 2050'ye kadar orta mesafe yolcu taşımalarının büyük bölümü demiryolu ile yapılmalıdır (yolcu ve yük taşımalarının %50'sinin karayolundan demiryoluna kayması). Yüksek hızlı demiryolu pazarı 1000 km'ye kadar olan seyahatlerde hava ulaştırmasından daha hızlı büyümelidir. 2050 yılına kadar havayolu ağının tüm ana bileşenleri, demiryolu ağı, tercihan yüksek hızlı demiryolu hizmetleri ile bağlanmalıdır. Bu amaçları hayata geçirmek için, AB 2013 yılında üye ülkelerin ulaştırma ağları arasındaki kopuklukları gidermek,

darboğazları ortadan kaldırmak ve teknik zorlukların üstesinden gelmek (örneğin, uyumsuz demiryolu standartları) için yeni ulaştırma altyapı politikasını benimsemiştir. Avrupa Tesislerinin Birleştirilmesi (Connecting Europe Facility: CEF) enstrümanı eş zamanlı olarak bu amaçlara finansal destek sağlamak için oluşturulmuştur.



Şekil 8 - AB'nin üye ülkelere verdiği yüksek hızlı demiryolu destekleri (2000-2017)

AB, 2000-2017 arasında yüksek hızlı demiryolu altyapı yatırımlarına 23,7 milyar avro kısmi finansal destek sağlamış, ayrıca yüksek hızlı demiryolu hatlarına ERTMS (European Rail Transport Management System) kurmak için de 4,4 milyar avro destek vermiştir (Şekil 8). Bunlara ek olarak, Avrupa Yatırım Bankası (EIB) 2000 yılından başlayarak yüksek hızlı demiryolu hatlarının inşasını desteklemek için 29,7 milyar avro kredi vermiştir. AB desteklerinin yüksek hızlı demiryolu yatırımlarına ayrılan payının yaklaşık yarısı (11 milyar avrodan çok) İspanya'daki yatırımlara verilmiştir. Bu desteklerin 21,8 milyar avrosu (toplamın %92,7'si) yedi üye ülkeye aktarılmıştır. AB destekleri toplam yüksek hızlı demiryolu inşa maliyetlerinin yaklaşık %11'ini karşılamaktadır.

### YHD ve Konvansiyonel Trafik Hatlarının Maliyet Analizi

AB Sayıştay'ının bulguları arasında üye ülkelerin yaklaşım farklılıkları da incelenmiştir. Demiryolu yatırımları genel olarak yüksek maliyetlidir. YHD yatırımları da geometrik özellikleri nedeniyle görece daha yüksek maliyetlidir. Örneğin, Tablo 2'de listelenen denetimden geçirilmiş hatların ortalama km maliyeti 20 milyon avronun üzerinde tahmin edilirken, gecikmeler ve enflasyon dahil çeşitli nedenlerle, hatlar, öngörülenden daha yüksek maliyetlerle tamamlanabilmektedir (ortalama 25 milyon avro). Bu nedenle, yatırım seçeneklerinin doğru tanımlanıp incelenmesi gerekmektedir. Seçeneklerden ikisi, yüksek hızlı yeni bir hat inşa etmek veya konvansiyonel hattın iyileştirilmesidir. Avrupa genelinde, sadece tahsisli yüksek hızlı hat yapımı seçeneği ele alınmakta iken İtalya ve Almanya'da, YHD hattının bir bölümünün ya da tamamının çok yüksek hızlı hizmetleri desteklemekte yeterli olup olmadığı veya konvansiyonel hattın iyileştirilmesinin proje gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığı dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımlar, incelenen hatların yatırım maliyetleri ve kazanılan gerçek yolculuk süresi arasındaki ilişkilere göre değerlendirilmiştir. Tablo 2'deki incelemeye göre, yolculuk süresinden tasarruf edilen her dakikanın yatırım maliyeti ortalama 117 milyon avro olup, km maliyeti 34,5 milyon avro (Eje Atlántico yüksek hızlı hattında) ile 369 milyon avro (Stuttgart-Münih yüksek hızlı hattında) arasında değişmektedir.

**Tablo 2** - AB Sayıştay'ın denetlediği yüksek hızlı hatların maliyeti ve yolculuk süresi tasarrufu

Denetlenen hat	Uzunluk (km)	Toplam maliyet (milyon avro)	Yolculuk süresi tasarrufu (dakika)	Seyirden kazanılan her dakika için maliyet (milyon avro)
Berlin-Münih	671	14.682	140	104,87
Stuttgart-Münih	267	13.273	36	368,69
Rhin-Rhône	138	2.588	75	34,51
LGV Est Européenne	406	6.712	130	51,63
Madrid-Barcelona-Fransa Sınırı	797	12.109	305	39,70
Eje Atlántico	165	2.596	75	34,61
Madrid-Galicia	549	7.684*	110	69,85
Madrid-León	345	5415	95	57,00
Milan-Venedik	273	11.856	49	241,96
Turin-Salerno	1.007	32.169	192	167,55
<b>Toplam/ortalama</b>	<b>4.618**</b>	<b>109.084</b>	<b>1.207</b>	<b>117,04</b>

\* Hattın tamamı için maliyet tahmini analizi. Yolculuk süresine Madrid-León YHD hattıyla örtüşen 133 km uzunluk dahildir (Guadarrama tüneli hariç).

\*\* 445 km uzunluğundaki Munich-Verona kesimi ile hattın denetlenen toplam uzunluğu 5.063 km olur.

### Maliyet verimliliği analizi

En uygun seçeneğin tercih edilmesiyle milyonlarca avro tasarruf yapılabilir. Örneğin, İskandinavya ve Akdeniz arasındaki koridorunda Almanya, Avusturya ve İtalya'dan geçen Münih (Almanya)-Verona (İtalya) arasında bir yüksek hızlı hat inşa edilmektedir. Ancak hız verileri bu seçimi onaylamamaktadır: Münih ve Verona arasındaki konvansiyonel demiryolu hattında halen 13 duruş bulunmakta, istasyonlardaki duruş süresi 41 dakika olup toplam yolculuk süresinin %12,6'sıdır. Mevcut durumda, Münih-Verona arasındaki yolculuk süresi 5 saat 24 dakikadır. Hat üzerindeki yüksek hızlı Brenner Base Tünel kesimi tamamlanıp yolculuk süresi 3,5 saate düştüğünde, bu hattaki ortalama (ticari) hız sadece 115 km/sa olacaktır. Bu hız tam teşekküllü bir yüksek hızlı hat inşa etmek için hala çok düşüktür.

Yüksek hızlı demiryolu altyapısı hem yapım hem de bakım maliyetleri bakımından geleneksel (konvansiyonel) demiryollarından daha pahalıdır. Buna karşın, 300 km/sa veya üzerinde çok yüksek hızlı hatlardaki hizmetler, iyileştirilmiş konvansiyonel hatlardaki tren seyirleriyle karşılaştırıldığında, sınırlı düzeyde ek yolculuk süresi tasarrufu sağlamaktadır. Bu nedenle, yeni çok yüksek hızlı bir hat inşa etmek yerine, maliyet tasarrufu sağlayabilecek, mevcut konvansiyonel hatların standardını yükselterek hızı artırma seçeneği göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, Venedik ve Trieste arasında yeni yüksek hızlı hat ve konvansiyonel hattın iyileştirilmesi seçenekleri karşılaştırıldığında, Tablo 3'te görüldüğü gibi 5,7 milyar avro maliyet tasarrufuna karşılık yolculuk süresini 10 dakika artırmaktadır; yani, yolculuk süresine her bir dakikalık ek 570 milyon avro tasarruf sağlar.



**Tablo 3 - Venedik ve Trieste arasındaki yatırım seçeneklerinin maliyet karşılaştırması**

Tasarım konfigürasyonu	Tasarım hızı (km/sa)	Maliyet (milyar avro)	Yolculuk süresi (dak)	Tasarruf (milyar avro/dak)
300 km/sa yeni yüksek hızlı hat	300	7,5	55	570
İyileştirilmiş konvansiyonel hat	200	1,8	65	

## TÜRKİYE'DE YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU YATIRIMLARI

Dünyadaki ilk yüksek hızlı demiryolundan yaklaşık yarım asır sonra ülkemizdeki ilk yüksek hızlı tren (YHT) Ankara ve Eskişehir arasında 2009 yılında raylarla buluşmuştur. Bu hat ile Türkiye YHD hattına sahip dünyada 8. ve Avrupa'da 6. ülke olmuştur. Ardından 2011 yılında Ankara ve Konya arasında YHT seferleri başlamıştır. 2014 yılında İstanbul, önceki yıllarda YHT hizmeti alan Ankara ve Konya kentlerine YHT hatlarıyla bağlanmıştır. Şekil 9'da görülen toplam 1.213 km uzunluğunda YHT hattı günümüzde hizmet vermektedir. Tablo 4'te yapımı tamamlanıp işletmeye açılan ve yapımı devam eden yüksek hızlı ve hızlı demiryolu hatları ve bazı özellikleri görülmektedir. [6].



**Şekil 9 - Yüksek hızlı demiryolu ağı (2022)**

Yapımı tamamlanan ve 2022 yılında test sürüşlerine başlanan Ankara-Sivas YHT hattının testlerin ardından işletmeye açılması planlanmaktadır. Çalışmaları sürdürülmekte olan Ankara-İzmir YHT hattının Polatlı-Afyonkarahisar kesiminin 2023, Afyonkarahisar-Uşak-Manisa-İzmir kesiminin 2024 yılında ve Bursa-Osmaneli (Bilecik) hattının ise 2023 yılında tamamlanması hedeflenmiştir. Bunların yanında, Konya-Karaman Niğde (Ulukışla)-Yenice-Mersin-Adana hızlı tren projesi, Mersin-Adana-Osmaniye-Gaziantep hızlı demiryolu projesi, Sivas-Erzincan hızlı demiryolu projesi, Gaziantep-Şanlıurfa-Mardin hızlı demiryolu projesi, Nusaybin-Habur hızlı demiryolu projesi planlanmaktadır [6].

Yenilenmekte olan Halkalı-Kapıkule yüksek hızlı demiryolu hattının 67 km uzunluğundaki Ispartakule-Çerkezköy kesimi için, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) 150 milyon avro finansal destek sağlamayı kabul etmiştir. Halkalı-Kapıkule demiryolu hattı Türkiye'nin demiryolu ağını Bulgaristan üzerinden Trans-Avrupa Taşımacılık Ağına (TEN-T) bağlayacaktır (<https://aygm.uab.gov.tr/isparkule-cerkezkoy-demiryolu-hatti-projesi>).

**Tablo 4 -** Yapımı tamamlanan ve devam eden YHT hatları (<https://www.tcdd.gov.tr/projeler>)

YHT hattı	T/D*	Açılma tarihi	Uzunluk (km)	YHT'den önce yolculuk süresi	YHT'den sonra yolculuk süresi	Tasarım hızı (km/sa)	Ticari hız (km/sa)
Ankara-Eskişehir	T	2009	245		1:20	250	184
Ankara-Konya	T	2011	102 (Polatlı) 320 (Konya)	10:30	1:45	250	183
Konya-İstanbul	T	2013 2014 2019 2019	379 (E.Şehir) 645 (Pendik) 668 (S.Çeşme) 702 (Halkalı)	11:00	4:50 (S.Çeşme)	250	138 (S.Çeşme)
Eskişehir-İstanbul	T	2014 2019 2019	(266, Pendik) (289, S.Çeşme) (323, Halkalı)			250	
Ankara-İstanbul	T	2009 2014 2019 2019	(245, E.Şehir) (511, Pendik) (534, S.Çeşme) (568, Halkalı)		4:20 (S.Çeşme) 5:30 (Halkalı)	250	123 (S.Çeşme) 103 (Halkalı)
Ankara-Sivas	D	-	405	12:00	2:00	250	
Ankara-İzmir	D	-	624 (508, Polatlı-İzmir)	14:00	3:30	200	
Halkalı-Kapıkule	D	-	229	4:00 6:30	1:20 (Yolcu) 2:20 (Yük)	200	
Mersin-Adana-Gaziantep	D	-	295	6:23	2:15	160-200	

\* T: Tamamlandı, D: Devam ediyor

TCDD Stratejik Plan (2015-2019) raporunda, toplam hat uzunluğuna ilişkin konulan hedef şöyledir: “2023 yılına kadar 10.000 km YHT ve 4.000 km konvansiyonel hat yaparak, toplam demiryolu ağını 25.940 km’ye, 2035 yılına kadar ise 11.480 km YHT ve 4.480 km konvansiyonel hat yaparak, toplam demiryolu ağını 28.376 km’ye yükseltmek.” (s. 86) [7].

11. Kalkınma Planı’nın (2019-2023) “Politika ve Tedbirler” başlığı altında YHT hatları için iki hedef konulmuştur: (515.2) Daha dengeli bir modal dağılımın oluşturulması ve yolcu konforunun artırılması amacıyla yapım çalışmaları devam eden yüksek hızlı ve hızlı tren hatları tamamlanacaktır. (515.3) Yüksek hızlı tren hatlarında arz ve talep dengesi gözetilerek tren planlaması yapılacak ve ekspres seferler artırılarak seyahat süreleri kısaltılacaktır [8].

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın “Ulaşan ve Erişen Türkiye, 2021” adlı raporundan [6], YHD yapımında, Ankara merkez olmak üzere İstanbul-Ankara-Sivas, Ankara-Afyonkarahisar-İzmir ve Ankara-Konya koridorları çekirdek ağ olarak belirlenmiş, 15 büyük ilin yüksek hızlı trenle birbirine bağlanması planlanmıştır. 11. Kalkınma Planı’na atıfla, dönem başında (2018) 1.213 km olan yüksek hızlı ve hızlı demiryolu uzunluğunun dönem sonunda (2023) 5.509 km olması

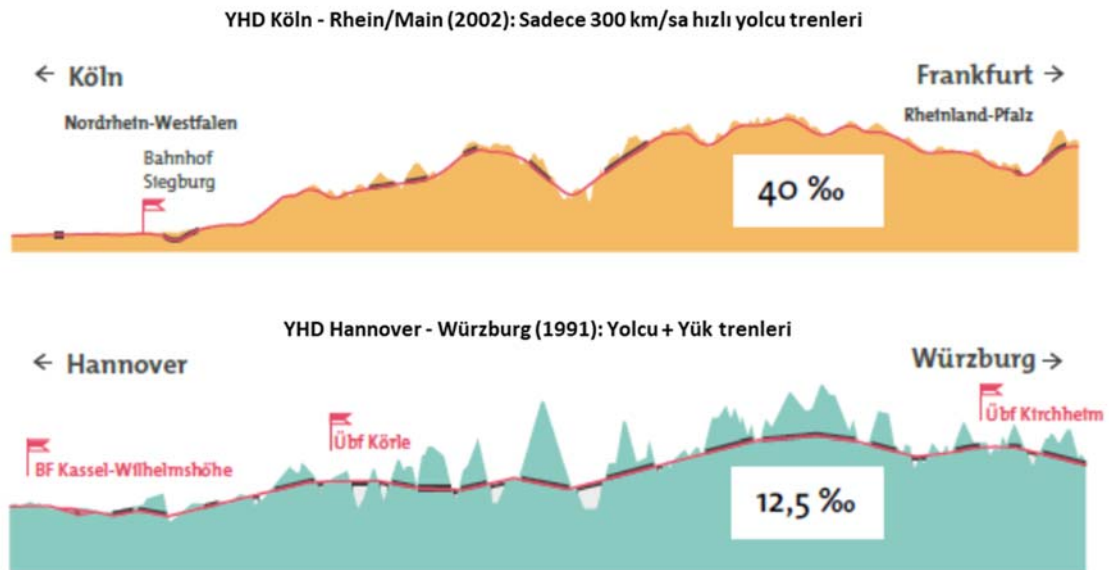
planlanmakta; 11.590 km uzunluğundaki konvansiyonel demiryolu hattının ise 12.018 km'ye yükseltilmesi, böylece 2023 yılında toplam 17.527 km demiryolu uzunluğuna ulaşılması planlanmaktadır. Demiryollarının karasal sistemler içindeki yolcu taşımacılığı payının da %1,3'ten %3,8'e çıkartılması hedeflenmektedir.

Yukarıdaki alıntılar, TCDD ile Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın birbirlerine yakın tarihlerde hat uzunluklarına ilişkin olarak koyduğu hedefler arasında büyük farklar bulunduğunu göstermektedir. Bu tutarsızlıklar, ülkemizdeki YHD ve konvansiyonel ağların geliştirilmesi konusundaki kafa karışıklığını ve belirsizliği işaret etmektedir. Ayrıca, belirtilen hat uzunluklarının tren hatlarının uzunlukları olup, fiili demiryolu uzunlukları değildir. Örtüşen tren hatları nedeniyle, demiryolu uzunlukları belirtilenden daha kısa olabilmektedir (referans için bkz. Tablo 1)

### YHD Hatlarının Proje Standartları

Dünyadaki YHD hatlarının tasarım hızları 350 km/sa seviyesine çıkmaktadır. Minimum yatay kurp yarıçapları 2.500 ile 5.000 m, düşey kurp yarıçapları 20.000 ile 30.000 m arasında değişmekte, maksimum dever 160 ya da 180 (200) mm kullanılmakta, boyuna eğimler YHT hatlarında %40'a kadar çıkarken, karma hatlarda %12,5 olmaktadır [9]. Türkiye'de yapımı tamamlanan Ankara-İstanbul ve Konya-İstanbul hatları ile birlikte yapımı devam eden ve planlanan hatlarda tasarım hızı 250 km/sa, minimum yatay kurp yarıçapları 3.500 ile 6.500 metre arasında seçilirken, maksimum dever 130 mm ve maksimum boyuna eğim %16 alınmaktadır [10].

Almanya'da sadece yüksek hızlı ya da karma trafiğe ayrılan hatların geometrik standartları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 10'da gösterildiği gibi, günümüzde yüksek hızlı trenler %40 eğimli rampaları tırmanabilirken, yük trenlerinin de işletildiği karma hatlarda boyuna eğimler sınırlandırılmak (%12,5) zorundadır. İkinci durumda, otoyol standartlarında olduğu gibi, düşük boyuna eğimler nedeniyle, daha çok sayıda veya daha uzun tüneller ve viyadükler gibi altyapı maliyetlerini arttıran standart tercihleri yapılmak zorundadır [1].



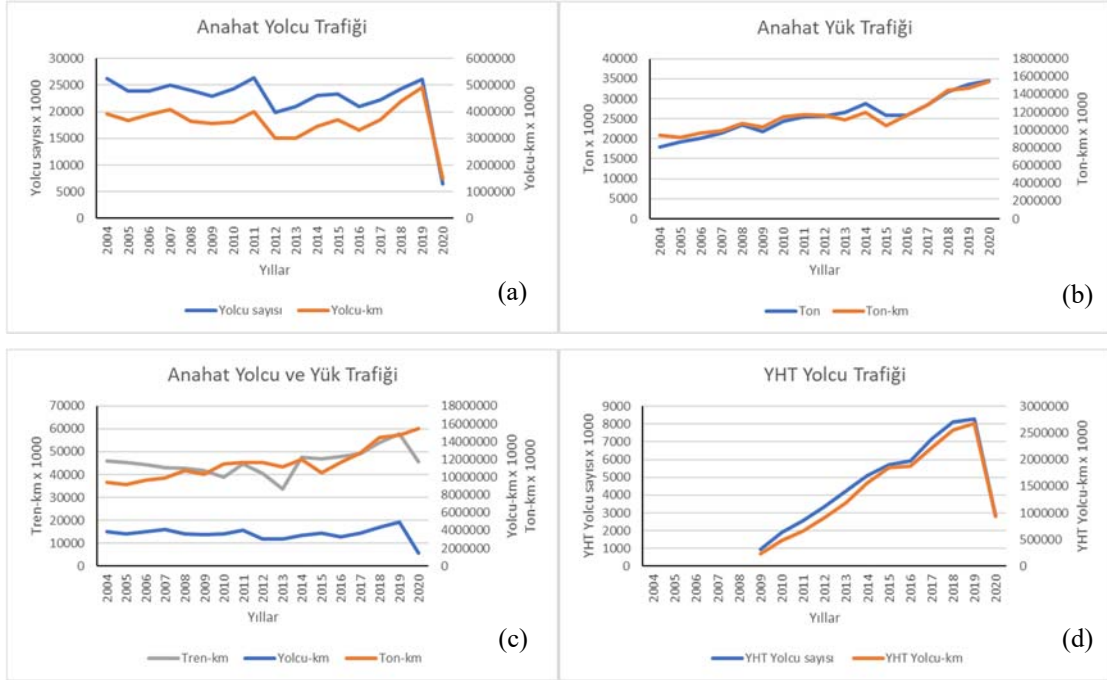
Şekil 10 - Sadece yüksek hızlı yolcu trenleri ve karma trafik işletilen hatlarda boyuna eğimler [1]

Dünyadaki hat standartlarıyla karşılaştırılırsa, Türkiye’deki YHD hatlarının karma tren trafiğine göre planlandığı ve tasarlandığı anlaşılmaktadır. Özellikle, maksimum deyer ve maksimum boyuna eğim standartları, YHD hatlarında yük trenlerinin de işletilmesine uygun olarak seçilmiştir.

### Yolcu ve Yük Trafikinin Yıllara Göre Değişimi

Türkiye’de ilk YHT seferleri Ankara ve Eskişehir arasında 2009 yılında başlamıştır. İzleyen yıllarda Eskişehir ve İstanbul arasındaki YHD inşaatları sürerken 2012 yılında Gebze-Köseköy arasındaki demiryolu kesimi hizmete kapatılmıştır. Bu uygulama, İstanbul bağlantılı yolcu ve yük trenlerini kesintiye uğratmıştır. TCDD 2015-2019 Stratejik Planı’nda [7] yolcu trafiğindeki azalma şu şekilde ifade edilmiştir: “2010 yılında toplam taşımalar içinde %8 paya sahip olan yüksek hızlı yolcu trenleri, hızlı tren ağının yaygınlaşmasıyla birlikte 2014 yılı sonunda %22 paya ulaşmıştır. Konvansiyonel trenlerle gerçekleştirilen anahat ve bölgesel yolcu taşımacılıklarının payları ise 2010 yılında %23 ve %69 iken 2014 yılında %17 ve %61’e inmiştir.” (s. 14); “2010-2014 döneminde YHT ve konvansiyonel hat yapım-bakım çalışmaları nedeniyle birçok konvansiyonel anahat treninin işletilememesi nedeniyle yolcu sayısında %5, yolcu km’de %4 azalış yaşanmıştır.” (s. 48).

Şekil 11’de yolcu ve yük trafiğindeki kısmi azalma gözlemlenebilmektedir (Şekil 11a-c). YHT trafiğinin 2009 yılından itibaren düzgün sayılabilecek bir eğilimle arttığı görülmektedir (Şekil 11d). Şekildeki grafiklerde dikkat çeken önemli bir bulgu, özellikle anahat yolcu trafiğinin kalkınma planlarında belirtilenin aksine artma eğiliminin oldukça sınırlı düzeyde kalmasıdır. Hatta, bazı yıllarda azalma eğilimi de gözlenmektedir. Anahat ekspres ve bölgesel yolcu trenlerinin kısmen azaltılması hem yolcu-km hem de tren-km ölçülerinde kendini göstermektedir. Karar vericilerin YHT yatırımlarına öncelik verirken konvansiyonel yolcu hizmetlerini ihmal etmesi hatta kısıtlaması, anahat yolcu trafiğindeki azalmanın ana nedenidir. Demiryolu öncelikli ulaştırma politikasıyla uyumlu olmayan bu yaklaşımın gözden geçirilmesi gerekmektedir.



Şekil 11 - Anahat yolcu ve yük trafiğinin yıllara göre değişimi (www.tuik.gov.tr)

NOT: 2020’de tüm ölçütlerdeki azalmanın nedeni yılın ilk çeyreğinde başlayan Covid-19 salgınıdır.

## SONUÇ

Konvansiyonel ve yüksek hızlı demiryolu sistemleri sürdürülebilir ulaştırma türleridir. Görece daha az çevresel etkileri ve ekonomik büyümeye olan olumlu katkıları, böyle bir sınıflamaya izin vermektedir. Bilet ücretlerine destek verilmesiyle, sürdürülebilir kalkınmanın sosyal adalet ayağı da desteklenebilmektedir. Yeterli talep bulunması durumunda belirli terminaller arasında tahsisli (ayrık) YHD hatları tasarlanıp inşa edilebilir. Aksi halde, YHD hatlarının yapım ve işletim maliyetleri yüksek olduğundan, yapılan yatırımın verimliliği tartışmalı hale gelecektir. Bu durumda, mevcut konvansiyonel hatların iyileştirilip (standartların yükseltilip), karma tren trafiğine hizmet vermesinin daha uygun olacağı önerilmektedir.

Karma trafikle işletilen hatların öne çıkan olumlu tarafları şunlardır: Yük trenleri için yüksek bir kapasite ve kısa seyahat süresi elde edilirken, pahalı altyapının daha verimli kullanılması sağlanır (yüksek gelirler nedeniyle). Olumsuz tarafları için şunlar sayılabilir: Hızlı ve yavaş trenler ayrılmadığı için hat kapasitesinin azalması, dağlık arazilerde yüksek altyapı maliyeti ve bakım için daha kısa zaman aralıkları ayrılması [11].

Türkiye'deki YHD hatlarında, hat genişliği (1435 mm), hat eksenleri arasındaki açıklık (4,5 m), düşey gabari (6,72 m), en büyük dingil yükü (22,5 ton), ray tipi (UIC60), Avrupa ve uluslararası standartlara uyum bakımından seçilen özelliklerdir. Diğer geometrik standartlar (minimum yatay kurp yarıçapı, maksimum dever ve maksimum boyuna eğim), bu hatlarda karma trafik (yolcu ve yük trenlerinin bir arada) işletileceği anlamına gelmektedir.

Tablo 4'te hesaplanan YHD hatlarındaki ticari hızlar, dünyada sadece yolcu trenlerinin işletildiği YHD hatlarındaki ticari hızların oldukça altındadır. Yüksek maliyetleri nedeniyle, yeni YHD hatlarının yapımı ve konvansiyonel hatların yenilenmesi için, fayda ve maliyet odaklı planlama ve değerlendirme araçlarının geliştirilmesi ve bunların yasal mevzuat ile desteklenmesi önerilmektedir.

## Kaynaklar

1. Leboeuf, M., High Speed Rail: Fast Track to Sustainable Mobility, International Union of Railways, UIC, 2018, 74 p.
2. Todorovich, P., Schned, D. and Lane, R., High-Speed Rail International Lessons for U.S. Policy Makers, Lincoln Institute of Land Policy, 2011, 60 p.
3. ECA, A European high-speed rail network: not a reality but an ineffective patchwork, Special Report, European Court of Auditors, 2018, 82 s.
4. Ashiabor, S. and Wei, W., Advancing High-Speed Rail Policy in the United States, MTI Report 11-18, Mineta Transportation Institute, 2012, 72 p.
5. Nunno, R., High Speed Rail Development Worldwide, Fact Sheet, The Environmental and Energy Study Institute (EESI) 2018, 8 p.
6. UAB, Ulaşan ve Erişen Türkiye, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2021, 595 s.
7. TCDD, Stratejik Plan 2015-2019, T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 2015, 86 s.
8. TC, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019, 209 sayfa.
9. Çoban, N. E., İyileştirilen ve Yeni Planlanan Yüksek Hızlı Demiryollarının Karşılaştırılması, Raylı Sistemler Mühendisliği Programı, İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 2018, 75 s.

10. Yüze, A. N., Ülkemizde Planlanan, Yapılmakta Olan ve Yapılan Yüksek Hızlı Demiryolu Hatlarının İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Ulaştırma Mühendisliği Programı, İTÜ Yüksek Lisans Tezi, 2015, 95 s.
11. Grein, O., Success Factors of the German High Speed Rail System, DB International GmbH, 2014, 26 p. <http://www.cedop.info/wp-content/uploads/2014/05/Grein-DB-HSR-in-Germany.pdf>.



# YAPI MALZEMELERİ

Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi <i>İlbüke Uslu, Can Baran Aktaş, İsmail Özgür Yaman</i> .....	695
Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi <i>Cavit Çağatay Kızıltepe, İsa Yüksel, Serdar Aydın, Ayşenur Sığındere</i> .....	707
Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi <i>Yasin Engin</i> .....	717
Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri <i>Berna Orhon Kolukısa, Bimen Kadiroğlu, Mert Yücel Yardımcı</i> .....	731
Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi <i>Ahmet Reha Günay, Sami Karadeniz</i> .....	743
Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası <i>Mehmet Özmen, Barış Yiğit Canpolat, Hakan Karatay, Banu Yeşim Büyükkakıncı</i> .....	767
Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber <i>Tunahan Beşer, Burak Erdal, Faraz Malik, Serhat Sarıkaya</i> .....	781





# Hafif Betonda Genleştirilmiş Kil Agregası Kullanımı ile Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Meta-Analiz Yöntemiyle İncelenmesi

İlbüke USLU<sup>1</sup>, Can Baran AKTAŞ<sup>2</sup>, İsmail Özgür YAMAN<sup>3</sup>

## ÖZET

Beton yoğunluğunun azaltılması, yapının toplam ağırlığının çoğunlukla betondan oluşması nedeniyle yapıların tasarım sürecine ve özellikle de deprem performansına olumlu katkı sağlar. Beton yoğunluğunu azaltmanın etkili yöntemlerinden biri beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturan agregaların hafifletilmesi yani betonda hafif agregaların kullanılmasıdır. Genleştirilmiş kil agregası (GKA), diğer hafif agregalar ile karşılaştırıldığında basınç dayanımı yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Pürüzlü yüzeyinden dolayı matris içerisinde kalsit kristalleri ve C-S-H jeli olan hidrasyon ürünlerinin oluşumunu teşvik eder. Mevcut çalışma, meta-analiz yoluyla hafif GKA'lı betonun mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, betonun mekanik özellikleri ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, su/bağlayıcı oranı, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir. Analizlerin sonucunda su, çimento ve normal ağırlıklı agreganın 28 günlük basınç dayanımına olan etkisinin uçucu kül, silis dumanı ve GKA miktarından daha çok olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında, regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur. Mevcut araştırmanın sonuçları, meta-analizin bütünsel etkisi nedeniyle birbirinden bağımsız yürütülen tek bir çalışmanın sonuçlarına göre daha güçlü ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Genleştirilmiş Kil Agregası; Meta-Analiz; Hafif Beton.

---

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ilbuke.uslu@metu.edu.tr

2 TED Üniversitesi, Ankara - can.aktas@tedu.edu.tr

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara - ioyaman@metu.edu.tr

## **ABSTRACT**

### ***The Relation Between Use of Lightweight Expanded Clay Aggregate in Concrete and Compressive Strength: A Meta-Analysis***

*Concrete production constitutes a significant part of the construction industry, and reducing its density creates advantages as the total load of the structure is mostly comprised of concrete. One of the most common methods to reduce the density is the incorporation of lightweight aggregate. The study aims to assess the mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate concrete (LECA) through meta-analysis. It has essential characteristics, which are having the highest compressive strength, providing heat and sound isolation, among the other lightweight building materials. In the matrix, LECA promotes the formation of hydration products, which are calcite crystals and C-S-H gel, due to its rough surface. Thus, it is used as a construction material with traditional cementitious materials. This paper will present the earlier studies that explained LECA concrete properties, considering different types and compositions. More than 150 data points were analyzed through literature to conduct a meta-analysis in the scope of the study. The fundamental results of this study demonstrated the relationship between the mechanical properties of concrete with the integration of LECA. Detailed statistical analysis of the correlation between different parameters were shown, such as the amount of LECA, w/c ratio, amount and type of binder, water/cementitious material ratio, compressive strength at 28<sup>th</sup> day, and density. This research will be more robust compared to the results of a single study due to the combined effect of meta-analysis.*

**Keywords:** *Lightweight Expanded Clay Aggregate; Meta-Analysis; Lightweight Concrete.*

## **GİRİŞ**

Hafif beton ilk kez 2000 yıldan uzun bir süre önce kullanılmaya başlanmıştır. Antik çağda Babil şehri, Sümer Uygarlığı döneminde hafif volkanik malzemeler kullanılarak inşa edilmiştir [1]. 20. yüzyılda hafif agregalar yeniden yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Betonun ve yapının toplam ağırlığını azaltmak için alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Uygulama alanları yapılarla sınırlı kalmamış ve örneğin 1918 yılında gemi ve mavnalı yapılarında etkin bir şekilde hafif beton kullanılmıştır. 1950'lerde ise hafif beton kullanılarak birçok yapı tasarlanmıştır [1]. Hafif beton yapısının en etkili yöntemlerinden biri betonda hafif agreganın kullanılmasıdır.

Türkiye, birçok aktif fay hattı üzerinde yer almakta olup, konumundan dolayı depremsellik açısından kritik bir bölgede yer almaktadır. Deprem esnasında yapılara etkiyen yük, yapının ağırlığı ile doğru orantılıdır. Yapının ağırlığının azaltılması deprem sırasında oluşabilecek hasarı azaltır. Ayrıca, ağırlığın azaltılması temel yüklerini azaltabilir, bu da daha küçük temeller, daha az kazık ve çelik donatı gibi destek elemanlarının en kesitlerinin azalması anlamına gelir. Bu sayede kirişler, kolonlar, kirişler vb. gibi tüm destek elemanlarının boyutları küçültülebilir. Büyük açıklıklı köprülerde hafif beton kullanımının ekonomik olarak avantajları bulunmaktadır. Daha az destek elemanı kullanarak köprünün açıklıkları artırılabilir. Yük başına daha fazla eleman taşınabileceğinden nakliye maliyeti düşürülebilir. Bu ürünler daha az kamyon taşımacılığı ve kum, çakıl vb. gibi doğal malzemelerin sınırlı kaynaklarına yönelik endüstriyel talepleri azaltmaktadır. ABD ön yapılı beton fabrikasında kamyon taşımacılığı maliyetleri ile ilgili iki farklı çalışma yürütülmüştür. Bu araştırma sonuçlarına göre, nakliyeden kaynaklanan maliyet tasarrufu, hafif agreganın maliyetinden yedi kat daha fazladır [2]. Ayrıca, hafif agregalarla inşa edilen yapılar daha hafif olduğundan daha az iskele kullanılmasına sebep olmaktadır. Bu da yapının yapım maliyetini düşürür. Gözenekli yapıları nedeniyle ısı ve ses yalıtımı sağladığı için enerji verimliliği açısından da bu agregaları kullanmak birçok avantaj sağlamaktadır.

Basit bir modelde, kumlu hafif beton kullanımı %15-17 ısıtma enerjisi tasarrufu ve %10 soğutma enerjisi tasarrufu tahminiyle sonuçlanırken, betonda kullanılan agregaların tamamının hafif

olması durumunda ise yaklaşık %35-40 ısıtma enerjisi tasarrufu ve %30 soğutma enerjisi tasarrufu tahmini ile sonuçlanmaktadır [3].

Hafif agregalar içerisinde basınç dayanımı en yüksek olanlardan biri geliştirilmiş kil agregasıdır. Üretilmiş ve yapay olan bu agregası 1100-1300 °C dereceleri arasında ısıtıldığında orijinal halinin 5-6 katı hacim artışına uğrayarak dış yüzeyinde sinterleşmiş gaz kabarcıklarıyla dolu bir kütle haline gelmektedir [4]. Genleştirilmiş Kil Agregası (GKA) yirmiden fazla ülkede üretilmektedir. GKA'nın kimyasal bileşimi esas olarak SiO<sub>2</sub>'den oluşmakta olup, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO ve Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O gibi bazı alkalileri de içermektedir [5]. Kaynağa ve üretim yöntemine bağlı olarak, hafif agregalar, partikül şekli ve dokusunda önemli farklılıklar gösterir. Şekilleri kübik, yuvarlak, köşeli veya düzensiz olabilirken, yapısı ince veya büyük gözenekli, pürüzsüz ya da düzensiz olabilmektedir. GKA'nın iç hücreli yapısı ve sahip olduğu binlerce hava dolu boşluk sebebiyle ısı ve ses yalıtım gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlara ek olarak hafiflik, yangına dayanıklılık gibi temel avantajları ile birlikte yapıların Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) performansının artmasına katkı sağlamaktadır. (LEED); enerji tasarrufu, su verimliliği, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, iyileştirilmiş iç mekan çevre kalitesi ve kaynakların yönetimi ve bunların etkilerine karşı hassasiyet gibi performansları iyileştirmeyi amaçlayan stratejiler kullanılarak oluşturulmuştur [6]. GKA diğer hafif agregalar arasında geniş kullanım alanına sahiptir. Örnek olarak hafif beton yapıların büyük çoğunluğunda, yollar ve demiryollarında, drenaj ve yalıtım malzemelerinde, istinat duvarlarında ise hafif dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. GKA'nın bu avantajları birçok inşaat mühendisliği alanında doğal agregalarla birlikte kullanılabilirliğini göstermektedir.

Bu çalışmada meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir [7-23].

Çalışmanın sonuçları, betonun mekanik özellikleri ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir.

Analizlerin sonucunda çeşitli değişkenlerin betonun 28 günlük dayanımına olan etkisi araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur.

## AMAÇ

Meta-analiz, istatistiksel yöntemler kullanarak birden fazla bilimsel çalışma sonuçlarını sistematik olarak sentezlemek veya birleştirmek için kullanılan bir araştırma yöntemidir. Meta-analiz birden fazla çalışmanın sonuçlarını birleştirerek istatistiksel gücü arttırmaktadır. Bu çalışmada ise meta-analiz kapsamında 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada GKA kullanımı ile yapısal betonun mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek amaçlanmıştır. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### İstatistiksel Kavramlar

Bu çalışmada istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Değişkenler arasındaki korelasyona bakılmıştır. Korelasyon, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçer. Korelasyon katsayısı (r) bir değişkenin varyasyonunun hangi ölçüde diğer değişken tarafından belirlendiğini gösterir.

Determinasyon/belirtme katsayısı ( $R^2$ ) korelasyon katsayısının ( $r$ ) karesidir. Değişkenlerdeki değişimin yüzde kaçının birbiri ile açıklandığının ölçüsüdür. Başka bir deyişle, değişkenlerin birbiri üzerindeki varyans miktarıdır. Kalan miktar ise başka değişkenlere bağlıdır.

Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin ne kadar güçlü olduğunu ölçmektedir. Bu değer 0 ile 1 arasındadır. Bu değer in güvenilirliği veri sayısı ile doğru orantılıdır.

Sonuçların yorumlanmasında ise Regresyon ve ANOVA (Varyans Analizi) kullanılmıştır. Regresyon, aynı korelasyon analizindeki gibi bir bağımlı değişken ile bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu çalışmada olduğu gibi birden fazla bağımsız değişken ve bir bağımlı değişkenin arasındaki doğrusal ilişki ise çoklu regresyon analizi ile ölçülebilir. Bu çalışmada bağımlı değişken betonun 28 günlük basınç dayanımı, bağımsız değişkenler ise GKA, çimento, silis dumanı, uçucu kül, agrega ve sudur. Agrega miktarında normal ağırlıkta olan toplam ince ve kalın agregaların tamamı göz önünde bulundurulmuştur.

ANOVA ise “varyans analizi” demektir, yukarda bahsedilen bağımsız değişkenlerin ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını istatistiksel olarak anlaşılmasını sağlar. Ayrıca bağımsız değişkenlerin ortalamalarına ilişkin hipotezlerin test edilmesinde yararlanılan bir yöntemdir. Regresyon çalışmasındaki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek için ANOVA testi kullanılır. ANOVA analizi ile her bir bağımsız değişkenin ortalamasının diğerlerinden ne kadar farklı olduğu gösterilmektedir. Bu da hangi bağımsız değişkenin, bağımlı değişken ile arasında bir bağlantı olduğunu anlamaya yardımcı olur. Birkaç popülasyonun ortalamalarının hepsinin eşit olduğu sıfır hipotezini test etmek için tek faktörlü veya tek yönlü ANOVA kullanılır. Sıfır hipotezinde değişkenler arasında bir ilişki olmadığı veya anlamlı bir fark olmadığı kabul edilir.

Ortalamalar arasındaki herhangi bir farklılığın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek ve sıfır hipotezini test etmek için varyans analizinin temelini oluşturan p-değerini bu analizden elde edilen anlamlılık değeriyle karşılaştırmak gerekmektedir. Genellikle anlamlılık değeri 0,05 olarak kabul edilmektedir. Anlamlılık düzeyi, %5'lik bir riskle ortalamalar arasında bir fark olmayacağı anlamına gelir.

Sonuçların güvenilir olup olmadığını (istatistiksel olarak manidar) kontrol etmek için p değeri kontrol etmek gerekmektedir. Bu değer 0,05'ten küçükse, sonuçlar istatistiksel olarak manidardır.

Regresyon ve ANOVA analizleri Excel ve Minitab uygulaması kullanılarak oluşturulmuştur.

### **Parametre Optimizasyonu**

Parametre optimizasyonu, kontrol edilebilen bağımsız değişkenler için en uygun ayarları belirlemek için kullanılır. Tanımlanan spesifik bir hedefe ulaşmak için her bir bağımsız değişken için optimal değer aranır. Duyarlılık analizinden önce genellikle parametre optimizasyonu yapılır.

### **Duyarlılık Analizi**

Duyarlılık analizi, girdi değişkenleri olarak bilinen bağımsız değişkenlerdeki değişikliklere bağlı olarak hedef değişkenin (bağımlı değişken) nasıl etkilendiğini belirleyen bir analizdir. Belirli koşullar altında bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır, bu analizle birlikte hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin fazla olduğu anlaşılabilir. Bu analizi yapabilmek için öncelikli olarak varyans analizindeki sıfır hipotezini reddetmek gerekmektedir.

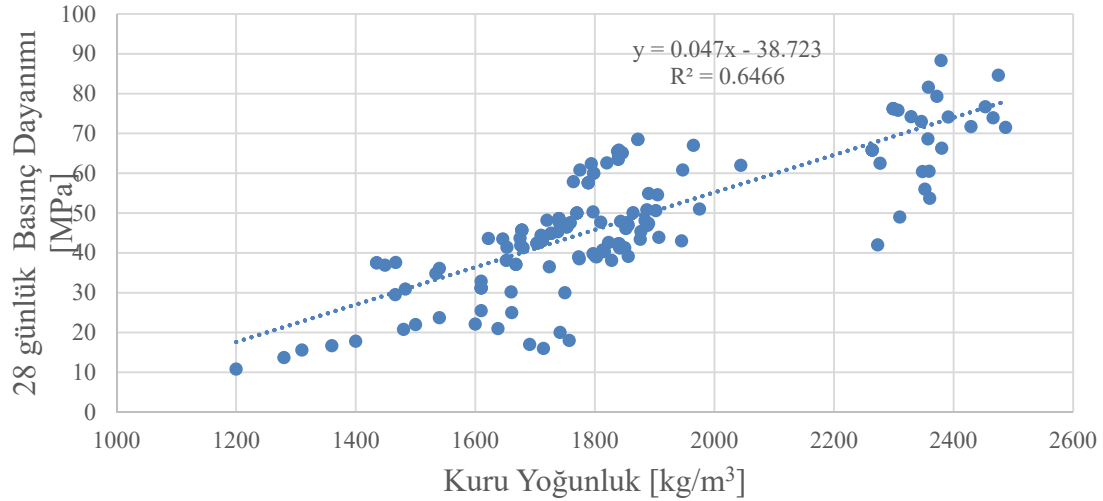
Duyarlılık analizi, bir modelin parametreleri ve çıktısı arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Örneğin, düşük duyarlılık indeksine sahip bir parametrenin değerleri modelin sonucunu fazla etkilemeden ayarlanabilir. Öte yandan, parametre yüksek hassasiyet indekse sahipse; bu parametredeki herhangi bir değişiklik, modelin sonucunu dramatik bir şekilde değiştirecektir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Korelasyonlar ve Determinasyon Katsayısı

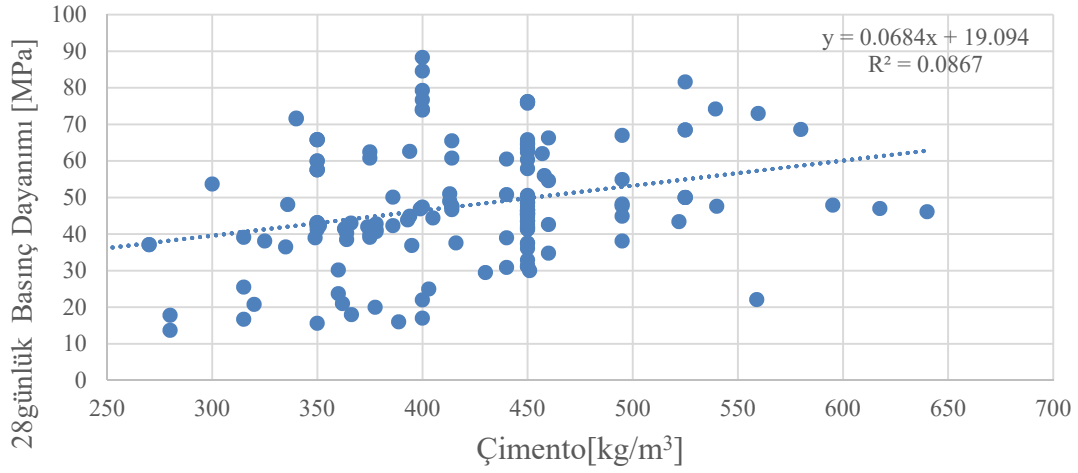
Çalışma kapsamında betonun yaygın olarak ölçülen değişkenleri arasındaki korelasyon katsayısı incelenmiştir.

$R^2$  değeri neden sonuç ilişkisi kurulmaksızın iki değişkenin birbiri üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere 28 günlük basınç dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki korelasyonun kuvvetini belirten  $R^2$  değeri %65’tir. Basınç dayanımındaki değişimin %65’i kuru yoğunluk ile açıklanabilirken %35’i açıklanamaz. Şekil 1’deki iki ayrı kümelenmenin sebebi verilerin hem içeriğinde LECA bulunan hafif beton hem de içeriğinde normal ağırlıklı agrega bulunan normal beton olarak ikiye ayrılmasıdır. İlk kümelenme  $1200-2000 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip olan hafif beton verilerine aitken ikinci kümelenme  $2250-2300 \text{ kg/m}^3$  aralığında ilk kümelenmeye göre çok daha az miktarda LECA içeren betona aittir. İkinci kümelenmenin son bölgesindeki  $2400 \text{ kg/m}^3$  ve üstü yoğunluğa sahip olan normal betona ait verileri göstermektedir.



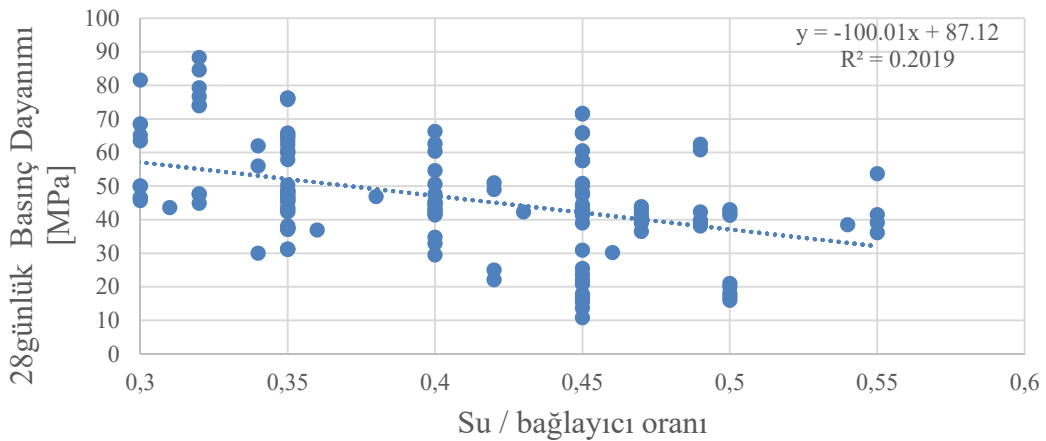
Şekil 1 - Kuru Yoğunluk ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

İncelenen bir diğer korelasyon basınç dayanımı ve çimento miktarı arasındaki ilişkidir. Şekil 2’de çimento miktarı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı  $R^2$  değeri %9’dur. Basınç dayanımındaki varyasyonun %9’u çimento miktarı ile açıklanabilirken %91’i açıklanamaz. Bu derece düşük katsayının anlamı bu iki değişken arasında neredeyse hiç korelasyon olmadığıdır. Her ne kadar bu iki değişken arasındaki korelasyonun daha yüksek olması beklense de veriler içerisinde normal ve hafif agregaların birlikte bulunması nedeniyle bu durum ortaya çıkmaktadır. Sadece çimento ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki korelasyona değil su/bağlayıcı oranı ve mineral katkı malzemeleri ile basınç dayanımı arasındaki korelasyonlara da bakmak daha doğru sonuçlar verebilir.



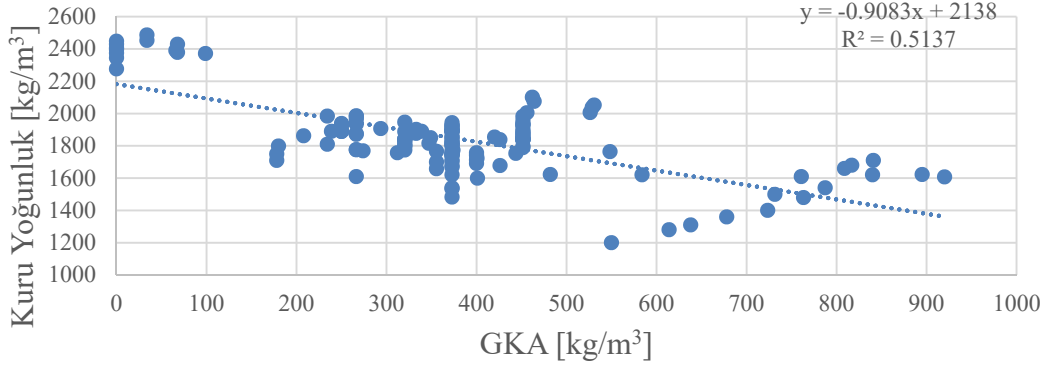
Şekil 2 - Çimento ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 3'te su/bağlayıcı oranı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı  $R^2$  değeri %20'dir. Basınç dayanımındaki varyasyonun %21'i su/bağlayıcı oranı ile açıklanabilirken %79'u açıklanamaz. Burada, sadece çimento ve basınç dayanımı arasındaki korelasyondan daha güçlü bir korelasyon değeri elde edilmiştir. Ancak hala düşük bir değer elde edilmesinin sebebi basınç dayanımındaki varyasyonun birden fazla değişkene bağlı olmasıdır. Bu değişkenler, su miktarı, normal agrega miktarı, hafif agrega miktarıdır. Bu sebeple bireysel olarak su/çimento veya su/bağlayıcı oranıyla basınç dayanımı arasında yeterince güçlü bir korelasyon sayısı elde edilememiştir.



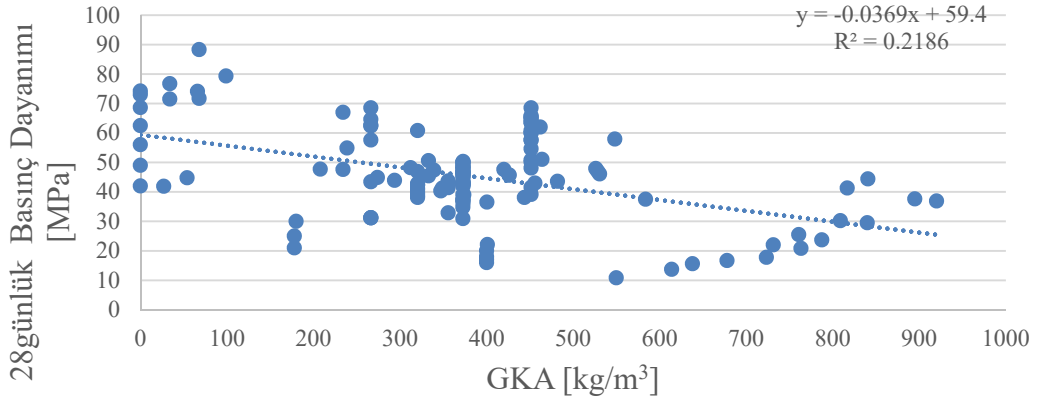
Şekil 3 - Su/bağlayıcı Oranı ve 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 4'te GKA ve kuru yoğunluk arasındaki determinasyon katsayısı  $R^2$  değeri %51'dir. Kuru yoğunluktaki varyasyonun %51'i GKA miktarı ile açıklanabilirken %49'u açıklanamaz



Şekil 4 - Kuru Yoğunluk ve GKA Miktarı Arasındaki İlişki

Şekil 5'te GKA miktarı ve basınç dayanımı arasındaki determinasyon katsayısı  $R^2$  değeri %22'dir. Buna göre basınç dayanımındaki varyasyonun %22'si GKA miktarı ile açıklanabilirken %78'i açıklanamaz. Bunun anlamı, bireysel olarak GKA miktarı ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki olmadığıdır. Buradaki ilk kümelenme içeriğinde GKA bulunmayan beton numunelerinin verilerine aittir, diğer kümelenmelerinin sebebi ise kullanılan farklı GKA miktarlarıdır.



Şekil 5 - 28 Günlük Basınç Dayanımı ve GKA Miktarı Arasındaki İlişki

### Meta-Analiz Sonuçları

Tablo 1'deki regresyon analizinin sonuçları bütün bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken 28 günlük basınç dayanımını tahmin etmede ne kadar iyi/kötü olduğunu göstermektedir. Tablo 2' de ise bu bağımsız değişkenleri ayrı ayrı incelemeyi sağlar. Regresyon ve varyans analizi bütün değişkenlerdeki anlamlılığı araştırmada kullanılır.

Tablo 1'den elde edilen  $R^2$  değeri 0,62, düzeltilmiş  $R^2$  değeri ise 0,60'tır. Çoklu regresyon analizlerinde düzeltilmiş değer dikkate alınmaktadır.

Bunun anlamı ise 28 günlük basınç dayanımındaki varyasyonun %60'ı yukarıda bahsedilen bütün bağımsız değişkenler tarafından belirlenmiştir. Betonun malzeme kaynaklı kendine özgü değişken ve tahmin etmesi zor yapısı, literatürde tespit edilen etki ve ilişkilerde dahi çok yüksek R<sup>2</sup> değeri elde edilememesi ve 6 farklı bağımsız değişken olduğu göz önüne alınırsa, bu değer kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2'deki regresyon analizinden elde edilen katsayılar ve kesme değerine bağlı olarak bir denklem oluşturulmuştur. Buna göre oluşturulan denklem (1) aşağıda sunulmuştur. Bu denkleme çimento, silis dumanı, uçucu kül, GKA, toplam normal agrega, ve su miktarı kg/m<sup>3</sup> cinsinden girilerek betonun 28 günlük basınç dayanımı MPa cinsinden tahmin edilebilir. Denklem, literatürdeki 150'den fazla veri noktası kullanılarak elde edildiğinden dolayı tek bir veri setine dayanan bireysel sonuçlara göre çok daha üstündür ve kullanıcıya büyük oranda kolaylık sağlar.

$$F_{c28} = 28,15 + 0,046 * \text{Çimento} + 0,086 * \text{Silis Dumanı} + 0,026 * \text{Uçucu Kül} + 0,009 * \text{GKA} + 0,026 * \text{Toplam Agregası} - 0,164 * \text{Su} \quad (1)$$

**Tablo 1 - Regresyon ve Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları-1**

Regresyon Analizi	R	0,79
	R <sup>2</sup>	0,62
	Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	0,60
Varyans Analizi	P değeri	3,91E-28

**Tablo 2 - Regresyon ve Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları-2**

Regresyon Analizi Sonuçları	Katsayılar	t-istatistik	P-değeri
Kesme Noktası	28,150	2,522	0,013
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	0,046	3,350	0,001
Silis Dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	0,086	1,781	0,077
Uçucu Kül (kg/m <sup>3</sup> )	0,026	1,658	0,099
GKA (kg/m <sup>3</sup> )	0,009	1,253	0,212
Toplam Agregası (Normal) (kg/m <sup>3</sup> )	0,026	6,721	3,78E-10
Su (kg/m <sup>3</sup> )	-0,164	-4,480	1,49E-05

Bağımsız değişkenlerin t- istatistik değerleri incelendiği zaman en yüksek değerlerin çimento, toplam normal agrega ve su'ya ait olduğu anlaşılmaktadır. Bunun anlamı bu üç verinin regresyon analizinde daha güvenilir ve anlamlı olduğudur çünkü t-istatistik değeri ne kadar büyükse, katsayının o kadar güvenilir olduğunu gösterecektir.

P değeri regresyon modelinin ne kadar anlamlı, kabul edilebilir olduğunu gösterir. Genel modelin p değeri, 3.91e<sup>-28</sup> dir. Bu değer alpha (0,05) değerinden oldukça küçük olduğu için 0 hipotezi kolaylıkla reddedilmiştir. Bunun ardından, bütün bağımsız değişkenlerin p değerlerinin 0 hipotezini reddetmek için yeterli olup olmadığı incelenmelidir. Bu modele göre, bağımsız değişkenler içerisinde silis dumanı, uçucu kül ve GKA'nın p değeri 0,05'ten büyüktür bunun



anlamı sıfır hipotezini reddedemediğimizdir. Yani bu bağımsız değişkenler manidar değildir. Buna karşılık olarak, çimento, toplam agrega ve suyun p değeri ise 0,05'ten küçüktür bunun anlamı ise 0 hipotezinin reddedilebileceğidir. Bütün olarak incelediğimizde, silis dumanı, uçucu kül ve GKA'nın 28 günlük basınç dayanımının tahmin edilmesinde anlamlı değişimlerdir. Ancak, çimento, toplam normal agrega ve su miktarı basınç dayanımının tahmin edilmesinde anlamlı bir değerdir.

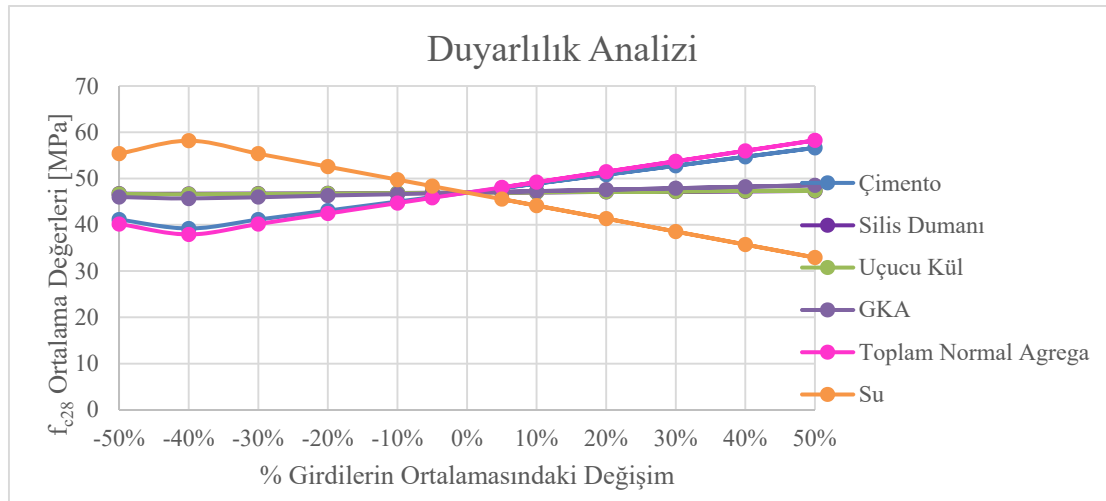
### Parametre Optimizasyonu

Parametre optimizasyonu için MiniTab uygulaması kullanılmıştır. Yapılan örnekteki optimizasyon hedefi, bağımlı değişken olan  $f_{c,28}$  değerini 30 MPa olarak ayarlamaktır. Bu programda bütün bağımsız değişkenler için en düşük ve en yüksek miktarlar mevcut 150'den fazla veri noktasına göre belirlenir, ancak gerçekçi tasarım değerleri elde etmek için en düşük toplam normal agrega miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3'te sunulan değerler  $f_{c,28}$  değerini 30 MPa elde etmek için toplam normal agrega miktarının sınırlandırıldığı bir örnektir. Parametre optimizasyonu sayesinde farklı değerleri sınırlandırarak farklı basınç dayanımları da elde edilebilir.

**Tablo 3 - Parametre Optimizasyonundan Elde Edilen Veriler**

Bağımsız Değişkenler	Miktar( $\text{kg/m}^3$ )
Çimento	302
Silis Dumanı	9.7
Uçucu Kül	33.9
GKA	658.7
Toplam Normal Agrega	600.8
Su	219.1
TOPLAM YOĞUNLUK	1824.2

### Duyarlılık Analizi



**Şekil 6 - Duyarlılık Analizi**

Şekil 6'da girdilerin (bağımsız değişkenlerin) ortalama değerleri, eksi ve artı %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak değiştirilmiştir. Ayrıca bu grafikte değişen bağımsız değişkenlerle belirlenen  $f_{c,28}$ 'e karşılık gelen ortalama değer de gösterilmiştir.

$f_{c,28}$ 'in ortalama değerini daha yüksek ölçüde azaltmak/arttırmak için girdinin (bağımsız değişkenin) grafikte eğime sahip olması gerekmektedir.

Bu değişkenler su, toplam normal agrega ve çimentodur. Düz hatta sahip (0'a yakın eğimi olan) girdiler,  $f_{c,28}$ 'in ortalaması üzerinde çok az etkisi olan veya hiç etkisi olmayan değişkenleri gösterir. Bu girdiler ise uçucu kül, silis dumanı ve GKA'dır.

## SONUÇLAR

Çalışmada meta-analiz kapsamında literatürden 150'den fazla veri noktası derlenmiş ve incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, betonun basınç dayanımı ile GKA kullanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. GKA miktarı, bağlayıcı miktarı, mineral katkı miktarı ve türü, su/bağlayıcı oranı, 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk gibi farklı parametreler arasındaki korelasyonların ayrıntılı istatistiksel analizi ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak gösterilmiştir. Bu analizlere göre p-değeri ( $3.91 \times 10^{-28}$ ) alpha değerinden oldukça küçük olduğu için sıfır hipotezi reddedilmiştir ve 6 farklı bağımsız değişkenin ortalamalarının birbirinden farklı olduğu kanısına varılmıştır. Bunun anlamı varyansların homojen olmadığıdır ve varyans analizinin temelini oluşturur. Hangi değişkenler arasında fark olduğunu bildirmemektedir.

GKA ve betonun kuru yoğunluğu arasındaki determinasyon katsayısı  $R^2$  değeri 0.51'dir. Bu değer iki değişken arasında güçlü bir korelasyon olmadığını göstermektedir. 28 günlük basınç dayanımı ve kuru yoğunluk arasındaki  $R^2$  değeri %65'tir. GKA ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki  $R^2$  değeri %22'dir. Çimento miktarı ve 28 günlük basınç dayanımı arasındaki  $R^2$  değeri ise %9'dur. Bu değer diğerlerine göre çok küçüktür bunun anlamı ise en zayıf korelasyonun bu iki değişken arasında olduğudur. Bunun regresyon analizinden elde edilen denklemlerle herhangi bir ilgisi yoktur. Bu iki farklı değişken arasındaki neden sonuç ilişkisini değil sadece bireysel olarak iki farklı değişken arasındaki ilişkinin güçlülüğünü göstermektedir. Neden-sonuç ilişkisi kurabilmek için grafikleri, varyans analizini ve korelasyon katsayısını iyi analiz etmek gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, regresyon analizine dayalı olarak, 28 günlük basınç dayanımının değerlendirilen değişkenlerle olan ilişkisi bir denklem olarak sunulmuştur. Değişkenlerin değerleri denkleme girilerek betonun beklenen ortalama 28 günlük basınç dayanımı tespit edilebilir. Regresyon analizindeki detayları incelemeler ve duyarlılık analizi sonucunda su, çimento ve normal ağırlıklı agreganın 28 günlük basınç dayanımına olan etkisinin uçucu kül, silis dumanı ve GKA miktarından daha çok olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun anlamı, uçucu kül, silis dumanı ve GKA betonun mekanik performansını olumsuz etkilemeden kullanılabilir. Mevcut araştırmanın sonuçları, meta-analiz ile çok sayıda verinin anlamlı bir biçimde birleştirilmesiyle birlikte bütünleşik bir etki yaratmaktadır. Bu sebeple birbirinden bağımsız yürütülen tek bir çalışmanın sonuçlarına göre daha güçlü ve güveniliridir.

Betonda GKA kullanımının maliyet ve performans açısından avantajları olmasına rağmen inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu çalışmanın sonucunda ise GKA miktarının betonun en önemli özelliklerinden biri olan 28 günlük basınç dayanımına etkisi su, çimento ve normal ağırlıklı agregadan oldukça az olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımı üzerinde diğer değişkenler kadar etkili bir parametre olmadığına gösterilmesi betonda GKA kullanımının yaygınlaştırılması için önemlidir.

### **Kaynaklar**

1. Chandra, S., Berntson, L., Lightweight aggregate concrete : science, technology, and application, 2002, 450 sayfa.
2. ACI Committee 213, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, 2003.
3. Cavalline, T. L., Gallegos, J., Castrodale, R. W., Freeman, C., Liner, J., & Wall, J., “Influence of Lightweight Aggregate Concrete Materials on Building Energy Performance,” Buildings, Vol.3(11), 2021 pp 94.
4. Alexander, M. G., Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites, Cachan Rilem Publ., 1999
5. Haselbach, L., Engineering Guide to LEED - New Construction: Sustainable Construction for Engineers, New York, 460 sayfa
6. ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98), 2004.
7. Ozguven, A., and Gunduz, L., “Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate,” Cement and Concrete Composites, Vol. 34(6), 2012, pp 781–787.
8. Bogas, J. A., Gomes, A., and Pereira, M., “Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate,” Construction and Building Materials, Vol. 35, 2012, pp 1013–1022.
9. Bogas, J. A., and Nogueira, R. “Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions,” KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 18(6), 2014, pp1780–1791.
10. Bogas, J. A., and Gomes, A. “Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete,” Cement and Concrete Composites, Vol. 60, 2015, pp 111–122.
11. Dilli, M. E., Atahan, H. N., and Şengül, C., “A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates,” Construction and Building Materials, Vol. 101, 2015, pp 260–267.
12. G S, R., and Sivaraja, M., “Experimental Investigation on Self-Compacting Self-Curing Concrete Incorporated with the Light Weight Aggregates,” Brazilian Archives of Biology and Technology, Vol. 59(spe2), 2016
13. Józwiak-Niedźwiedzka, D., “Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate,” Cement and Concrete Composites, Vol. 27(6), 2005, pp 709–715.
14. Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A., and Dumontet, H., “Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ),” Cement and Concrete Research, Vol. 40(11), 2021, pp 1590–1600.
15. Karamloo, M., Mazloom, M., and Payganeh, G., “Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete,” Construction and Building Materials, Vol. 123, 2016, pp 508–515.
16. Lotfy, A., Hossain, K. M. A., and Lachemi, M., “Durability properties of lightweight self-consolidating concrete developed with three types of aggregates,” Construction and Building Materials, Vol. 106, 2016, pp 43–54.

17. Mahdy, M., “Structural Lightweight Concrete Using Cured LECA,” *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Vol. 5(9), 2016, pp 25-31.
18. Malešev, M., Radonjanin, V., Lukić, I., and Bulatović, V., “The Effect of Aggregate, Type and Quantity of Cement on Modulus of Elasticity of Lightweight Aggregate Concrete,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39(2), 2013, pp 705–711.
19. Mohammadi, Y., Mousavi, S., Rostami, F., and Danesh, A., “The effect of silica fume on the properties of self-compacted lightweight concrete,” *Current World Environment*, Vol. 10(Special-Issue1), 2015, pp 381–388.
20. R, A. K., and P, P., “Mechanical Properties of Structural Light Weight Concrete by Blending Cinder & LECA,” *IARJSET*, Vol. 2(10), 2015, pp 64–67.
21. Sajedi, F., and Shafigh, P., “High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 37(7), 2012, pp 1885–1893.
22. Yoon, J., Kim, J., Hwang, Y., and Shin, D., “Lightweight Concrete Produced Using a Two-Stage Casting Process,” *Materials*, Vol. 8(4), 2015, pp 1384–1397.
23. Youm, K.-S., Moon, J., Cho, J.-Y., and Kim, J. J., “Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume,” *Construction and Building Materials*, Vol. 114, 2016, pp 517–527.

## Bor Madeni Atıklarından Alkali Füzyon Yöntemi ile Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi

Cavit Çağatay KIZILTEPE<sup>1</sup>, İsa YÜKSEL<sup>2</sup>, Serdar AYDIN<sup>3</sup>, Ayşenur SİĞİNDERE<sup>4</sup>

### ÖZET

Bor madeninin farklı madencilik yöntemleri ile zenginleştirilmesi esnasında içerisinde bir miktar bor bulunan (%15-20) atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bor zenginleştirme prosesi esnasında açığa çıkan atık malzeme tümüyle herhangi bir sektörde değerlendirilememektedir. Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Kırka atıkları ile farklı oranlarda sodyum hidroksit (%2, %4, %6, %8 ve %10) içeren tek bileşenli geopolimer bağlayıcılar; 600 °C sıcaklıkta, farklı sürelerde (1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat) kül fırını içerisinde kalsine edilerek hazırlanmıştır. Kalsinasyon işleminin sona ermesinin ardından, numunelere havada ani soğutma yöntemi uygulanmıştır. Harç karışımlarının dökümünün ardından karışımlar 16 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş ve ardından 100 °C'de 24 saat boyunca etüv içerisinde kür edilmiştir. Kür işleminin sone ermesiyle numunelerin, basınç dayanımları belirlenmiş ve seçilen karışımlar üzerinde iç yapı analizleri (SEM/EDS) yapılmıştır. Hazırlanan harç numunelerinden 10-25 MPa aralığında basınç dayanımları elde edilmiştir. SEM analizi sonucunda %8 ve %10 Na<sub>2</sub>O içeren karışımların, %2 Na<sub>2</sub>O içeren karışıma göre matris fazının daha yoğun olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bor atığı, kalsinasyon, tek bileşenli geopolimer bağlayıcı.

### ABSTRACT

#### **Development of One-Part Geopolymer Binder from Boron Mine Tailings with Alkali Fusion Method**

Mine tailings with a fair amount of boron (15-20%) are discarded during the enrichment of boron mine via different mining methods. Mine tailings discarded during the enrichment process of boron don't utilize totally. The production of one-part geopolmer binder of the utilization of mine tailings discarded in Kırka Boron Facility as a raw material via alkali fusion is investigated

---

1 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - cavit.kiziltepe@btu.edu.tr

2 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - isa.yuksel@btu.edu.tr

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - serdar.aydin@deu.edu.tr

4 Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa - aysenur.sigindere@btu.edu.tr

*within the scope of in this study. One-part geopolymer binders were prepared at 600 °C and different duration times (1, 2, 3, 4, 5, and 6 hours) by calcining within the muffle furnace with Kırka boron mine tailings having different sodium hydroxide ratios (2%, 4%, 6%, 8%, 10%). Calcined mine tailings were cooled in air via shock cooling method. After preparing mortar mixtures, they were waited along 16 h in room temperature and cured in an oven at 100 °C by 24 h. The compressive strength values of specimens were obtained after curing process and microstructure analyses (SEM/EDS) were performed on selected mixtures. The compressive strength values in the rage of 10-25 MPa were obtained from prepared mortar specimens. The matrix phases of mixtures with 8% and 10% Na<sub>2</sub>O are denser than the mixture containing 2% Na<sub>2</sub>O according to SEM.*

**Keywords:** *Boron tailing, calcination, one-part geopolymer binder.*

## **GİRİŞ**

Dünya bor rezervlerinin yaklaşık %74'ü ile ülkemiz, dünyada en fazla rezerve sahip ülkedir. 2015 yılı verilerine göre, dünya bor pazarındaki talebin yaklaşık %50'si ülkemiz tarafından karşılanmıştır [1]. Ülkemizde bor rezervleri; Kütahya-Emet, Bigadiç-Balıkesir, Kestelek-Bursa ve Kırka-Eskişehir bölgelerinde yer almaktadır. Doğada yaklaşık 230 adet bor minerali bulunmaktadır. Bu mineraller içerisinde en önemlileri (ülkemizde bulunması ve ticari değerinin olması bakımından); tinkal, kolemanit ve üleksit mineralleridir. Emet'te kolemanit ve üleksit, Kırka'da tinkal, Bigadiç'te kolemanit ve üleksit, Kestelek'te ise kolemanit yatakları mevcuttur.

Bor, temizlik sanayi, inşaat sektörü, seramik sanayi, nükleer sanayi vb. birçok farklı endüstriyel sektörde yaygın bir şekilde kullanılan çok önemli bir madendir. Bor madeninin farklı madencilik yöntemleri ile zenginleştirilmesi esnasında içerisinde bir miktar bor bulunan (%15-20) atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Bor zenginleştirme prosesi esnasında açığa çıkan atık malzemeler işletmeler tarafından atık barajlarında depolanmakta ve herhangi bir sektörde değerlendirilememektedir. Ayrıca bu malzemelerin atmosfere açık ortamlarda depolanması çevre kirliliğine neden olmaktadır. Atıkların içerisinde bulunan bor bileşiklerinin yağmur suları tarafından çözünmesi hava, su ve toprak kirliliğine yol açmakta olup, bu durum canlılar açısından risk oluşturmaktadır.

Doğal çevre ve insan sağlığı açısından en büyük risklerden bir diğeri ise maden atıklarının depolandığı atık barajlarının herhangi bir sebepten dolayı yıkılması ve baraj içerisinde bulunan atıkların serbest kalarak doğaya karışmasıdır. Son 10 yılda Brezilya ve Rusya'da bulunan demir cevheri ve altın madeni atıklarının depolandığı atık barajlarının yıkılması sonucunda çok ciddi çevre sorunlarıyla karşılaşmıştır [2-4]. Ayrıca Rico vd. [5], yapmış oldukları çalışmada 1965-2000 yılları arasında kayıtlara geçen 29 adet yıkılmış atık barajının olduğunu belirtmiştir.

Ülkemizde beton, harç, blok elemanlar vb. yapı malzemelerinin üretiminde bağlayıcı madde olarak Portland çimentosu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat Portland çimentosu üretiminde kullanılan hammaddelerin (kil-kireçtaşı) temini doğal çevrenin tahribatına neden olmaktadır. Ayrıca Portland çimentosu üretimi aşamasında atmosfere salınan gazlar (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb.) doğal çevreye oldukça zarar vermektedir. Çimento içerisindeki karma oksitlerin yaklaşık 1300 °C-1400 °C seviyelerinde oluşmasından dolayı enerji sarfiyatı oldukça yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı üretimi son yıllarda önemli araştırma konularından biri olmuştur. Bu araştırmalardan en ilgi çekenini ise alkalilerle aktive edilerek üretilen geleneksel (iki bileşenli: alkali aktivatör-alüminosilikat toz malzeme) geopolimer bağlayıcılarıdır. Fakat iki bileşenli sistemler içerisinde kullanılan alkali aktivatörlerin viskoz ve korozif yapıda olması nedeni ile uygulama anında insan vücuduna temas etmesi durumunda insan sağlığına olumsuz etkisi olmaktadır. Ayrıca, iki bileşenli geopolimer bağlayıcıların yerinde döküm işlemlerinde uygulanabilirliği pratik olmamaktadır. Son yıllarda

yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment) çalışmaları, sadece tek bileşenli geopolimer bağlayıcıların çevresel açıdan Portland çimentosuna kıyasla önemli ölçüde faydaları olduğunu göstermiştir [6]. Bu nedenlerden dolayı, son yıllarda, araştırmacılar Portland çimentosu gibi pratik bir şekilde kullanılabilir tek bileşenli (sadece su ilavesiyle) geopolimer bağlayıcıların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Son yıllarda alkali füzyon yöntemi kullanılarak üretilen tek bileşenli geopolimer bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Ye vd. [7], kırmızı çamur ile pellet sodyum hidroksiti belirli oranlarda (kırmızı çamurun %10 ve %15'i kadar Na<sub>2</sub>O olacak şekilde) karıştırarak elde ettiği kuru karışımı, 800 °C'de 1 saat boyunca kalsine etmiştir. Alkali füzyon yöntemi ile elde edilen kırmızı çamur esaslı geopolimer bağlayıcılar belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20, 25 ve 30) silis dumanı ile yer değiştirerek 0,65 su/bağlayıcı oranında geopolimer hamur karışımları hazırlanmıştır. Silis dumanı oranının artması ve su/bağlayıcı oranının azalmasıyla hamur karışımlarının basınç dayanımlarının önemli oranda arttığı rapor edilmiştir.

Abdel-Gawwad ve Khalil [8], %60 klinker üretimi esnasında toz toplama ünitelerinde toplanan atık toz malzeme (cement kiln dust) ve %40 feldispattan oluşan kuru karışımı alkali füzyon yöntemiyle kalsine ederek tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada kalsinasyon sıcaklıklarının (1200 °C ve 1300 °C), kalsinasyon süresinin (2 saat ve 3 saat) ve sodyum karbonat içeriğinin (%10 ve %20) üretilen geopolimer bağlayıcı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu tip geopolimer bağlayıcı ile hazırlanan geopolimer hamurların 28 günlük basınç dayanımları yaklaşık 52 MPa bulunmuştur.

Peng vd. [9], bentoniti alkalilerle (sodyum karbonat ve sodyum hidroksit) birlikte farklı sıcaklıklarda (700 °C, 850°C ve 1000 °C) 3 saat boyunca kalsine ederek geopolimer klinker üretimi gerçekleştirmiştir. Sırasıyla 1000 °C ve 850 °C sıcaklıklarda kalsine edilen bentonit+sodyum hidroksit (%25) ile bentonit+sodyum karbonat (%33) karışımlarından elde edilen geopolimer klinker ile üretilen hamur karışımlarının 210 gün sonundaki basınç dayanımları sırasıyla yaklaşık 45 MPa ve 55 MPa olarak rapor edilmiştir.

Ke vd. [10], kırmızı çamuru belirli oranlarda sodyum hidroksit ile karıştırarak elde edilen kuru karışımın 800 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca kalsine edilmesi ile üretilen geopolimer bağlayıcının içyapı özelliklerini ve bu bağlayıcı ile hazırlanan hamur karışımlarının basınç dayanımı değerlerini incelemiştir. Kırmızı çamur ağırlığının %5, %10 ve %15'i kadar Na<sub>2</sub>O oranına denk gelen sodyum hidroksit ile homojen bir karışım oluşturacak şekilde karıştırılmıştır. Yüzde 5 sodyum hidroksit içeren kırmızı çamur esaslı geopolimer bağlayıcı ile üretilen hamur karışımı ilk 7 günde sertleşmemiş ve 14 günden sonra dayanım kazanmaya başladığı rapor edilmiştir. Yüzde 10 ve 15 oranlarında sodyum hidroksit içeren geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlar ise kısa sürede dayanım kazanmışlar ve maksimum basınç dayanımı değerleri 7. günde sırasıyla 10 MPa ve 8 MPa olarak rapor edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır.

## AMAÇ

Bu çalışmanın amacı, büyük oranda ülkemize has atık olma özelliğini taşıyan bor madeni atıklarının, bütünüyle değerlendirilebilmesi açısından tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde hammadde olarak kullanımının mümkün olup olmadığını araştırmaktır. Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Ham ve kalsine edilen atıkların kimyasal bileşimi XRF (X-Işınları Floresans Spektrometresi) analizi ile belirlenmiş olup, Tablo 1’de gösterilmiştir. Kalsine Kırka atığına ait XRF sonucu, alkali füzyon yöntemi kullanılmadan yalnızca ham maddenin 1 saat boyunca kalsine edilmesi ile üretilen numuneye aittir. Bu kalsinasyon, ham madde içinde yer alan oksit miktarlarının nasıl değiştiğini görmek amacıyla yapılan bir çeşit ön deneydir.

**Tablo 1 - Ham ve Kalsine kırka atığının (600 °C -1 saat) kimyasal kompozisyonu**

Atık Türü	Bileşenler, Ağırlıkça (%)										
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K.Kayıbı
<b>Kırka (Ham)</b>	19,20	16,12	1,47	6,40	18,60	0,68	0,31	4,81	0,24	-	32,17
<b>Kırka (Kalsine)</b>	25,21	22,03	1,59	7,34	24,55	0,93	0,40	5,55	0,38	-	12,03

Kırka tinal zenginleştirme tesislerinden açığa çıkan ve atık barajlarında depolanmış bor madeni atıkları alkali füzyon yöntemi ile kalsine edilmeden önce, etüv içerisinde 100 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işleminin ardından ve kalsinasyon prosesi öncesinde numuneler 2 dakika boyunca 400 rpm hızında bilyalı değirmende öğütülmüştür. Kalsinasyon öncesinde öğütme işleminin amacı, numunelerin tane boyutları arasındaki farkları minimize etmek ve tane boyutu açısından homojen hale getirmektir. Öğütülen numuneler kalsinasyon prosesi öncesinde 75 µm elekten öğütülmüştür. Elek altında kalan malzeme kalsinasyon prosesinde kullanılmıştır. Aktivatör olarak Merck firması üretimi olan ve %97 saflığa sahip, granül formda sodyum hidroksit kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit, kalsinasyondan bir gün önce belirli oranlarda su ile karıştırılmıştır. Sodyum hidroksit ve sudan oluşan çözelti soğuması için 1 gün bekletilmiştir. Öğütme işleminin ardından elde edilen bor madeni atıkları, farklı Na<sub>2</sub>O oranlarına sahip (%2, %4, %6, %8 ve %10) sodyum hidroksit çözeltisi ile karıştırılarak hamur karışımı elde edilmiştir. Hamur karışımlarının çözelti/katı oranları (içerdikleri Na<sub>2</sub>O oranlarına bağlı olarak) 0,40-0,50 aralığındadır. Elde edilen hamur karışımları, bilye formuna getirildikten sonra 600 °C sıcaklıkta, farklı sürelerde (1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat) kül fırını içerisinde kalsine edilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığı atığın TG/DT analizi sonucunda belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda atık içerisinde yeni kristal fazların oluştuğu görülmüştür. Kalsinasyon işleminin sona ermesinin ardından, numunelere havada ani soğutma yöntemi uygulanmıştır. Numuneler soğuduktan sonra tekrar bilyalı değirmende 3 dakika boyunca 400 rpm hızda öğütülmüştür.

Harç karışımları laboratuvar tipi mikser kullanılarak üretilmiştir. Tüm harç karışımlarında agrega/bağlayıcı oranı 2.5’dir. Homojen bir karışımın elde edilebilmesi için bağlayıcı malzemeler ve standart silis kumu karışımı 1 dakika düşük devirde karıştırılmıştır. Yaklaşık 3 dakikalık karıştırma işleminin ardından (2 dakika yavaş devir ve 1 dakika hızlı devir) taze haldeki harç karışımları 50x50x50 mm’lik küp kalıplara iki tabaka halinde yerleştirilmiş, her tabaka 1 dakika sarsma tablasında sıkıştırılmıştır. Hazırlanan %4, %6, %8 ve %10 Na<sub>2</sub>O içeren harç karışımların su/bağlayıcı oranı 0,52 iken %2 Na<sub>2</sub>O içeren karışımın 0,52 su/bağlayıcı oranında kalıplara yerleştirilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle %2 Na<sub>2</sub>O içeren harç karışımının su/bağlayıcı oranı 0,57 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan harç karışımlarının atmosfere açık yüzeyleri alüminyum folyo ile sarılarak 16 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş, ardından 100 °C’de



24 saat boyunca etüv içerisinde kür edilmiştir. Kür işleminin sona ermesiyle numunelerin, basınç dayanımları belirlenmiş ve seçilen karışımlar üzerinde SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizleri yapılmıştır.

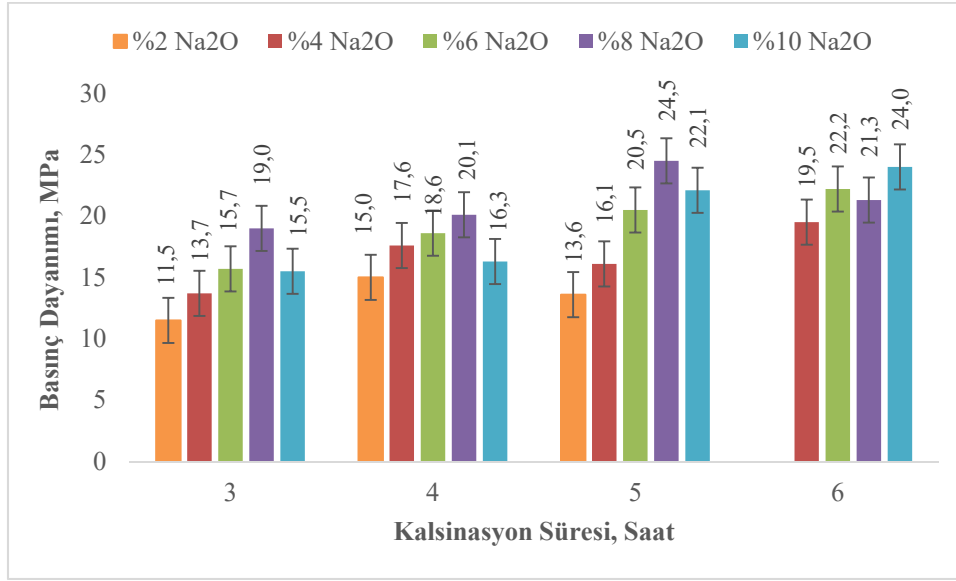
## DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan çalışmalar sonucunda %10 Na<sub>2</sub>O içeren karışımlardan; 1 ve 2 saatlik kalsinasyon süreleri sonucunda yeterli basınç dayanımı elde edilememiştir. Bu sebeple 1 ve 2 saatlik kalsinasyon süreleri çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Bu aşamada üretilen geopolimer bağlayıcılar ve bu bağlayıcılar ile üretilen harç karışımlarının özellikleri ve sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 2** - Farklı Na<sub>2</sub>O oranının ve kalsinasyon sürelerinin geopolimer bağlayıcı özellikleri ve hazırlanan harç karışımlarının sonuçları

Karışım Adı	Su/bağlayıcı	Kalsinasyon Süresi (Saat)	Basınç Dayanımı (MPa)
SH10-0,52-3	0,52	3	15,5
SH8-0,52-3	0,52	3	19,0
SH6-0,52-3	0,52	3	15,7
SH4-0,52-3	0,52	3	13,7
SH2-0,57-3	0,57	3	11,5
SH10-0,52-4	0,52	4	16,3
SH8-0,52-4	0,52	4	20,1
SH6-0,52-4	0,52	4	18,6
SH4-0,52-4	0,52	4	17,6
SH2-0,57-64	0,57	4	15,0
SH10-0,52-5	0,52	5	22,1
SH8-0,52-5	0,52	5	24,5
SH6-0,52-5	0,52	5	20,5
SH4-0,52-5	0,52	5	16,1
SH2-0,57-5	0,57	5	13,6
SH10-0,52-6	0,52	6	24,0
SH8-0,52-6	0,52	6	21,3
SH6-0,52-6	0,52	6	22,2
SH4-0,52-6	0,52	6	19,5

Şekil 1'de kalsinasyon süresine ve farklı Na<sub>2</sub>O oranlarına göre geopolimer harç numunelerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri yer almaktadır.



Şekil 1 - Basınç dayanımı değerleri

Üç saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, Na<sub>2</sub>O oranının %8'e kadar artması ile basınç dayanımlarında artış eğiliminin olduğu görülmektedir. Na<sub>2</sub>O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %19'luk artış meydana gelirken, %6 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %36; %8 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %65 artış gözlemlenmiştir. Na<sub>2</sub>O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %18'lik düşüş (%8 Na<sub>2</sub>O oranına göre) gözlemlenerek 15,5 MPa bulunmuştur.

Dört saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, genel eğilim 3 saat kalsine edilmiş geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımıyla benzerdir. Na<sub>2</sub>O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %17'lik artış meydana gelirken, %6 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %24; %8 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %34 artış gözlemlenmiştir. Bu serilerde Na<sub>2</sub>O oranının artmasıyla, basınç dayanımlarındaki artış yüzdeleri, 3 saat süre ile kalsine edilmiş bağlayıcılarla üretilen harç karışımlarının kine göre azalmıştır. Na<sub>2</sub>O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %19'luk düşüş gözlemlenerek (%8 Na<sub>2</sub>O oranına göre) 16,3 MPa bulunmuştur.

Beş saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, genel eğilim 3 ve 4 saat kalsine edilmiş geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımıyla birbirine benzerdir. Na<sub>2</sub>O oranının %2'den %4'e çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %18'lik artış meydana gelirken, %6 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında %50; %8 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %80 artış gözlemlenmiştir. Na<sub>2</sub>O oranının %10'a çıkması ile basınç dayanımında %10'luk düşüş gözlemlenerek (%8 Na<sub>2</sub>O oranına göre) 22,1 MPa bulunmuştur.

Altı saat boyunca kalsine edilen bağlayıcı ile hazırlanan numunelerde, diğer serilerden farklı olarak, Na<sub>2</sub>O oranının %8'e kadar artması ile basınç dayanımlarında belirgin artışlar olmamıştır. Na<sub>2</sub>O oranının %4'ten %6'ya çıkması ile basınç dayanımında yaklaşık %13'lik artış meydana gelirken, %8 Na<sub>2</sub>O oranına sahip harç numunelerinin basınç dayanımlarında ise %9 artış gözlemlenmiştir. Bu seride, diğer serilerin aksine Na<sub>2</sub>O oranının %10'a çıkması ile en yüksek basınç dayanımı (24,0 MPa) elde edilmiştir.

%4 Na<sub>2</sub>O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri 13,7 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 19,5 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin, 3 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımına göre yaklaşık %28 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %17 ve %42'dir.

%6 Na<sub>2</sub>O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında lineere yakın bir artış gözlemlenmiştir. En düşük basınç dayanımı değeri 15,7 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 22,2 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %18 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %30 ve %41'dir.

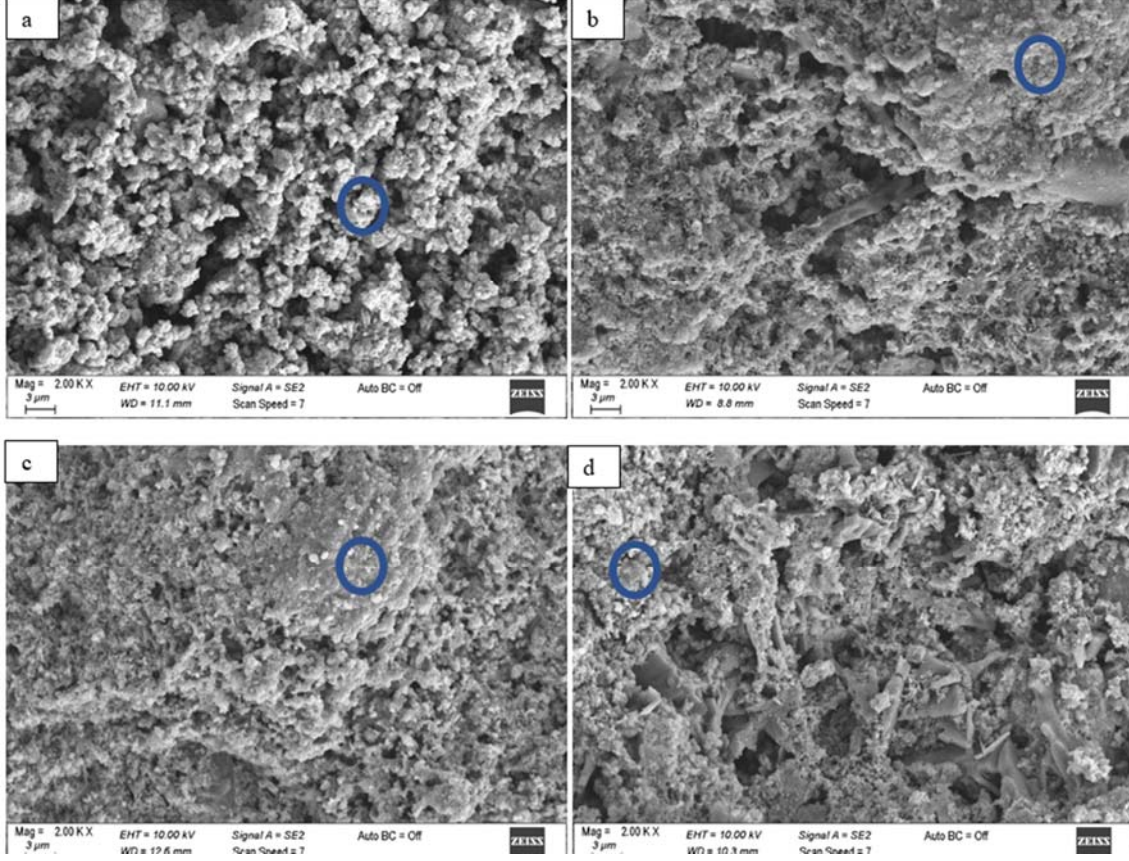
%8 Na<sub>2</sub>O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin 5 saate kadar artması ile basınç dayanımlarında artış gözlemlenirken, 6 saat kalsinasyon süresinde basınç dayanımı bir miktar azalmıştır. En düşük basınç dayanımı değeri 19,0 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise diğer serilerden farklı olarak 24,5 MPa ile 5 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %6 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %28 ve %12'dir.

%10 Na<sub>2</sub>O oranına sahip ve farklı kalsinasyon sürelerinde kalsine edilen geopolimer bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerde, kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında artış olmuştur. En düşük basınç dayanımı değeri 15,5 MPa ile 3 saat kalsinasyon süresinde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı ise 24,0 MPa ile 6 saat kalsine edilen numunelerden elde edilmiştir. Dört saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımında yaklaşık %5 artış var iken, 5 saat ve 6 saat kalsine edilen numunelerin basınç dayanımlarındaki artış sırasıyla %42 ve %54'tür.

### SEM Analizi Sonuçları

Bir önceki bölümde elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, 4 farklı karışım seçilerek SEM/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu/Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi yapılmıştır. Kalsinasyon süresinin ve farklı Na<sub>2</sub>O oranlarının numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemek için; SH8-0,52-3, SH10-0,52-5, SH8-0,52-5 ve SH2-0,57-5 karışımları seçilmiştir. Karışımların SEM görüntüleri Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, kalsinasyon süresinin 5 saat olduğu numunelerde (a, b ve c) Na<sub>2</sub>O oranı arttıkça matris fazı daha yoğun bir yapıdan oluşmaktadır. %2 Na<sub>2</sub>O oranına sahip numunelerde iç yapı daha boşluklu iken, %8 ve %10 Na<sub>2</sub>O içeren numunelerde yer alan boşluklar, geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünler ile dolarak, daha yoğun matris fazı oluşmuştur. SH2-0,57-5 (a) karışımında yuvarlak içine alınan noktada yapılan EDS analizi sonucunda, yaklaşık %60 düzeyinde Ca atomlarının varlığı tespit edilmiştir. Si, Al, Na ve Mg atomlarının atomik oranları ise %5'in altındadır. Bu sonuç iç yapıda bulunan Ca atomlarının geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumu için reaksiyona girmediğini göstermektedir. Geopolimerizasyon ürünlerinin oluşmaması ve buna bağlı olarak boşluklu bir yapının oluşmasından dolayı en düşük basınç dayanımı (13,6 MPa) SH2-0,57-5 karışımından elde edilmiştir. SH8-0,52-5 (b) ve SH10-0,52-5 (c) karışımlarında yuvarlak içine alınan noktalarda yapılan EDS analizi sonuçları benzerlik göstermektedir. Bu bölgelerde %18-19 seviyelerinde Ca atomu ve %13-14 seviyelerinde ise Si atomu bulunmaktadır. Ayrıca Na atomu %1-4 seviyelerinde iken Mg atomu da %12-17 seviyelerinde bulunmuştur. Bu bölgede Ca/Si oranı 1,35-1,38 aralığında bulunmuştur. Elde edilen

sonuçlar ışığında geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda bu bölgede Ca bakımından zengin, ayrıca yapısında Na ve Mg olan C-(Na-Mg)S-H yapısı oluşmuştur. SH8-0,52-3 (d) karışımının matris fazı, SH8-0,52-5 (b) ve SH10-0,52-5 (c) karışımlarınıninkine benzerlik göstermektedir. Yuvarlak içine alınan noktada yapılan EDS analizi sonucunda, Ca ve Si atomları ayrı ayrı yaklaşık %6 seviyesindedir. Ayrıca yaklaşık %4 Mg atomu ve %47 Na atomu bulunmaktadır. Ca/Si oranı yaklaşık 1'dir.



**Şekil 2** - a: SH2-0,57-5, b: SH8-0,52-5, c: SH10-0,52-5, d: SH8-0,52-3 karışımlarının SEM (SE) görüntüleri

## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Kırka Bor İşletme tesisinde açığa çıkan atık malzemenin, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Kalsinasyon süresinin artması ile basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir.
- Basınç dayanımları üzerinde; kalsinasyon süresinin etkisi, Na<sub>2</sub>O oranının etkisine göre daha belirgindir.
- Karışımların Na<sub>2</sub>O oranlarına bakılmaksızın, 600 °C kalsinasyon sıcaklığında optimum kalsinasyon süresi 5 saattir (%4 Na<sub>2</sub>O içeren karışım hariç).
- En yüksek basınç dayanımı, SH8-0,52-5 karışımından 24,5 MPa olarak elde edilmiştir.

- Elde edilen basınç dayanımı değerleri Kırka bor atığının, alkali füzyon yöntemi ile tek bileşenli geopolimer bağlayıcı üretiminde ham madde olarak kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir.
- Karışımların matris fazının SEM görüntüleri, basınç dayanımı değerleri ile uyumlu olup, yapılan EDS analizi ile geopolimerizasyon reaksiyonları Ca bakımından zengin, ayrıca yapısında Na ve Mg olan C-(Na-Mg)S-H yapısı oluşmuştur.

### **Teşekkür**

219M426 numaralı ve “Bor Madeni Atıklarından Tek Bileşenli Geopolimer Bağlayıcı Geliştirilmesi” başlıklı TÜBİTAK projesinden üretilmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca malzemeleri temin eden Eti Maden Kırka Bor İşletme Müdürlüğü’ne de teşekkürlerimizi sunarız.

### **Kaynaklar**

1. Bor Sektör Raporu . 2011. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. Türkiye: Bor Sektör Raporu.
2. Quadra, G. R., Roland, F., Barros, N., Malm, O., Lino, A. S., Azevedo, G. M., Mendonça, R. F. “Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil”, *Chemosphere*, January 2019, 215, pp 753-7.
3. Almeida, C. A., de Oliveira, A. F., Pacheco, A. A., Lopes, R. P., Neves, A. A., de Queiroz, M. E. L. R. “Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin-Brazil”, *Chemosphere*, October 2018, 209, 411-420.
4. Glotov, V. E., Chlachula, J., Glotova, L. P., Little, E. “Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East”, *Engineering Geology*, November 2018, 245, 236-247.
5. Rico, M., Benito, G., Diez-Herrero, A.. “Floods from tailings dam failures”, *Journal of Hazardous Materials*, June 2008, 154(1-3), 79-87.
6. Ouellet-Plamondon, C., and G. Habert. “Life cycle analysis (LCA) of alkali-activated cements and concretes.” In *Handbook of alkaliactivated cements, mortars and concretes*, 2014, 663–686. Cambridge: WoodHead.
7. Ye, N., Yang, J., Liang, S., Hu, Y., Hu, J., Xiao, B., Huang, Q. “Synthesis and strength optimization of one-part geopolimer based on red mud”, *Construction and Building Materials*, 2016, 111, 317-25.
8. Abdel-Gawwad, H. A., Khalil, K. A. “Application of thermal treatment on cement kiln dust and feldspar to create one-part geopolimer cement”, *Construction and Building Materials*, 2018, 187, 231-7.
9. Peng, M. X., Wang, Z. H., Shen, S. H., Xiao, Q. G., Li, L. J., Tang, Y. C., Hu, L. L. “Alkali fusion of bentonite to synthesize one-part geopolimeric cements cured at elevated temperature by comparison with two-part ones”, *Construction and Building Materials*, 2017a, 130, 103-112.
10. Ke, X., Bernal, S. A., Ye, N., Provis, J. L., Yang, J. “One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends”, *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98(1), 5-11.



# Sürdürülebilir Hazır Beton Üretimi

Yasin ENGİN<sup>1</sup>

## ÖZET

Beton, dünyada sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci malzemedir ve ayrıca açık ara dünyanın en çok kullanılan yapı malzemesidir. Küresel olarak yılda yaklaşık 4 milyar ton çimento ve tahminen 10 milyar m<sup>3</sup> beton tüketilmektedir İnşaat sektörünün en önemli girdilerinden biri olan hazır beton, sürdürülebilir üretim açısından birçok potansiyele sahiptir. Bildiri kapsamında sürdürülebilir hazır beton üretimi; daha az çimento kullanımı, yakın tedarik kaynaklarının tercih edilmesi, reçete optimizasyonu ve dijitalleşme, 28 gün yerine daha ileri yaş dayanımlarına bakılması, karbon ayak izi düşük çimento ve bağlayıcıların kullanımı, projelerde daha yüksek dayanımlı beton tercih edilmesi, çevresel etki sınıfları, yapısal tasarım optimizasyonu ve geri kazanılmış agrega kullanımı başlıkları altında değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilir beton, karbon ayak izi, geri dönüşüm.

## ABSTRACT

### **Sustainable Ready Mixed Concrete Production**

Concrete is the second most widely used material in the world after water and is also by far the most used building material in the world. Globally, approximately 4 billion tons of cement and an estimated 10 billion m<sup>3</sup> of concrete are consumed annually. Ready mixed concrete, which is one of the most important inputs of the construction industry, has many potentials in terms of sustainable production. In this study, sustainable ready mixed concrete production is discussed in terms of using less cement, choosing close supply sources, recipe optimization and digitalization, looking at higher age strengths instead of 28 days, using cement and binders with low carbon footprint, preferring higher strength concrete in projects, environmental impact classes, structural design optimization and evaluated under the headings of recycled aggregate use.

**Keywords:** Sustainable concrete, carbon footprint, recycling.

---

<sup>1</sup> İstanbul - yasin.engin@gmail.com

## **GİRİŞ**

İnsan kaynaklı faaliyetlerin çevreye etkisi küresel ölçekte ilk kez 1972 yılında Stockholm’de gerçekleştirilen BM İnsan Çevresi Konferansı’nda işlenmiştir. Sürdürülebilir kalkınma kavramı ise ilk kez, 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu’na hazırlanan Brundtland Raporu’nda geçmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanım yoktur. Brundtland Raporu’nda “sürdürülebilir kalkınma”, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılayabilen kalkınma olarak tanımlanmıştır [1].

1997 yılında küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası ilk çerçeve olan Kyoto Protokolü, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi içinde imzalanmıştır. Kyoto Protokolü ile hedeflenen başarıya ulaşılamaması, 1950’lerden 2010’lara kadar atmosferdeki karbon miktarının sürekli artış göstermesi ve bunun sonucunda küresel sıcaklık artışının kritik düzeye ulaşması daha etkili ve yaygın politikaların oluşturulması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun üzerine 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris’te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar Konferansı’nda kabul edilmiştir. 2021 yılı sonunda Türkiye tarafından da imzalanan Paris Anlaşması, çimento ve dolayısıyla hazır beton sektörü başta olmak üzere birçok sanayi sektörünün iklim değişikliği ile mücadele kapsamında dönüşümünü tetikleyen ve hızlandıran bir milat olmuştur. Her ne kadar 2005 yılında Avrupa Birliği’nde Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) uygulanmaya başlanmış olsa da küresel ölçekte farkındalık ve duyarlılık 2015 sonrasında oluşmaya başlamıştır. Bunun en iyi örneği ABD, İngiltere, Almanya vb. birçok ülkedeki çimento ve hazır beton sektörlerinin iklim değişikliği ile mücadele kapsamındaki yol haritalarını ilk kez 2021 yılında duyurmuş olmalarıdır.

## **AMAÇ**

Bu çalışmada hazır beton sektöründe sürdürülebilirliğin önemi, düşük karbon hedefi, alınan ve alınacak aksiyonlar, bu kapsamda oluşan riskler ve fırsatlar hem literatür hem de pratik uygulamalar ile desteklenerek geniş bir açıdan işlenmektedir. Dünyadan ve Türkiye’den çeşitli veriler ve bu verilere dayanarak yapılan tahminler ile de bir durum analizi yapılmaktadır.

## **BETONUN ÖNEMİ**

Beton, dünyada sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci malzemedir ve ayrıca açık ara dünyanın en çok kullanılan yapı malzemesidir [2]. Küresel olarak yılda yaklaşık 4 milyar ton çimento tüketilmektedir [3] ve bu çimentonun %80’i ile beton üretildiği varsayılırsa karşımıza 10 milyar m<sup>3</sup> gibi devasa bir beton üretim miktarı çıkmaktadır. Bu neredeyse dünyadaki her insan başına yıllık 1,3 m<sup>3</sup> beton üretimi demektir. Türkiye’de ise 2021 yılında 105 milyon m<sup>3</sup> hazır beton üretimi gerçekleşmiştir [4].

Birleşmiş Milletler, küresel olarak önümüzdeki 40 yıl içinde 230 milyar m<sup>2</sup>’lik yeni bir alan inşa edileceğini, dünya binalarındaki mevcut taban alanının iki katına çıkacağını tahmin etmektedir. Bunun büyük çoğunluğu Afrika ve Asya’da olacaktır, ancak 2060 yılına kadar 25 milyar m<sup>2</sup> yeni inşaat alanı eklenecek olan Avrupa’da da hala önemli bir büyüme beklenmektedir [5]. Pratik bir alternatifi olmayan beton, yeni bina ve altyapı talebini karşılamada önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

Üstün fiziksel ve mekanik özellikleri, kolay üretilmesi, sürdürülebilir olması ve diğer alternatif malzemelere göre daha ekonomik olması betonu kelimenin tam anlamıyla modern yapılı çevrenin temel unsuru haline getirmektedir. Bir yapı malzemesi olarak betonun değeri yadsınamaz; ancak iklim değişikliği ile mücadele, betonun ve beton bileşenlerinin sorgulanabilir olmasına da neden



olmaktadır. İnşaatın temel unsurlarından biri olan beton, gelecek yıllarda yapı çevremizde daha fazla iklim direnci elde etmek için vazgeçilmez olacak olan dayanımı, çok yönlülüğü ve dayanıklılığı gibi birçok özelliği nedeniyle de değerlidir. Ayrıca beton, kimyasal karbonatlaşma süreci boyunca ortamdaki karbonu ömrü boyunca tutma konusunda benzersiz bir kapasiteye sahiptir. Bu açıdan betona “karbon yutağı (carbon sink)” bir malzeme tanımı da yapılabilmektedir [6]. 1930 ile 2019 arasında, tahmini olarak 21 milyar ton ortam karbondioksiti (CO<sub>2</sub>) karbonatlaşma yoluyla beton ve diğer çimentolu ürünler tarafından tutulmuştur [7]. Bununla birlikte, betonun karbon ayak izi, karbonatlaşma ile tutabileceği CO<sub>2</sub>'nin oldukça üzerindedir. Bunun nedeni, betona benzersiz yapısal özelliklerini veren bileşen olan Portland çimentosu üretim sürecinin yüksek derecede emisyon yoğun olmasıdır. Çimento, çoğu uygulamada tipik olarak hacimce betonun %15'inden fazlasını oluşturmazken, malzemenin karbon emisyonunun neredeyse %90'ını oluşturmaktadır. Küresel olarak, Portland çimento endüstrisi, toplam antropojenik CO<sub>2</sub> emisyonlarının %8'inden sorumludur [8] ve bu nedenle beton bir ülke olsaydı, Çin ve ABD'den sonra dünyanın en büyük üçüncü yayıcısı olurdu [9].

Son yıllarda giderek artan düşük karbonlu üretim ve teknoloji yelpazesi, bugün hem yapısal performansı iyileştirmek hem de beton emisyonlarını azaltmak için mevcut süreçlere dahil edilmektedir. Bunlardan bazıları son derece yenilikçidir. Diğerleri ise düşük teknolojili ve pratikte zaten iyi kurulmuş, ancak çok daha kapsamlı bir şekilde konuşlandırılabilir niteliktedir.

Betondaki emisyon azaltımları yalnızca tek bir değişiklik değil, malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca kümülatif olarak elde edilebilmektedir. Buna bileşen seçimi, imalat, nakliye, inşaat süreçleri, inşaat sonrası bakım, onarım, bertaraf ve yeniden kullanım dahildir.

Emisyon azaltımları, aynı beton karışımında veya nihai üründe bireysel azaltma faktörleri birleştirildiğinde en üst düzeye çıkmaktadır. Çoğu emisyon azaltımı, mevcut çimento ve beton üreticileri tarafından uygulanabilir niteliktedir. Betondaki karbon ayak izini azaltmak, birbirini takip eden ayrı endüstrilerin ve aktörlerin ortaya çıkmasından ziyade, büyük ölçüde yerleşik çimento ve beton üreticilerinin kararlarını ve eylemlerini içermektedir.

Beton gibi üretilen herhangi bir malzemenin kullanım ömrü boyunca birden fazla noktada karbon emisyonları üretilir. Bu emisyonlar iki kategoriye ayrılır [10]:

1. Gömülü karbon emisyonları; malzeme kullanılmadan önce ham madde çıkarımı, yukarı akış üretimi, nakliye ve imalat aşamaları sırasında meydana gelen emisyonlardır.
2. Operasyonel karbon emisyonları, imalat ve inşaat sonrasında malzemenin operasyonel ömrü boyunca meydana gelir.

Şekil 1'de hazır betonun beşikten kapıya kadarki süreçteki emisyon oranları görülmektedir. Hazır betonun gömülü karbon emisyonu toplam emisyonun %90'ından fazlasını kapsamaktadır. Üretim kaynaklı operasyonel emisyon oranı ise %5 seviyesindedir.



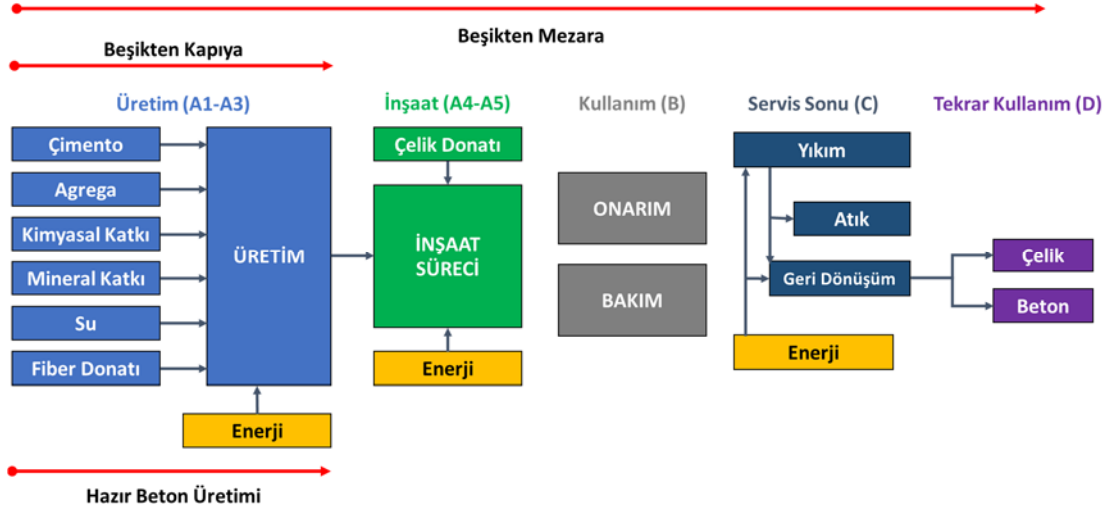
Şekil 1 - Hazır betonun beşikten kapıya emisyon aşamaları [11]

Betonun iklim üzerindeki etkisi, büyük ölçüde Portland çimentosu üretim süreciyle ilişkili gömülü karbon emisyonlarının bir işlevidir. Çimento ile ilgili gömülü karbon emisyonları “proses” ve “yanma” emisyonlarına ayrılmaktadır. Çimento üretimindeki emisyonların yaklaşık %60’ı, CO<sub>2</sub>’nin kireçtaşı kalsinasyonunun kimyasal bir yan ürünü olarak salındığı süreç emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Kalan emisyonlar, fosil yakıtların (en yaygın olarak kömür) klinker üretimi için gerekli olan 1450°C sıcaklığa ulaşılması için yakılmasından kaynaklanmaktadır [12].

Bu bilgiler ışığında şu soru sorulabilir. Sadece 2050 yılına kadar karbon emisyonunu net sıfıra düşürme gerekliliği ile medeniyetin gelişme ihtiyacını nasıl birlikte sağlayabileceğiz? Bu, betonun karbon emisyonunu azaltmak hatta nötrlemek için beton bileşenlerine ve üretim/taşıma gibi operasyonlara odaklanmayı gerektiren yöntemler ile cevaplanabilecek bir sorudur.

## HAZIR BETONUN YAŞAM DÖNGÜSÜ

Hazır betonun yaşam döngüsü aşamaları Şekil 2’de belirtilmiştir. Üretim aşamasında (A1-A3) beton bileşenlerinin çevresel etkileri (gömülü karbon ve su), bu bileşenlerin nakliyesi, üretim esnasında tüketilen enerji ve açığa çıkan emisyon, tüketilen su ve proses sonucu açığa çıkan atıklar dikkate alınır. İnşaat aşamasında (A4-A5) ise üretilen betonun inşaat sahasına nakliyesi, tüketilen enerji, sahadaki uygulamalar kaynaklı çevresel etkiler incelenir. Kullanım aşamasında (B) ise betonun servis ömrü boyunca ihtiyaç duyacağı onarım ve bakım kaynaklı tüketimlerin oluşturacağı çevresel etkilere ve bu süre içindeki karbonatlaşma potansiyeline bakılır. Beton yapının servis ömrü sonunda (C) yıkılması, atıkların nakliyesi, işlenmesi, depolanması ve tasfiye edilmesi gibi süreçlerden kaynaklanan çevresel etkiler ve en sonunda ise tekrar kullanım (D) aşaması incelenir [13].



Şekil 2 - Hazır beton yaşam döngüsü aşamaları [13]

Hazır betonun yaşam döngüsü analizi genellikle üretim (A1-A3) aşaması ya da A1-A5 aşaması kapsamında incelenir. Özellikle hazır beton üreticisinin yaşam döngüsü analizinde karşısına çıkan en önemli sorun kendi sorumluluğu dışındaki süreçlerin verilerine kolay bir şekilde ulaşamamasıdır. Örneğin, beton bileşenlerinden kaynaklanan karbon ve su ayak izinin hazır beton üreticisi tarafından hesaplanması tahminden öteye geçmemektedir. Bu nedenle çimento, agrega ve kimyasal katkı üreticilerinin bu verileri sağlaması gerekmektedir. Bu konuda son yıllarda az sayıda da olsa hesaplama yapılabilen platformlar ve uygulamalar kullanılmaya başlanmıştır.

### Türkiye Hazır Beton Sektöründe Karbon Ayak İzi

Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB) tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Tablo 1’de görüleceği üzere beş farklı dayanım sınıfına ait ortalama beton reçeteleri tespit edilmiştir. Bu verilerin ağırlıklı ortalaması ile de tek bir beton reçetesi temin edilmiştir [13].

**Tablo 1** - Türkiye’de üretilen hazır betonların dayanım sınıfı bazında ortalama karışım içerikleri [13]

Basınç Dayanım Sınıfı	Ortalama Beton Reçetesi					Ağırlıklı Ortalama
	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	
Ort. Çimento Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	263,8	288,1	321,1	355,3	382,8	290,5
Ort. Uçucu Kül Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	18,8	23,6	28,2	23,7	24,5	22,7
Ort. Cüruf Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	11,2	14,7	16,8	19,6	27,6	14,6
Ort. İri Agrega Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	871,0	877,3	883,6	898,0	912,6	878,0
Ort. İnce Agrega Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	1019,6	1003,1	957,1	918,9	901,6	995,5
Ort. Su Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	166,9	163,1	160,9	159,1	157,4	163,6
Ort. Kimyasal Katkı Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	3,3	4,0	4,5	5,1	5,4	4,0
Ort. Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2354,6	2374,0	2372,2	2379,7	2411,9	2368,8

**Tablo 2** - Dayanım sınıfları bazında 1 m<sup>3</sup> hazır betonun karbon ayak izi

		Karbon Ayak İzi (kg CO <sub>2</sub> eq.)					Ağırlıklı Ortalama
		C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	
A1-A3	Ham maddeler	285,17	308,96	339,57	370,16	396,43	310,47
A4-A5	İnşaat Süreci	29,93	30,73	31,61	32,63	33,58	30,75
B1	Kullanım	-7,00	-7,64	-8,52	-6,48	-6,98	-7,69
C1-C4	Servis Ömrü Sonu	36,65	36,88	36,86	36,95	37,32	36,82

**Tablo 3** - CSC referans ve hedef değerler

Dayanım Sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
<b>Karbon ayak izi düşürme seviyeleri [net kgCO<sub>2e</sub> / m<sup>3</sup>]</b>						
Referans	213	237	261	286	312	325
Seviye 1 (≥%30)	149	166	183	200	218	228
Seviye 2 (≥%40)	128	142	157	172	187	195
Seviye 3 (≥%50)	107	119	131	143	156	163
Seviye 4 (≥%60)	85	95	104	114	125	130

THBB tarafından yapılan çalışma kapsamında Türkiye’de üretilen hazır betonun dayanım sınıfı bazında karbon ayak izi Tablo 2’de belirtilmektedir. Beşikten kapıya (A1-A3) süreç dikkate alındığında 1 m<sup>3</sup> hazır betonun karbon ayak izi yaklaşık 310 kg’dır [13].

Tablo 3’te ise Beton Sürdürülebilirlik Konseyi’nin (CSC) sertifikalandırma sürecinde kullandığı farklı basınç dayanım sınıflarına ait karbon ayak izi seviyeleri görülmektedir [14].

C30/37 sınıfına ait referans karbon ayak izi 261 kg’dır. Oysa bu değer ülkemizde 309 kg’dır. Bu farkın ana nedeni Türkiye’de özellikle AB ülkelerine oranla daha az mineral katkı ve düşük klinkerli (katkılı) çimento kullanımınıdır. Tablo 4’te Türkiye’de ve Türkiye’nin içinde yer aldığı CEMBUREAU üyesi ülkelerdeki çimento cinsine göre kullanım oranları belirtilmiştir. CEM I alternatifi olan düşük karbonlu CEM II çimentoları karbon ayak izi açısından oldukça avantajlıdır. Bu açıdan Türk çimento sektöründe mevcut karbon ayak izini düşürmek için ciddi bir fırsat olduğu söylenebilir.

**Tablo 4 - Türkiye ve CEMBUREAU üyesi ülkelerde çimento cinsine göre kullanım oranları [15, 16]**

Çimento Cinsi	Türkiye	CEMBUREAU
CEM I	%59	%39
CEM II	%28	%46
CEM III	%1	%9
CEM IV	%9	%5
CEM V	%2	%1

## SÜRDÜRÜLEBİLİR HAZIR BETON ÜRETİMİ

Çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO<sub>2</sub> emisyonu, betonun sürdürülebilirliği kapsamında üzerinde durulması gereken en önemli husustur. Eğer çimento üretiminde ağırlıklı olarak fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa genel olarak 1 ton klinker üretimi sonucu yaklaşık 1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu açığa çıkmaktadır.

Küresel karbon ayak izini düşürmek için çimento üreticileri kömür ve petrokok gibi fosil yakıtlar yerine kalorifik değeri yakın ya da denk alternatif yakıtlar ve atıklar kullanmakta, ayrıca klinker oranını azaltıp ikincil bağlayıcı malzemeler (mineral katkıları) kullanarak katkıli çimentolar üretmektedir, ancak çimento çok geniş bir alana yayılmış uygulamalara yönelik olan, farklı müşteri gruplarına arz edilen ve belirli standartları sağlamak zorunda olan bir üründür. Bu nedenle yapılacak iyileştirmeler de belirli limitler dâhilinde olabilmektedir. Son yıllarda gündemde olan; ancak henüz tam olarak genel bir uygulama aşamasına geçmeyen karbon yakalama, depolama ve kullanma teknolojisi bu sorunun çözülmesinde çok daha etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yine de bunun için bir süre daha beklenmesi gerekecektir. Öte yandan beton, performans kriterleri önceden tasarlanmış nihai bir üründür ve uygulamalara bağlı olarak sürdürülebilirlik performansı iyileştirilebilmektedir.

### Daha Az Çimento Kullanımı

Çimento, betonun ağırlıkça ortalama %12’sini temsil eder; ancak betondaki gömülü karbonun %90’ını oluşturur [13]. Büyük resme baktığımızda ise çimento üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının %8’inden sorumlu olduğu görülmektedir [8]. Çimento üretiminde oluşan karbon emisyonu azaltıldıktan sonra, birim beton hacmi başına kullanılan çimento miktarı azaltılarak

ilave karbon indirgeme işlemleri yapılabilir. Çimento miktarını azaltmak için en etkili yöntemlerden birisi çevresel etkisi daha düşük olan tamamlayıcı malzemeler diğer bir ifade ile mineral katkıları kullanmaktır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bu anlamda en çok bilinen malzemelerdir. Bu malzemeler kendilerini birçok yönden ispat etmiş ve standartlarda yer almıştır.

Mineral katkıların üretici ve tüketici tarafından tercih edilmelerini etkileyen üç ana husus bulunmaktadır:

1. Maliyete etkisi: Konu çevre de olsa sürdürülebilirliğin üç saçı ayağından birisi de ekonomidir. Hem üretici hem de tüketici mevcut bir ürünün maliyetinin artmasını tercih etmez. Mineral katkıları genel olarak çimentodan daha düşük fiyatlıdır. Eş miktarda çimento azaltılması bile genel olarak birim maliyeti yükseltmezler. Nakliye önemli bir maliyet kaynağı oluşturduğu için üreticiler yakın kaynakları tercih ederler. Bu da bazen bu ürünlerin kullanımını olumsuz etkilemektedir.
2. Ürün performansına etkisi: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi standartlarda yer alan ve teknik performansları ispat edilmiş mineral katkıları bazı projelerde neredeyse zorunlu olarak kullanılmaktadır. Özellikle sadece çimento ile üretilen betonların karşılayamayacağı bazı dürabilite (dayanıklılık) koşullarını karşılamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bunun dışında betonda plastik rötrenin (yüzeysel çatlak oluşumu) azaltılması, taze beton sıcaklığının düşürülmesi, pompalanabilirliğinin artırılması ve dayanım gelişiminin normalleştirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.
3. Çevresel performans: Betondaki karbon ayak izini düşürmeleri ve atık miktarının azaltılması başlıca faydalarıdır. Özellikle yeşil bina projelerinde malzeme kategorisinde avantaj sunmaktadırlar.

Hem üretici hem de tüketici açısından faydası olan bu ürünlerin kullanımında bazı engeller de mevcuttur. Bunlar:

- Kaynaklar sınırlıdır.
- Kaynaklar üretim sahasına uzak olabilmektedir.
- Kullanım miktarları sınırlıdır.
- Bazı kaynaklar stabil ürün sağlayamamaktadır.
- Bazı malzemelere karşı ön yargılar mevcuttur.
- Uçucu kül temin edilen termik santrallerin sayısının giderek azalması beklenmektedir.
- Demir-çelik üretiminde ham madde olarak hurda kullanım oranı giderek artmaktadır.
- Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelere yurt dışından talepler artmaktadır.

Bu engelleri azaltmak ve önüne geçmek için yapılması gerekenler:

- Üreticiler nakliye açısından kendilerine avantaj sağlayacak mineral katkıları araştırmalıdır. Volkanik kül, volkanik cüruf, kalker tozu, kalsine edilmiş kil vb. alternatif malzemeler de göz önünde bulundurulmalıdır.
- Reçete optimizasyonu ile farklı beton sınıfları ve müşteri talepleri doğrultusunda çeşitli beton karışımları çalışılmalıdır.
- Müşterilere ve denetçilere mineral katkıların avantajları standartlar çerçevesinde ve akademik çalışmalarla anlatılmalıdır.
- Kaynakların stabil olması için üretici ile temasa geçip gerekli iyileştirmelerin yapılması ve herhangi bir değişiklik durumunda hızlı bir şekilde bilgi alınması sağlanmalıdır.

- Mineral katkıların çimento çeşitleri ve kimyasal katkıları ile uyumu araştırılmalı ve gerekli testler yapılmalıdır.
- Yüksek fırın cürufu gibi erken dayanımdan ziyade geç dayanıma etkisi olumlu olan mineral katkı kullanımı durumunda 28 günden ziyade 56 gün veya daha ileri yaş dayanımları dikkate alınmalıdır.

Çimento miktarını standartlar kapsamında kabul edilebilir seviyede azaltmak için alınabilecek diğer aksiyonlar ise:

- Standartlar açısından kullanılabilir nitelikte olsa dahi zayıf, kirli, yassı özelliklerde agrega kullanılmamalıdır.
- Metilen mavisi değeri yüksek olan (dayanımı olumsuz etkileyen kil vb. istenmeyen içerik) ince malzeme kullanımından olabildiğince sakınılmalıdır.
- Performans açısından daha yüksek nitelikte su azaltıcı katkıları tercih edilmelidir.
- Yüksek dayanım sınıflarında küp yerine silindir numune ile kalite kontrol süreçlerinin takip edilmesi sağlanmalıdır. (Bu konuda sadece üretici değil denetçi makamların da birlikte çalışması gerekmektedir.)
- Malzemelerin uyumluluğu araştırılmalıdır. Kimyasal katkı – çimento, çimento – mineral katkı uyumu bu anlamda öne çıkmaktadır.
- Beton bileşenlerinin olabildiğince stabil olması ve üretim süreçlerinin de uygun olması ile standart sapmanın düşük değerlerde kalması sağlanmalıdır.
- Agrega gradasyonu optimize edilmelidir. Pompalanabilirlik olumsuz etkilenmeyecek şekilde maksimum doluluk sağlanmalıdır.

Betonu akıllıca kullanmayı öğrendikten sonra, betondaki çimento miktarını da düşürmenin yolları keşfedilmelidir. Sıklıkla, gereksinimleri karşılamak için gerekenden daha fazla çimento kullanılabilmektedir. Bunun nedeni geleneksel bakış açısı, hızlı dayanım kazanma isteği ve karbona odaklı tasarım bilinçsizliğinden kaynaklanmaktadır. İngiltere’de 90 farklı beton karışımı ile yapılan bir çalışmada, aynı beton sınıfından kullanılan çimento miktarının 300 kg/m<sup>3</sup> ile 525 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir [17]. Daha fazla çimento kullanmanın çok farklı teknik nedenleri olabilir, ancak bu denli bir varyasyonu açıklamaya yetmeyecektir. Çimento dozajının performansı sağlamak nedeniyle artmasının başlıca nedenleri aşağı belirtilmiştir:

- Yanlış veya yetersiz beton tasarımı
- Kirli ince ya da iri agrega kullanımı
- Hatalı agrega gradasyonu
- Yanlış kimyasal katkı seçimi
- Karıştırma ekipmanlarından kaynaklı kusurlar
- Malzemelerin yoğunluklarının yanlış hesaplanması
- Betonun dayanım testindeki hatalar

### **Yakın Tedarik Kaynaklarının Tercih Edilmesi**

Beton hem üretimi hem de ham maddelerin tedariki açısından yerel bir malzemedir. Yine de bu konuda yapılacak iyileşmelerin etkisi oldukça büyük olacaktır. Betonda ağırlıkça en fazla kullanılan malzeme agregadır. 1 m<sup>3</sup> beton üretmek için yaklaşık 2 ton iri ve ince agrega kullanılır.

Agregadan sonra ise çimento gelmektedir. Bu nedenle başta agrega ve çimentonun, üretim tesisine olabildiğince yakın yerlerden tedarik edilmesi nakliye nedeniyle oluşacak karbon emisyonunu azaltacaktır. Ancak, bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Yakın bir kaynağa göre daha uzakta olan bir kaynaktan tedarik edilen agrega ya da çimentonun beton karışımında sağlayacağı avantaj daha yüksek olabilir. Bu yüzden konuya daha geniş bir çerçeveden bakmak faydalı olacaktır. Beton üretimiyle ilgili en büyük CO<sub>2</sub> emisyon kaynaklarından biri şantiyeye ulaşım ve betonu ihtiyaç duyulan yere pompalamak için gereken enerjidir. 2050 yılına kadar tüm taşımacılığın elektrik, hidrojen veya her ikisinin bir kombinasyonu ile sıfır emisyonlu araçlar tarafından gerçekleştirileceği varsayılmaktadır.

### Reçete Optimizasyonu ve Dijitalleşme

Erken dayanım ihtiyacı için mineral katkı içeriği daha düşük olan karışımlar, erken dayanım ihtiyacı olmayan yapı elemanları için ise daha yüksek oranlarda mineral katkı kullanılabilir. Bunun için de yüksek erken mukavemete ihtiyaç duymayan bina bileşenleri tanımlanmalıdır.

Agregaların sürekli dağılımı ile beton formülasyonunun optimizasyonu, granüler iskeletin nihai gözenekliliğini azaltır. Agregaların doldurmadığı bu boşlukları çimento hamuru (pastası) doldurur. Bu nedenle, granüler kaplamanın optimize edilmesi, belirli bir basınç dayanımı [18] için gerekli olan çimento miktarını azaltır. Standartlar çok daha azına izin verse de hazır beton üretiminde ortalama 300 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanılmaktadır [19]. Bu çimentonun bir kısmını ince dolgu maddeleri ile ikame etmek ve işlenebilirlik nedeniyle benzer hacimde hamur fazı tutmak mümkündür.

Karışımı optimize etmede zorluk yaratan ikinci neden kaliteli agrega teminidir. Agregalar da yerel malzemelerdir. Bu nedenle, yerel taş ocağı iyi bir agrega çeşitliliği sağlayamazsa, optimize edilmiş bir granüler iskelet tasarlamak mümkün olmayabilir ve gerekli dayanım ve işlenebilirlik performansını elde etmek için daha fazla çimento gerekebilir. Agreganın kalitesi ve gradasyonu çimento dozajının azaltılmasında oldukça etkili yöntemler olarak öne çıkmaktadır.

Dijitalleşme, betondan kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bina bilgi modellemesi (BIM) sayesinde yapıların hem üretim hem işletme hem de kullanım sonrası aşamalarındaki çevresel performansları daha proje başlamadan hesaplanabilmekte ve yapıların yaşam döngüsü analizi dijital ortamda simüle edilebilmektedir. Dijitalleşme ayrıca betonun nakliye sırasında izlenmesine ve doğru şekilde dökülmesine yardımcı olmaktadır. Çimento ve betona ilişkin veriler, karbon ayak izinin belirlenmesini sağlamak ve ayrıca inşaatta kullanılan malzemelerin kaynağını göstermek ve binaların kullanım ömrü boyunca enerji performansını izlemek için müteahhit ve bina kullanıcılarının kullanımına sunulmaktadır. Dijitalleşme ayrıca beton performansının tahmin edilmesine, agrega performansının belirlenmesine ve katkı maddelerinin optimize edilmesine yardımcı olabilmektedir [20].

### 28 Gün Yerine Daha İleri Yaş Dayanımlarına Bakılması

Hem ASTM hem de EN standartlarında 28 günlük dayanım zorunlu bir parametre değildir. Üretici, kullanıcı ve denetçi arasında önceden alınacak bir kararla 56 veya 90 günlük dayanımlar dikkate alınabilir. Yani 28 günde beton dayanımının standart limitini sağlamasından ziyade ileri yaşlarda sağlaması tercih edilebilir. Bu sayede özellikle sıcak havalarda daha yüksek miktarda mineral katkı kullanımının önü açılabilir.

Tasarım varsayımlarıyla ilgili bir diğer nokta, beton dayanımını değerlendirirken betonun yaşının önemidir. Beton dayanımı genellikle 28 günde test edilir. Bu, yalnızca Portland çimentosundan yapılmış betonun mukavemetinin genellikle nihai mukavemetine ulaştığı tipik zamandır. Betonda mineral katkıları kullanıldığında, mineral katkıların reaktifliği Portland çimentosu klinkerinden

daha yavaş olduğu için dayanım gelişimi de daha yavaştır. Özellikle, yüksek miktarda mineral katkı içeren beton daha uzun bir kürleme süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sürenin sonunda sadece Portland çimentosundan yapılmış betona benzer bir dayanım performansına sahip olunmaktadır [21, 22]. Bu nedenle, beton dayanımının 28 günden sonra, örneğin 56 günde değerlendirilmesi daha uygun olmaktadır.

### **Karbon Ayak İzi Düşük Çimento ve Bağlayıcıların Kullanımı**

THBB tarafından yapılan bir araştırma kapsamında Türkiye’de hazır beton üreticilerinin kullandığı çimento cinslerinin kullanım oranları tespit edilmiştir [13]. Hazır beton sektörü tarafından %67 oranında CEM I 42.5, %21,4 oranında CEM II/A 42.5, %6,5 oranında CEM II/B 42.5 ve %5,1 oranında diğer çimento cinsleri kullanılmaktadır.

Betonda hatta betonarmede en yüksek gömülü karbona sahip bileşen çimentodur. Bu nedenle hem üretici hem de tüketici daha düşük karbon ayak izi olan çimentoları tercih etmelidir. Ancak, buna karar vermek için farklı kaynaklara ait ürünlerin kıyaslanması gerekir. Bu konuda en güvenilir referans EPD (çevresel ürün beyanı) belgeleridir. Ülkemizde EPD belgeli çimento neredeyse yoktur. Birkaç firmanın dönemsel olarak aldığı belgeler mevcuttur. Ülkemizde EPD belgeli hazır beton bu bildirinin yazıldığı tarih itibarıyla yoktur. Sadece bazı firmaların kendi deklarasyonları mevcuttur.

Bunun dışında en etkili yöntem ise klinker oranı düşük çimento kullanımını tercih etmektir. Ülkemizde genel olarak en çok üretilen ve tüketilen çimento cinsi %55’lik oranla CEM I 42.5 R çimentosudur [15]. Oysa AB ülkelerinde en fazla CEM II/A tipi çimento tercih edilmektedir. Bu çimento ortalama %10 daha az klinker içermektedir [16].

Alternatif çimentolar bir anlamda çimento dünyasındaki paradigma değişikliğini temsil ederken, gelecekteki çimentonun nasıl olması gerektiğine dair çalışmaların bir sonucudur. Her ne kadar bazı alternatif çimentoların literatüre girişi 50-60 yıl öncesine dayansa da son yıllarda bu çimentolar (bağlayıcılar) özellikle karbon emisyonu açısından faydaları ile öne çıkmış ve daha fazla araştırmaya konu olmuştur. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- AAFA: Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül / Alkali activated fly ash
- AAS: Alkali ile aktive edilmiş cüruf / Alkali activated slag
- CCSC: Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu / Carbonated calcium silicate cement
- CSAC: Kalsiyum sülföalüminat çimentosu / Calcium sulfoaluminate cement
- MOC: Magnezyum oksiklorür çimentosu / Magnesium oxychloride cement
- MPC: Magnezyum fosfat çimentosu / Magnesium phosphate cement
- PÇ: Portland çimentosu
- RBC: Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

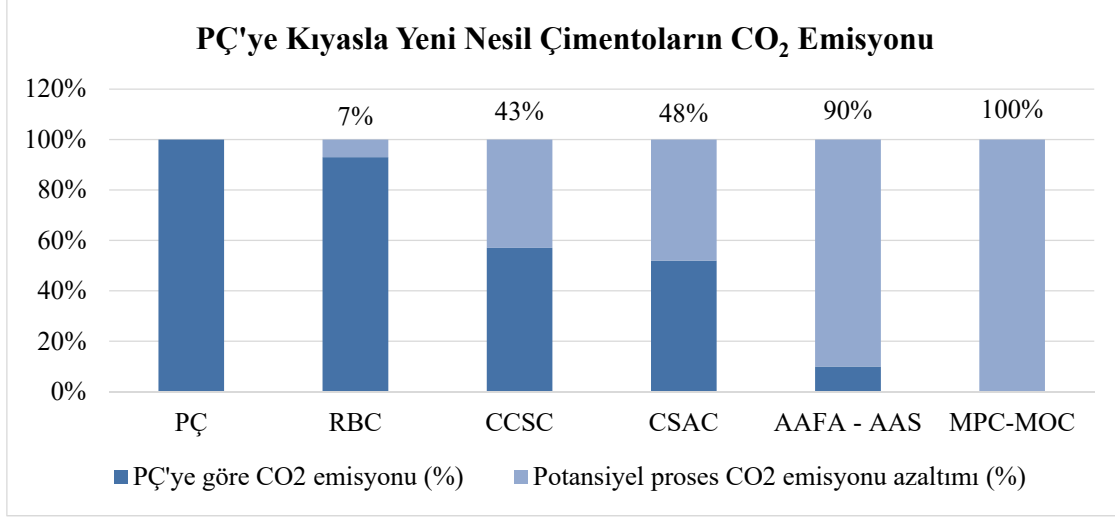
Şekil 3’te Portland çimentosuna (PÇ) kıyasla alternatif çimentoların karbon emisyonları görülmektedir.

### **Projelerde Daha Yüksek Dayanımlı Beton Tercih Edilmesi**

Tablo 1’de belirtildiği gibi daha yüksek dayanım sınıfında beton elde etmek için genel olarak çimento, daha doğru bir tabir ile bağlayıcı malzeme miktarının artması gerekmektedir. Bu karbon açısından olumsuz gibi gözükse de gerçekte kesinliği yoktur. Beton dayanımının artması



sonucunda taşıyıcı elemanlarının ebadı ve çelik donatı miktarı azalabilmektedir. Bu nedenle toplam fayda hesaplamasında bu unsurlar da dikkate alınmalıdır.



**Şekil 3 - Portland çimentosuna kıyasla alternatif çimentoların CO<sub>2</sub> emisyonu**

### Çevresel Etki Sınıfları

Genel olarak bir proje üzerinde çalışan mühendisler ve tasarımcılar genellikle tek bir çevresel etki sınıfı belirlemekte ve bu sınıf da en baskın etkiye ait olmaktadır. Ancak bir ev için dış beton ve iç beton aynı kısıtlamalara tabi değildir. Örnek olarak, bir ev XC1 C25/30 çevresel etki sınıfının yeterli olacağı iç mekân betonu ile XC4 C35/45'ten oluşabilen dış hava koşullarına maruz kalan beton arasında bir ayrımla inşa edilirse önemli miktarda karbon tasarrufu yapılabilmektedir.

### Yapısal Tasarım Optimizasyonu

Özellikle döşemeler yapıya en fazla yük getiren elemanlar olarak öne çıkmaktadır. Gerekli dayanım şartlarını sağlayan hafif beton kullanımı ile yapının maruz kaldığı yük hafifleyecek ve bu sayede daha az taşıyıcı elemana veya daha düşük kesitli elemanlara ihtiyaç duyulacaktır.

Yapısal optimizasyon, aynı yük taşıma kapasitesini daha az malzeme ile gerçekleştirme imkânı sağlar. Yüksek teknolojik hazırlık düzeyine sahip örnekler, öngörülen boşluklu döşemeler veya boşluklu döşemelerdir. Bu sistemlerin uygulanması, orijinal beton hacminin %35'ine kadar tasarruf edilmesini sağlayabilmektedir [23]. Yalnızca gerekli yükü taşımak için gerektiği kadar malzeme kullanan optimize edilmiş (organik) şekiller konusunda yeni gelişmeler beklenmektedir [23]. Paslanmayan donatı kullanımı, beton kaplamanın en aza indirilmesine izin verdiği için beton hacimlerini azaltabilen başka bir teknolojidir.

Betonarme bir yapının inşa edilme şekli, ortaya çıkan CO<sub>2</sub> emisyonları üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir. Kalıbın içine pompalanan beton genellikle daha yüksek bir bağlayıcı içeriğine ihtiyaç duyar ve bu nedenle pompalanmadan dökülen betona kıyasla daha yüksek bir CO<sub>2</sub> ayak izine neden olur [24].

Prefabrikasyon gibi daha sanayileşmiş bir süreç, fabrikada daha yüksek hassasiyet ve daha az atık yoluyla daha düşük malzeme talebine yol açabilir. Prensip olarak, modüler bir üretim, inşaatla daha yüksek bir verimlilik sağlar. Bununla birlikte, özellikle büyük boyutlu elemanlar için nakliye

mesafeleri kırsal alanlarda prekast betonu, ekonomik olarak zorlaştırabilir. Eklemeli (3 boyutlu) imalat ve yeni kalıp teknolojileri, malzeme açısından verimli şekiller sağlayabilir [25, 26].

Cambridge Üniversitesi tarafından hazırlanan bir raporda, yapısal elemanların tüm güvenlik faktörleri uygulandıktan sonra tipik olarak kapasitelerinin yalnızca %60-80'ini kullanmak üzere tasarlandığı vurgulanmıştır [27]. Malzemenin performansındaki belirsizlik, beton elemanları ile ilgili olarak bu aşırı tasarımın belki de temel bir nedenidir. Örneklem tutarlılığı, agrega performans varyasyonları, ortam sıcaklığı, operatör etkisi ve ek belirsizlikler göz önüne alındığında, tasarımcıların neden çok dikkatli davrandığı daha iyi anlaşılmaktadır. Bu nedenle; betonun davranışının gerçek zamanlı olarak daha iyi anlaşılması, kalite güvencesinin geliştirilmesine ve aşırı tasarımın en aza indirilmesine yardımcı olabilir.

Geometri kullanılarak, daha fazla betonun basınç bölgesinde kalması için kalıpları ayarlamak mümkündür. Karmaşık kalıplar gerektiren betonarme yapılar, işçilik maliyetleri ve operasyonel zorluklar nedeniyle tercih edilmemektedir. Ancak bu sorunlar, günümüzdeki bilgisayar programlarının gücü ve gelişmiş dijital üretim teknikleri ile çözülebilmektedir. ETH Zürih'teki araştırmacılar, gereksiz beton kullanımını önlemek için yenilikçi kalıp teknikleri kullanarak yalnızca basınca dayalı yapıların oluşturulması için hesaplama tasarımının nasıl uygulanacağı üzerinde çalışmaktadır. Bu, görsel olarak çarpıcı ve aynı zamanda malzeme açısından verimli yapılara neden olabilecektir [17].

### **Geri Kazanılmış Agrega Kullanımı**

Kentsel çevrede en yaygın malzemeler inşaat malzemeleridir. Ömrünü tamamlayan yapıların yıkılması ile açığa çıkan atıkların çoğu geri dönüştürülebilir, ancak bunların çoğu aşağı geri dönüştürülür (downcycle) yani malzeme değer kaybeder ve genelde ait oldukları sektör dışında kullanılır. Beton atıkları yol dolgularında kullanılabilir, ancak nadiren yeni binalar için bir ham madde olarak değerlendirilir. Aslında bu milyonlarca ton malzemeyi yeni inşaat projeleri için yeniden kullanmanın birçok avantajı vardır. Malzemeler zaten şehirlerde yer almaktadır. Bu nedenle uzun tedarik zincirlerine gerek kalmaz. Döngüsel ekonomi stratejisine sahip tüm şehirler için kent madenciliği, bu malzemelerden mümkün olduğu kadar uzun süre boyunca değer elde edebilir.

Geri kazanılmış agrega içeren betonun özellikleri hem agrega türünden hem de karışımdaki oranından güçlü bir şekilde etkilenir. Geri kazanılmış agrega ikamesi, su emilimini artırarak betonun dayanıklılığını azaltabilir ve dolayısıyla işlenebilirliği korumak için süperakışkanlaştırıcıyı ve su dozajını artırabilir [28]. Sonuç olarak, geri kazanılmış agrega kullanımı çimento talebini 20-40 kg/m<sup>3</sup> artırabilmektedir [29]. Buna karşılık iyi kalitede geri dönüştürülmüş yerel agregalar, nakliye tasarrufları da dahil olmak üzere genel olarak karbon tasarrufu sağlayabilir. Ancak, kullanımlarını doğal agregalarla karşılaştırmak için ayrıntılı bir sürdürülebilirlik ve karbon değerlendirmesi yapılması gerekmektedir.

Beton atığı hem agrega hem de çimento pastası içermektedir. Çimento pastasının geri kazanılması da son derece etkilidir. Bu ince malzeme, kalsiyum kaynağı olarak klinker üretimi için bir ham madde olarak etkin şekilde kullanılabilir. Bu sayede proses kaynaklı emisyonlar düşürülebilmektedir [30].

Ülkemizde mevcut durumda inşaat ve yıkıntı atıklarına yönelik seçici yıkım mevzuat kapsamında bir koşul olarak belirtiliyor olsa da pratikte uygulanmamaktadır. İnşaat ve yıkıntı atıkları genel olarak atık sahalarında depolanmakta ve çok az sayıda geri kazanım tesisinde geri dönüşüme tabi tutulmaktadır. Buradan elde edilen geri kazanılmış agregalar ise alt temel dolgusu olarak değerlendirilmektedir.

## SONUÇ

Sürdürülebilirlik ve özellikle dögüsel ekonomi açısından hazır beton sektörü birçok potansiyele sahiptir. İklim değışikliği ile mücadelenin ölkelerin ve şirketlerin ajandalarında giderek en önemli madde olarak öne çıkması ve 1,5°C senaryosunun küresel bir hedef haline gelmesi bu potansiyeli daha da görünür hale getirmiştir. Hazır beton sektörünün daha sürdürülebilir bir iş modeline geçmesi sadece üreticilerin değil; politika yapıcılarının, müşterilerin, şartname ve standart hazırlayıcıların, tedarikçilerin ve hatta tüm paydaşların birlikte hayata geçirebileceği kolektif bir süreçtir.

## Kaynaklar

1. Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 100 Maddede Sürdürülebilirlik Rehberi, Sürdürülebilir Kalkınma Derneği, 2017.
2. Gagg, C. R., “Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis,” *Engineering Failure Analysis* 40 (May 2014): 114–40.
3. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>, Erisim tarihi (10.07.2022)
4. <https://www.thbb.org/sector/istatistikler/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
5. [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188\\_GABC\\_en%20%28web%29.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf), Erisim tarihi (10.07.2022)
6. Larson, W., Came, F., “Concrete as a Carbon Sink. Rethinking Carbon Sequestration in the Built Environment,” Building Resilience Coalition, 2018.
7. Guo, R., Wang, J., Bing, L., Tong, D., Ciaıs, P., Davis, S. J., Andrew, R. M., Xi, F., and Liu, Z., “Global CO<sub>2</sub> Uptake By Cement From 1930 to 2019,” *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 1791–1805, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1791-2021>, 2021.
8. Lehne, J., and Preston, F., Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs, 2018.
9. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>, Erisim tarihi (10.07.2022)
10. <https://spot.ul.com/blog/embodyed-vs-operational-carbon/>, Erisim tarihi (10.07.2022)
11. Lewis, M., Huang, M., Waldman, B., Carlisle, S., and Simonen, K., Environmental Product Declaration Requirements in Procurement Policies, Carbon Leadership Forum, University of Washington. Seattle, WA. 2021.
12. International Energy Agency, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, IEA, 2018.
13. Türkiye Hazır Beton Birliği, Hazır Beton Yaşam Dögüsü Rehberi, 2021.
14. Mission Impossible Partnership, Low-Carbon Concrete and Construction:A Review Of Green Public Procurement Programmes, 2022.
15. Türk Çimento, 2011-2020 İstatistik Kitabı, Türk Çimento Yayınları, 2021.
16. Türk Çimento, Katkılı Çimentolar EN 197-1 ve EN 197-5 Standartları ve Belgelendirmesi Semineri, <https://www.youtube.com/watch?v=ZPzCak1Nf0w>, Erisim tarihi (10.07.2022)
17. <https://industry europe.com/sectors/construction-engineering/structural-concrete-in-a-zero-carbon-future/>, Erisim tarihi (10.07.2022)

18. Müller, H.S, Haist, M., Vogel, M., “Assessment of The Sustainability Potential of Concrete and Concrete Structures Considering Their Environmental Impact, Performance and Lifetime,” *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 321–337. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039.
19. Müller, C., “Use of cement in concrete according to European standard EN 206-1,” *HBRC J.* 8 (2012) 1–7. doi:10.1016/j.hbrcj.2012.08.001.
20. Cembureau, Cementing the European Green Deal, Cembureau Publication, 2020.
21. Khokkar, M., Rozière, E., Turcry, Ph., Grondin, F., Loukili, A., “Mix Design of Concrete With High Content of Mineral Additions: Optimisation to Improve Early Age Strength,” *Cement and Concrete Composites*, 32(5), 2010.
22. Toutanjia, H., Delatte, N.; Aggoun, S., Duval, R.; Danson, A., “Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete,” *Cement and Concrete Research*, 34, 2004.
23. VDZ, Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector, Verein Deutscher Zementwerke, 2021.
24. Abebe, J., Lohaus, L., “Effects of The Composition and Amount of Paste on The Pumpability and Pump-Stability of Flowable Concretes,” XXII Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavik, Iceland, Jan 2014, Publication No. 50-2/2014.
25. Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M., “Additive Manufacturing Technology and Its Implementation in Construction as an Eco-Innovative Solution,” *Automation in Construction*, 93, 2018.
26. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D., “Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges,” *Composites Part B: Engineering*, 143, 2018.
27. Minimising Energy in Construction (MEICON) Survey Report, University of Cambridge, 2018. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/287863>, Erişim tarihi (14.07.2022)
28. Robalo, K., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., “Experimental Development of Low Cement Content and Recycled Construction and Demolition Waste Aggregates Concrete,” *Construction and Building Materials*, Volume 273, 2021.
29. Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., Althaus, HJ., “Comparative LCA of Recycled and Conventional Concrete For Structural Applications,” *Int J Life Cycle Assess* 18, 909–918, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>
30. Pellegrino, C., Faleschini, F., “Recycled Aggregates for Concrete Production: State-of-the-Art. In: Sustainability Improvements in the Concrete Industry,” *Green Energy and Technology*. Springer, Cham, 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28540-5_2).

# Alkanolamin Türlerinin Portland Uçucu Küllü Çimentoların Priz Süresi ve Dayanım Gelişimine Etkileri

Berna Orhon KOLUKISA<sup>1</sup>, Bimen KADİROĞLU<sup>2</sup>, Mert Yücel YARDIMCI<sup>3</sup>

## ÖZET

*Bu çalışmada Portland çimentosu üretiminde öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan alkanolaminlerden trietanolamin (TEA), triisopropanolamin (TIPA) ve dietanolisopropanolamin (DEIPA) türlerinin Portland uçucu küllü çimentoların priz süresi ve basınç dayanımı gelişimine etkileri incelenmiştir. Ağırlıkça %65 Portland çimentosu klinkeri, %5 alçıtaşı ve %30 silissi uçucu kül kullanılarak üretilen bir Portland uçucu küllü çimentonun priz başlangıç ve bitiş süreleri ile 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları katkısız ve 250, 500 ve 1000 ppm TEA, TIPA ve DEIPA katkılı karışımlarda belirlenmiştir. Deney sonuçları %30 uçucu kül içeren Portland çimentolarının priz süreleri ve dayanım gelişimlerinin kullanılan alkanolamin türü ve dozajından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Alkanolaminlerin çalışmada kullanılan Portland uçucu küllü çimentonun 2 günlük dayanımlarını geliştirirken 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında önemli bir gelişme sağlamadığı belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Portland uçucu küllü çimento, alkanolamin, TEA, TIPA, DEIPA.

## ABSTRACT

### **Effects of Alkanolamine Types on Setting Time and Strength Development of Portland – Fly Ash Cements**

*The effects of triethanolamine (TEA), triisopropanolamine (TIPA), and diethanolisopropanolamine (DEIPA), which are alkanolamine types used as grinding aids in cement production, on setting time and compressive strength development of Portland - fly ash cements were investigated in this study. Initial and final setting times and 2, 28, and 56-day compressive strengths of a Portland-fly ash cement, which is a blend of 65% Portland cement clinker, 30% siliceous fly ash, and 5% gypsum, were determined on the blank and 250, 500 and 1000 ppm TEA, TIPA and DEIPA added mixtures. The experiments showed that the setting times and compressive strength developments of Portland cements containing 30% fly ash were significantly influenced*

---

1 Kentçim Çimento A.Ş., Manisa - berna.kolukisa@kentcim.com.tr

2 Lyksor Kimya A.Ş., İzmir - bimen.kadiroglu@lyksor.com

3 İstanbul Okan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - mert.yardimci@okan.edu.tr

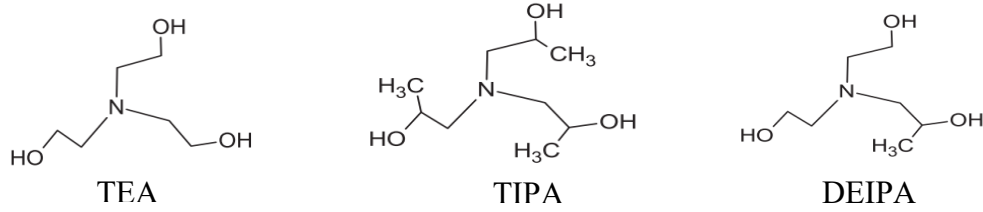
by the alkanolamine type and dosage. It was found that the alkanolamines enhanced the 2-day compressive strength of Portland – fly ash cement but did not improve the 28 and 56-day compressive strength.

**Keywords:** Portland-fly ash cement, alkanolamine, TEA, TIPA, DEIPA.

## GİRİŞ

Portland çimentosu klinkerinin uçucu kül ile birlikte öğütülmesi veya Portland çimentosuna sonradan eklenerek homojen karıştırılması ile elde edilen katkılı çimentolar hem daha düşük maliyetli çimento üretimini sağlamakta hem de CO<sub>2</sub> emisyonunu düşürerek çevresel zararların azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan, uçucu külün betonun kalıcılığını artırması diğer bir avantaj olarak Portland uçucu küllü çimentoların önemini arttıran diğer bir özelliktir. Ancak, Portland çimentosu-uçucu kül karışımlarının uçucu külün yavaş gelişen puzzolanic reaksiyonu nedeniyle erken dayanımının genellikle düşük olması bu karışımların erken dayanımının artırılması yönündeki araştırmalara ilgiyi arttırmıştır. Uçucu kül katkılı çimentoların erken dayanımının, uzun dönemli durabilite performansında azalma olmadan, katkısız çimentolar seviyesine getirilmesi, bu çimentoları daha ince üreterek kısmen başarılmakla birlikte (1), alkali sülfatlar ve alkanolaminler gibi kimyasallarla uçucu kül aktivitesinin artırılması yöntemleri de bulunmaktadır (2-4).

Alkanolaminler temel olarak çimento klinkeri öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan kimyasal katkılardır (5,6). Alkanolamin bir terim olarak alkan (veya parafin) bir ana zincirde hidroksil ve amino fonksiyonel grupları içeren kimyasal bileşiklerin geniş bir ailesini kapsar. Öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkı olarak kullanılan tipik etanolaminler Şekil 1’de şematik olarak gösterilen kimyasal yapıdadırlar.



**Şekil 1** - Değişik türde alkanolaminlerin şematik moleküler yapısı (5)

TEA kullanım dozajına göre priz hızlandırıcı ve priz geciktirici etkiler gösterebilen bir kimyasal katkıdır ve genellikle doğrudan kullanımdan daha çok, diğer bazı kimyasal katkıların üretiminde bir bileşen olarak kullanılır. TEA kimyasal katkı formülasyonlarında, özellikle düşük C<sub>3</sub>A içerikli çimentolarda yüksek dozajda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı sonunda meydana gelebilecek priz süresi uzamalarının kontrolü için, priz hızlandırıcı bileşen olarak kullanılır. TEA’nin Portland çimentosu sistemlerinin priz süresi üzerine etkileri dozaja göre değişiklik göstermektedir. TEA’nin 200 ppm gibi düşük dozajlarda priz hızlandırdığı, 500 ppm gibi dozajlarda prizi yavaşlattığı ve 1000 ppm gibi dozajlarda ise prizi çok daha fazla hızlandırdığı belirtilmektedir (3). TEA’nin varlığında C<sub>3</sub>A ile alçıtaşının arasındaki reaksiyonlar, etrenjit oluşumu ve bunu takiben etrenjitin monosülfata dönüşümü de hızlanır (7, 8, 19). TEA’nin C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S’in çözünmesini erken yaşlarda hızlandırarak etrenjit, kalsiyum hidroksit (portlandit) ve C-S-H oluşumunu katkısız çimento hamuruna göre geliştirerek erken dayanımı geliştirdiği düşünülmektedir (8, 9). TEA’nin özellikle yüksek dozajlarda C<sub>3</sub>S’in hidratasyonunu geciktirdiği ve kısmi hidratasyonuna neden olduğu belirtilmektedir (19). Erken dayanım TEA kullanımı ile gelişirken ileri yaş dayanımlarında beklenen gelişmenin olmaması TEA’dan kaynaklanan amin moleküllerinin C<sub>3</sub>S yüzeyinde kalın bir tabaka oluşturarak çözünme ve difüzyonu önlemeleri (16)

ve oluşumu TEA tarafından hızlandırılan etrenjit ile TEA'nin komplekslerinin C<sub>3</sub>A'nin reaksiyonlarını önlemeleri (17) olarak gösterilmektedir. TEA'nin uçucu külden Al, Ca ve Fe çözünmesini arttırması nedeniyle uçucu kül-Portland çimentosu sistemlerinin erken dayanımını arttırdığı rapor edilmiştir (10). Ancak hidratasyonun ileriki aşamalarında TEA'nin portlandit yüzeylerine yapışarak birikmesi ve kısmen kalsiyum hidroksit tarafından emilmesi nedeniyle çözültide konsantrasyonunun düşerek etkinliğinin azaldığı belirtilmektedir. TEA'nin çimento hidratasyonu üzerindeki etki mekanizması özet olarak (i) C<sub>3</sub>A ile alçıtaşı arasındaki kimyasal reaksiyonları hızlandırmak, (ii) yüksek dozajlarda AFt'nin AFm'ye dönüşümünü hızlandırmak ve (iii) hegzagonal alüminat hidratların formasyonunu ve kübik forma dönüşümlerini hızlandırmak olarak kabul edilir. TEA'nin varlığında kalsiyum hidroksitin miktarının azaldığı ve TEA'daki oksijen ile çimentodan kaynaklanan Ca<sup>+2</sup> iyonları arasındaki etkileşimden meydana gelen TEA- Ca<sup>+2</sup> yapılarının oluşması nedeniyle portlanditin miktar ve morfolojisinde değişimler meydana geldiği belirtilmektedir (17).

TIPA'nin sadece alçıtaşı ve Portland çimentosu klinkerinden oluşan sistemlerde hem erken hem de ileri yaş dayanımlarını geliştirdiği rapor edilmiştir. TIPA'nin Fe<sup>+3</sup> iyonu ile kompleks geliştirebildiği ve C<sub>4</sub>AF'nin hidratasyonunu alçıtaşı tamamen harcanmış olsa bile hızlandırdığı belirtilmektedir (11). TIPA'nin standart kür uygulanmış %30 uçucu küllü Portland çimentosu hamurlarının 7 ve 60 günlük basınç dayanımlarını belirgin derecede arttırdığı rapor edilmiştir. Bu artışların TIPA'nin uçucu külün çözünmesini hızlandırarak pozzolanik reaksiyonu geliştirip hamur sisteminin boşluk yapısını iyileştirmesi yoluyla olduğu belirtilmiştir. TIPA içeren karışımlarda civa porozimetresi ile belirlenen boşluk yapısına yönelik çalışmalar özellikle yüksek dozajda TIPA kullanımı ile sürüklenmiş hava miktarında artış olduğunu, bunun da basınç dayanımı kayıplarına neden olabileceği belirtilmektedir (11, 14).

DEIPA'nin Portland çimentosu sistemlerinde özellikle alüminat fazlarının hidratasyonunu geliştirdiği rapor edilmiştir (15). DEIPA'nin erken yaşta etrenjit formasyonunu hızlandırdığı, alüminyum ve demir fazlarının ikincil reaksiyonlarını geliştirdiği, etrenjitin monosülfata dönüşümünü hızlandırdığı ve mikro-kristal yapıya sahip kalsiyum hidroksit oluşumunu sağladığı; ileri yaşlarda ise C<sub>3</sub>S'in reaksiyonlarını geliştirip daha az boşluklu bir mikro yapı oluşumu sağlayarak ileri yaş dayanımlarında artışlara neden olduğunu rapor eden çalışmalar da bulunmaktadır (6). Öte yandan, DEIPA'nin çimento hidratasyonunu ilk 72 saatte hızlandırarak erken dayanımı arttırdığı, ancak daha boşluklu bir yapıya neden olarak ileri yaş dayanımlarında beklenen yüksek dayanımın elde edilemediğini rapor eden çalışmalar da vardır. Genel olarak alkanolaminlerin çimentolu sistemlerde alüminatlarla etkileşime girerek hidratasyon ürünlerinin oluşum mekanizmasını etkilediği ve bazı morfolojik değişimlere neden olduğu belirtilmektedir (15). DEIPA'nin kireçtaşı tozu (CaCO<sub>3</sub>) içeren Portland çimentolarının priz sürelerini önemli derecede etkilemeden, 3 günlük dayanımları %28, 28 günlük dayanımları ise %20 oranında geliştirdiği (12) ancak DEIPA içeren karışımlarda çimento-süperakışkanlaştırıcı uyumunun azaldığı rapor edilmiştir (12, 13).

## AMAÇ

Bu çalışmada aslında çimento öğütme kolaylaştırıcı kimyasal katkı olarak kullanılan TEA, TIPA ve DEIPA türü alkanolaminlerin %65 Portland çimentosu klinkeri, %5 alçıtaşı ve %30 silisi ucu kül karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimentoların priz süreleri ve dayanım gelişimlerine etkilerinin karışım suyuna katılmaları halinde incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma TEA, TIPA ve DEIPA'nin öğütme kolaylaştırıcı olarak performanslarını ele almaktadır.

## DENEYSEL YÖNTEM

### Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışmada kullanılan uçucu küllü çimento, bir çimento fabrikasından elde edilmiş Portland çimentosu klinkerlerinin laboratuvar ölçeğindeki bilyalı değirmende %5 oranında alçıtaşı ile belirli bir inceliğe kadar birlikte öğütülmesi ve ardından öğütülmüş Yatağan Termik Santrali uçucu külünün ağırlıkça %30 oranında ikame edilmesi ile elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılmadan önce bilyalı laboratuvar değirmeninde öğütülmüştür. Kullanılan klinker ve uçucu külün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.

**Tablo 1** - Uçucu küllü çimento üretiminde kullanılan bileşenlerin bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub> <sup>(a)</sup>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Sertbest CaO	Kızdırma % (b)	İncelik (b)	45 µm üzeri (%)	Özgül ağırlık
Klinker	21.26	5.96	2.48	66.21	1.21	0.39	0.4	1.01	0.77	0.64	3149	16.90	3.12
Portland Çimentosu	20.22	5.666	2.36	64.7	1.27	2.33	0.43	0.96	-	1.62	3650	6.5	3.11
Uçucu kül												40.82	
Öğütülmüş Kül	50.72	18.12	7.43	12.88	2.97	3.82	1.32	2.14	5.5	0.57	-	8.5	-
Uçucu küllü çimento	27.06	9.314	3.84	50.7	1.8	3.36	0.71	1.3	2.02	1.59	4150	7.2	2.97

(a): XRF yöntemi ile, (b): Blaine yöntemi ile (cm<sup>2</sup>/g)

Kullanılan klinkerlerin kimyasal analizine göre Bogue formülleri ile hesaplanan ana bileşenleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2** - Kullanılan klinkerin ana bileşenleri

C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
61.2	14.8	11.6	7.5

Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin özellikleri Tablo 3’te görülmektedir.

Çalışmada TEA, TIPA ve DEIPA türü alkanolaminler üretilen Portland – uçucu küllü çimentonun karışım suyuna çimento ağırlığına göre 250 ppm (0.025%), 500 ppm (0.05%) ve 1000 ppm (0.1%) konsantrasyonlarında katılarak kullanılmıştır. Dolayısıyla hiç kimyasal katkı içermeyen kontrol karışımı dahil toplam 10 adet çimento hamuru karışımı üretilmiştir.

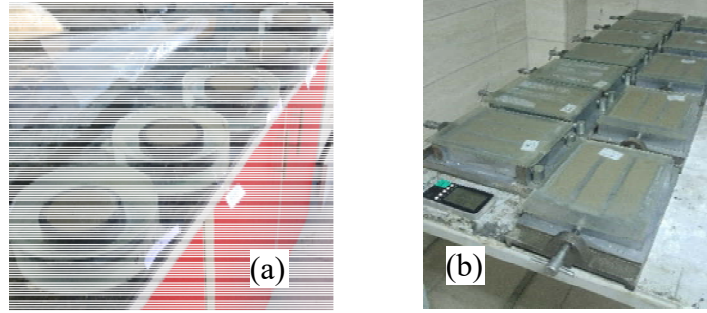


**Tablo 3 - Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin bazı özellikleri.**

	Kimyasal adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Katı madde (%)	pH
TEA	Trietanolamin	1.12	85	10
TIPA	Triisopropanolamin	1.03	85	11
DEIPA	Dietanol-isopropanolamin	1.08	85	12

### Karışımlar ve Uygulanan Testler

Çalışmada priz süresi ve dayanım gelişimi tayini için hamur örnekler üretilmiştir. Üretilen çimentoların alkanolamin varlığında normal kıvam için gerekli olan su miktarları TS EN 196-3'e göre (20) belirlenmiştir. Alkanolaminlerin çimento hamuru üretilirken hiç kullanılmaması ve en yüksek dozajda (1000 ppm) kullanılması hallerinde normal kıvam suyunun fazla değişmediği görülmüştür. Bu gözlem alkanolaminlerin çok düşük sterik etkileri nedeniyle hamur akıcılığında fazla bir değişiklik yapmadığı yönündeki literatüre paraleldir (3, 16). Dolayısıyla tüm çimento hamuru karışımlar belirlenen kıvam sularında (su/bağlayıcı oranı 0.30 civarında) bir Hobart mikser kullanılarak üretilmiştir. Karışım tamamlandıktan sonra karışımların priz sürelerinin belirlenmesi için Vicat halkalarına örnekler alınarak priz süresi su içerisinde belirlenmiştir (Şekil 2a).



**Şekil 2 - Priz süresi (a) ve dayanım tayini (b) için alınan örnekler**

Serilerin dayanım gelişimlerinin belirlenmesi için TS EN 196-1 (21) prosedürü takip edilerek 40 x 40 x 160 mm boyutlarında 6 adet prizmatik örnek alınmıştır. Bu örnekler, üstü cam plaka ile kapalı olarak (Şekil 2b) laboratuvar koşullarında 1 gün beklendikten sonra kalıplarından çıkarılarak dayanımlarının belirleneceği günlere kadar (2, 28 ve 56 gün) standart su küre koşullarında bekletilmişlerdir. Prizmatik örneklerin basınç dayanımları 3 noktalı eğilme deneyi sonrası kalan parçalar üzerinde gerçekleştirilen eğilme sonrası basınç deneyi ile belirlenmiştir. Her bir yaş için 2 prizmatik örnek eğilme deneyinde kullanıldığından dolayı bu çalışmada rapor edilen basınç dayanımları her yaş için 4 örnek ortalamasıdır.

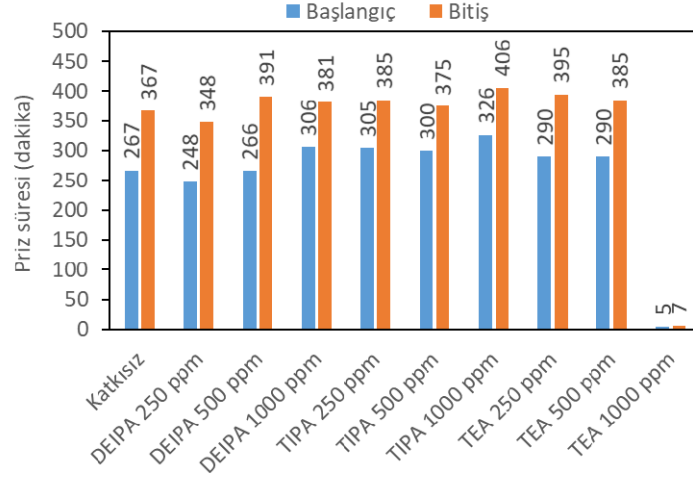
## DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### Priz Süresi Sonuçları

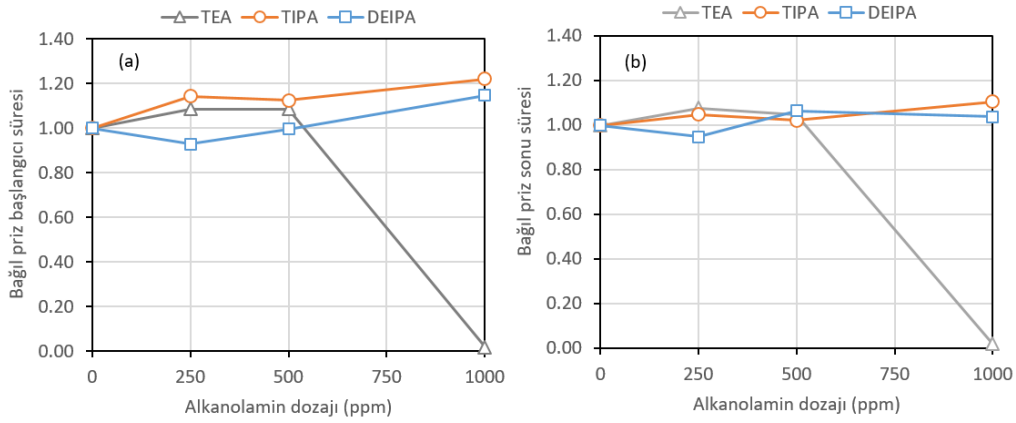
Hazırlanan çimento hamurlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 3'te görülmektedir.

Şekil 3'ten görüldüğü gibi, kimyasal özellikleri Tablo 1'de görülen Portland çimentosu klinkeri ve uçucu kül kullanılarak, %65 klinker, %30 silissi uçucu kül (Yatağan Termik santrali) ve %5 alçıtaşı karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimentonun priz süreleri kullanılan alkanolamin

türü ve dozajından önemli derecede etkilenmektedir. Kullanılan çimentonun priz başlangıç ve sonu 267 ve 367 dakika olarak ölçülmüştür. Alkanolamin kullanımının üretilen uçucu küllü çimentoların priz sürelerinde meydana getirdiği değişimler, her bir seride alkanolaminsiz karışıma göre bağıl priz süresi olarak Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 3 - Alkanolamin türü ve dozajının %30 uçucu kül içeren çimentoların priz sürelerine etkileri.



Şekil 4 - Alkanolamin içeren karışımların katkısız karışıma göre bağıl priz başlangıcı (a) ve priz sonu (b) süreleri.

Şekil 3 ve Şekil 4'ten görüldüğü gibi, alkanolamin kullanımı Portland uçucu küllü çimentoların priz sürelerini alkanolaminsiz karışıma göre genellikle uzatmıştır. Kullanılan alkanolamin türü ve konsantrasyonunun önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. TEA kullanımı ile 500 ppm dozaja kadar priz sürelerinde %10 civarında uzama meydana gelmişken, 1000 ppm dozajda priz başlangıcı ve sonu 5 ve 7 dakika seviyelerine düşerek çok hızlı priz oluşmuştur (Ani priz belirtilerine benzer olan bu olgu, normal Portland çimentosu sistemlerinde yetersiz alçıtaşı kullanımı sonucu meydana gelen olaydan farklı olduğu için çok hızlı priz olarak anılmıştır). TIPA kullanımı priz başlangıç süresini artan dozajla birlikte giderek uzatmıştır. En düşük dozaj olan 250 ppm'de priz başlangıç süresindeki uzama %14, 1000 ppm konsantrasyonda meydana gelen

priz başlangıç süresi uzaması ise %22 seviyesindedir. Priz sonu süresinde uzama ise TIPA kullanımını ile 500 ppm dozaja kadar çok hafif olmuş (%5) ancak 1000 ppm'de priz sonu süresi katkısız kontrol karışımına göre %10 civarında uzamıştır. DEIPA'nin priz sürelerine etkisi 500 ppm'e kadar TEA ve TIPA'nin tersine olmuştur. DEIPA 250 ppm dozajda priz süresini hafifçe kısaltmış (priz başlangıcı %7, priz sonu %5), daha yüksek konsantrasyonlarda ise priz süresi uzamıştır. Bin ppm'lik en yüksek dozajda priz başlangıcı katkısız karışıma göre %15 uzamışken priz sonu süresinde çok önemli bir değişiklik olmamıştır. Şekil 3 ve 4'ten görüldüğü gibi alkanolaminlerin uçucu küllü çimentoların priz süresine etkileri kullanılan alkanolamin türü ve dozajına göre değişiklikler göstermektedir. TEA ve TIPA 500 ppm dozaja kadar priz sürelerini uzatırken DEIPA priz süresini 250 ppm'de kısaltmış, 500 ppm'de değişikliğe neden olmamıştır. Alkanolamin türleri arasındaki en büyük farklılık 1000 ppm dozajda gözlenmiştir. TIPA ve DEIPA bu dozajda priz başlangıç süresini %20'ye yakın seviyede uzatırken TEA'da ise çok hızlı priz gözlenmiştir. TEA'nin çok hızlı prize neden olması  $C_3A$ 'nin çok hızlı reaksiyonu ve hızlanan etrenjit formasyonuna bağlanmaktadır. Açıklanan mekanizmaya göre, TEA bir taraftan  $C_3S$ 'in reaksiyonunu geciktirici bir etki yaparken, diğer taraftan  $C_3A$ 'nin üzerine hızlıca yapışarak normalde  $C_3A$ 'nin çok hızlı reaksiyonunu yavaşlatmak üzere  $C_3A$  yüzeyinde oluşması beklenen sülfatürün tabakanın (alçıtaşından kaynaklanan) oluşumunu etkileyerek  $C_3A$ 'nin hızlı reaksiyonunun kontrolünü önlediği belirtilmektedir (7). TEA'nin yüksek dozajda kullanımı ile gözlenen hızlı priz olayı Yaphary vd. (17) tarafından ise başka bir mekanizma ile açıklanmıştır. Buna göre, TEA varlığında artan etrenjit oluşumu sonrasında meydana gelen TEA-etrenjit formasyonu  $C_3A$ 'nin etrafını hızlıca kaplayarak ileri hidrasyonunu önlemekte, bu durumda  $C_3S$ 'in çözünmesi hızlıca artarak çok hızlı bir C-S-H oluşumu nedeniyle hızlı prize neden olmaktadır.

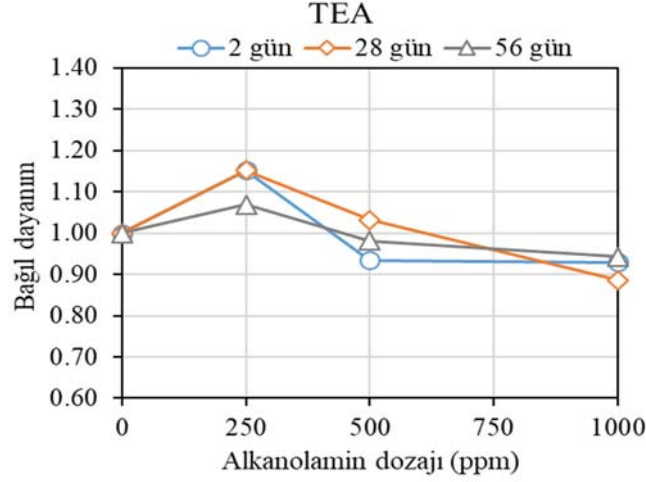
### Basınç Dayanımı Sonuçları

TEA, TIPA ve DEIPA alkanolamin katkılarının %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentonun 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarına etkileri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de katkısız karışımın ilgili günlerdeki basınç dayanımlarına göre bağıl basınç dayanımı olarak verilmiştir. Alkanolaminsiz çimento hamuru örneklerinin 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları Tablo 4'de standart sapma değerleri ile birlikte görülmektedir.

**Tablo 4** - %65 klinker, %30 uçucu kül ve %5 alçıtaşı karışımından oluşan Portland uçucu küllü çimento hamuru karışımlarının 2, 28 ve 56 günlük ortalama basınç dayanımları (standart sapma değerleri parantez içerisinde gösterilmiştir).

Basınç dayanımları (MPa)	2 gün	28 gün	56 gün
%65 klinker + %30 uçucu kül + %5 alçıtaşı	39.9 (1.7)	87.2 (1.3)	93.0 (2.2)

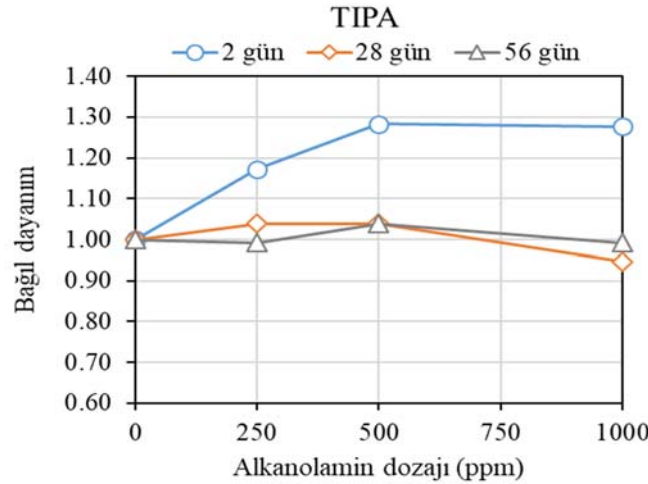
Şekil 5'ten görüldüğü gibi, 250 ppm'lik TEA dozajı uçucu küllü çimentonun 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarında artışlara neden olmuştur. En yüksek artış katkısız kontrol karışımına göre %15 ile 2 ve 28 günlük dayanımlarda elde edilmiştir. 56 günlük örneklerde kontrol karışımına göre basınç dayanımı artışı %7 olmuştur. TEA dozajının artırılması ile birlikte kontrole göre basınç dayanımı artışı kaybolmuş, hatta bazı günlerde kontrol karışımından daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Beş yüz ppm dozajda 2 günlük örneklerin basınç dayanımı kontrolden %7 daha azdır. Bin ppm dozajda ise (çok hızlı prize neden olan dozaj) 2, 28 ve 56 günde elde edilen basınç dayanımı değerleri kontrol karışımından yaklaşık %10 civarında daha düşüktür.



Şekil 5 - TEA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Heinz vd. (10) TEA'nin uçucu külün çözünürlüğünü artırarak uçucu külden Al, Ca ve Fe iyon salınımını artırdığını belirlemiştir. Gartner ve Myers (3) TEA ve TIPA'nin çimentolu sistemlerde dayanım gelişimindeki etkilerini demir iyonu taşınımı ile açıklamıştır. Bu araştırmacılar TEA ilavesi ile daha fazla demirin çözündüğünü ve daha fazla mono veya tri-sülfat oluştuğunu rapor etmiştir. Dolayısıyla Portland çimentosunun kompozisyonuna bağlı olmak üzere, literatürde Portland çimentolu sistemlere TEA ilavesi ile dayanım artışlarının rapor edildiği görülmektedir (2). Öte yandan, TEA içeren serilerin ileri yaş gelişiminin erken yaşlardaki kadar olmadığı, hatta katkısız duruma göre daha az dayanım elde edildiği de görülmektedir. İleri yaşlardaki bağıl dayanımın düşük olması bazı araştırmacılar tarafından TEA'nin kalsiyum hidroksit tarafından emilmesine bağlı olarak konsantrasyonunun düşmesi (3) ve ilk başta hızlanan  $C_3A$  reaksiyonu nedeniyle meydana gelen etrenjit artışı ile oluşan TEA-etrenjit komplekslerinin  $C_3S$ 'in etrafını sararak difüzyonunu ve çözünmesini engellemesine bağlanmaktadır (17).

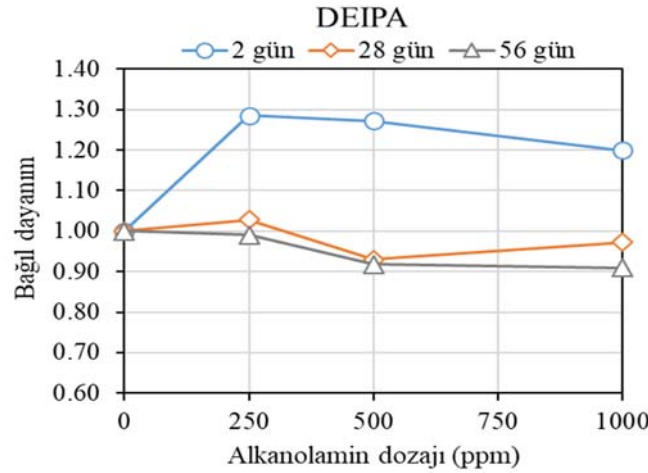
Şekil 6'da TIPA'nin %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimento hamurlarının 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları ilgili yaşlarda katkısız kontrol karışımına göre bağıl dayanım olarak görülmektedir.



Şekil 6 - TIPA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Şekil 6'da görüldüğü gibi TIPA %30 uçucu kül içeren hamurların 2 günlük dayanımında çok çarpıcı bir artış sağlarken 28 ve 56 günlük dayanımlarda kontrole göre dayanım artışı önemli mertebede değildir. 250 ppm'lik TIPA katkısı uçucu küllü hamurların 2 günlük dayanımını katkısız karışıma göre %17, 500 ve 1000 ppm'lik dozajlarda ise %28 seviyesinde arttırmıştır. Yirmisekiz ve 56 günlük dayanımların kontrol karışımı seviyesinden  $\pm$  %5 farklı olduğu görülmektedir. Literatürde TIPA'nın Portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinde, uçucu külün demir fazı başta olmak üzere, külün çözünürlüğünü arttırdığı, bunun çimentonun hidratasyonunu da arttırarak katkısız hale göre daha fazla kalsiyum hidroksit oluşturduğunu, bunun sonucu olarak güçlenen alkali ortamın da katkısıyla uçucu külün puzzolanik reaksiyonlarının artması neticesinde ileri yaş dayanımlarda katkısız duruma göre artış olduğu belirtilmiştir (3,11). Ancak sunulan çalışmada sadece 2 günlük dayanımlarda çok belirgin bir artış olmasına karşın 28 ve 56 günlük dayanımlarda katkısız kontrol karışımına göre çok belirgin bir artış kaydedilmemiştir. Dolayısıyla TIPA'nın sunulan çalışmadaki Portland çimentosu-uçucu kül sisteminde puzzolanik reaksiyonu etkilemeden klinkerin aluminat ve silikat fazlarına yaptığı etkilerle erken dayanımı arttırdığı düşünülmektedir.

DEIPA'nın %30 uçucu kül içeren hamurların 2, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarına etkisi ilgili yaşlarda kontrol karışımına göre bağlı dayanım olarak Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7 - DEIPA dozajının %30 uçucu kül içeren hamurların basınç dayanımına etkisi.

Şekil 7'den görüldüğü gibi, 250 ppm'lik DEIPA katkısı, tıpkı TIPA'da olduğu gibi, %30 uçucu kül içeren çimentonun 2 günlük dayanımlarında önemli derecede artış sağlamıştır. Ancak dozaj arttıkça 2 günlük dayanımı geliştirme oranı hafif bir azalma eğilimi göstermiştir. İki yüz elli ppm dozajda katkısız kontrole göre 2 günlük dayanım artışı %29'dur. Beş yüz ve 1000 ppm dozajlarda ise katkısız kontrole göre sağlanan 2 günlük dayanım artışları sırasıyla %27 ve %20 olmuştur. Ancak karışımların 28 ve 56 günlük dayanımları ya katkısız karışım seviyesinde ya da ondan %10 kadar daha az olmuştur. Literatürde DEIPA'nın çimento hidratasyon sürecine çok olumlu katkıları belirtilmesine karşın (15, 18), bu olumlu katkıların ileri yaş dayanımlarına bazı hallerde yansımadağı görülmektedir. Benzer sonuçlar Riding vd. (15) tarafından da rapor edilmiştir. Yazarlar DEIPA'nın çimentonun hidratasyon derecesinde artış sağlamasına karşın, 7 ve 28 günlük dayanımlarda bir gelişme sağlamadığını belirtmiştir.

Alkanolamin kullanımı ile bir taraftan aluminat fazının hidratasyonu hızlanırken diğer taraftan C<sub>3</sub>S'in hidratasyonunun geciktirilmesi uçucu küllü sistemde ileri yaşlarda dayanım artışına neden olacak puzzolanik reaksiyonları olumsuz etkileyebilmektedir. C<sub>3</sub>S hidratasyonunun kısmen önlenmesi kalsiyum hidroksit oluşumunu da azaltmakta, dolayısıyla uçucu kül ile puzzolanik

reaksiyonun da beklenen seviyede gerçekleşmemesine neden olabilmektedir. Bu durum mineral katkılı çimentolarda alkanolamin kullanımı ile kontrole göre ileri yaşlarda dayanım gelişiminin erken yaşlardaki kadar sağlanamamasının nedeni olarak gösterilmektedir (18). Bu çalışma kapsamında incelenen alkanolaminlerin yüksek pH ortamında demir iyonlarını bağlama özelliklerinin yüksek olduğu literatürde belirtilmektedir. Bu durumda bazı araştırmacılar, alkanolamin kullanımı ile erken yaş dayanımlarında meydana gelen artışın  $C_3A$ 'nin reaksiyonlarının hızlanmasının yanı sıra,  $C_4AF$ 'nin hidratasyona katkısının artması ile olduğunu belirtmektedirler (3).

## SONUÇ

Çalışmada kullanılan alkanolaminlerin (TEA, TIPA ve DEIPA) kimyasal yapı olarak birbirlerine çok benzer olmalarına karşın uçucu küllü Portland çimentolarının priz süreleri ve dayanım gelişimleri üzerindeki etkilerinin birbirlerinden bazı farklılıklar gösterebildiği gösterilmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Alkanolamin kullanımı %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoların priz sürelerini kullanılan alkanolamin türü ve kullanım dozajına bağlı olarak etkilemektedir.
- TEA 250 ve 500 ppm dozajlarda priz başlangıcı ve sonu sürelerini hafifçe uzatırken 1000 ppm dozajda çok hızlı prize neden olmuştur. TIPA ve DEIPA priz başlangıcı süresini artan dozajı ile birlikte giderek uzatmıştır. Priz başlangıç süresini en fazla uzatan alkanolaminin 1000 ppm dozajda %22 ile TIPA olduğu belirlenmiştir. Priz sonu sürelerine alkanolaminlerin etkisi priz başlangıç süresine göre daha azdır.
- Çalışmada kullanılan alkanolaminler %30 uçucu kül içeren çimentonun 2 günlük dayanımını, dozaja bağlı olarak, katkısız kontrol karışımına göre %15 ile %29 mertebelerinde arttırmıştır. TEA yalnızca 250 ppm dozajda 2 günlük dayanımı %15 arttırırken, TIPA ve DEIPA 1000 ppm dozaja kadar 2 günlük dayanımı %20'den fazla arttırmıştır.
- Alkanolamin kullanımı ile %30 uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoda 2 günlük dayanımda önemli artışlar sağlanırken 28 ve 56 günlük dayanımlarda ya kontrol karışımı seviyesinde ya da ondan, en fazla %10 kadar, daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Alkanolaminlerin yüksek oranda uçucu kül içeren Portland uçucu küllü çimentoların priz süresi ve dayanım gelişimine önemli bir etkisi bulunduğu yalnızca bir Portland – uçucu küllü çimento örneğinde gösterilmiştir. Bu çalışmanın sınırlı sonuçları alkanolaminlerin daha ekonomik ve sürdürülebilir çimento üretimi için fırsat sunan bir katkı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, en optimum faydanın sağlanabilmesi için alkanolaminlerin farklı klinker ve karışım özelliklerine sahip çimentoların hidratasyon sürecine etkilerinin daha ileri analizler ve iç yapı incelemeleri ile desteklenmiş daha kapsamlı deneysel programlarla araştırılması gelecek çalışmalar için önerilir.

## Teşekkür

Yazarlar deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı Kentçim Çimento A.Ş. kalite kontrol laboratuvarı teknisyeni Sn. Süleyman Soylu'ya teşekkür ederler.

### Kaynaklar

1. Bouzoubaa, N., Zhang, M.H. Bilodeau, A. Malhotra, V.M. Laboratory-produced high-volume fly ash blended cements: physical properties and compressive strength of mortars” *Cement and Concrete Research*. 28 (11), (1998) pp. 1555-1569.
2. Lee, C.Y., Lee, H.K. Lee. K.M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Research*, 33 (3) (2003), pp. 425-431.
3. Gartner, E. Myers, D. Influence of tertiary alkanolamines on Portland cement hydration. *Journal of American Ceramic Society*. 76 (1993), pp. 1521-1530.
4. Magistri, M., Presti, E. Influence of grinding aids. *World Cem.*, 6 (2007), pp. 39-41.
5. Yang, S.G., vd. (2017). Impact of four kinds of alkanolamines on hydration of steel slag-blended cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 131: p. 655-666.
6. Ma, S.H., Li, W., Zhang, S., Hu, Y., Shen, X. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. *Cement and Concrete Research*, 2015. 67: p. 122-130.
7. Ramachandran, V.S., Action of triethanolamine on the hydration of tricalcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 1973. 3(1).
8. Ramachandran, V.S. Hydration of cement—role of triethanolamine, *Cem. Concr. Res.* 6 (1976) 623–632.
9. Heren, Z., Ölmez, H. The influence of ethanolamines on the surface properties of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*. 27 (1997) 805–809.
10. Heinz, D., Göbel, M., Hilbig, H., Urbonas, L., Bujauskaite, G. Effect of TEA on fly ash solubility and early age strength of mortar. *Cement and Concrete Research*. 40 (2010) 392–397.
11. Ma, B., Zhang, T., Tan, H., Liu, X., Mei, J., Qi, H., Jiang, W., Zou, F. Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of cement-fly ash paste. *Construction and Building Materials*, 2018. 179: p. 89-99.
12. Lu, X., Wang, S., Li, C., Ye, Z., Cheng, X. Research on Properties and the Hydration of Portland Limestone Cement with Diethanol-Isopropanolamine. *Ceramics-Silikaty*, 2018. 62(3): p. 233-239.
13. Kobya, V., Kaya, Y., Aghabaglou, A.M. Effect of amine and glycol-based grinding aids utilization rate on grinding efficiency and rheological properties of cementitious systems. *Journal of Building Engineering*. 47 (2022) 103917.
14. Zou, F., Tan, H., He, X., vd. Effect of triisopropanolamine on compressive strength and hydration of steaming-cured cement-fly ash paste. *Construction and Building Materials* Volume 192, (2018), Pages 836-845.
15. Riding, K., Silva, D.A., Scrivener, K. Early age strength enhancement of blended cement systems by  $\text{CaCl}_2$  and diethanol-isopropanolamine. *Cement and Concrete Research*. 40 (2010) 935-946.
16. Lu, Z.C., Kong, X.M., Jansen, D., Zhang, C.Y., Wang, J., Pang, X.F., Yin, J.H. Towards a further understanding of cement hydration in the presence of triethanolamine, *Cement Concrete Research*. 132 (2020).

17. Yaphary, Y.L., Yu, Z.C., Lam, R.H.W., Lau, D. Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time, *Construct. Build. Mater.* 141 (2017) 94–103.
18. He, Y., Liu, S. H., Zhang, X., Liu, W. B., Liao, G. Y., Xu, M. F. Influence of triethanolamine on mechanical strength and hydration performance of blended cement containing fly ash, limestone and slag. *Journal of Building Engineering.* 44 (2021) 102879.
19. Han, J., Wang, K. Shi, J., Wang, Y. Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Construction and Building Materials* 93 (2015) 457–462.
20. TS EN 196-3. Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
21. TS EN 196-1. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



# Yüksek Dayanımlı Betonun Balistik Performansının Deneysel ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi\*

Ahmet Reha GÜNAY<sup>1</sup>, Sami KARADENİZ<sup>2</sup>

## ÖZET

Dünya'daki savaşlarda, askeri unsurlar ve siviller zarar görmektedir. Ülkeler Savunma Sanayii'ndeki yatırımlarını artırmakta, yüksek hız ve tahribatlı mühimmat sistemleri geliştirmeyi sürdürmektedir. Günümüzde, tehditlerin gelişimine paralel olarak korumanın da etkin biçimde sağlanabilmesi önemlidir. Bu nedenle, mühimmat çarpması gibi yüksek hız ve enerjili seyreden dinamik etkiler altında, temel yapı malzemesi olarak Yüksek Dayanımlı Betonun dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yazarların bir önceki çalışmalarında nümerik veri seti elde edilen 125 MPa dayanımlı Yüksek Dayanımlı Beton için Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli kullanılarak bir dizi sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu betonun deneysel olarak davranışını incelemek üzere hedef üretilmiş ve balistik atış testleri gerçekleştirilmiştir. Balistik atış testleri sonucu elde edilen penetrasyon, krater derinliği, hasar yüzey alanı, delik çapı sonuçları ve hedef numune ile çarpan parça görselleri sayısal analizlerde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek Dayanımlı Beton, Balistik, Sayısal ve Deneysel

## ABSTRACT

### **Experimental and Numerical Investigation of Ballistic Performance of High Strength Concrete**

Military elements and civilians are damaged in wars in the world. The countries increase their investments in the Defense Industry and to continue to develop of high speed and ammunition systems. Today, It is important to provide effective protection in parallel with the development of threats. For this reason, the dynamic behavior of ultra-high strength concrete as a basic building material under dynamic effects with high speed and energy such as ammunition impact was studied experimentally and numerically. A series of numerical analyzes were carried out using the Holmquist Johnson Cook (HJC) material model for high strength concrete with 125 MPa strength, from Which the numerical data set was obtained in the previous studies of the authors. In addition, target was produced and ballistic shooting tests were carried out to evaluate the

---

1 TÜBİTAK SAGE/Atılım Üniversitesi, Ankara - reha.gunay@tubitak.gov.tr

2 Başkent Üniversitesi, Ankara - skaradeniz@baskent.edu.tr

*experimental behavior of this concrete. As a conclusion of the ballistic test, the crater, damage surface area, target specimen and piercing parts of view obtained with penetration, were compared with the results obtained by numerical analysis and verified.*

**Keywords:** *High Strength Concrete, Ballistic, Numerical and Experimental*

## 1. GİRİŞ

Günümüzde Savunma Sanayii alanında mühimmat sistemleri geliştirme çalışmalarına yönelik Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Bu durumun en önemli nedeni ise ülkelerin ekonomi ve enerji gibi temel alanlarda varlık gösterebilmesine olanak sağlamak için savunma alanında öncü olma istekleridir. Bu sebeple, Dünya’da Endüstriyel ve Savunma Sanayii alanlarında araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Ülkemizde son yıllarda kazandığı ivme ile sivil, askeri sistemlerinin tasarımı ve üretimi konusunda bilgi, belge ve doküman üretme çalışmalarında hayli mesafe kat ederek ürünler geliştirmektedir. Birçok gelişmiş ülke, sanayilerindeki gelişime paralel olarak stratejik öneme sahip tesisler ve altyapılar kurmaktadır. Bu tesisler şüphesiz ki önemli amaçlara hizmet eden sistemleri bünyelerinde barındırmaktadır. Yatırımlar ise büyük ölçekli ve yüksek maliyetlere katlanılarak hayata geçirilmektedir. Enerji alanında nükleer santraller, barajlar, ulaşım alanında geniş açıklıklı köprüler, demiryolu sistemleri, tüneller ve savunma alanında harekât kontrol merkezleri, askeri karargâhlar, sığınak yapıları, yüksek maliyetli yatırımlara örneklerdir. Yapılar ise çeşitli doğa olayları ve dış tehditlerin etkisi altında yer almaktadır. Bu sebeple kritik öneme sahip tesisler korunmalıdır. Korumanın sağlanması ve tehditlerin bertaraf edilmesi için yapının kurulum aşamasında geleneksel yöntemlerin aksine günümüz teknolojisine uygun çözümlere odaklanmak gereklidir.

Birçok kritik tesisin yapımı için kullanılan temel yapı malzemesi betondur. Diğer yapı malzemelerine kıyasla beton sağladığı ekonomik avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Geçmişten günümüze kullanılan beton, özellikle son yıllarda tasarım, üretim yöntemlerinin gelişimi ve son teknoloji ekipmanlar kullanımı ile birlikte yüksek nitelikli yapı malzemesi halini almıştır. Betonlar dayanım sınıflarına göre normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı olarak gruplandırılmaktadır. Dünya üzerinde bu konuda genel bir mutakabata varılmamış olmakla birlikte, basınç dayanımı 60 MPa kadar olan betonlar normal dayanımlı beton (NDB), 60-120 MPa arası yüksek dayanımlı beton (YDB) ve 120 MPa ile üzeri dayanımda yer alan betonlar Çok Yüksek Dayanımlı Beton (ÇYDB) olarak sınıflandırılmaktadır[1]. Bu sınıflarda üretilen betonların balistik performanslarının incelenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan bu çalışmalarda, M.H. Zhang vd. [2], 45-235 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betonlar geliştirmiş ve 12,60 mm çap ve 23,93 mm boyda çelik parçayı 620-700 m/s hız aralığında hedefe çarptırarak penetrasyon derinliğini 15-71 mm aralığında ölçmüşlerdir. Fan Wan vd. [3], 57 MPa basınç dayanımında ve fiber katkısız geleneksel betondan 89-405 mm ebatlarında hegzagonal ve silindirik formda hedef yapısı olarak üretmiş, 7,5 mm çap 10,30 mm boyda çelik parçayı 820 m/s hızda hedefe çarptırarak, penetrasyon derinliğini 188-300 mm aralığında ölçümlemişlerdir. R.Yu vd. [4], 500x500x100 mm ebatlarında 125-142 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı hedefe 7,62 mm ölçüsündeki mermiyi 830 m/s hızla fırlatarak, penetrasyon derinliğini 57-70 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Dawson vd. [5], 28-34 MPa basınç dayanımına ve inşaat çeliğine (donatı) sahip betonarme betonu üretmiş ve 1370x1370x152 mm ölçüsünde hedef yapısına 6,25 mm çapında tungsten parçayı 2200 m/s hızla çarptırarak, penetrasyon derinliğini 60-70 mm aralığında ölçümlemişlerdir. H. Wu vd. [6], 67-142 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkılı ve katkısız çok yüksek dayanımlı betona, 750 mm çapında 3 mm kalınlıkta çelik kalıp içine aldıkları silindirik yapıdaki hedefe boy/çap oranı 0,14 olan ve 30 mm namlu içinden fırlatılabilen çelik parçayı fırlatmışlar ve 115-748 mm aralığında penetrasyon derinliğini ölçümlemişlerdir. Jason T. Gomez vd. [7], 38,15 MPa basınç dayanımına sahip fiber katkısız 410x410x410 mm ölçüsünde küp beton hedefe Maraging çeliğinden üretilen

6,4 mm çap ve 64,34 boydaki parçayı 186-616 m/s hızlarda tekrarlı olarak fırlatarak penetrasyon derinliğini 24-135 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Joosef Leppanen [8], 25-30 MPa beton dayanımlı 750x375x500 mm hedef yapısına 4 mm çapında silindirik çelik parçayı 1850 m/s hızla hedefe çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 55 mm olarak ölçümlemiştir. Zhong Cheng Mu vd. [9], 51 MPa basınç dayanımında inşaat çeliği (donatı) kullanarak 360x360x400 mm ebadında hedef betona 12,6 mm çap ve 34 mm boyda 38CrSi çelik (sivri uçlu) parçayı 500-1500 m/s hız aralığında çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 75-162 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Petr Máca vd. [10], 132-151 MPa dayanıma sahip 300x400x50 mm ölçüde fiber katkılı çok yüksek dayanımlı betona 7,92 mm çap ve 26,7 mm boyda çelik parçayı 710-730 m/s hızlarda çarptırarak penetrasyon derinliğini 19-50 mm aralığında ölçümlemişlerdir. L. Guo vd. [11], 40-45 MPa fiber katkısız betona 1800 mm çap ve 10 mm kalınlıkta çelik ile çevrenmiş silindir formda hedefe 60 mm çap ve 300 mm boyda 30CrMnSiNi2A alaşımlı çelik parçayı 843-1400 m/s hızlarda çarptırarak, penetrasyon derinliğini 1670-3200 mm aralığında ölçümlemişlerdir. H. Wu vd. [12], 107-137 MPa basınç dayanımına sahip 750 mm çapında, 3 mm kalınlıklı çelikte çevrili beton hedefler üretmiş ve 25,3 mm çap ve 152 mm boyda SiMnCrNiMoV çelik parçayı 510-850 m/s hızlarda hedefe çarptırarak ve 37-346 mm aralığında penetrasyon derinliği ölçümlemişlerdir. Chuang Liu vd. [13], 45 MPa basınç dayanımında fiber katkısız geleneksel betondan 450 mm çap ve 700 mm boyda silindirik hedefe 9 mm çap ve 80 mm boyda çelik parçayı 500-1700 m/s hızlarda çarptırarak penetrasyon derinliğini 24-95 mm aralığında ölçümlemişlerdir. Jian Liua vd. [14], 75-140 MPa basınç dayanımında 750 mm çap ve 700 mm boya sahip silindirik hedef yapısına 25,3 mm çap ve 152 mm boyda çelik parçayı 554-808 m/s değişken hızlarda hedef yapısına çarptırarak ve penetrasyon derinliğini 129-414 mm aralığında ölçmüşlerdir.

Yapılan çalışmalarda farklı türde hedef yapıları ve delici parçalar kullanıldığı görülmektedir. Özellikle yüksek dayanım sınıflarında hedef üretim çalışmaları ve aynı zamanda tungsten delici kullanılarak balistik test çalışmalarının sınırlı sayıda araştırmaya konu olduğu değerlendirilmektedir.

## 2. AMAÇ

Beton üzerine gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları genellikle dayanım ve durabilite koşullarının iyileştirilmesine yöneliktir. Birçok araştırmacı çalışmalarında, betonun  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  s<sup>-1</sup> gerinim hız aralığındaki davranışlarını gözlemlemişlerdir. Yüksek gerinim hızlarında oluşan dinamik etkiler altındaki davranış üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Zira beton yaşam döngüsü boyunca sadece statik yükleme koşullarına maruz kalmaz. Aynı zamanda rüzgâr, deprem, fırtına ve sel vb. doğal afetlerle oluşan dinamik etkilere de karşı koymaktadır. İlaveten doğal afetler dışında insan faktörü ile oluşabilen dinamik etkiler de betonun hasarına yol açmaktadır. Bu duruma en iyi örnek ise mühimmat sistemlerinin sebep oluşturduğu parçacıklaşma ve darbe basıncı etkileridir. Dinamik etkilerin betonda neden olduğu hasarı belirlemek, önlem alabilmek için malzeme davranış biçimi ve özelliklerinin kavranması gereklidir. Olağan yükler dışında yapıların davranışının belirlenmesine yönelik araştırma çalışmalarında [15,16] malzeme ölçeğinde yüksek dayanımlı betonun dinamik davranışının belirlenmesi sonucu, yapı tasarımlarında hesap güvenilirliği artacaktır. Bu sebeple yüksek hız ve enerjili seyreden olayların oluşturduğu dinamik etkilerin, betonda yansımalarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, mevcut yapıların iyileştirilmesi ve yeni yapıların güvenli tesis edilmesine yönelik önemli katkılar sunacaktır. Bu motivasyonla çalışmada, 125 MPa basınç dayanımına sahip Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) üretilecek ve tungsten ağır alaşımı parça kullanılarak balistik performansı deneysel ve sayısal olarak incelenecektir.

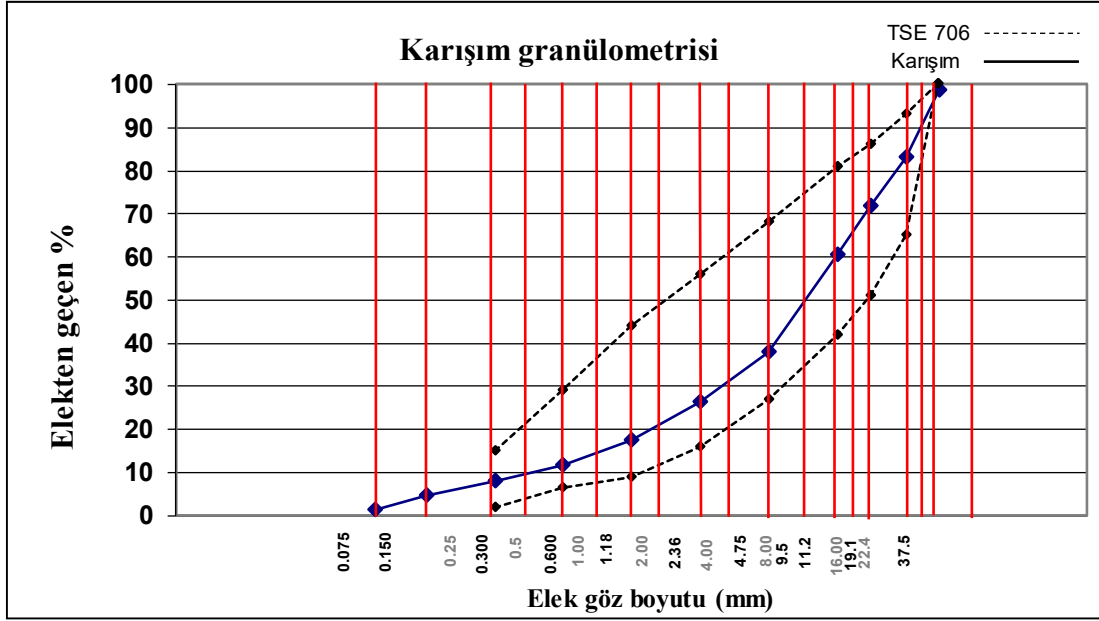
### 3. BALİSTİK TEST ÇALIŞMALARI

#### 3.1. Yüksek Dayanımlı Beton Tasarımı ve Örneklerin Üretimi

Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) geliştirmek üzere karışım hesapları oluşturularak dökümler ve basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Üretimde çimento malzemesi olarak 3,14 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu CEM I 52.5 N kullanılmıştır. Çimento hamuru ile agregaya bağında oluşabilecek boşlukların kapatılması için 2,86 gr/cm<sup>3</sup> özgül ağırlıkta öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agregaların seçimi aşamasında su emme gereksiniminin çok düşük olmasına, bünyesinde kil, silt gibi malzemelerin bulunmamasına ve kirli olmamasına özen gösterilmiştir. Üretimde 0-5 mm kum, ince kireç taşı agregaya 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-25 mm kaba kireç taşı agregaya kullanılmıştır. Kum ve agregaların özgül ağırlıkları sırasıyla 2,63 kg/dm<sup>3</sup>, 2,67 kg/dm<sup>3</sup>, 2,64 kg/dm<sup>3</sup>, 2,65 kg/dm<sup>3</sup> ve su emme kapasiteleri sırasıyla %1,18, %0,65, %1,07, %0,88 ve karışımda kullanılan agregaların incelik modülü 4,60'dır. Numune üretiminde kullanılan agregaların elek analiz sonuçları Tablo 1'de ve Agregaya granülometrisi Şekil 1'de yer almaktadır. Ayrıca deneysel çalışmada betonun işlenebilirliğin artması ve dayanımında olumsuz etkilerin önlenmesi için yüksek su indirgeyiciler (süper akışkanlaştırıcılar) kullanılmıştır. Üretimde polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Şekil 2-3'de kullanılan malzemelerin görselleri ve Tablo 2'de 1 m<sup>3</sup> YDB'nin gerçek bileşimi yer almaktadır.

**Tablo 1 - Kullanılan agregaların ve karışımın granülometri tablosu.**

Elek göz boyutu,mm	Elekten geçen %			
	0-5 mm (Kum)	5-12 mm (ince)	12-19 mm (Kaba)	19-25 mm (Kaba)
37,5 mm	100	100	100	100
22,4 mm	100	100	100	88,5
19 mm	100	100	83	42,86
16 mm	100	100	68	2,6
11,2 mm	100	97,5	2,5	0,7
9,5 mm	100	80,07	1,27	0,32
8 mm	100	64,7	0,2	0
4,75 mm	99,9	24,3	0,1	0
4 mm	95,6	1,8	0	0
2,36 mm	71,9	0,73	0	0
2 mm	66,7	0,5	0	0
1,18 mm	46,4	0,04	0	0
1 mm	44,4	0	0	0
0,600 mm	32,48	0	0	0
0,5 mm	29,5	0	0	0
0,300 mm	22,06	0	0	0
0,25 mm	20,2	0	0	0
0,150 mm	12,73	0	0	0
0,125 mm	11,9	0	0	0
0,075 mm	3	0	0	0
<b>Karışım Oranları</b>	<b>39</b>	<b>33</b>	<b>16</b>	<b>12</b>



Şekil 1 - Karışım granülometrisi.



Şekil 2 - (1) 0-5 mm Kum, (2) 5-12 mm İnce Agrega, (3) 12-19 mm Kaba Agrega ve (4) 19-25 mm Kaba Agrega Görseli.



Şekil 3 - (a) Curuf Görseli, (b) Süperakışkanlaştırıcı Görseli.

Beton karışım hesabı sonucu 125 MPa dayanıma sahip YDB'nin içeriğinde yer alan malzemeler ve 1 m<sup>3</sup> hacim için kuru kütleli bilgileri ile oranları belirlenmiş ve Tablo 1'de yer almaktadır.

**Tablo 2** - 125 MPa basınç dayanımına sahip betonun 1 m<sup>3</sup> gerçek bileşimi.

Malzemeler	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Oran (%)
Çimento	450	
Cüruf	45	
Kum (0-5 mm)	775	
Kireç taşı (5-12 mm)	663	
Kireç Taşı (12-19 mm)	316	
Kireç taşı (19-25 mm)	238	
Su/Çimento		13
Süperakışkanlaştırıcı		2,5

Malzemelerin seçimi ve tasarım hesaplamalarının gerçekleştirilmesi sonucu yüksek dayanımlı beton üretim çalışmalarına başlangıç verilmiştir. İlk aşamada agregalar laboratuvar ortamında etüvde kuruma işlemine tabi tutulmuştur. Etüvden çıkarılan agregalar bir süre bekletilmiş, tasarım hesabına göre tartılmış ve betoniye yerleştirilmiştir. Agregaların yerleştirilmesi sonrasında tasarım hesap miktarlarına uygun olarak çimento ve cüruf eklenerek kuru karışımın hazırlanması için betoniye çalıştırılmıştır. Etüv ve betoniye görseli Şekil 4'te yer almaktadır.



(a)

(b)

**Şekil 4** - (a) Etüv görüntüsü, (b) Betoniye görüntüsü.

Betoniye yaklaşık bir dakika çalıştırılması sonrası kuru karışımın oluşumu gözlemlenmiştir. Kuru karışıma kıvam verilmesi için süper akışkanlaştırıcı ve su tasarım hesabına uygun, çimentoda yaşanabilecek topaklaşmanın önlenmesi için kademeli olarak ilave edilmiştir. Kıvamın sağlanması için yaklaşık 3-4 dakika betoniye karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Oluşumun

tamamlanması sonrası, yüksek dayanımlı betonun slump (kıvamı) değeri yaklaşık 0-1 arasında ölçümlenmiştir. YDB kısa sürede sertleşme eğiliminde davranış göstermiştir. Betoniyerde üretilen beton hızlı biçimde kürek yardımı ile 150X300 mm ebatlarında olan silindir numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Ancak ilk safhada numune kalıbının içinde betonun boşluksuz dağılım gösterebildiğini söylemek mümkün değildir. Düşük işlenebilirliğin negatif etkilerinin ortadan kaldırılmasına yönelik olarak, numune kalıpları titreşim tezgahının üzerine alınmış vibrasyonla üç aşamalı olarak ve ara katmanlarda sürekli tokmaktama çalışması gerçekleştirilerek yerleştirilmiştir. Silindir kalıplara yerleştirilen numuneler bir saat süre ile sertlik kazanması için üretim alanında bekletilmiştir. Göreceli olarak sertleşen beton, kalıpların içinde farklı bir bekleme alanına alınmış ve yaklaşık bir gün sonra tamamen sertleşen numuneler kalıptan çıkarılarak test gününe kadar bekletilmek üzere kür havuzun alanına aktarılmıştır. Numuneler 24 °C ve %97 nem oranına sahip ortamda kür işlemine tabii tutulmuştur.

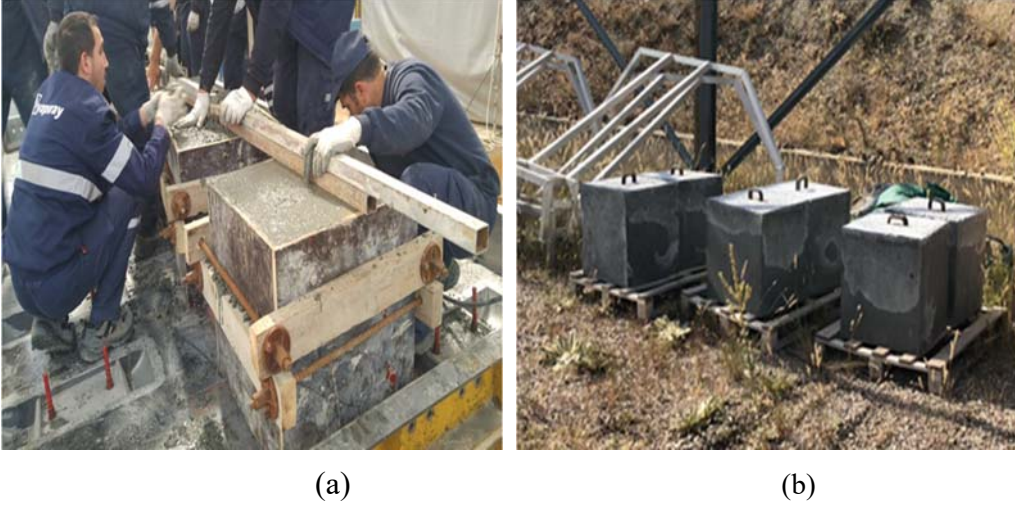
Kür süresinin tamamlanması sonrasında, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki toplam 12 adet silindir beton numune, 1., 7., 28. ve 56. günde Universal beton presi kullanılarak  $1 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> gerinim hızında basınç dayanım testlerine tabii tutulmuşlardır.

YDB' nin nihai dayanıma kadar geçen süre zarfında gerçekleştirilen basınç dayanım testlerine ilişkin sonuç bilgileri Tablo 3'te yer almaktadır.

**Tablo 3 - Yüksek Dayanımlı Beton basınç dayanım sonuçları.**

Sıra No	Gün	Basınç Dayanımı (MPa)	Standart Sapma (MPa)
1	1.	108	7,35
2	7.	115	7,84
3	28.	125	3,70
4	56.	135	3,22

Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen YDB 28. günde 125 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Mikrosilis malzemelerin dayanıma katkı sağlaması sonucu 56. günde 135 MPa dayanım değeri ölçümlenmiştir. YDB'nin işlenebilirliği düşük seviyededir ve hızlı sertleşme eğilimi göstermektedir. Negatif bu etki nedeniyle balistik test için kullanılacak YDB hedef betonu (büyük ebatla üretimde) kalıp içine yeterince yerleşmeyebilir ve segregasyonlar oluşabilir. Ayrıca balistik testlerde performans gösterebilmesi için hedef boyutların çarpan parçaya oranla doğru belirlenmesi (L/D oranı) hedefin çarpma etkisine maruz kalacağı yüzeyin uzunluğu ile parçanın çapı arasındaki ölçü ilişkisi önemli olup, L/D olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu sebeplerle, kullanılacak parçanın çapına oranla hedef yapısının yüzey uzunluğu 35 kat daha fazla olarak tasarlanmış ve hedef yapısı 500x500x500 mm ebatlarında üretilecektir. Hedef üretiminde, betoniyerde hazırlanan YDB'nin hızlı sertleşmesi sebebiyle, titreşim tezgâhı üzerinde hazır halde bulunan kalıplara hızlı bir biçimde yerleştirilmesi gerekmiştir. Yerleştirme işlemi üç aşamada, ara bölümlerin tokmaklanması ve titreşim tezgâhının döküm süresince sürekli halde çalıştırılmasıyla sağlanmıştır. Döküm sonrasında, YDB' nin tamamen sertleşmesi beklenmiş ve bir gün sonra kalıptan çıkartılmıştır. Hedef betonu vibrasyon ve yerleşme problemlerinin tespitine ilişkin, gözle muayene edilmiştir. Yapılan muayene sonucu üretim kaynaklı sorun bulunmadığı gözlemlenmiştir. Altı adet üretilen hedef betonları test gününe kadar kür işlemine tabii tutulmuştur. Hedef üretim aşamaları ve numunelerin nihai görselleri Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5 - (a) Hedef betonu üretim aşamaları, (b) Üretim sonrası görseli

### 3.2. Delici Parça Üretimi

Balistik testlerde hedefe çarptırılacak parçanın dağılmadan YDB' ye nüfuz etmesi ve mümkün olabilecek en büyük hasarı oluşturması, hedef yapısının davranışının belirlenmesi gerekli ise güçlendirilme tedbirlerinin alınması ve hedef optimizasyonunun sağlanması açısından önemlidir. Günümüzde yürütülen balistik test çalışmalarında savunma ve uzay sanayinde kullanımı son dönemlerde artan tungsten ağır alaşımı parça kullanılmaktadır [17]. Tungsten ağır alaşımı ürünler, ısıya dayanıklılığı, oda sıcaklığı ve artan sıcaklıklardaki yüksek dayanımı, yüksek termal iletkenlik özelliği nedeniyle ön plana çıkmaktadır [18]. Stratejik bir ürün olan tungsten kolay elde edilemez ve bağımsız üretim şartlarını gerektirmektedir. Tungsten ağır alaşımları temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Alaşımlardan ilki Ni-Fe, diğeri ise bağlayıcı fazın Ni-Cu içerdiği alaşımlardır [19]. İhtiyaç ve kullanım alanlarına göre tungsten ağır alaşımların içeriği belirlenmekte ve üretilmektedir. Çalışmalarda sıklıkla kullanılan alaşımlara ilişkin bilgiler ve sağladıkları avantaj-dezavantajlar Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4 - Tungsten ağır alaşımları değerlendirme tablosu [18].

Alaşım İçeriği	Avantaj	Dezavantaj
W-Ni-Cu	Düşük fazlı sinterleme sıcaklığı, düşük manyetik geçirgenlik, yüksek ısı iletkenlik	Düşük Mekanik Özellikler
W-Ni-Fe	Düşük üretim maliyeti	Standart alaşım
W-Ni-Co	Yüksek mekanik özellikler	İntermetalik oluşumu
W-Ni-Fe-Co	W-Ni-Fe'den daha yüksek mekanik özellikler	Radyoaktif alanda kullanım problemi
W-Ni-Fe-Mo	Yüksek sertlik	Sinterleme hassasiyeti yüksek.

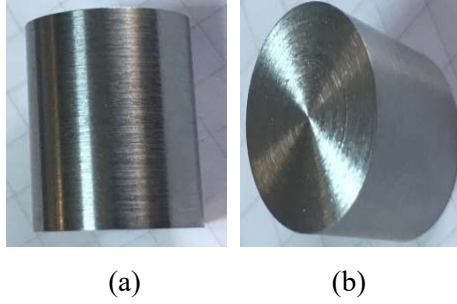


Balistik test çalışmasında W-Ni-Fe düşük üretim maliyetine sahip standart alaşım parça kullanılacaktır. Tungsten ağır alaşımı delici parçaya ait kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 5'te yer almaktadır.

**Tablo 5** - Tungsten ağır alaşımı mekanik özellikleri tablosu.

Alaşım İçeriği	Yoğunluk(gr/cm <sup>3</sup> )	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik(HRC)
%92.5W.%5.6Ni.%2.4Fe	17,5-18,00	600	15-25	850-950	29-35

Delici parça toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir. Geometrisi silindirik ve küt burunlu olarak ifade edilebilir. Delicinin görseli Şekil 6'da yer almaktadır.



**Şekil 6** - Tungsten alaşımı parça (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey görüntüsü.

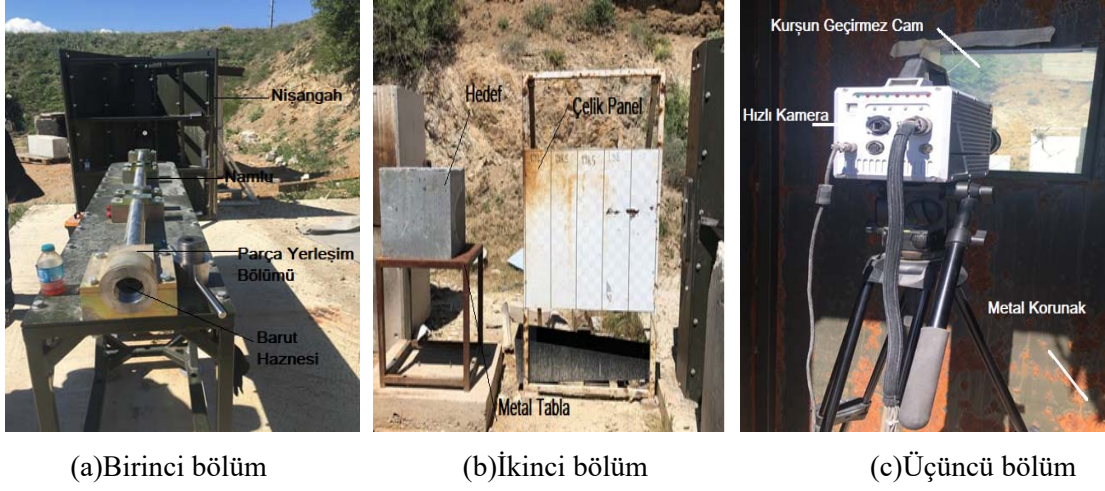
Balistik testlerde kullanılan tungsten ağır alaşımı delici parçaların geometri, ağırlık ve mekanik özellikleri ile ilgili bilgiler Tablo 6'da yer almaktadır.

**Tablo 6** - Tungsten delici parçaların özellikleri.

Sıra No	Boy(mm)	Çap(mm)	Kütle (gr)	Sertlik (HRC)
1	20	14	56,64	32
2	20	14	53,83	32
3	20	14	56,33	32
4	20	14	56,49	30
5	20	14	54,08	35
6	20	14	54,08	35

### 3.3. Barut Silahı Test Düzenegi ve Özellikleri

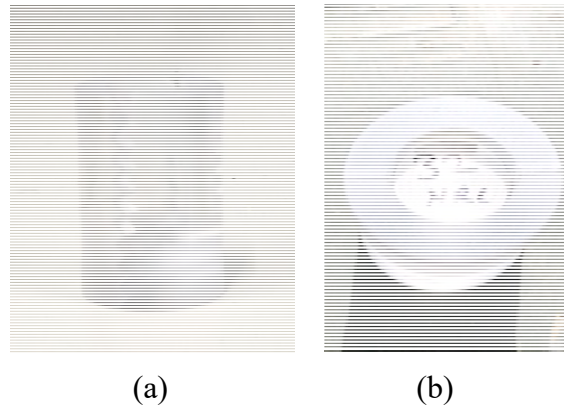
Barut silahı test düzenegi birinci bölüm barut silahı, ikinci bölümü hedef bölgesi ve üçüncü bölüm hızlı kamera ölçüm bölgesinden oluşmaktadır. Düzenek görselleri Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 7 - Barut Silahı Test Düzenegi

Hedef bölgesinde, hedef ile barut silahının yükseklik seviyesini ayarlamak için hedef yapısının yerleştirildiği metal tabla ve hız verisini ölçmek üzere ayarlanmış özel çelik panel bulunmaktadır. Çelik panel 1000 mm uzunluğunda, 200 mm aralıklarla markalanmış ve hızlı kameranın görüntü açısında yer almaktadır. Çelik panel parçanın hızının ölçümlenebilmesi için yol verisini sağlamak üzere düzenekte yer almaktadır. Barut silahı test düzeneginin üçüncü ve son bölümü ise barut silahı ve hedef bölgesine dik konumlandırılan ve geniş açıyla görüntü alabilen hızlı kamera sistemidir.

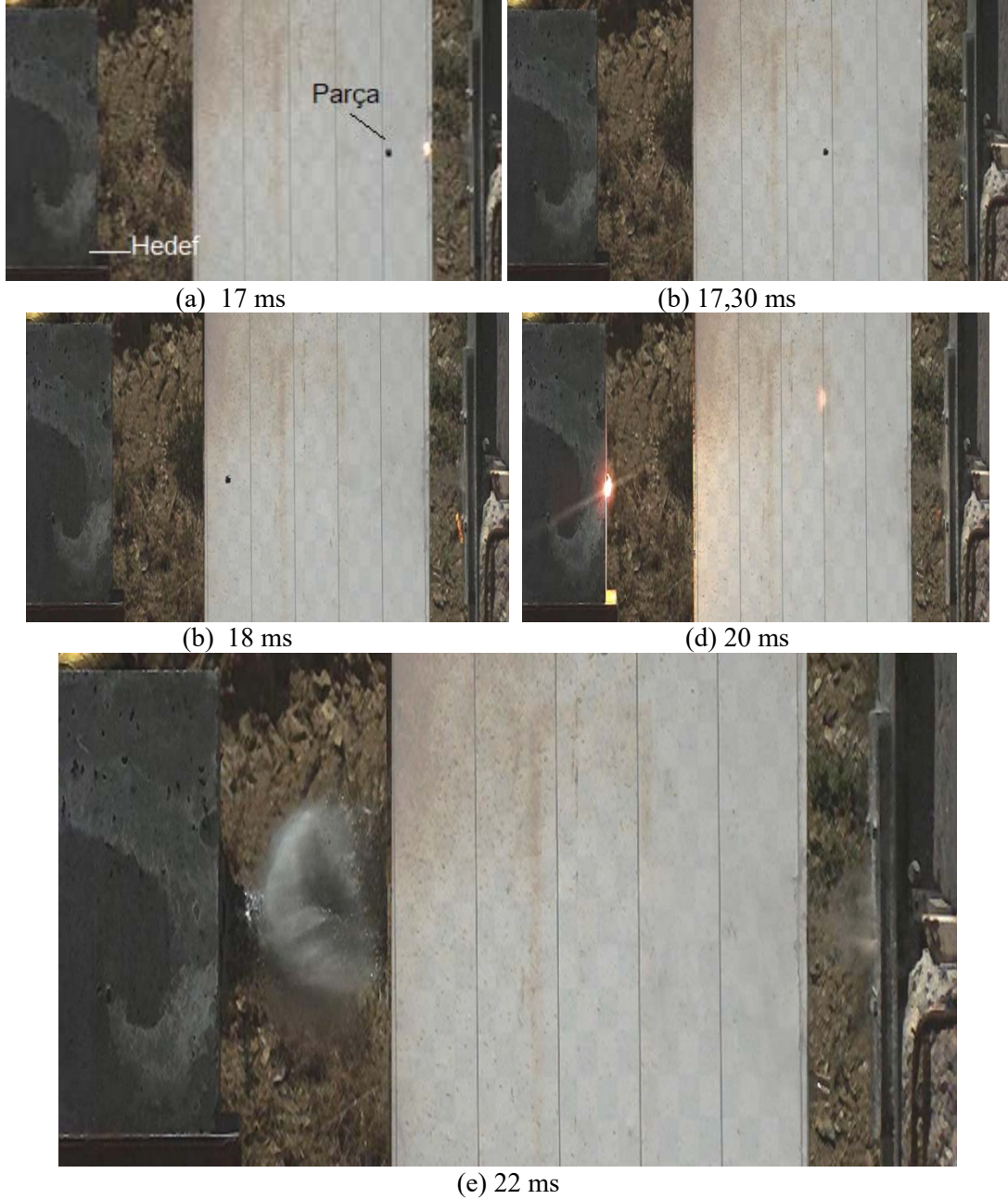
Barut silahı barutun yanması ile oluşan itki kuvvetinin parçanın namlu içinde hızlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Test düzenegindeki namlu çapı 25 mm ve parçanın çapı ise 14 mm'dir. Tungsten ağır alaşımı parçanın çapının namlu çapından daha düşük değere sahip olması ve namlu içinde sürtünmeye bağlı hasar oluşturmasına karşın testlerde sabo kullanılmıştır. Sabo dış çapı 25 mm, iç çapı 14,5 mm ve 25 mm boyundadır ve plastik malzemeden üretilmiştir. Sabo namludan çıktıktan sonra hedefe çarpmadan önce uçuş sırasında delici parçadan ayrılmakta ve genellikle nişangâh tarafından tutulmaktadır. Sabo ve atış öncesi parçanın sabo içinde görsel Şekil 8'de yer almaktadır.



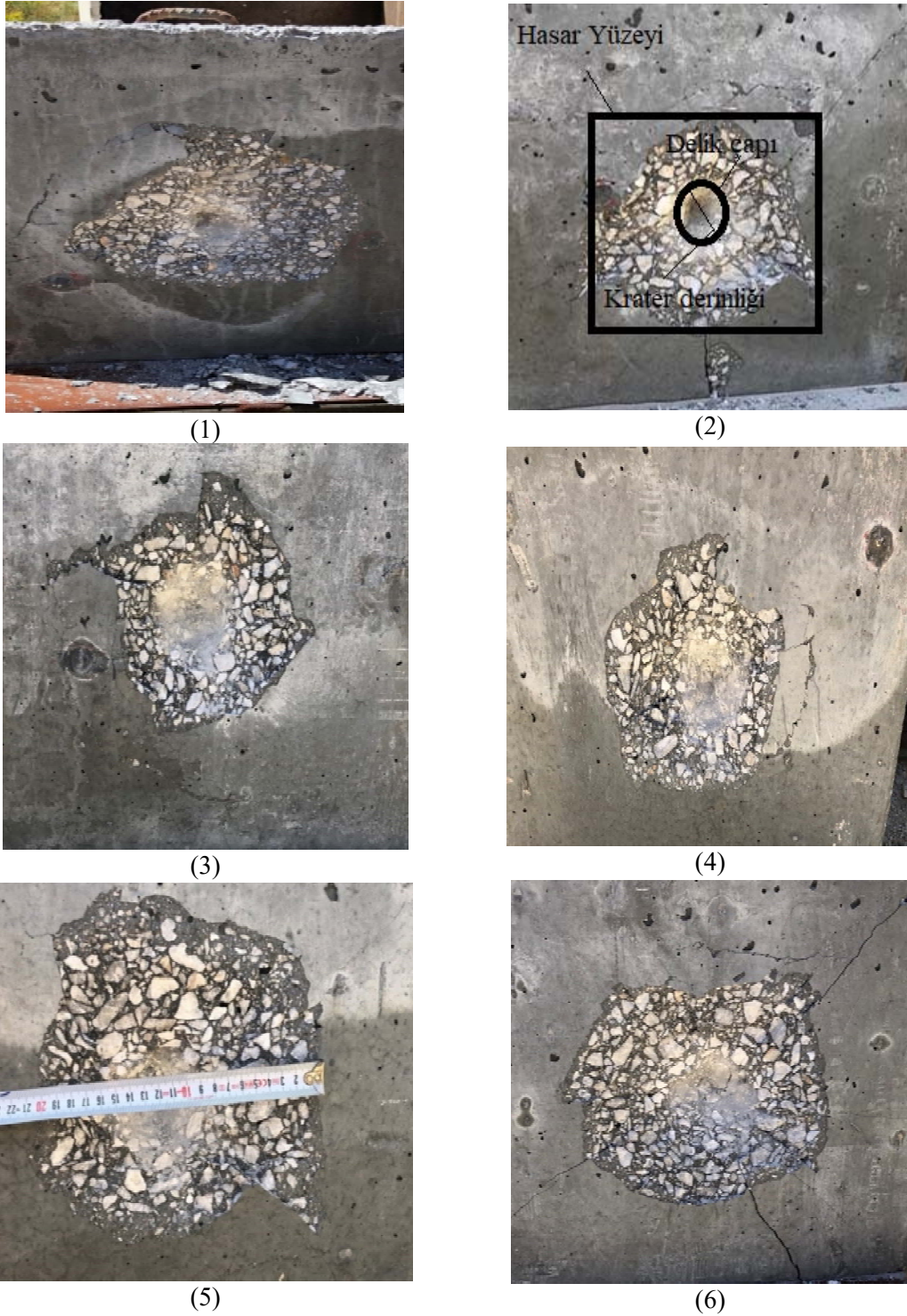
Şekil 8 - (a) Sabo görseli, (b) Atış öncesi parça görseli.

### 3.4. Balistik Test Aşamaları ve Sonuçları

Yüksek dayanımlı betondan (125 MPa basınç dayanımında donatı veya fiber katkısız) 500x500x500 mm ebatlarında üretilen küp hedefe, 14 mm çap ve 20 mm boyda silindir 6 adet tungsten ağır alaşımı delici parça çarptırılmıştır. Hız ölçümü hedef bölgesinde yer alan çelik panel (1000 mm uzunluklu ve 200 mm aralıkla markalanmış) ve hızlı kamera aracılığıyla sağlanmıştır. Hızlı kamera ms zamanda fotoğraf çekmektedir. Parçanın 200 mm aralıktaki uçuşu sırasında çekilen fotoğraf sayısına göre zaman bilgisi elde edilmiştir.  $Yol = hız \times zaman$  bağıntısı dikkate alınarak, sırasıyla mesafe, hız ve zaman ilişkisine uygun biçimde hız verisi ölçümlenmiştir. Buna göre, beş test çalışmasında barut miktarı 20 gr olarak uygulanmış ve hız verisi 795-860 m/s aralığında ve altıncı (son) test çalışmasında barut miktarı 5 gr artırılarak 25 gr olarak kullanılmış ve hız verisi 934 m/s ölçümlenmiştir. Atışın zamana bağlı çekimi Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9 - 5 nolu balistik testin zamana bağlı kaydedilen görüntüleri.



**Şekil 10 - YDB hedef numunelerin test sonrası görüntüleri.**

Barutun ateşlenmesi ile tahrik edilen tungsten ağır alaşımlı parça hızlı kameranın tetiklenmesi sonrasında namlunun uç kısmından barut silahını terk edip yaklaşık 17. ms'de görüntülenmiştir. Sabo delici parçadan namlu bitiş bölgesi ile nişangâh arasında ayrılmış ve nişangâh tarafından tutulmuştur. Parça 17-20 ms aralığında x yönünde (zemine paralel) ve açı değişimi olmaksızın serbest uçuşunu sürdürmüştür. Parça 20. ms'de hedefe ilk temasını gerçekleştirmiş ve hedefe

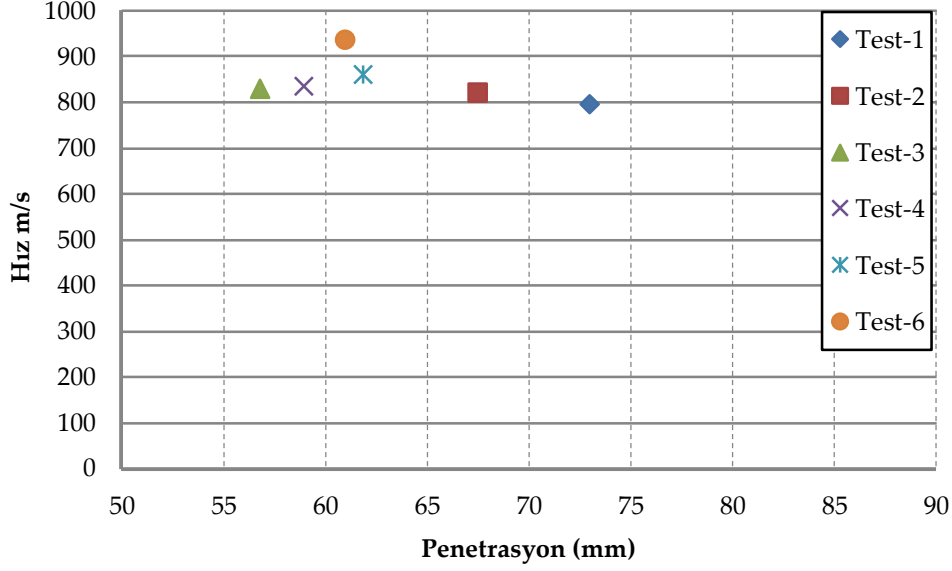
penetre olmaya başlamıştır. Bu aşamada çarpmadan kaynaklı olarak kıvılcım kümesi oluşmuştur. 20-22 ms aralığında delici parça hedef içindeki ilerlemesini sürdürmüş ve 22. ms'de hedeften beton parçaları koparak penetrasyon sonlanmıştır. Test sonrasında hasar yüzeyi, krater derinliği, penetrasyon derinliği ve delik çapı belirlenecektir. İfade edilenler sırasıyla, çarpan parçanın yüzeyde oluşturduğu deformasyon hasar yüzeyi alanı, x yönünde (zemine paralel) hedefe çarpan parçanın beton içinde z yönünde oluşturduğu deformasyon krater derinliği, x yönünde hedefte oluşan deformasyon penetrasyon derinliği ve çarpan parçanın hedefte oluşturduğu deliğin çapı ise delik çapı olarak tanımlanmaktadır. Hedeflerin balistik test sonrası oluşan hasar görüntüleri Şekil 10'da ve sonuç bilgileri Tablo 7'de yer almaktadır.

**Tablo 7 - Balistik test sonuç tablosu.**

Hedef no	Hız(m/s)	Penetrasyon(mm)	Hasar Yüzeyi(mm)	Delik Çapı(mm)	Krater (mm) derinliği
1	795	73,00	250X230	20,00	70,00
2	820	67,51	200X230	25,70	58,25
3	828	56,84	170X200	26,14	62,23
4	835	59,00	230X210	21,00	63,00
5	860	61,88	200X230	28,20	62,15
6	934	61,00	240X250	24,00	57,00

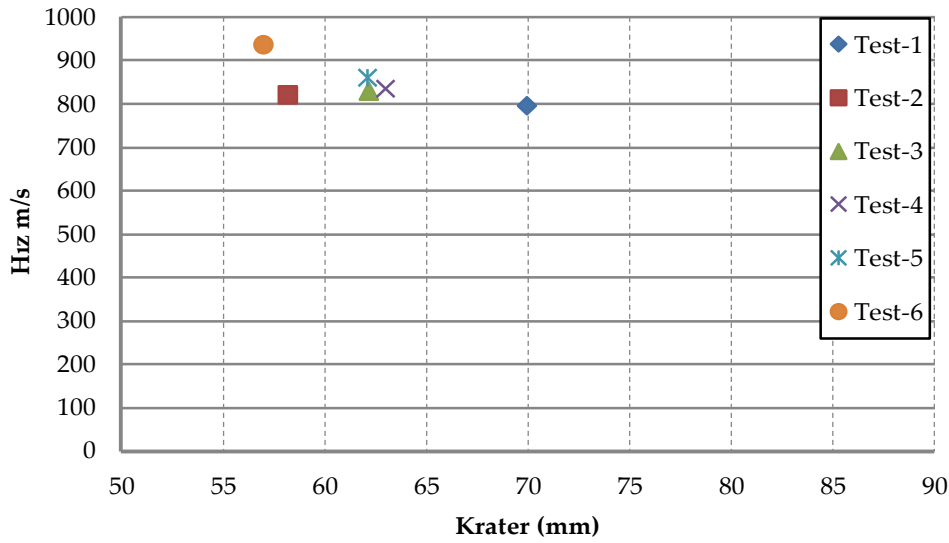
Şekil 10'da yer alan hedef hasar görüntüleri incelendiğinde, çarpma sırasında parçanın çarptığı bölgeye yakın olarak radyal gerilme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmektedir. Radyal gerilme çatlakları parçanın ilk temas anında çarpma bölgesinde oluşan çatlaklardır. Bu tür çatlaklar genellikle gevrek hedef yapılarında görülmektedir. Çatlaklar süresiz ve derin değildir. YDB gevrek malzeme olması nedeniyle radyal gerilme çatlaklarına bağlı olarak çimento hamuru yüzeyden sıyrılmıştır. Agregalarda ise yüksek oranda tahribat oluşmadığı görülmektedir. Belirtilen bölge hasar yüzeyi olarak ifade edilebilir. Balistik test çalışmasında hasar yüzeyi tüm hedefler için 170X250 mm aralığında ölçümlenmiştir. 2 ve 6 nolu hedefte daha belirgin halde radyal gerilme çatlaklarına ilave olarak kesme çatlakları da oluşmuştur. Çarpma olayında yüzeyde oluşan ve ilerleyen basınç gerilme dalgaları, tersinir olarak çekme gerilme dalgası olarak yansımaktadır. Bu durumda, oluşan çekme gerilme değerinin betonun çekme gerilmesi sınırını aşması sonucu kesme çatlakları görülebilir. Kesme çatlakları sürekli ve hedefle yaklaşık 45° açı yapan ve derin olmayan biçimde oluşmuştur. Bütün hedeflerde üretim şartları aynı olmasına rağmen, 6 nolu hedefe daha yüksek hızda ve daha sert parçanın fırlatılması sonucu kesme çatlaklarının oluştuğu değerlendirilmektedir. Parçanın süneklik yapısı çarpma üzerinde etkinlik sağlayan bir diğer parametredir. 1-6 nolu hedeflere çarptırılan parçanın çapı 14 mm'dir. Hedeflerde ölçülen delik çapı 20-28 mm aralığındadır. Çarpan parça, çapının yaklaşık 2 katı ölçüsünde hedefte delik çapı hasarı oluşturmuştur. 1-6 nolu hedeflerde parçanın penetre ettiği bölgede yer alan çimento hamuru ve agregalardan kopmalar gerçekleşmiştir. Hedefin kesitinden ölçülebilen değer krater derinliği olarak ifade edilmektedir. Hedef yapılarında donatı (inşaat çeliği) veya fiber katkıları kullanılmamıştır. Bu tip katkıları, çarpma esnasında oluşan basınç dalgalarının çekme dalgası olarak yansması sonucu betonun zayıf olan çekme davranışının iyileştirilmesine yönelik görev almakta, betonun dağılmasını önlemekte ve hasar yüzeyinin azaltılmasında olumlu katkıları sunmaktadır. Balistik testlerde hedef yapılarında yüzeysel hasarlar meydana gelmiş ve penetrasyon ile krater derinliğinin 3 katı kadar hasar yüzeyi oluşumu gözlemlenmiştir.

Altıncı testte ulaşılan hız önceki testlere oranla daha yüksek 934 m/s olarak ölçülmüştür. Altıncı testte barut miktarının artırılmasının benzer ağırlıktaki parçanın hızlandırılmasına olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Hızın artırılmasının hedefe etkisi kinetik enerji değişimi ile ilişkilidir. Hızın artmasıyla oluşan fazla kinetik enerjinin hedef tarafından absorbe edilmesi sonucu genel olarak penetrasyon derinliğinin artırdığı ve değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Test sonuçlarına ait hız penetrasyon ilişkisi Şekil 11’de yer almaktadır.



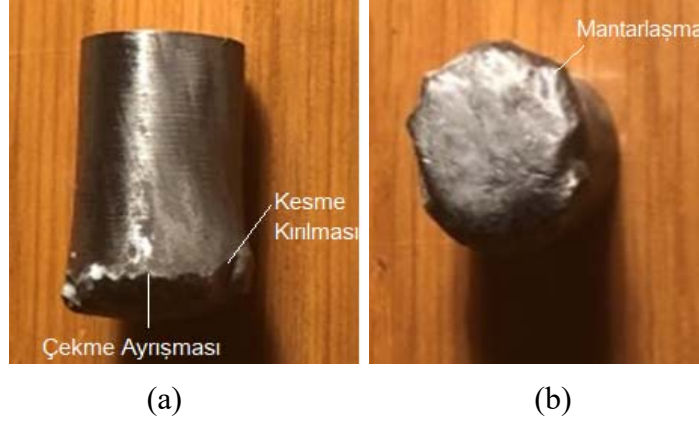
Şekil 11 - Hız-penetrasyon ilişkisi.

Penetrasyon derinliği ilişkisine benzer olarak hızın artması ile birlikte numune benzer numune koşullarında (ağırlık ve sertlik) hedef betonlarda krater derinliğinin arttığı gözlemlenmektedir. Parçanın sivri uçlu olmaması ve silindirik küt burunlu olması nedeniyle ölçülen penetrasyon derinliği ve krater derinliği ölçümleri benzer aralıkta sonuçlanmıştır. Hız-krater derinliği ilişkisi Şekil 12’de ifade edilmektedir.



Şekil 12 - Hız-krater derinliği ilişkisi.

Balistik test çalışmasında hedef gibi tungsten ağır alaşımı delici parçada da hasarlar oluşmuştur. Delici parçanın test sonrası görünümü Şekil 13'te yer almaktadır.



Şekil 13 - Tungsten parçanın test sonrası görüntüsü (a) Yan yüzey, (b) Üst yüzey.

Delici parçada, yüzey bölgesinde kesme kırılması, çekme kuvvetlerinin etkisiyle çekme ayrışması ve mantarlaşma oluşumu gözlemlenmiştir. Hedefin 500 mm kalınlıkta (ince olmaması) nedeniyle yapraklanma oluşmadığı görülmektedir.

#### 4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

##### 4.1. Holmquist Johnson Cook Malzeme Modeli

Holmquist Johnson Cook (HJC) malzeme modeli genellikle beton malzemelerin çarpma, darbe basıncı ve patlamaya karşı davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır. HJC modeli elastik-viskoplastik model olarak Holmquist tarafından geliştirilmiştir [20]. HJC modeli yüksek gerinim, gerinim hızı ve yüksek basınç altında betonun davranışının tespiti için son günlerde sıklıkla tercih edilen malzeme modelidir. Bu malzeme modeli ticari sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna programına 1997 yılında \*Mat-Johnson-Holmquist-Concrete (111#) olarak eklenmiştir [21]. HJC model olarak dayanım, hasar ve Eos (Equation Of State) bölümlerinden oluşmaktadır. Alt başlıklarda malzeme modeli ve matematiksel açıklamalarına yönelik bilgilere yer verilmektedir.

##### 4.1.1. Dayanım

HJC malzeme modelinin matematiksel formu aşağıdaki gibidir;

$$\sigma^* = [A[1 - D] + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

Denklemden gerilme ve basınç için gösterilenler  $\sigma^* = \sigma/f_c$  ve  $P^* = P/f_c$  sırasıyla normalize edilmiş gerilme ve basınç değerlerini, ara denklemde kullanılan  $f_c$  betonun karakteristik basınç dayanımını,  $\sigma$  eşdeğer gerilmeyi, P gerçek basıncı ifade etmektedir.

Denklemden diğer ifade edilenler,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^*/\dot{\epsilon}^*_0$ ,  $\dot{\epsilon}^*$  birimsiz nicelik olan normalize edilmiş gerinim hızını,  $\dot{\epsilon}^*$  gerinim hızını,  $\dot{\epsilon}^*_0$  referans gerinim hızını ifade etmekte ve hesaplamalarda genellikle  $1 \text{ s}^{-1}$  olarak değerlendirmeye alınmaktadır.  $T^* = T/f_c$  normalize edilmiş çekme gerilmesi denklemini, T çekme gerilmesini,  $f_c$  betonun karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir.  $S_{max}$  maksimum gerilmedir.

Denklemden bulunan sabitler A, B, C ve N ise, sırasıyla dayanıma, basınca, gerinim hızına ve basınç sertleşmesine bağlı parametrelerdir.

#### 4.1.2. Hasar

HJC modelinde çarpma sonrasında hasar durumu aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_P + \Delta \varepsilon \mu_P}{\varepsilon_P^f + \mu_P^f} \quad (2)$$

Burada  $\Delta \varepsilon_P$  efektif plastik gerinim değişimi ve  $\Delta \varepsilon \mu_P$  sabit basınç altında plastik hacimsel gerinim değişimi,  $\varepsilon_P^f + \mu_P^f$  ise kırılma gerçekleşene kadar sabit basınç altında toplam plastik gerinimi ifade etmektedir.

$$\varepsilon_P^f + \mu_P^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq EFMIN \quad (3)$$

Bu ifadede EFMIN malzeme sabitidir.

#### 4.1.3. Eos

HJC modelinde çarpma anında betona aktarılan basıncın, beton içindeki boşlukları kapatarak kompakt hale gelmesi durumu EOS (durum denklemi) ile sağlanmaktadır. EOS üç aşamada gerçekleşmektedir.

Birinci faz elastik durum olarak tanımlanmaktadır. Negatif basınç ile elastik limit noktası aralığında malzeme lineer elastik formdadır.

$$P = K\mu; P < P_{basl} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan ifade edilen,  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  olarak hesaplanmakta olup, burada  $\rho_0$  ilk yoğunluk,  $\rho$  ise o anki yoğunluk, K hacimsel modülüdür.  $K = P_{basl}/\mu_{basl}$  olarak hesaplanmaktadır.  $P_{basl}$  elastik limit noktasında oluşan hacimsel gerinim  $\mu_{basl}$  olarak ifade edilmektedir.

İkinci faz betonun içinde yer alan boşlukların tam olarak kapatılmasına kadar geçen geçiş aşamasıdır. Bu aşama  $\mu_{kilit}$  ve  $P_{kilit}$  noktasına erişinceye kadar devam etmektedir.

İkinci faz aşağıda yer alan denklem ile ifade edilebilir;

$$P = P_{basl} + K_{kilit}(\mu - \mu_{basl}) \quad (5)$$

$K_{kilit} = (P_{kilit} - P_{basl}) / (\mu_{pkilit} - \mu_{basl})$ ,  $\mu_{pkilit}$  sıkışmış durum  $P_{kilit}$  anındaki hacimsel gerinimdir.

Son ve üçüncü aşama betonun içinde hiçbir boşluğun kalmadığı kompakt durum olarak açıklanabilir.

$$P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \quad (6)$$

Denklemden yer alan,  $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{kilit}) / (1 + \mu_{kilit})$  hacimsel gerinim dönüşümünü,  $\mu_{kilit} = \frac{\rho_{kompakt}}{\rho_0} - 1$ ,  $\rho_{kompakt}$  betonun içinde hiç boşluk kalmadığı kompakt haldeki yoğunluğu ve  $K_1, K_2, K_3$  malzeme sabitlerini ifade etmektedir.



#### 4.2. Sayısal Analiz Çalışmaları

Sayısal analiz çalışmalarında balistik testlerde yer alan koşulların modellenmesi ve balistik test sonuçlarına uygun verilerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Analizler Ls-Dyna yazılımı ve ANSYS program çözücülerinin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Balistik testlerle aynı koşulların sağlanması açısından hedef yapısı \*Mat-Johnson-Holmquist-Concrete (111#) malzeme modeli kullanılarak 500x500x500 mm ebatlarında modellenmiştir. Modelleme iki bölge halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölge, tungsten ağır alaşımı delici parçanın en yıkıcı etkiyi gösterdiği 100x100 mm'lik yüzey alanı ile 250 mm derinlikteki bölge SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) ağırsız yöntem kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemde, öncelikle 0,1x0,1x0,1 mm ebatlarında küp elemanlar oluşturulmuş, küpün her bir köşesini işaretleyen noktalar atılmış, SPH dönüşümü ile elemanlar yok edilmiş ve belirli bir yarı çapta birbirleriyle etkileşim halinde noktalar modellenmiştir. Hedef betonunda SPH bölgesi dışında kalan ve delici parçanın etkisini daha az göstereceği öngörülen alan ikinci bölge olarak tasarlanmıştır. Bu bölge 10x10x10 mm'lik küp elemanlara bölünerek Lagrange-Lagrange çözüm yöntemine uygun modellenmiştir. Modellemede, son olarak SPH ve Lagrange kontakları gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz çalışmalarında, balistik testlerde kullanılan tungsten ağır alaşımı delici parça 20 mm boy ve 14 mm çapta silindirik geometriye, 2 mm aralıklarla heksahedron bölümlenerek modellenmiştir. Heksahedron bölümlenmenin düşük enerjili durumlarda bile yüksek deformasyonu benzetimlemeye olanak sağladığı ve doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir[22]. Tungsten ağır alaşımı delici parça, \*Math\_Johnson\_Cook (015) malzeme modeli ve Lagrange-Lagrange çözücüsü kullanılarak analiz edilmiştir. Beton içerisinde yapısal boşluklar bulunmaktadır. Çarpma anında, hedefte oluşan basıncın ve boşlukların tamamen doldurulduğu kompakt halin oluşumunun modellenmesi için durum denklemi kullanılmıştır. Analizde, HJC malzeme modeli ile uyumlu çalıştığı bilinen \*EOS\_GRUNEISEN durum denklemi tercih edilmiştir. Malzeme model parametreleri ve sayısal verileri Tablo 8-10'da yer almaktadır.

**Tablo 8 - YDB' nin parametre tablosu.**

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	G,GPa	A	B	C	N	$f_c$ ,MPa	T,MPa	EPS <sub>0</sub>
2700	33,2	0,30	1,50	0,01	0,59	135	8,4	1,00
E <sub>fmin</sub>	S <sub>fmax</sub>	P <sub>bası</sub> ,GPa	P <sub>kilit</sub> ,GPa	D1	D2	K <sub>1</sub> ,GPa	K <sub>2</sub> ,GPa	K <sub>3</sub> ,GPa
0,001	12,5	0,162	0,000095	0,003	1,000	16,2	-40	26

**Tablo 9 - Tungsten ağır alaşımı parça parametre tablosu.**

MID	RO	G	A	B	N	C	M
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00
TM	TR	EPSO	CP	SPALL	D2	D3	D4
1,72E+03	3,00E+02	1,00E+00	1,34E+02	2,00E+00	3,30E-01	-3,00E+00	4,20E-03
EFMIN							
1,00E-06							

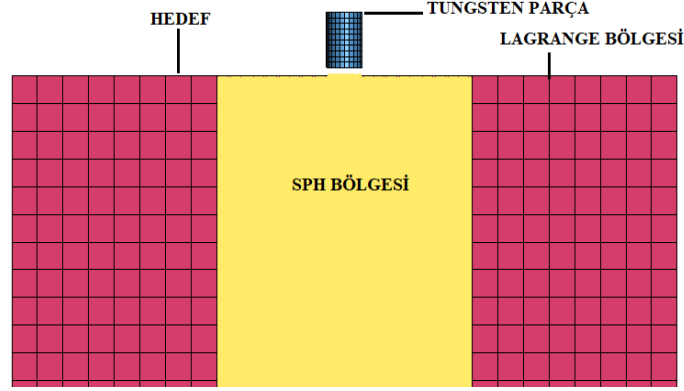
**Tablo 10 - Durum denklemi parametre tablosu.**

EOSID	C	S1	2	3	GMAO	A	E0
9	1,70E+04	1,60E+11	1,506E+09	1,77E+08	1,20E-01	1,60E-02	1,00E+00

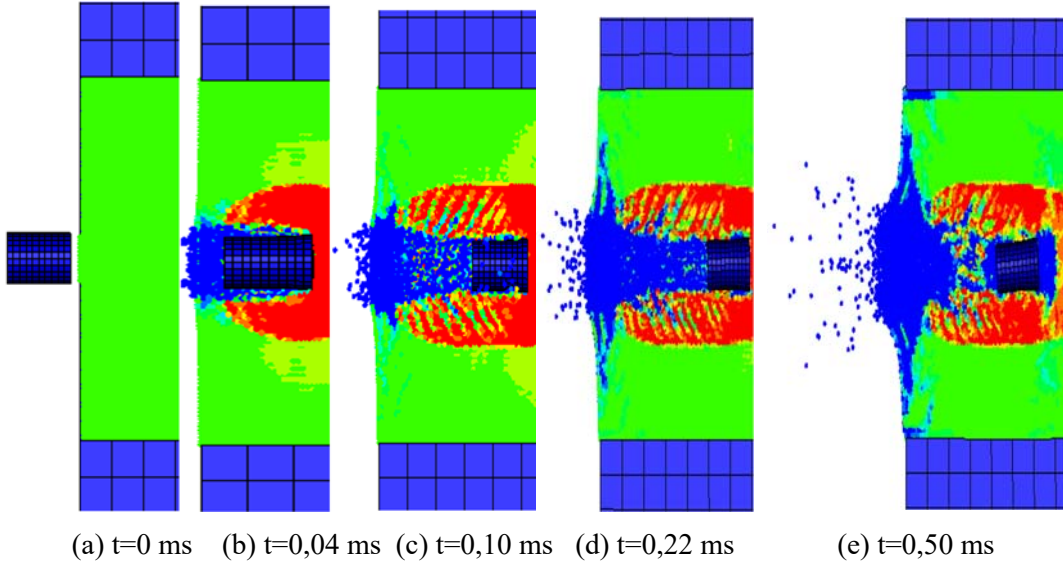
VO

0.0

Modelde hedef x, y yönlerinde rijit ve sabit olarak tasarlanmıştır. Delici parçanın hedefe çarpacağı yön z yönü olarak belirlenmiştir. Parça ve hedefin birlikte gösterildiği model görseli Şekil 14’de yer almaktadır.



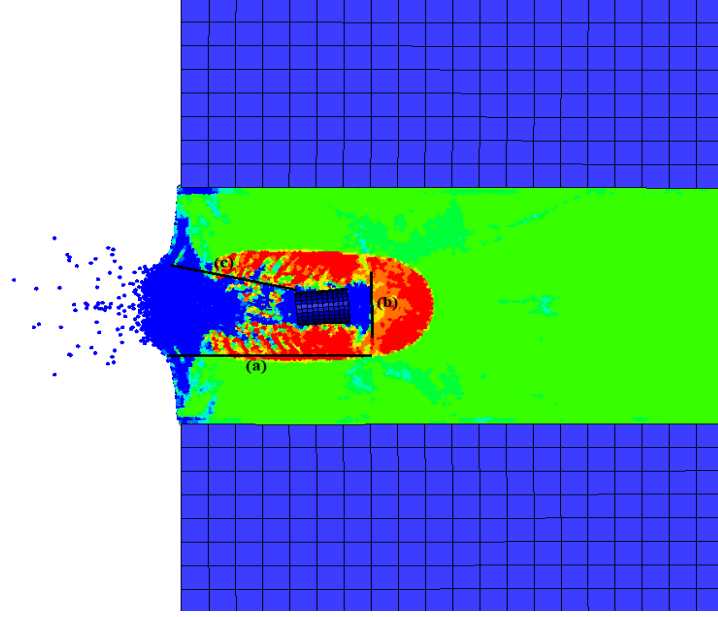
Şekil 14 - Modelin Görünüşü.



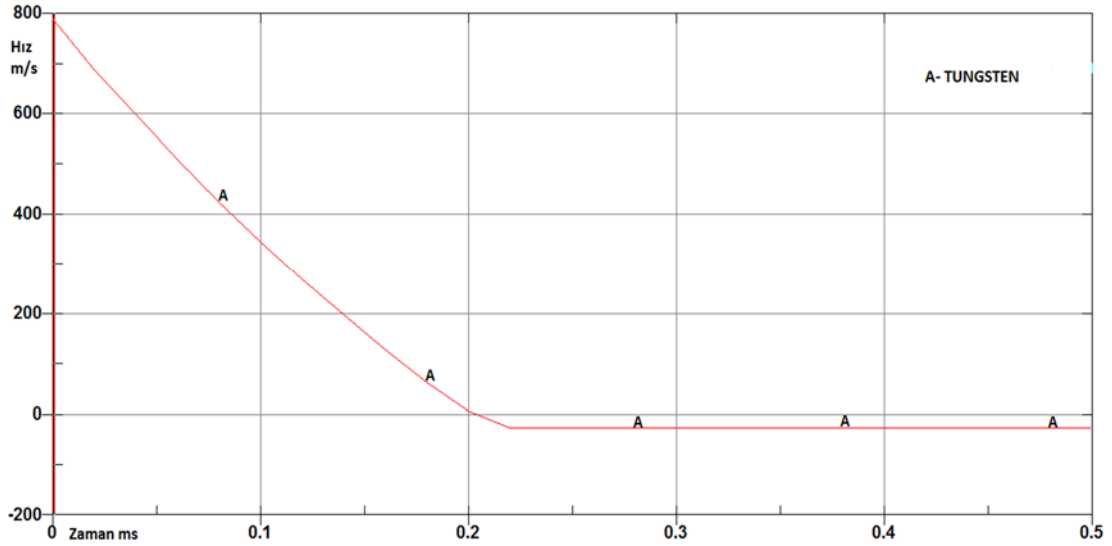
Şekil 15 - 790 m/s hızda ve zamana bağlı tungsten parçanın hedefe çarpma prosesinin nümerik görseli.

Sayısal analiz,  $t=0$  ms ile  $t=0,50$  ms zaman aralığında koşturulmuştur. Analizin zamana bağlı görünüm aşamaları Şekil 15’te yer almaktadır. 0-0,04 ms aralığında penetrasyon başlamış ve parçada herhangi bir deformasyon oluşumu gözlenmemiştir. 0,04-0,10 ms zaman aralığında penetrasyon derinliği, yoğunluk değişiminde artış ve hedeften parça kopması gerçekleşmiştir. Aynı zaman aralığında, delici parçanın ön bölümünde mantarlaşma oluşumunun başladığından söz edilebilir. 0,10-0,22 ms aralığında hedeften kopan parçalar ve kırılmalar hedef yüzeyinde genişlemiştir. 0,22. ms’de penetrasyon maksimum seviyeye erişmiştir. Hedef yüzeyindeki

çatlaklar ve kırıklar çarpışma bölgesinin tümüne yayılım göstermiş haldedir. Sayısal analizin sonlandığı 0,50 ms'de delici parçanın düşük seviyelerde hedefle açtığı, bir miktar geri tepmeye uğradığı ve şekil değiştirmesinin tamamlandığı görülmektedir. Bu anda, delici parça tarafından aktarılan kinetik enerjinin, hedef tarafından tamamen sönmüldüğü ve analizin sonlandığı ifade edilebilir. Bu analizin, penetrasyon ve krater derinliği, delik çapının ölçüm bölgesi ve sonuçlarına ilişkin görsel Şekil 16'da ve tungsten ağır alaşımı parçanın hız-zaman ilişkisi Şekil 17'de yer almaktadır.



Şekil 16 - 790 m/s'de koşutulan analizin (a) Penetrasyon derinliği 68,10 mm,(b) Delik çapı 27,20 mm,(c) Krater derinliği 73 mm görseli.



Şekil 17 - Tungsten hız-zaman ilişkisi.

Balistik test çalışmasında farklı hızlara erişim sağlandığı bilinmektedir. Modele entegre edilen parametre değerlerinin test sonuçlarına yakınsaması sonucu, farklı hızlardaki davranışın ve sonuç aralığının denetlenmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Modelleme sabit, başlangıç koşulu hız verisinin 820 m/s olarak değiştirilmesiyle analiz 2, hız verisinin 850 m/s olarak değiştirilmesiyle

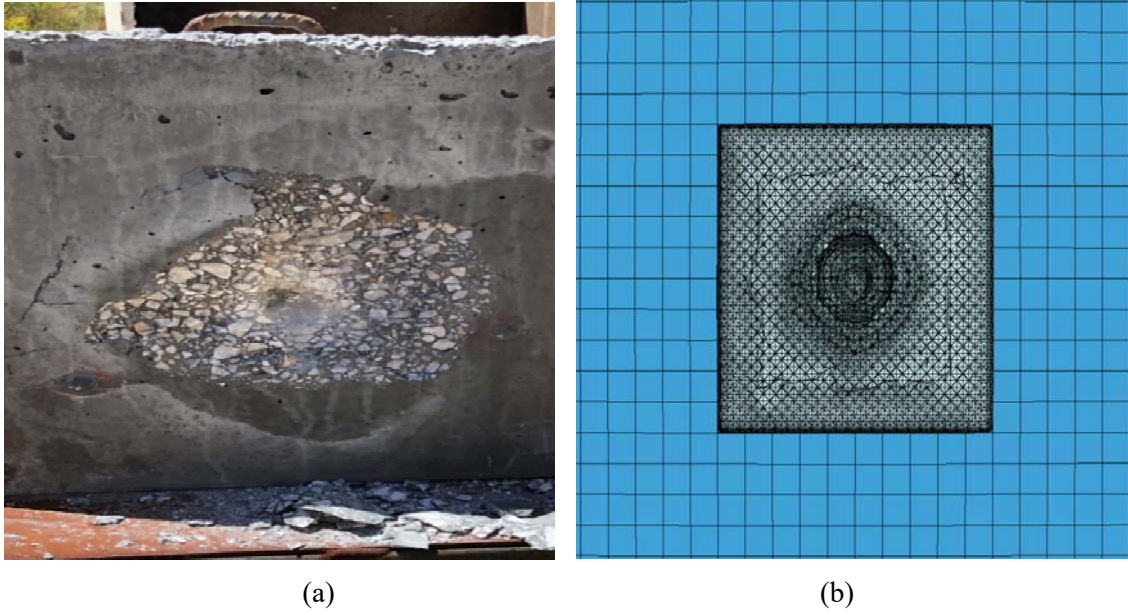
analiz 3 ve son olarak balistik testlerde erişilen en yüksek hız olan 930 m/s hız ile analiz 4 koşturulmuştur. Hızların kademeli olarak artırılmasıyla koşturulan analizlerde, hedef ve delici parçanın davranışında yüksek dereceli değişim görülmemiştir. Genellikle hızın artırılmasıyla penetrasyon ve krater derinliğinin lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hızın artırılmasının delik çapı ölçümlerinde belirgin değişime yol açmadığından ifade edilebilir. Sayısal analizlere ait penetrasyon derinliği, delik çapı ve krater derinliği ölçüm sonuçları Tablo 11’de yer almaktadır.

**Tablo 11 - Analiz sonuç tablosu.**

<b>Analiz no</b>	<b>Hız(m/s)</b>	<b>Penetrasyon(mm)</b>	<b>Delik Çapı(mm)</b>	<b>Krater (mm) derinliği</b>
1	790	68,10	23,01	73,00
2	820	71,65	24,50	75,51
3	850	72,50	25,08	75,58
4	930	72,80	26,80	75,70

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Balistik ve sayısal çalışmalarına ilişkin hedef yapısının kıyaslama görseli Şekil 18 ve tungsten ağır alaşımı delici parçanın değişimi Şekil 19’da yer almaktadır.



**Şekil 18 - (a) 4 nolu balistik test hasar görüntüsü, (b) 1 nolu sayısal analiz hasar görüntüsü.**



Şekil 19 - YDB. (a) Orijinal delici , (b) Delici hasar görüntüsü,(c) Sayısal analiz hasar görüntüsü.

Balistik ve sayısal çalışmaların bütün halde sonuç değerlendirmeleri;

- Balistik testlerde hedefin üretim kaynaklı yoğunluk değişimleri, delici parçanın çarpma açısı değişimleri ve düşük düzeyde de olsa delici parçaların ağırlık ve sertlik değerlerinin farklı olması, sayısal çalışmalarda erişilen penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçümlerine benzer aralıkta fakat farklı sonuçlanmasının üzerinde etki göstermiştir.
- Balistik test çalışmasında çarpan delici parçalar genel olarak hedeften sekerek ayrılmış ve delici parçada oluşan kinetik enerjinin tamamı hedefe aktarılamamış ve parça üzerinde kalarak delicinin deforme olması için harcanmıştır. Sayısal çalışmada ise delici parça bütünüyle hedef içinde kalmış ve tüm kinetik enerjisini hedefe aktarmıştır.
- Balistik test çalışmasında, hedef yapısından beton parçalarının kopmasıyla oluşan hasar yüzeyi, delik oluşumu ve krater yapısının olduğu görülmektedir. Sayısal çalışmada ise, SPH ile modellenen bölümlerde parça kopması, delik profili ve krater yapısı benzetimlenmesi sağlanabilmiştir. Ancak Lagrange-Lagrange çözücüsü ile bölümlenen bölgede, bölümlene aralığının geniş olması ve çarpma etkinlik alanının dışında kalması nedeniyle, balistik test görüntülerinde gözlemlenen yüzeysel çatlaklar sayısal çalışma ile benzetimlenememiştir.
- Sayısal çalışmalarda Lagrange-Lagrange çözücüsünde yüksek deformasyonlarda elamanın silinerek kaybolması ve ancak malzemenin hacminin sabit kalması zorunluluğu sebebiyle hasar bölgesi dışında kalan alanlarda oluşan yüzeysel çatlaklar ve kesme kırılmalarının görselleştirilememesine neden olduğu değerlendirilmektedir.
- Balistik test görüntülerinde genelde çimento hamuru yüzeyden sıyrılmış ve çimento hamurundan kütleli kayıplar meydana gelmiştir. Üretimde kullanılan kaba agregalar, beton dayanımını artırarak penetrasyon derinliği ve hasar yüzey alanını azaltılması yönünde önemli katkılar sunmaktadır. Sayısal analizlerde, agrega ebatlarına (ince, kaba vb.) yönelik gerçek durumu yansıtacak ölçüde agrega dağılımı modellenmesi sağlanamamıştır. Bu nedenle, malzeme modeli denkleminde çarpma ile oluşan basınç EOS (durum denklemi) ile betonun kompakt yapıya ulaştığı değerlendirilerek çözümleme sağlanmıştır.
- Delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşma ile genişleme olduğu ve bir miktar kırılmaya maruz kalarak kesit kaybına uğradığı görülmektedir. Sayısal analizde ise delici parçanın ön yüzeyinde mantarlaşma ile genişleme oluşumu benzetimi sağlanmıştır. Ancak delici parçanın modellenmesinde, Lagrange-Lagrange çözümü ve eleman boyutlarının büyük olması nedeniyle kırıklar görselleştirilmemiştir.

Sonuç olarak sayısal analizler, balistik test çalışmaları sonuçlarına hedef, çarpan parça hasar görüntüsü, penetrasyon, krater derinliği ve delik çapı ölçüm değerleri kapsamında benzer aralıkta ve yakınsayan sonuçlar vermiştir. Gelecekte bu tip Yüksek Dayanımlı Betona donatı veya fiber katkıları ilave edilerek daha yüksek hızlarda atışlar deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilerek sonuçlar değerlendirilebilir ve endüstriyel uygulamalar desteklenebilir.

### **Semboller**

$\sigma^*$	normalize edilmiş gerilme
$\sigma$	gerilme
$f_c$	betonun karakteristik basınç dayanımı
$P^*$	normalize edilmiş basınç
P	basınç
$\dot{\epsilon}^*$	normalize edilmiş gerinim hızı
$\dot{\epsilon}_0$	referans gerinim hızı
$T^*$	normalize edilmiş çekme gerilmesi
T	betonun çekme gerilmesi
$S_{max}$	maksimum gerilme
$\epsilon_p^f$	kırılma anına kadar plastik gerinim
$\mu_p^f$	kırılma anına kadar hacimsel gerinim
$\Delta\epsilon_p$	efektif plastik gerinim değişimi
$\Delta\epsilon\mu_p$	plastik hacimsel gerinim değişimi
$\rho_0$	ilk yoğunluk
$\rho$	yoğunluk
K	bulk modülü
$P_{bası}$	elastik limitteki basınç
$\mu_{bası}$	elastik limitteki hacimsel gerinim
$P_{kilit}$	kompakt durumda basınç
$\mu_{kilit}$	kompakt duruma kadar oluşan gerinim
$\mu_{kilit}$	kompakt durumda gerinim
$\rho_{kompakt}$	kompakt durumda betonun yoğunluğu
$\bar{\mu}$	hacimsel gerinim dönüşümü
$E_S$	statik elastisite modülü
$\nu$	poisson oranı
G	kayma modülü
$\epsilon$	hata terimi

### Kaynaklar

1. Ahmet Reha GÜNAY, “Çok Yüksek Dayanımlı Bir Betonun Yüksek Gerinim Hızlarındaki Davranışının Deneysel Ve Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi”, doktora tezi, Başkent Üniversitesi, 2021.
2. M.H. Zhang, V.P.W. Shimb, G. Lua, C.W. Chewa, “Resistance of high strength concrete to projectile impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.31, no.1, 2005, pp 825–841.
3. Fan Wan, Zhigang Jiang, Qinghua Tan, Yangyueye Cao, “ Response of steel tubeconfined concrete targets to projectile impact”,*International Journal of Impact Engineering*, vol. 94, no.1, 2016, pp 50-59.
4. R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, “ Energy absorption capacity of a sustainable ultra high performance fibre reinforced concrete in quasi-static mode and under high velocity projectile impact”, *Cement and Concrete Composites*, vol.68, no.1, 2016, pp.109-122.
5. A.Dawson, S. Bless, S. Levinson, B. Pedersen, S. Satapathy, “Hypervelocity penetration of concrete” *International Journal of Impact Engineering*, vol.35, no.1, 2008, pp. 1484–1489.
6. H. Wu, Q. Fang, X.W. Chen, Z.M. Gong, J.Z. Liu, “ Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1320 m/s”, *Construction and Building Materials*, vol.74, no.1, 2015, pp.188–200.
7. Jason T. Gomez, Arun Shukla, “Multiple impact penetration of semi-infinite concrete”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.25, no.1, 2001, pp 965–979.
8. Joosef Leppanen,” Concrete Structures Subjected to Fragment Impacts”, doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2004.
9. ZhongCheng Mu, Wei Zhang, “An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.38, no.1, 2011, pp. 770-778.
10. Petr Máca, Radoslav Sovják, Petr Konvalinka,” Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.63,no.1, 2014, pp. 158-163.
11. L. Guo a, Y. Hea, X.F. Zhang, C.X. Pang, L. Qiao, Z.W. Guan, “Study mass loss at microscopic scale for a projectile penetration into concrete”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.72,no.1, 2014, pp. 17-25.
12. H. Wu, Q. Fang, J. Gong, J.Z. Liu, J.H. Zhang , Z.M. Gong, “ Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC”,*International Journal of Impact Engineering*, vol.84, no.1, 2015, pp. 38-53.
13. Chuang Liu, Xianfeng Zhang , Haihua Chen, Jipeng Wang, Haiyang Wei, Wei Xiong, “Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities”, *International Journal of Impact Engineering*, vol.138, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103482>.
14. Jian Liua, Chengqing Wua, Yu Sua, Jun Lia, Ruizhe Shaob, Gang Chenc, Zhongxian Liub,“Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts” *Engineering Structures*, vol.173, no.1, 2018, pp. 166–179.
15. Lavan, O. , De Stefano, M. , “Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures” *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, Springer, 2013, [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9789400753761>.

16. Mario Lucio Puppia, Linda Giresinia, Fabio Doveria and Mauro Sassub, “ Structural irregularity: The analysis of two reinforced concrete (r.c.) buildings”, Engineering Solid Mechanics, vol.7, no.1, 2019, pp. 1-23.
17. “Tungsten heavy alloys”, Kennametal Densalloy, Engineering Guide, 2014.
18. Lin Huang “In Situ oxide dispersion strengthened tungsten alloys with high compressive strength high strain to failure” Acta Materialia, vol.122, no.1, 2017, pp.19.
19. Hakan HAFIZOĞLU, “Tungsten ağır alaşımlarının yüksek gerinme hızlarında deformasyonunun deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması”, doktora tezi, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, 2019.
20. Holmquist TJ, Johnson GR, Cook WH, “A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures”, 14 th international symposium on ballistic, vol.1, no.1, 1993, pp. 591–600.
21. Malvar LJ, Crawford JE, Wesevich JW, “A plasticity concrete material model for DYNA3D”, International Journal of Impact Engineering, vol.19, no.1, 1997, pp. 847–873.
22. Sjaardama, G. ,Benzley, S. , Perry, E. , Merkley, K. , Clark, B. , “A Comparison of All Hexagonal and All Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elasto-plastic Analysis.” 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, vol.1, no.1, 1995, pp. 179-191.



## Sürdürülebilir Binalarda Yapı Malzemesi Olarak Kullanılan Miselyum Tuğlası

Mehmet ÖZMEN<sup>1</sup>, Barış Yiğit CANPOLAT<sup>2</sup>, Hakan KARATAY<sup>3</sup>,  
Banu Yeşim BÜYÜKAKINCI<sup>4</sup>

### ÖZET

Türkiye’de ve dünyada sürdürülebilir kaynaklara olan yönelim her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de kendini göstermektedir. Gelişen ve yükselen sürdürülebilir yeşil yapı tasarımı için geliştirilmekte olan ve kullanılmaya başlanan çok çeşitli malzemelerden biri de bu çalışmanın öznesi olan “**Miselyum Tuğlası**”dır.

Miselyum, polimer bileşimli, lifli, çoğunlukla yer altında bulunan, tamamen doğal (mantar özlü), geri dönüşümü kolay, elverişli mekanik özelliklere sahip bir malzemedir. Geleneksel yapı malzemeleriyle rekabet edebilecek özellikleriyle dış cephe giydirme ve yer kaplama, tuğla, yalıtım malzemesi ve mobilya gibi alanlarda uygulanarak dünyada kendini kanıtlayan Miselyum, Türkiye’de de tanınmakta olmasına rağmen henüz kendine alan bulamamış ve örnek teşkil edebilecek çalışmalarda kullanılmamıştır. Statik açıdan yeterli yapı sabit yüklerini azaltabilecek hafif yapılı, yüksek ısı ve ses yalıtımlı, zararlı organizmalara karşı korumaya sahip bu çevreci malzeme Türkiye’de daha iyi tanınmalı, desteklenmeli ve çeşitli sektörlerde kullanılarak yaygınlaşmalıdır.

Bu çalışma sürdürülebilir yeşil yapılaşma eğilimine dikkatleri artırmaya katkıda bulunup Türkiye’deki inşaat sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalara, çalışanlara, yöneticilere kaynak oluşturacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürdürülebilir yapılar, Sürdürülebilir yapı malzemeleri, Miselyum, Bitkisel mantar.

### ABSTRACT

#### **Mycelium Brick Used As a Building Material in Sustainable Buildings**

The trend toward sustainable resources is evident in Turkey and around the world in the construction sector, as well as in all other sectors. Mycelium Brick, one of the various materials

---

1 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - mehmetozmen1@stu.aydin.edu.tr

2 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - bariscanpolat@stu.aydin.edu.tr

3 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - hakankaratay@stu.aydin.edu.tr

4 İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul - yesimbuyukakinci@aydin.edu.tr

*being produced and used for constructing and growing sustainable eco-friendly structure design, is the subject of this research.*

*Mycelium is a polymer-based, fiber-based substance that was largely found underground, fully natural (fungal essence), easy to recycle, and had good mechanical properties.*

*Mycelium, which has proven itself in the world by being applied in areas such as exterior cladding and floor covering, brick, insulation material and furniture with its features that can compete with traditional building materials, has not yet been used in studies that can set an example, although it is also known in Turkey. This eco-friendly material is statically adequate, lightweight, thermally soundproof, and resistant to dangerous organisms, all of which can lower building constant loads. It should be better understood, promoted, and spread among Turkey's diverse sectors.*

*By drawing attention to the trend of sustainable eco-friendly construction, this study will provide resources for enterprises, employees, and managers in the construction industry in Turkey.*

**Keywords:** *Sustainable buildings, Sustainable building materials, Mycelium, Vegetative fungi*

## 1. GİRİŞ

Sanayileşmiş ülkelerde çıkarılan doğal kaynakların yaklaşık %40'ı kullanılarak inşa edilen binalar, çevre üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [1]. Ortaya çıkan atıkların %45 ila %65'i inşaatlar tarafından üretilmektedir [2]. Buna ek olarak sera gazlarının %30'undan yapı malzemeleri sorumlu olup, zararlı emisyonların %18'inin malzemelerin üretim aşamasında kullanılan enerji ve ulaşımdan kaynaklandığı tespit edilmiştir [3].

Binalar karbon emisyonlarının büyük bir kısmından sorumlu oldukları ve önemli miktarda kaynak kullandıkları için çevre üzerinde önemli ve sürekli bir etkiye sahiptir. Binalar dünyanın tatlı su kaynaklarının 1/6'sını, odun kullanımının 1/4'ünü, malzeme ve enerji akışının 2/5'ini kullanmaktadır. İnşaat sektörü temel yapı malzemelerinin üretimi, nakliyesi ve montajından önemli miktarda enerji tüketmektedir. Düşük somutlaştırılmış enerji malzemeleri enerji tasarrufu sağlar ve Sera gazları emisyonlarını sınırlandırarak çevre üzerindeki etkiyi de azaltmış olur [4].

**Amaç;** Varlıkların tükenmesi, erozyon, çevre kirliliği, dayanıklılık, yaşam beklentisi... gibi yapı malzemeleriyle tanımlanan karmaşıklıkla belirlenerek yapılar daha ekonomik bir şekilde inşa edilmelidir. Böylece sadece geliştirme ve olumsuz yönleri azaltılmakla kalmayıp bina ömrünü de uzatır. Benzer şekilde yeniden kullanım veya ham malzemenin geri kazanımı için de tasarlanmalıdır [5].

Bu olumsuzluklara tepki ve önlem olarak Türkiye'de ve dünyada sürdürülebilir yapılaşmaya yönelim başlamış ve ilgi her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de giderek artmakta, ivmelenmektedir. Sürdürülebilir inşaat 1993'te ilk defa uluslararası bina konseyi tarafından düzenlenen inşaat sektöründeki profesyonelleri ve araştırmacıların katılımıyla tanımlanmıştır. 1994'te ki 1. Uluslararası Sürdürülebilir İnşaat Konferansında ise inşaat sektörünün sürdürülebilirlik alanındaki sorumlulukları belirlenmiştir. Buna göre sürdürülebilir inşaat konusu "Çevreyi gözetken kurallar doğrultusunda kaynakları etkili kullanarak sağlıklı inşaat çevresi oluşturmak." diye ifade edilmiştir. Daha sonra sürdürülebilir inşaat kavramını "yeşil inşaat" almıştır. Bu yeni ifadeye göre tanımlamalar yapılmaya başlanmıştır. Yeşil inşaat bir projenin çevre üzerindeki etkilerini en aza indirecek yönde yapım kurallarına uygun olarak planlanması, yönetilmesi ve geri dönüştürülebilir olması biçiminde tanımlanmıştır [6]. Takip eden yıllarda da bu alanda çalışmalar artmış ve dünya çeyrek asrı aşan tecrübe, birikim elde etmiştir.

Enerji tasarrufu, emisyon kontrolü, malzemelerin üretimi ve uygulanması, yenilenebilir kaynakların kullanımı ve yapı malzemelerinin geri dönüştürülerek yeniden kullanılması ile ilgili

acil değişiklikler gereklidir. Artan çevresel kaygılar nedeniyle yeni çevre dostu yapı malzemeleri ve uygulamalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda hava kirliliği, biyolojik çeşitliliğin ve doğal kaynakların tükenmesi, iklim değişikliği, atık oluşumu, su kaynaklarının kirlenmesi ve tükenmesi, kentsel çevrenin bozulması acil önlem alınması gereken küresel sorunlar haline gelmektedir. Karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarından kaynaklanan iklim değişikliği ve küresel ısınma, insan refahı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehdidi kontrol altına almak için dünyanın 2050 yılına kadar emisyonları mevcut seviyelerin yaklaşık %50 altına düşürmesi gerekiyor [7].

**Kapsam;** Yakın gelecekte yenilenemeyen kaynakların tükenmesi nedeniyle, inşaatta düşük yerleşik enerjili ve tercihen yerel olarak mevcut olan yapı malzemelerine doğru bir kayma olacaktır. Ortak yapı malzemeleri (beton, çelik, ahşap ve plastik) ile karşılaştırıldığında, bu malzemeler düşük toksik, dayanıklılık, düşük sera gazı ve diğer kirlenici emisyon seviyelerini düşürmek, yüksek geri dönüşüm potansiyeli olan ve minimum işleme gereksinimleri gibi birçok faydalı özellikleri vardır. Birçoğu biyolojik olarak parçalanabilir ve tehlikeli yan ürünler üretmezler [7].

Günümüzde artık elde edilen birikimler sayesinde sürdürülebilir yapılaşma konusunda çok daha profesyonel adımlar atılmaktadır. Yeşil yapıları küresel ölçekte kabul gören kriterlere göre değerlendirerek puanlayan ve sertifikalandıran uluslararası kuruluşlar bulunmaktadır. Örneğin; BREEAM (İngiltere, 1990), CASBEE (Japonya, 2001), DGNB (Almanya, 2007), Green Globes (ABD, 2004), LBC (ABD, 2006), HQE (Fransa, 1995), Green Star (Avustralya, 2003) gibi gelişmiş ülkelerde ortaya çıkan ve sayıları artan girişimler, bu alana yoğunlaşan ilgiyi ve gerekliliği kanıtlamaktadır. Sürdürülebilir inşaatlarda çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan en iyi koşulları sağlayan, canlıların sağlığını tehdit etmeyen, tekrar kullanılabilen, doğaya kolayca dönebilen, üretimleri enerji etkin olarak gerçekleştirilebilen, ahşap, sıkıştırılmış toprak, saman esaslı bileşimler, demir-çelik sanayisi kaynaklı ferrock, bambu ve bu çalışmanın öznesi olan bitkisel(mantar) özlü Miselyum gibi çeşitli yenilikçi malzemeler kullanılmaktadır. Yapı malzemeleri seçimindeki genel konular: kaynak bulma, performans, bakım ve maliyettir [7]. Mantarlar, poliüretan ve polistiren gibi fosil bazlı ve sentetik malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptir. Bu malzemenin mimarlık ve inşaat alanında geliştirilmesi ve uygulanması şimdiye kadar pek araştırılmamış ve karakterize edilmemiştir [8].

Sürdürülebilir yapı malzemesi olarak farklı seçenekler de mevcuttur. Bunlardan bahsetmek gerekirse,

**Ferrock**, çoğunlukla geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilebilen demir açısından zengin bir malzemedir. Yapılan eğilme testleri ve çeşitli deneyler sonucunda Portland çimentosu ile üretilen betondan 5 kat daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bunların yanında esneklik özelliği ile de öne çıkmaktadır. Yüksek düzeyde basınca ve harekete dayanabilir. Beton tamamen katı olmasından dolayı ufak hareketler betonu zayıflatan çatlaklara neden olabilir. Ferrock ise esneklik özelliği sayesinde hareketlere dayanabilir. Bu nedenle deprem gibi sismik aktivitelerin olduğu bölgelerde kullanmak güvenlik ve sürdürülebilirlik açısından daha uygundur.

**Bambu**, dev otların bir üyesi olan bu malzeme, Latin Amerika, Asya ve Afrika'nın tropikal bölgelerinde bol miktarda bulunur. Mükemmel mekanik özellikleri, hafifliği, esnekliği, yüksek büyüme hızı ve nispeten düşük maliyeti sayesinde, sürdürülebilir yapı malzemesi olarak birçok fırsata sahiptir. Bambu kullanımı özellikle laminant parke, panel, sunta ve ateş tahtası üretiminde hızla artmaktadır [7].

**Sıkıştırılmış toprak**, insanlığın binlerce yıllık uzun ömürlü bir yapı malzemesidir. Sıkıştırılmış topraktan yapılan modern binalar, bambu veya inşaat demiri ile daha güvenli hale getirilebiliyor.

**Ahşap**, kolay ulaşılabilir, tanınır, estetik ve mekanik özellikleri açısından üstün yeteneklere sahip olması bakımından en yaygın kullanılan sürdürülebilir alternatif malzemelerden biri olarak kabul ediliyor. Enerji tasarrufu sağlayarak düşük işlem gerektirir.

**Miselyum**, polimer bileşimli, lifli, çoğunlukla yer altında bulunan, tamamen doğal olup mantarların bitkisel ve kök kısmından üretilen, geri dönüştürülmesi kolay, elverişli mekanik özelliklere sahip bir malzemedir. Geleneksel yapı malzemeleriyle rekabet edebilecek özellikleriyle dış cephe giydirme ve yer kaplama, tuğla, yalıtım malzemesi ve mobilya gibi alanlarda uygulanarak dünyada kendini kanıtlayan ve ticari pazarda yer bulabilen Miselyum, Türkiye’de de tanınmakta olmasına rağmen henüz kendine alan bulamamış, örnek teşkil edebilecek çalışmalarda kullanılmamıştır.

**Mantarlar hakkında temel bilgiler**, Mantarlar alemi Basidiomycota filumunun üyelerinin yenilebilir veya zehirli mantarlardan insan ve bitki patojenlerine kadar bir dizi ekolojik strateji sergilediği çeşitli bir krallıktır. Geçmişte araştırma faaliyetlerinde bulunan araştırmacıların çoğu hem ekolojik bağlamda hem de örneğin ahşap binalarda bu tür mantarların zararlı etkilerini azaltmak için lignoselüloz bozunma mekanizmalarını aydınlatmaya odaklanmışlardır. Atık malzemelerini kolonize etmek için ahşap çürütme mantarlarının kullanımı sınırlı ilgi görmüştür [9].

Miselyum kompozitlerinin benzersiz olmalarının nedeni, çok özel koşullarda büyüyen canlı mantar kültürlerini gerektirmeleridir. Miselyumun gelişmek için bol miktarda besin kaynağına, havaya, karanlığa, sıcaklığa ve neme erişimi olan steril bir ortama ihtiyaçları vardır. Selülozik malzemelerle (gıda) birleştirildiğinde miselyumla stabilize edilmiş malzemeler kurutulduğunda poliüretan köpüğü andıran bir yoğunluğa ve dayanıklılığa sahip olan yoğun kompozit matrisleri oluşturma yeteneğine sahiptirler. Birkaç farklı lifli substrat (örneğin kenevir, mısır kabuğu veya ağaç talaşı) ve miselyum türü, değişen yapısal bütünlük, yoğunluk ve görsel kaliteye sahip miselyum biyo-kompozitlerini yapmak için birleştirilebilir [10].

Miselyum bazlı bileşimli (kompozit) malzemeler mekanik, hafiflik ve birçok çevre dostu özellikleri konusunda avantajlar gösterse de büyük ölçekli uygulamalar için bazı sınırlandırmaları ve zorlukları vardır [11]. Yine de gelişen teknoloji ve artan ilgi neticesinde yeni çalışmalar ve farklı malzemelerle birlikte Miselyumdan elde edilen yapı malzemelerinin çeşitleneceği, mekanik özelliklerinin daha elverişli hale geleceği, ticari anlamda daha ekonomik olacağı, kaydedilen ilerlemelerle birlikte Türkiye’de de inşaat sektöründe öncü yapı malzemelerinden biri olacağı düşünülmektedir.

Mekanik açıdan yeterlilik gösterebilen, yapı sabit yüklerini azaltabilecek hafif yapılı, yüksek ısı ve ses yalıtımlı, zararlı organizmalara karşı korumaya sahip bu çevreci malzeme, Türkiye’de daha iyi tanınmalı, desteklenmeli ve çeşitli sektörlerde kullanılarak yaygınlaştırılmalıdır.

Bu çalışma sürdürülebilir yeşil yapılaşma eğilimine dikkatleri artırmaya katkıda bulunup Türkiye’deki inşaat sektöründe faaliyet göstermekte olan firmalara, çalışanlara ve yöneticilere kaynak oluşturacaktır.

## **2. YAPI MALZEMESİ OLARAK MİSELYUM**

**Miselyumun Yapısı:** Miselyum, mantarların bir hif kütesinden oluşan vejetatif (bitkisel) kısmıdır. Hyphae, mantarlarda büyüme görevi yapan uzun dallanan filamentli yapıdır. Her hif büyüme sürecini bölünerek ilerleten ve ortalama çapı 4-6 mikrometre olan bir veya daha fazla hücreden oluşur. Miselyum, hiflerden salgılanan enzimlerle biyopolimerleri daha basit gövdelere ayırır ve daha sonra canlı organizmaların karbon bazlı besinleri sindirmek için hücresel ölçekte bir eylem olan aktif taşıma ile onları emer. Bu süreç hiflerin alt tabakadan havaya büyümesini sağlayarak “mantar derisi adı verilen alt tabakayı kaplayan kabarık veya kompakt bir tabaka”

oluşturur. Bu nedenle Miselyumdan oluşan mantar kolonileri toprak, talaş, kâğıt ve diğer karbon bazlı maddeler gibi organik substratların (enzimlerin tepkimelerinde işlenen maddelerin) içinde veya yüzeyinde bulunabilir. Miselyumun doğada birincil kullanımları olarak organik maddede karbon bulunması nedeniyle organik atıkları ayrıştırma yeteneği ile ilgilidir [12].

**Miselyumun Çeşitleri:** Miselyum bazlı malzemelerin iki ana grubu vardır: Saf miselyum ve miselyum bazlı biyo-kompozitlerdir. Saf miselyum substratın tamamen bozulmasının sonucudur. Ayrıca “mantar derisinin substrattan çıkarılması” ile de elde edilebilir. Miselyum bazlı biyokompozitler ise büyüme sürecinde miselyumun kış uykusuna yatması veya öldürülmesinin sonucudur. Substratın kolonizasyonu sırasında materyal kurutulmuş veya ısıtılarak mantar büyümesi durdurulabilir. Miselyumun kurutulması kış uykusuna neden olacağından bu da çevre koşulları izin verdiğinde mantarların büyümesini yeniden başlatmaya hazır olduğunu ve ısıtmanın mantar büyümesini kalıcı olarak durduracağı anlamına gelir. Bu işlemlerden herhangi birinin sonucu olarak miselyum bazlı bir biyo-kompozittir. Büyüme süreci sırasında kısmen mantarın biyokütlesi ile değiştirilen substratı çimentolamaktadır. Kompozitler yalıtım panelleri, ambalaj malzemeleri, tuğlalar veya yeni tasarım nesnelere üretmek için şekillendirilebilir. Hem saf hem de kompozit miselyumun özelliklerine mantar türlerine, substratlara, büyüme koşullarına, malzemenin işlenmesine ve katkı maddelerine bağlıdır [12].

**Miselyumun Üretimi:** Miselyum bazlı biyolojik yapılar üretmek için bir organik madde substratına ayrı bir mantar türü aşılanır. Bitkisel miselyum hiphalarını uçtan uzatmak ve yeni hifleri dallandırmak ve bol bir ağ oluşturup bunları birleştirmek için bozunma ürünlerini kullanarak organik substratı bozarak kolonize eder. Alt tabakanın içerisine giderek daha sıkı bir ağ olarak gelişen hiflere nüfuz eder. Zamanla substrat kısmen mantar biyokütlesi ile değiştirilir ve ortaya çıkan miselyum substratın kendisini güçlü bir şekilde çimentolayarak biyokompozit bir malzeme olarak sonuçlanır [13].

**Büyüme Sürecinin İyileştirilmesi:** Mantar türlerinin seçiminde samanın bozunma hızının da (ana biyokütle kalıntısı türü olarak) dikkate alınması gerekir. Saman veya diğer lignoselülozik substratın hızlı kolonizasyonuna sahip olmak istenir. Bununla birlikte substratın aşırı bozunması saman bloğunun zayıflamasına neden olabilir. İzolatlar, agar ve ayrıca odun üzerinde büyüme hızları bakımından farklılık gösterir. Ancak bu büyüme hızları, kuru ağırlık kaybının kapsamı ile mutlaka ilişkili değildir. Bunun nedeni bu mantarların kolonizasyon stratejilerinde farklılık göstermesidir [9].

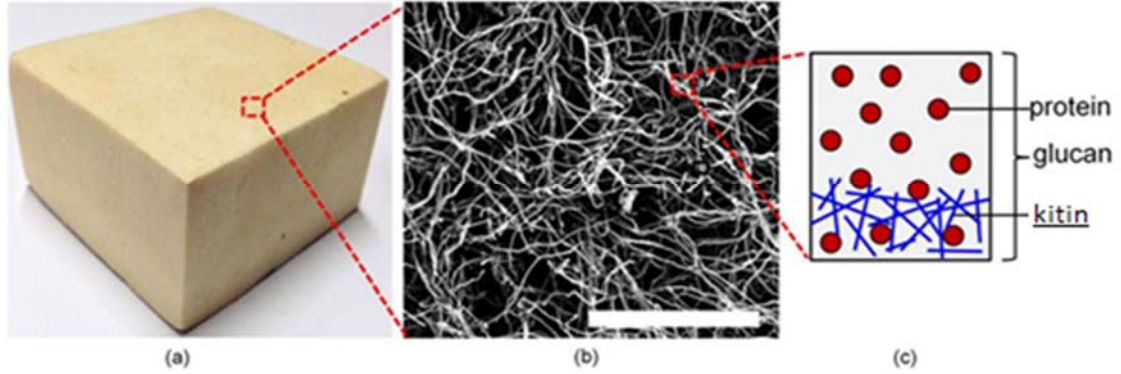
**Miselyumun Genel Kullanım Alanları:** Miselyum bazlı kompozitler akustik, yalıtım, yanmaz ve mekanik uygulamalarda köpük, ahşap ve plastiğin yerini alabilen malzemelerdir. Düşük iletkenlik indeksi, yüksek ses emilimi ve alev geciktirici indeksi göz önüne alındığında inşaatla kullanılan geleneksel malzemelerin yerini alabileceği gibi sürdürülebilir özellikleri de göz önüne alındığında aynı zamanda sürdürülebilir inşaatın geleceğinde önemli bir rol oynayabilir [13]. Verimli yalıtım performansı, yangına dayanıklılık ve hava temizleme gibi özelliklerle ilgili olarak binalarda yalıtım için kullanılan kimyasal petrol bazlı malzemelerin yerine miselyum bazlı malzemelerin kullanılması önerilmektedir [12].

## 2.1. Miselyumun Yapısal, Morfolojik ve Mekanik Özellikleri

Miselyum daha çok yer altında bulunan ve çok sayıda uzantılara sahip bir ağ sistemine benzemektedir. Polimerik ve hızlı büyüyen gittikçe daha da dallanan bitkisel liflerden oluşması en belirleyici özelliklerindedir (Şekil 1).

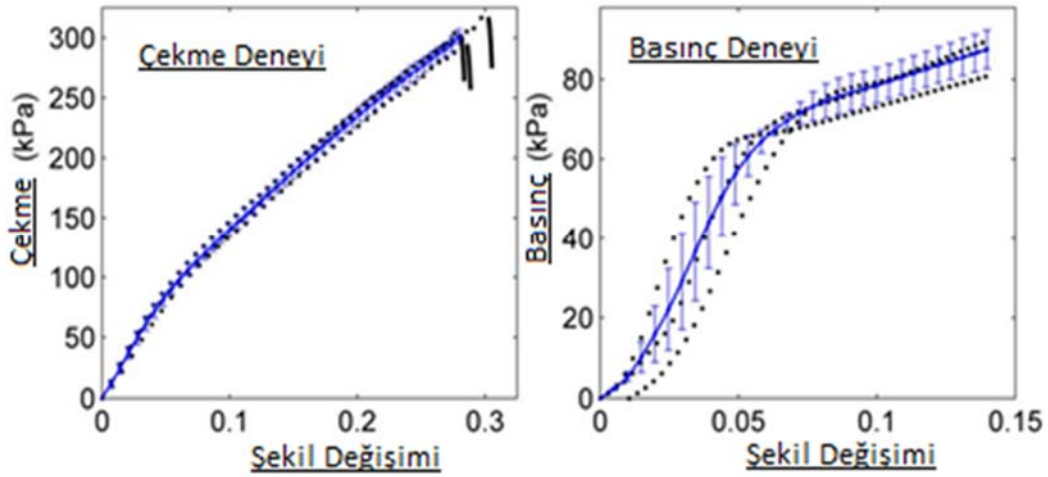
MR İslam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler ve RC Picu [4] tarafından 20 Ekim 2017 tarihinde yayımlanan çalışmada Miselyumun 200mm x 6mm x 3.5mm boyutlarındaki numuneleri kullanılarak çekme, 20mm x 20mm x 16mm boyutlarındaki numuneleri kullanılarak basınç

dayanımı ve yapısal özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlarından Miselyumun çekme ve basınç altındaki doğrusal olmayan davranış özelliklerini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 1 - (a) makro ölçekli görünüm (5cm×5cm×5cm), (b) mikro yapının SEM görüntüsü -ölçek çubuğu 100 µm- ve (c) tek hif duvarının yapısını gösteren şema. [14]

Miselyum bileşenleri çekme yüklerine maruz bırakıldığında uygulanan yük arttıkça şekil değiştirme artmakta ve lifler arasında bağlarda kopmalar meydana gelmektedir (Şekil 2). Basınç yükleri altında ise yük arttıkça Miselyum bileşenlerinin lifleri arasında bağlarda sıkılaşma meydana gelerek direnci artmaktadır (Şekil 2). Basınç yüklerine karşı şekil deformasyonu çok az miktarda olup bariz şekil değişikliği meydana gelmemektedir.



Şekil 2 - Miselyum numunesinin tek eksenli çekme ve basınç gerilmeleri altındaki davranışı. [14]

(Noktalı çizgiler (siyah), eş yoğunluktaki(41kg/m<sup>3</sup>) üç numune üzerinde gerçekleştirilen testlerin aralığını temsil eder ve düz çizgiler (mavi) karşılık gelen ortalama yanıtları temsil eder (çubuklar ortalamaya göre standart sapmayı temsil eder.) [14]

Miselyum, ince lifli bir yapısı olan, yenilenebilirliği son derece hızlı şekilde olan ve doğal malzeme kaynağı olarak değerlendirilebilen, hafif, istenilen herhangi bir kalıpta yetişebilme, özellikle yanmaya karşı oldukça dirençli ve yalıtımı yüksek olan bazı özellikleri sayesinde de yalıtım sağlayabilen bir yapı malzemesidir.

## 2.2. Miselyumun Avantaj ve Dezavantajları;

### Avantajları:

- Doğal olarak oluşurlar.
- Üretimleri için çok az harici enerji ile büyütülen ve kompostlaştırılan bir biyo-kompozit yapı malzemeleri sınıfındadır. Modern çağda binaların kısa ömürlerinin etkisini büyük ölçüde dengeleyebilir.
- Tamamen biyolojik olarak parçalanabildikleri için yıkımdan sonra atık üretmezler.
- Miselyum bazlı malzemeler, malzeme üretmek için diğer endüstrilerden gelen atıkları kullanarak yeşil üretimleri nedeniyle sürdürülebilir bir malzeme olarak avantajlıdır.
- Malzemenin diğer bazı avantajları ise hafifliği, yalıtım kapasitesi ve yangın geciktiriciliğidir.
- Betondan çok daha zayıf ve hafif olan monolitik miselyum beton teknikleri kullanılarak mümkün olan birçok avantajı ve yüzey kalitesini alır.
- Doğru form, dahili takviye sistemleri ve sağlam ancak nefes alabilen kalıp malzemelerinin bir kombinasyonu ve monolitik miselyum teknikleriyle büyüyen yapıların başarısı için çok önemlidir.
- Biyo-malzemelerden ve tarımsal atıklardan oluşan kompozitlerden üretilen yapıları hızla büyütme yeteneği döngüsel malzeme ekonomilerini teşvik ederek mevcut inşaat uygulamalarını büyük ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir.
- Binaların çok kısa beklenen ömürleri ile inşa edildiği ve bu da çöp sahasının bertaraf edilmesiyle sonuçlandığı bir zamanda miselyum binaların kalıcılığına, hangi malzemeleri kullandığımızı ve bunları kullanmayı bitirdikten sonra nereye gittiklerine dair geleneksel algılarımıza meydan okumaya yardımcı olabilir.
- Dönüştürme metodolojisi, malzeme özelliklerini, üretim tekniklerini ve form alternatiflerini aynı anda keşfeden özyinelemeli bir yöntem olarak açıklanmıştır.

### Dezavantajları:

- Miselyum kompozit malzemelerinin en büyük dezavantajı geleneksel yapı malzemelerine kıyasla çok düşük dayanım kapasitesine sahip olmalarıdır.
- Bir üst yapının bir parçası olarak kullanılan miselyum malzemesinin en büyük zayıflığı dış elementler ve organizmalar karşısında kırılma olmasıdır.

## 2.3. Miselyumun Malzeme Olarak Kullanım Yerleri:

Mantarın kök kısmında oluşan Miselyum, doğadan bitkisel olarak beslenen, atık üretmeyen bir malzeme olarak endüstriyel malzemelerin yerine kullanılabilir. Mantardan vegan bir malzeme ile doğa dostu ayakkabı, çantalar, çeşitli yapı malzemeleri ve satın alan kişinin mantar köklerinden kendisinin yetiştirebileceği lamba (Şekil 3) vb. üretilerek insanlığın hizmetine sunulabilecektir.

19-27 Ekim 2019 tarihleri arasında Hollanda Tasarım Haftası'nda Carlo Ratti'nin tasarladığı Miselyum panellerden kaplanan The Growing Pavilion (büyüyen pavyon) tasarımı sergilemişler. The Growing Pavilion ilk bakışta dev bir pasta gibi görülmektedir. Miselyum panellerin üzerini de İnka halkı tarafından geliştirilen ve kullanılan organik bir dolgu macunu ile kaplamışlar (Şekil 4). [15]



Şekil 3 - Mantar köklerinden yetiştirilen lamba



Şekil 4 - Panellerin üzerinde yetişen mantarlar

### 3. MİSELYUM TUĞLASI:

Miselyum tuğlaları, doğranmış atık mısır saplaları ve bu saplaları birbirine kaynaştırmak için kullanılan mantar kökleri olan canlı Miselyumlar birleştirilerek yapılmaktadır.

Hy-Fi 2014 yılında New York'ta Moma PS1'da Genç Mimarlar Programı için The Living'in mimarı David Benjamin tarafından 43cm x 18 cm x 10 cm ebatlarında canlı Miselyumdan tasarlanmıştır.

Tablo 1 - HY-FI Miselyum tuğla özellikleri [16].

MİSELYUM TUĞLA	
Boyutları	43cm x 18cm x 10cm
Ağırlık	680,00 gr
Yoğunluk	0,11 gr/cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma Mukavemeti	6,897 Mpa (1000 psi)' ye kadar malzeme sertliğini kaybetmez,
Elastisite Modülü	1,379 Mpa (200 psi),
Gerilme Direnci	0,207 Mpa (30 psi),
Nem Emilimi	%3' ten azdır,
Termal İletkenlik	Betondan 2 ~ 8 kat daha azdır,
Termal Yayımlım	Betondan 10 ~ 40 kat daha azdır,

Karbon ayak izi olmayan ve çok düşük enerji gerektiren tuğlalar miselyum ve atık malzemelerle yapılmıştır. Hy-Fi'nin baca şeklindeki tasarımı (Şekil 5) iklim kontrolünün sağlanmasına yardımcı olur. Kuleyi aydınlatmak için kulenin tepesinde ışığı kulenin içine yansıtacak yansıtıcı tuğlalar kullanılmıştır [16].





Şekil 5 - Hy-Fi'nin baca şeklindeki tasarımı [16]

Yapının tamamında 10.000 adet Miselyum tuğla kullanılmıştır. Yapıda kullanılan Miselyum tuğlaların genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 de ki bu veriler doğrultusunda 0,11 g/cm<sup>3</sup> değerinde düşük yoğunluğa sahip Miselyum tuğlalar, betondan 10 ~ 40 kat daha az termal yayılım ve betondan 2 ~ 8 kat daha az termal iletkenlikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Miselyum tuğlalar, hızlandırılmış yaşlandırma odasında UV ve ıslak-kuru yaşam döngülerine üç yıl boyunca maruz bırakılmış, bu süre sonunda malzemenin mekanik özelliklerinde değişim olmadığı tespit edilmiştir. Bu yapının sökülmesinden sonra tuğlalar toprak yüzeyine serilmiş iki ay sonunda doğada tamamen kayboldukları gözlenmiştir [16].

Tuğlaların dış yüzeyi kompozite benzemektedir. İç kısımları ise daha süngerimsi ve tuğlanın yapısı dış yüzeye doğru sertleşmektedir. Dış yüzeyi çok sert, çatlamaya ve çok yüksek miktarlarda baskılara dayanıklı olmaktadır. (Şekil 6-7).



Şekil 6 - ABD'li tasarımcı Phillip Ross tarafından Miselyum tuğlaların sağlamlığını göstermek için 1,80 x 1,80 metre ölçülerinde yapılan bir kemer [17]



**Şekil 7** - Miselyum tuğlası esasında canlı organizmaları besleyen ve barındıran bir yapı malzemesidir [17].

### **3.1. Miselyum Tuğlaları ile Isı Yalıtımı**

Miselyum tuğlaları termal iletkenliği ve termal yayınımlı gibi güçlü özellikleri ile binalarda su basman seviyesine kadar dış duvarların yalıtımı için sandviç tuğla duvar uygulama şekli olarak da inşa edilebilirler. Termal iletkenliği betondan 2 ~ 8 kat daha az, termal yayınımlı betondan 10 ~ 40 kat daha az (Tablo-2) olduğundan Miselyum tuğlaları ile yapılan yalıtım, geleneksel doğal yalıtım malzemelerine kıyasla ısı yalıtımında daha iyi bir performansa sahip olmaktadır. Miselyum malzemelerinin termal iletkenlikleri petrol kaynaklı yalıtımlardan daha yüksektir. Miselyum tuğlalarının mekanik mukavemeti, bina yalıtım malzemeleri için mevcut gereksinimlerin çok üzerindedir. Ortamın nem derecesi hassasiyeti uygun üretim prosedürleri kullanılarak sağlanırsa tuğlaların yoğunluğu potansiyel olarak daha da artırılmakta ve böylece taşıma kapasitesi ve termal özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır.



**Şekil 8** - Sertleşmiş yüzeyli Miselyum tuğlaları.

### **3.2. Miselyumun Tuğlalarda Derz Kaynaştırması**

Miselyum tuğlalar kurutulmuş, bileşenleri olan hifler ısı işlemi den sonra öldürülmekte ve böylece önemli biyolojik canlılık ortadan kaldırılmaktadır. Isıl işlemi den sonra Miselyum tuğlalar içeriden dışarıya doğru sertleşerek dış yüzeyde en sert miselyum tabakası oluşturmaktadır (Şekil 8). Miselyum tuğlalarının birbiri üzerine oturacak yüzeylerinde ki sert dış miselyum tabakası

pürüzlendirilerek uygun oranda nemlendirilmektedir. Miselyum hiflerin yeniden kendilerini yenileme işlemini uyararak tuğlalar üst üste dizilmektedir (Şekil 9). Uygun nem oranı dengelenerek tuğla hifleri uç uzantılarıyla büyümeye devam etmekte ve tuğlalar arasındaki derz boşlukları kapanmaktadır. Aradaki boşlukları saran hifler büyümeye devam ederken, neme maruz kalan hiflerin etrafında yoğun bir ağ üretmektedirler. Önce Miselyum substrat (enzimlerin tepkimelerinde işlenen maddeler) üzerinde toplanır ve sonra iyi yalıtılmış kahverengi-grimsi bir yüzey elde etmek için yüzeysel farklılaşmaya uğramaktadır.



**Şekil 9** - Miselyum tuğlaları arasındaki hifa köprü boşlukları

Tuğlalar arasındaki derz yaklaşık bir hafta sonra hif ağlarıyla kapanmakta ve kendilerini yenileme işlemini uyarılarını kaldırmak için tekrar ısıtma işlemleri ile kurutulmaktadır. Bu kurutma sonunda tuğlalar birbirine sıkıca tutturulmuş olarak kalmakta ve dış miselyum tabakası sertleşmektedir.[17] (Şekil 10)



**Şekil 10** - Miselyum tuğlalarının yaklaşık bir hafta sonra birbirine bağlanması.

#### **4. TARTIŞMA**

Genç Mimarlar Programı için The Living'in mimarı David Benjamin tarafından yapılan deneyler sonucu miselyum tuğlasının dayanıklılığı üç yıl boyunca test edilmiştir. Üç yılın sonunda sökülen tuğlalar boş bir arazide toprak yüzeyine serilmiş yaklaşık iki ay sonra doğada tamamen kayboldukları gözlenmiştir [17]. Uzun yıllar kullanılmak üzere tasarlanan projelerde bu denemeden sonra miselyum tuğlasının uzun vadeli kullanımının imkânsız olduğu ortaya çıkmıştır. Miselyumun yaşam süresi, yapılacak her türlü biyolojik ve deneysel çalışmalarla giderilmesi gereken eksikliklerin başında gelmektedir.

Miselyum genelde canlı ve kurutulmuş olarak kullanılmaktadır. Besin ve su takviyesi yapıldığı sürece büyümeye devam eden miselyum zaman içinde şapka oluşturarak meyve verir [18]. Miselyumlar kurutulduğu zaman ölmüş gibi görünseler de yapısal bütünlüğünü belirli bir süre daha sürdürmeye devam etmektedirler. Bu özelliğinden dolayı Miselyumlar belirli bir sürede olsa kurutulduktan sonra da yaşamlarını sürdürdüğü anlaşılmaktadır.

Miselyum bileşenlerini oluşturan hifler doğada özüne dönerek çok kısa sürede kaybolabilmekte ve çevre kirliliğinin tam aksine kendiliğinden bulunan öncesinde doğada var oluşu şekliyle bileşiklere ayrılmaktadır. Yapının fiziksel özelliği açısından tasarım ömrünün sınırlı olması nedeni ile negatif bir etki oluşturmaktadır. Ancak yaygın bir şekilde kullanımı halinde ise atık tüketimi konusunda geniş bir yelpazede doğaya pozitif bir katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

Miselyum tuğlasının bu kısa ömürlü dezavantajı devamlılığını ortadan kaldırmaktadır. Devamlılığını sağlayabilmek, yani doğada kaybolmamasını sağlayabilmek için ısıtma işlemi yetmiyorsa hava ile temasını engelleyecek çeşitli kimyasal veya yapısal malzemelerle tuğla yüzeyinin kaplama işlemleri yapılabilir. Hava ile temasını engellenerek mantar yetiştirilmesi önlenmiş olur. Dolayısıyla hem rejenerasyonuna bağlı şekil değiştirmesi hem de doğada yok olması engellenebilir.

Miselyum tuğlasını oluşturan lif bileşenlerini daha da karakterize etmek için farklı iklimler altında Miselyum tuğlaların uzun süreli termal ve nem bariyeri özellikleri çevresel etkilere maruz bırakılarak malzeme performansının daha fazla değerlendirilmesi gerekmektedir. Malzeme performansının biyolojik canlılığı azaldıkça ömrü uzayacaktır.

#### **5. SONUÇ**

Poliüretan ve polistren gibi fosil bazlı ve sentetik malzemelere çevre dostu bir alternatif olarak biyo bazlı malzemelere önemli ölçüde bir dönüş başlamıştır. Mantar miselyum malzemesinin çeşitleri, kullanım alanları, üretim yöntemleri, besinlerle büyüebilmeleri hakkında genel bilgiler verilerek yapılan proje ve tasarımlar çalışmamızda incelenmiştir. Miselyum hifleri farklı şekillerde, farklı atık malzemelerle harmanlanarak kullanıldığı bu proje ve tasarımların yapısal özellikleri ile çeşitlilikleri araştırılmıştır.

Miselyum tuğlasının üretimi sırasında masraf gerektirecek ekstra bir enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu enerji tasarrufu özelliği ile malzemeyi süregelen yapı malzemelerine göre daha ekonomik ve yok denecek kadar düşük çevresel etkiye sahip bir malzeme haline getirmektedir. Miselyum doğada özüne dönerek hızla toprağa karışmasıyla yapı tasarımlarında yapısal atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğine bir çözüm olarak düşünülmüştür. Çevre dostu olarak teknik ihtiyaçlara göre tasarlanan miselyum tuğlalar bazen yapının tamamlayıcı bir parçası bazen de yapının ana malzemesi olarak kullanılmıştır.

Proje ve tasarımlar da malzemenin ısı iletimi, basınca ve çekmeye karşı dayanımı ve bu kuvvetler altındaki davranış testleri yapılmıştır. Miselyum tuğlaların bazı özelliklerinin betondan daha sağlam olduğu Tablo-1' de belirtilen araştırma sonuçlarına göre tespit edilmiştir. Elde edilen

deney sonuçlarına göre yapı malzemesi için istenilen dayanıklılık düzeyinde olması, Miselyumun alternatif bir yapı malzemesi olabileceğini kanıtlamaktadır.

Miselyum hifleri yapı malzemesi olarak kullanıldığında ömrünün kısa olması, kurutulsa bile yeniden uyanarak malzemeleri sindirebilme vb. gibi bazı dezavantajları olduğu tartışma konusu olsa da doğa dostu olması gerçekliği kanıtlanmıştır. Yapılacak çalışmalarla giderilmesi gereken bu ve benzeri dezavantajlar çözüm üretilerek avantajlara dönüştürülmezse, malzemenin seri üretime geçmesinde de en büyük engel olmaya devam edecektir.

### Kaynaklar

1. Pulselli, R. M., Simoncini, E., Pulselli, F. M., & Bastianoni, S. (2007). Energy analysis of building manufacturing, maintenance, and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and buildings* (doi.org), (doi.org) 39(5), 620-628.
2. Yudelso, J. (2008), *The Green Building Revolution*, Island Press, Ceo, U.S. Green Building Council, s.33.
3. Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2003), “Embodied energy of common and alternative building materials and technologies *Energy and buildings*, (doi.org)35(2), 129-137.
4. Mridu Pavan Chakrabarty and Nitin Lekhwani (2016), “Green Building Materials Market-Growth, Trend and Opportunity: South Asian Perspective”, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 7, No. 4, April 2016
5. Nitish Kumar Sharma (2020), “Sustainable Building Material for Green Building Construction, Conservation and Refurbishing”, *International Journal of Advance Science and Technology* Vol. 29, No. 10S, (2020), s.5343-5350
6. Sırkıntı, H., (2012), “Sürdürülebilirlik Kapsamında Yeşil Yapım Uygulamaları ve Leed Sertifika Sistemine Öneriler“, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (izka.org.tr) s.107, İstanbul.
7. Paul Joseph and Svetlana Tretsiakova-McNally (2010), “Sustainable Non-Metallic Building Materials”, *Sustainability* 2010, 2, 400-427; doi:10.3390/su2020400
8. Jones M, Huynh T, Dekiwadia C, Daver F, John S. Mycelium Composites: A Review of Engineering (bioresourcesbioprocessing.springeropen.com) Karakteristikler ve Büyüme Kinetiği. *Biyonobilim Dergisi*. 2017; 11: 241–257, <https://doi.org/10/gdvp8s>
9. Yangang Xing, Matthew Brewer, Hoda El-Gharabawy, Gareth Griffith and Phil Jones (November 2017), “Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials”, (doi.org) *The Second International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science12132415(627081980) 022032 doi:10.1088/1755-1315/121/2/022032, (PDF) *Growing and Testing Mycelium Bricks as Building Insulation Materials* (doi.org) (researchgate.net), s.1-2.
10. Jonathan Dessi-Olive (2019), “Monolithic Mycelium: Growing Vault Structures”, 18th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies” *Construction Materials & Technologies for Sustainability*” (18th Nocmat 2019), 24th – 26th July 2019, Nairobi, Kenya, s.2
11. Yang, L., Park, D., and Qin, Z., (2021), “Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review”. *Frontiers in Materials*, (pubs.acs.org) Sayı: 8, s.14.
12. Ghazvinian A., (2019), “A Sustainable Alternative to Architectural Materials: Mycelium-based Bio-Composites”, s.160-161

13. Butu A., Rodino S., Miu B., Butu M. (2020), "Mycelium-Based Materials for the Ecodesign of Bioeconomy", Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures Vol. 15, No. 4, October-December 2020, s.1129-1140
14. Islam, M., Tudryn, G. J., Picu, R.C., Bucinell, R., ve Schadler, L. (2017), "Morphology and mechanics of fungal mycelium", Scientific Reports Dergisi, Sayı 7, s.1-12
15. Burgaz E., Bigumigu Yazarı, 07.11.2019 13:34 | Tasarım, <https://bigumigu.com/haber/the-growing-pavilion-hollanda-tasarim-haftasi-nda/>
16. Sertkaya Mimar S. N., Tokuç Doç. Dr. A., (June 2020), Geleneksel ve Çağdaş Mimari Yapılar Üzerine Akademik Çalışmalar, Yaşayan Yapılar: Miselyum ve Mimarlık, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye., (The Licence Number of Publicator: 2014/31220), [www.iksadyayinevi.com](http://www.iksadyayinevi.com), E mail: [iksadyayinevi@gmail.com](mailto:iksadyayinevi@gmail.com), [ayca.tokuc@deu.edu.tr](mailto:ayca.tokuc@deu.edu.tr), s.10-11.
17. Erduran A., (26.01.2021 18:05), <https://www.kisakisa.com/haber/betondan-daha-dayanikli-mantar-tuglasi/2778>, Mok K., Cornell University, Mycotecture: Building With Mushrooms?, (October 11, 2018) <https://www.treehugger.com/mycotecture-mushroom-bricks-philip-ross-4857225>,

## Sentetik Fiber Donatılı Betonların Tasarımı ve Uygulaması Hakkında Teknik Rehber

Tunahan BEŞER<sup>1</sup>, Burak ERDAL<sup>2</sup>, Faraz MALIK<sup>3</sup>, Serhat SARIKAYA<sup>4</sup>

### ABSTRACT

#### *Technical Guide for Synthetic Fiber Reinforced Concrete Design and Applications*

*Macro synthetic fiber reinforcements have been used in field (ground) concretes, concrete roads, sprayed concretes and some precast elements since the 1990s. It can be used completely instead of conventional reinforcement in continuous supported systems such as shotcrete and slab on ground applications. Macro synthetic fiber reinforcements increase crack resistance in concrete; provide durability; increase toughness and ductility.*

*Macro synthetic fiber reinforcements comply with Standard EN 14889-2 (Fibers - For Use in Concrete - Part 2: Polymer Fibers - Definitions, Properties and Compatibility).*

*Fiber types with an equivalent diameter  $>0.3$  mm are called macro.*

*Micro synthetic fiber reinforcements have been widely used in field (ground) concrete, concrete roads, shotcrete and repair mortars since the 1970s. Micro synthetic fiber reinforcements significantly reduce capillary cracking that is caused by plastic shrinkage in concrete applications with large surface areas, such as field (floor) concretes, topping (screed) concretes.*

*Micro synthetic fibers improve the surface properties of fresh concrete and eliminates the situations called bleeding-vomiting in concrete. Micro synthetic fiber reinforced concrete provides passive fire resistance in case of fire and creates time advantage for evacuation of people in highway tunnels.*

*Micro synthetic fiber reinforcements comply with Standard EN 14889-2 (Fibers - For use in concrete - class 1: Polymer fibers - Descriptions, properties and compatibility). Fiber types with an equivalent diameter of  $\leq 0.3$  mm are called micro.*

---

1 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş - Tunahan.Beser@kordsa.com

2 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş

3 Polyfibers

4 Kordsa Teknik Tekstil A.Ş - serhat.sarikaya@kordsa.com

## **1. NEDEN FİBERLİ BETON? (KARBON EMİSYONU) (ÇATLAK KONTROLÜ)**

Makro sentetik fiber donatılar, betonda çatlak direncini artırıp durabilite sağlar, tokluk ve sünekliği artırır. Geleneksel çelik donatılar gibi eğilme kapasitesi sağlar. Betonun yük altında şekil değiştirme yeteneğini artırır.

Betonda makro sentetik fiberler kullanıldığında, süneklik, dayanıklılık ve tokluk sağlamaktadırlar. Fiber dozajı şu şekilde tasarlanabilir: projede istenilen seviyede çatlak kontrolü, çatlak sonrası çekme gerilmesi ve eğilme kapasitesi veya her iki durum dikkate alınarak hesaplanabilir. Fiber ile güçlendirilmiş betonun performansı, fiber tipine (malzeme, boyut, ve geometri), ayrıca bağ kuvvetine ve beton karışımına bağlıdır.

## **2. TASARIMIN DETAYLARI**

### **a. Kılavuzlar**

Fiber ile güçlendirilmiş bir yapının tasarlanmasına ait yararlanılması gereken kılavuzlar.

- TR-34 3<sup>rd</sup> Concrete industrial ground floors, A guide to design and construction
- TR-34 4<sup>th</sup> Concrete industrial ground floors, A guide to design and construction
- ACI 360 Guide to Design of Slabs-on-Ground
- ACI 544 Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete

## **3. TASARIM NASIL YAPILIR/DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR**

### **a. Fiberin betona olan katkısının değerlendirilmesi**

Makro fiberlerin betona olan katkısının değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılan 2 adet test standardı mevcuttur.

#### **ASTM C 1609**

ASTM C1609 / C1609M - 19a Fiber Takviyeli Betonun Eğilme Performansı için Standart Test Yöntemi (Üçüncü Nokta Yüklemeli Kiriş Kullanarak)

Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)



ASTM C 1609 test düzeneği



Fiberli beton ile üretilen numuneler üzerinde ASTM C1609 Standardı'na göre eğilme deneyleri yapılmalıdır. Yapılan deneyde prizmalar yan çevrilerek kalıplara degen beton yüzeyleri iki çelik mesnet üzerine serbestçe yerleştirilir. Deney mesnet açıklığı 450 mm'dir. Prizmanın üst yüzeyinde, mesnet açıklığının 1/3'ü mesafesinde, birbirine eşit iki yük uygulanmıştır. Yükler kapalı çevrim test cihazı ile uygulanmış, numunenin orta noktasındaki sehimi LVDT (linear variable differential transformer) ile ölçülmelidir. Bütün deneyler, 28 gün yaşlandırılmış numuneler üzerinde ve en az 3 adet tavsiye edilen 6 adet numune üzerinde gerçekleştirilmelidir. Numune boyutları 15 cm x 15 cm x 50 cm'dir. Test sonucunda elde edilen  $R_{e3}$  (eş değer eğilme oranı) değeri, fiber ile güçlendirilmiş plağın pozitif moment hesabında dikkate alınacaktır. Tasarım yapılan ilgili raporda bu değer beyan edilmelidir.

### (TS) EN 14651 + A1

Metal Lifli Beton – Deney Metodu – Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini (Orantı Sınırı (LOC), Artık

EN 14651 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)

Standardın adında metal lif yazmasına karşın, makro sentetik fiber ile güçlendirilmiş betonların fiber performansının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Fiber ile güçlendirilmiş prizmalar yan çevrilerek kalıplara degen beton yüzeyleri iki çelik mesnet üzerine serbestçe yerleştirilir. Deneyde mesnet açıklığı 500 mm olarak kullanılır. Prizmanın üst yüzeyinde, mesnet açıklığının 1/2 mesafesinde, yük uygulanmaktadır. Numunenin orta noktasındaki sehimi, bu noktaya yerleştirilen CMOD (çatlak ağız ölçer) ile ölçüldü. Söz konusu deney kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesinde gerçekleştirilmelidir. Bütün deneyler 28 günlük numuneler üzerinde ve her bir deney minimum 3'er adet tavsiye edilen 6 adet olarak gerçekleştirilmelidir. Numune boyutları 15 cm x 15 cm x 60 cm'dir. Test sonucunda elde edilen  $f_{r1}$  ve  $f_{r4}$  (residüel dayanım) değerleri, fiber ile güçlendirilmiş plağın pozitif moment hesabında dikkate alınacaktır. Tasarım yapılan ilgili raporda bu değerler beyan edilmelidir.



EN 14651 test düzeneği

#### b. Akma çizgileri teorisi

Akma çizgileri teorisi zeminde plastik mafsalların oluşumunu ve momentlerin yeniden dağılımını hesaba katar. Bu oluşan plastik mafsallar pozitif eğilme mukavemetinde artış sağlarken elastik bölgenin yer değiştirmesine olanak sağlar. Plastik mafsal oluşumu, zeminin moment dayanımının ve taşıma gücü sınır durumunun tam olarak belirlenmesinde kullanılır (ACI 360R-10). Plastik mafsal oluşumu plağın artık (kalan) dayanımına bağlıdır ve bu artık değerler EN 14651

standardında  $f_{r1}$  ve  $f_{r4}$  (kalan dayanım), ASTM C 1609 standardında  $R_{e3}$  adı verilen değerlerinin kesit analizinde kullanılması ile belirlenmiştir. (ACI 544.4R-18, TR 34)

### Moment Hesabı (ACI 544-4R-18)

Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarlanmış bir yapıda belirlenen kesme kuvveti ve Moment kapasitesi ACI 544.4R-18 rehberinde yer alan ilgili amprik formüller kullanılarak hesaplama yapılabilir. Hesaplama raporlarında malzeme güvenlik faktörleri, artık dayanım değerleri  $f_{r1}, f_{r4}, f_{150}^D, f_{e3}$  veya eşdeğer eğilme oranı  $R_{e3}$  değerleri yer almalıdır.

### Yüklerin Tanımlanması ve Yükleme Durumlarının Değerlendirilmesi

Yüklerin doğru tanımlanması fiberli beton tasarımı için oldukça önemlidir.

Yayıllı Yük, $kN/m^2$	
Yükün geniş alana yayılması	İstiflenmiş paletler ve ruoların birim alandaki yükleri
	Sabitlenmiş makine veya ekipmanların yükleri
	Hafif olarak tanımlanmış ticari yükler
Çizgisel Yükler, $kN/m$	
Yükün bir çizgi boyunca uzandığı yükler	Bölme duvarlar
	Sabit Raylı sistemler
Noktasal Yükler, $kN$	
Taban plakası belli olan yükler veya tekerlek yükleri	Sabit makinalardan gelen noktasal yükler
	Araç tekerlek yükleri
	Raf ayak yükleri
	İstifleyici vinç rayı montajları

### c. Tasarım Örneği

Gerekli Bilgiler(Tasarım Girdileri)

- ✓ Zemin bilgisi, zemin yatak katsayısı
- ✓ Beton sınıfı
- ✓ Plak kalınlığı
- ✓ Yük çeşitleri
- ✓ Tekil yükler
- ✓ İkili yükler
- ✓ Dörtlü yükler
- ✓ Çizgisel yükler
- ✓ Yaylı yükler

### Güvenlik Katsayıları

#### Malzeme Güvenlik Katsayıları

Beton (Fiberli / Fibersiz Beton);  $\gamma_c = 1.50$

Sabit Yük ;  $\gamma_G = 1.20$

Hareketli Yük;  $\gamma_Q = 1.50$

Dinamik Yük ;  $\gamma_D = 1.60$

### Tasarım

Tekil Yük : 60 kN

Yük temas alanı : 500-250 mm,mm

Beton sınıfı; C25/30

Beton Kalınlığı;  $h = 200$  mm

Rezidüel Dayanım 0.5 mm çatlak ağzı genişliği;  $f_{R,1} = 1.700$  N/mm<sup>2</sup>

Rezidüel Dayanım 3.5 mm çatlak ağzı genişliği;  $f_{R,4} = 1.900$  N/mm<sup>2</sup>

Eksenel çekme dayanımı CMOD 0.5;  $\sigma_{r1} = 0.45 * f_{R,1} = 0.765$  N/mm<sup>2</sup>

Eksenel çekme dayanımı CMOD 3.5;  $\sigma_{r4} = 0.37 * f_{R,4} = 0.703$  N/mm<sup>2</sup>

Etkili Derinlik;  $d = 0.75 * h = 150$  mm

### Malzeme Güvenlik Katsayıları

Beton (Fiberli / Fibersiz Beton);  $\gamma_c = 1.50$

Sabit Yük ;  $\gamma_G = 1.20$

Dinamik Yük ;  $\gamma_D = 1.60$

### Beton Özellikleri

Basınç Dayanımı (Silindir);  $f_{ck} = 25$  N/mm<sup>2</sup>

Basınç Dayanımı (Küp);  $f_{cu} = 30$  N/mm<sup>2</sup>

Betonun Ortalama Basınç Dayanımı (Silindir) ;  $f_{cm} = f_{ck} + 8$  N/mm<sup>2</sup> = 33 N/mm<sup>2</sup>

Betonun Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı;  $f_{ctm} = 0.3$  N/mm<sup>2</sup> \*  $(f_{ck} / 1$  N/mm<sup>2</sup>)<sup>2/3</sup> = 2.6 N/mm<sup>2</sup>

Yalın Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı;  $f_{ctd,fl} = f_{ctm} * (1.6 - h / 1m) / \gamma_c = 2.4$  N/mm<sup>2</sup>

Betonun dizayn basınç dayanımı (Silindir);  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 16.7$  N/mm<sup>2</sup>

Betonun Elastisite Modülü;  $E_{cm} = 22$  kN/mm \*  $[f_{cm} / 10$  N/mm<sup>2</sup>]<sup>0.3</sup> = 31 kN/mm<sup>2</sup>

Poison oranı;  $\nu = 0.2$

Bağıl Rijitlik Yarıçapı;  $l = [E_{cm} * h^3 / (12 * (1 - \nu^2) * k)]^{0.25} = 924$  mm

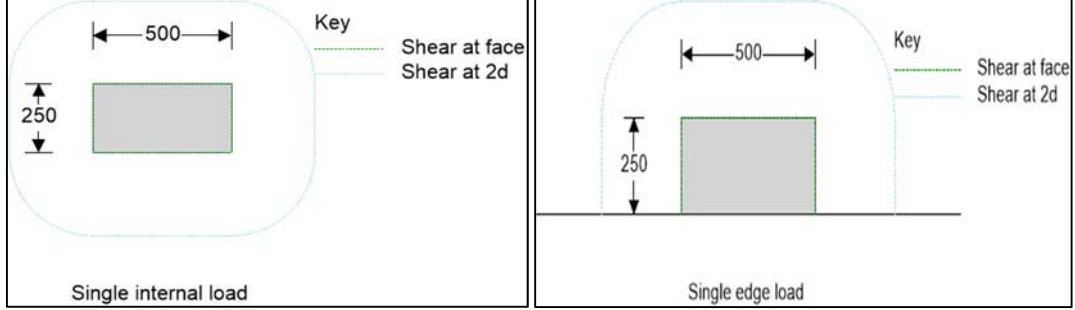
Sistem karakteristiği ;  $\lambda = (3 * k / (E_{cm} * h^3))^{0.25} = 0.773$  m-1

### Moment Kapasitesi

Plağın Negatif Moment Kapasitesi;  $M_n = M_{un} = f_{ctd,fl} * (h^2 / 6) = 16.0$  kNm/m

Plâğın Pozitif Moment Kapasitesi (**Makro Sentetik Lif lif katkısı**) ;  $M_p = M_u = h^2 / \gamma_c^*$   
( $0.29 * \sigma_{r4} + 0.16 * \sigma_{r1}$ ) = 8.7 kNm/m

### Tekil Yük Çözümü Yapılmıştır



Yükün merkez ve kenarda olması durumu

Tekerlek Yüğü = 60 kN

Malzeme Güvenlik Faktörü = 1,6

Temas Alanı A = 500 mm

Temas Alanı B = 250 mm

Temas Alanı yarıçapı a = 199,5 mm

$a / l = 0,21$

Plak Merkez Kapasite = 333,9 kN

Plak Kenar Kapasite = 194.2 kN

Merkez Yük Kontrolü  $P_u > \gamma_{maf} * P = 333,9 > 96,0$  --- OK

Kenar Yük Kontrolü  $P_u > 0.8 * \gamma_{maf} * P = 194.2 > 96,0$  ---- OK

### Yüklü Alan Yüzünde Zımbalama Kontrolü

$V_p = 0,54$  MPa

$V_p \leq V_{max} = 0,51 < 4.50 (V_{MAX})$  --- OK

Yüklü Alan Yüzündeki Kesme Kontrolü

Merkez 1012.5 kN > 96,0 kN --- OK

Kenar = 675.0 kN > 96.0 kN --- OK

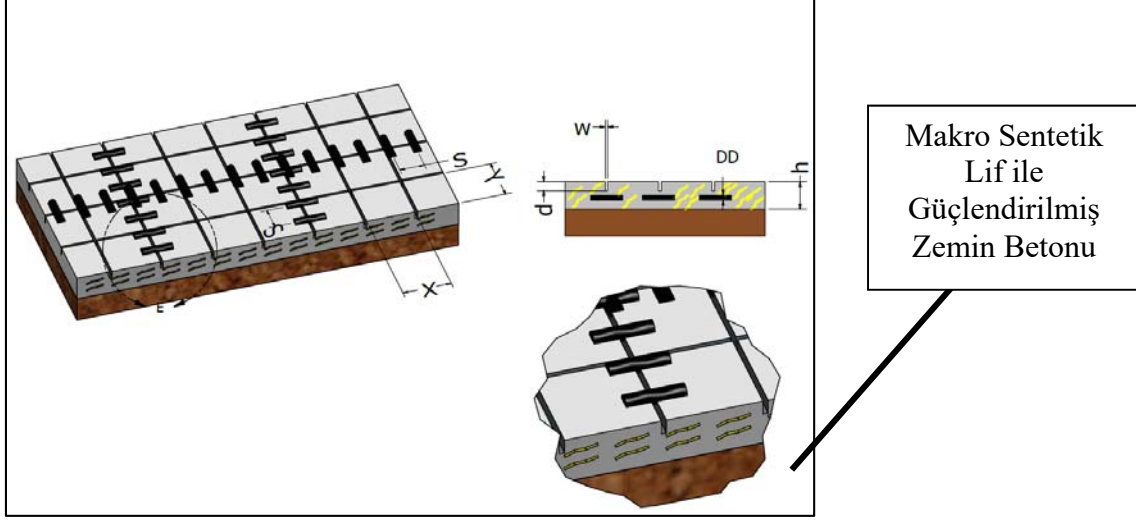
Kritik Çevrede Kesme Kontrolü

Merkez 251.3 kN > 96,0 kN --- OK

Kenar 144.2 kN > 96.0 kN --- OK

### Projede Uygulanması Gereken Derz Kesimi ve Detayları

Derz, zemin betonlarında oluşturulan düzenli çatlaklardır. Burdaki amaç betonun istemsiz çatlaklarının önüne geçilmesidir. Zamanında uygun koşullarda oluşturulan derz kesimleri betonun durabilitesi koruması açısından önem arz etmektedir.



### Kesme derz kesimi ve detayları

Derz Kesim Boyutları: Beton Plak kalınlığının maksimum 30 katı, X-Y

Derz Kesim Genişliği : 3-4 mm, w

Derz Kesim Derinliği : Plak kalınlığının %25'i, d

Derz Kesim Zamanı : Beton döküldükten sonra genellikle 24 saat sonra yapılmalı (betonun kesim şeritleri hasar görmeyecek kadar kadar güçlü olmalıdır)

Dikiş Demir Uzunluk, Çapı ve Aralığı : 450 mm uzunluğunda, 25 mm çaplı, 300 mm aralık ile sıralanmış (ACI 302.1R), DD-S

### Özet Rapor

Varsayımlar/Dizayn Kriterleri	
k, zemin yatak katsayısı, N/mm <sup>3</sup>	0,03
Beton Basınç Dayanımı, f <sub>ck</sub> , MPa	25
Pozitif Moment, M <sub>p</sub> kNm/m	8,7
Negatif Moment, M <sub>n</sub> kNm/m	16,0
Makro Sentetik Fiber Donatı ile Çözüm	
Plak Kalınlığı, mm	200
Dozaj, kg/m <sup>3</sup>	3
Fiber Tipi	54 mm
f <sub>r1</sub>	1.7 MPa
f <sub>r4</sub>	1.9 MPa

#### 4. KARBON EMİSYONU KARŞILAŞTIRMASI

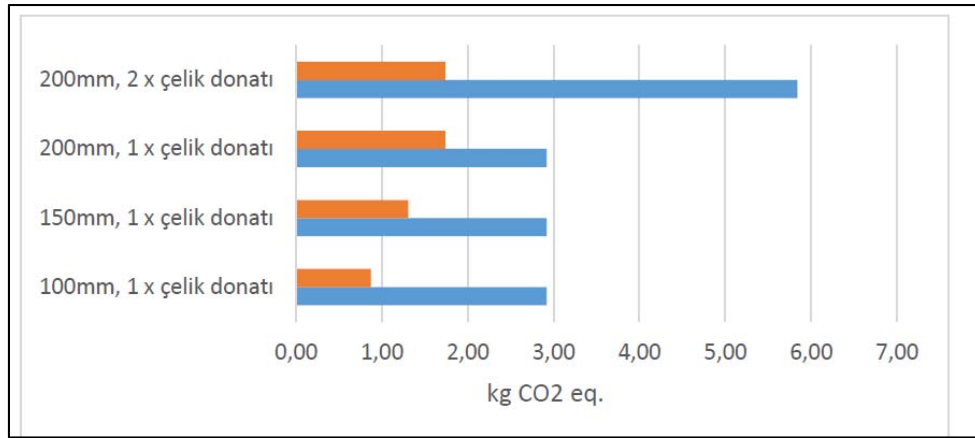
ISO 14040/44 standartları çerçevesinde yapılan ürün yaşam döngüsü değerlendirmesine göre

1 kg Makro Sentetik Fiber Donatı ürününün karbon ayak izi değeri 2,9 kg CO<sub>2</sub> eşdeğerindedir. (1)

1 m<sup>3</sup> beton hazırlanması için kullanılan makro sentetik miktarı göz önüne alındığında aşağıdaki sonuca ulaşılır.

Makro sentetik fiber kullanım miktarı 3 kg/m<sup>3</sup> beton - 1 m<sup>3</sup> beton içinde makro sentetik fiber miktarına ait karbon ayak izi 8,7 kg CO<sub>2</sub>.

Makro Sentetik Fiber Donatı ürünü betonun dayanım gücünü artırmaktadır. Muadili olan çelik donatı ürünlerine kıyasla makro sentetik fiber donatı kullanımı ile betonun donatı kaynaklı karbon ayak izi yaklaşık %40-70 oranında düşmektedir.(2)



Makro senetik fiber donatı	
Çelik donatı	

Geleneksel Çelik Donatı Opsiyonları	Çelik donatılı 1m <sup>2</sup> beton plaka		Makro Sentetik fiber donatılı 1 m <sup>2</sup> beton plaka		Fark	
	Donatı miktarı, kg	Karbon ayak izi, CO <sub>2</sub> kg	Amount, kg	Total Emission, kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq	%
100mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,3	0,87	-2,05	-70%
150mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,45	1,31	-1,61	-55%
200mm,1 x çelik donatı	3,46	2,92	0,6	1,74	-1,18	-40%
200mm,2 x çelik donatı	6,92	5,84	0,6	1,74	-4,10	-70%

## 5. MAKRO SENTETİK LİF DONATILI ENDÜSTRİYEL ZEMİN BETONU TEKNİK UYGULAMA REHBERİ

### a. Zeminin Hazırlanması

Fiberle güçlendirilmiş beton dökümünden önce saha, beton dökümüne uygun hale getirilmelidir. Eğer zemin betonu kontrollü dolgu üzerine uygulanacaksa, dolgunun istenen düzeyde performansı için mekanik sıkılaştırma ya da farklı zemin iyileştirme yöntemleri ile zeminin gerekli taşıma kapasitesine ulaşması sağlanır. Dolgunun beklenen kapasiteye ulaşıp ulaşmadığını test etmek için Plaka Yükleme Deneyi, CBR, Kum Konisi ve Proctor gibi zemin deneyleri yapılmalıdır. Elde edilen test sonuçlarının uygunluğu, alanında uzman kişiler tarafından kontrol edilir.

### b. Saha Ön Hazırlık

Yeterli taşıma kapasitesine ulaşan zeminin, istenen hassasiyette tesviyesi yapılmalıdır ve ölçüm aletleri ile tüm sahada kot değerleri not edilmelidir. Uygulaması yapılacak zemin betonu kalınlığı, zemindeki en yüksek kot değeri bulunan bölgeye getirilmelidir. Saha herhangi bir atık malzeme olmayacak şekilde temizlenmeli ve zeminde sürtünmeyi azaltmak ve su kaybının önüne geçilebilmesi için zemin ile beton arasına çift kat (200 mikron ve üzeri) polietilen folyo serilmelidir. Zemin betonu ile yapının taşıyıcı elemanları ve perde/duvar gibi yapılar arasındaki bağlantı, elastomerik (xps, eps ve benzeri ayırıcı) malzemelerle ayrılmalıdır.

### c. Anoların Hazırlanması ve Dikiş Donatılarının Yerleştirilmesi

Önceden hazırlanmış metal ya da ahşap ano kalıpları, projeye ve günlük beton döküm planına uygun biçimde boyutlandırılmış aralıklara göre yerleştirilmelidir. Soğuk derzler oluşacağı için anolar arasına dikiş donatıları (dowel) yerleştirilerek plaklar arası geçişlerde etkin yük aktarımı sağlanmalıdır. Dikiş donatı uzunluğu, çapı ve gömme boyu ilgili fiberli donatılı tasarım projesinde verilmelidir. Dikiş donatılarının bir tarafına kılıf yerleştirilerek yatayda meydana gelecek yer değiştirmeler serbest hale getirilmelidir.

### d. Beton Reçetesinin Hazırlanması

Uygulaması yapılacak sentetik fiberli beton, bölgede bulunan doğal kaynaklar gözetilerek uzman kişiler tarafından dizayn edilmelidir. Uygun agregaların seçimi, agrega gradasyonu, su/çimento oranı, katkı kullanımı gibi konular bölge ve iklim şartları göz önünde bulundurularak projeye özel beton reçetesi hazırlanmalıdır. Çimento ile birlikte uçucu kül gibi puzolanik bağlayıcılar beton reçetesine eklenebilir. Özel durumlar olmadığı sürece su/çimento oranının 0,55 değerinin geçmemesi tavsiye edilir.

### e. Slump Tayini

Slump değerleri, sentetik fiberli zemin betonu uygulaması başlamadan önce hazır beton firması ve beton uygulama firması ile birlikte yapılacak uygulama öncesi slump testi ile belirlenmelidir. Slump değerleri sahaya gelen ve döküme hazır olan sentetik fiberli betonda min. S3 sınıfında olmalıdır (Fiberli betonun çökme değeri 100-150 mm). Belirlenen beton mix dizaynı ve slump değerinin sürekliliği, uygulama süresince yetkililer tarafından düzenli olarak kontrol edilmelidir.

### f. Fiber Donatıların Betonda Homojen Karışımının Sağlanması

Yapılan statik hesap sonucu bulunan uygun dozaja göre paketlenmiş sentetik fiberler, beton santralinde agrega bandına eklenerek betonda karışmasıyla veya sahada beton mikseri haznesine katılarak min. 7 dk. en yüksek devirde çevrim yapılarak karıştırılmasıyla sağlanır. Beton dökümü süresince fiberlerin uygun dozajda kullanımı ve karışım süresi takip edilmelidir.

#### **g. Sentetik Fiberli Beton Dökümü**

Sentetik fiberli beton, direkt olarak beton mikserinden ya da pompa ile dökülür. Laser screed makine ile ya da el mastarı ile mastarlanır. Döküm esnasında vibratör kullanmak betonun yerleşimini kolaylaştıracaktır. Döküm süresince betonun reçeteye uyumluluğu kontrol edilmeli, slump deneyleri ile kıvam kontrolü yapılmalıdır. Betonda segregasyon (ayırışma) oluşmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Beton temininin aksaması, beton imalatında soğuk derz oluşmasına sebep olacağından, önceden belirlenmiş döküm programına göre imalat yapılmasına özen gösterilmelidir.

#### **h. Lazerli Mastarlama Uygulaması**

Sentetik fiber sayesinde lazerli sistemin hızlı ve hassas imalatından istifade edilebilir. Uygulama lazerli mastarlama makinası ile yapılıyor ise lazer alıcılara beton üst kot değerleri girilir. Dökülen sentetik fiber donatılı beton lazerli sistem yardımıyla istenilen kot hassasiyetinde vibrasyonla sıkıştırılarak mastarlanır. Akabinde yüzey perdah bitirme işlemleri yapılırken tam kot hassasiyetiyle mastarlanmış bu betonun, proje toleransları dahilinde  $\pm$  kot hassasiyeti bozulmadan homojen şekilde oturması sağlanmalıdır. Özellikle endüstri 4.0'a uygun endüstriyel zemin betonu projelerinde bu konuya daha fazla dikkat edilmelidir.

#### **i. Perdah ve Yüzey İşlemleri**

Beton serim işleminin ardından sahadaki fiziksel koşulların (sıcaklık, nem, rüzgâr) durumuna göre dökümü takip eden birkaç saat içerisinde (bitmiş beton yüzeyinin parmak izi bırakacak kıvama gelmesinden sonra) tepsi perdah işlemleri yapılmalıdır. Fiberden arındırılmış yüzeyler elde etmek için, perdah makinesinin bıçakları bir süre için düz ayarlanması (örneğin; ilk iki geçiş) ve birbirine dik konumda olması tavsiye edilir. Devam eden geçişler standartlarda tarif edildiği gibi normal teknik ve zamanlamalarla verilir. Süpürgeli beton fırçası veya mala kullanımında, hareketin sadece tek yönde olmasına dikkat edilmelidir. Yüzey sertleştiricili uygulamalarda, yüzey sertleştiricinin beton üzerinde eşit dağılımına özen gösterilmelidir.

#### **j. Kontrol Derz Kesimi**

Kontrol derz kesimi beton çatlaklarını kontrol altına almak için yapılır. Derz kesimi, beton dökümünden itibaren mümkün olan en kısa süre içerisinde yapılmalıdır. Hava durumuna göre 24-48 saat aralığında tamamlanması tavsiye edilmektedir. Derzler genellikle aks aralıklarına denk getirilir ve ortada bulunan derzler aks aralıklarıyla eşit mesafelerde bulunur. Fiber içeren betonlar için, klasik ıslak bir testere ile yapılan kesim, beton derinliğinin 1/3-1/4'ü aralığında olmalıdır. Bölmelerin uzunluk/genişlik oranı 1:1,5'tan küçük olmalıdır ve merkeze olabilecek en yakın mesafede bulunmalıdır. Derz kesim alanlarının ortalama 4-6 m x 4-6 m olması tavsiye edilir.

#### **k. İzolasyon Derz Kesimi**

İzolasyon derzi, zemin ve bitişik yapı elemanlarının arasında dikey ve yatay hareketin serbestçe oluşmasının gerektiği yerlerde kullanılmalıdır. Saha zemini oturmalarının binaya zarar vermemesi için önemlidir. İzolasyon derzi, duvarla, kolonlarla, ekipman temelleriyle, temel destekleriyle, ya da kanalizasyon şebekesi, rögar, karter ve merdiven gibi sınırlı noktalarla birleşim yerlerinde kullanılmalıdır. Polietilen levha türevi malzeme min. 20 mm ve köşelerde min. 40 mm uygulanmalıdır.

#### **l. Soğuk Derz**

Günlük döküm sonrası veya arasında zaman farkı oluşan beton sahaların kesişim kenarlarında dikiş donatıları genellikle 19-30 mm çapında 40-45 cm uzunluğunda 30 cm aralıklarla yerleştirilir. Betonun yatay düzlemde serbest olarak hareket edebilmesi için dikiş donatılarının bir tarafına bir ucu kapalı plastik boru yerleştirilir. Ayrıca özel derz ürünleri de kullanılabilir.



### m. Kür Yapılması

Betonda çimentonun suyla olan hidrasyon reaksiyonunun devam etmesi amacıyla bilinen kür teknikleri uygulanmalıdır. Beton, nemli tutulması durumunda çimento hidrasyon ile birlikte beton dayanım kazanmaya devam eder. Zemin betonları ıslatılarak, üzerine geçirimsiz folyo malzemeleri serilerek ya da kimyasal kür uygulaması ile kürlenebilir. Kür işlemi yapılmadığı takdirde betonda yüzey çatlaklarının oluşması ve dayanımının düşük olması gibi problemler ortaya çıkabilir. Endüstriyel zemin betonu 28 gün sonra tam mukavemetini kazandıktan sonra dizayn yüklerine karşı kullanıma hazır hale gelir.

### n. Soğuk Havada Beton Dökümü

Beton dökümü sırasında; ortalama sıcaklığın art arda üç gün süre ile + 5°C'nin altına düşmesi TS1248 standardında soğuk hava olarak tanımlanmıştır. Soğuk hava koşullarında priz süresi uzar, hidrasyon yavaşlar, dayanım kazanma hızı azalır ve buna bağlı olarak da kalıp alma süresi de gecikir. Taze betonun içindeki suyun donması halinde hidrasyon da durur. Don etkisine uğrayan beton çözülünce hidrasyon yeniden başlayabilir, ancak çimento hamuru-agrega ve çimento hamuru-donatı ara yüzeylerinde aderans büyük ölçüde azalır. Bu durumda betonun kazanacağı nihai dayanımda azalma meydana gelir.

Soğuk havada zemin betonu dökümüne karşı alabilecek bazı önlemler aşağıdadır;

- Mümkünse don riski olan hava koşullarında beton dökümü yapılmamalıdır.
- Donma-çözünme etkilerine karşı mikro ve makro sentetik fiberli güçlendirilmiş beton tercih edilmelidir.
- Yüksek hidrasyon ısısına sahip çimento, daha yüksek çimento dozajı ve düşük su / çimento oranı seçilebilir.
- Priz hızlandırıcı ve hava sürükleyici gibi beton katkıları kullanılabilir.
- Betonun ilk sıcaklığının donma derecesine düşmemesi için agregası, çimento ve özellikle su ısıtılmalıdır.
- Zemin betonu dökümü öncesi kalıplar denetlenmelidir, varsa buz parçaları temizlenmelidir.
- Çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan ısının beton dışına yayılması önlenmelidir. Bunun için beton yorganı ya da farklı yalıtım teknikleri uygulanabilir.
- Beton belirli bir dayanıma ulaşıncaya dek korunmalıdır. Bu süre; yapı elemanının özellikleri, maruz kalacağı şartlar ve beton özelliklerine göre değişir. Beton dayanım kazanma hızı azaldığından kalıp alma süresi uzatılmalıdır.

### o. Sıcak Havada Beton Dökümü

Sıcak havada beton dökümü sırasında, çimentonun hidrasyon hızının artması ve taze beton karışımındaki suyun buharlaşma hızının artmasından dolayı gerekli önlemler alınmalıdır. TS1248 standardına göre; beton dökümü sırasında ortalama sıcaklığın art arda üç gün süre ile 30°C'nin üstünde bulunduğu süredeki hava durumu sıcak hava olarak tarif edilmektedir. Sıcak havaya bağlı olarak taze betonda; priz süresinin kısalması, çökme kayıp hızının artması, plastik rötre artma olasılığı gibi problemler ortaya çıkar. Sıcak havada betonun erken kürü daha büyük önem kazanır.

Sıcak havada zemin betonu dökümüne karşı alabilecek bazı önlemler aşağıdadır;

- Rötre ve plastik oturma çatlaklarını minimize etmek için mikro ve makro sentetik fiberli güçlendirilmiş beton tercih edilmelidir.
- Betonda karma suyu sıcaklığının düşük olmasına dikkat edilmelidir. Mümkünse beton karışımında agregası büyüklüğünde buz parçaları kullanılabilir.

- Hidratasyon ısısı düşük çimento kullanmak gerekir. Çimentonun fabrikadan sıcak gelmesi halinde, beton karışımına girmeden önce soğutulması gerekir.
- Sıcak ve kuru havalarda beton dökümü tercihen sabah erken saatler/akşam ya da gece vakitlerinde yapılmalıdır.
- Beton dökümünden önce beton kalıbı ve donatı ıslatılmalı, ıslatma suyu buharlaşır buharlaşmaz döküm yapılmalıdır.
- Betonda en büyük hacme sahip olan agregaların sıcaklığı denetim altına alınmalıdır. Gölge alanda stok edilmesi ve zaman zaman su püskürtülmesi agregaların serin kalmasını sağlar.
- Betonun yerleştirilmesi ve yüzey düzeltilmesi işlemleri için iyi bir planlama yapılması şarttır. Döküm yerine ulaşan beton bekletilmeden yerleştirilmeli ve vibrasyon kısa sürede tamamlanmalıdır.

### **Kaynaklar**

1. TS EN 14889-2, Lifler - Betonda kullanım için - Bölüm 2: Polimer lifler - Tarifler, özellikler ve uygunluk
2. ASTM C 1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third- Point Loading)
3. TR 34 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> edition, Technical Report No .34, A guide to Design and Construction
4. ACI 544.4R-18, Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete
5. ACI 360R-10, Guide to Design of Slabs-on Ground
6. TS EN 14651, Metal lifli beton - Deney yöntemi - Eğilmede çekme dayanımının tayini(Kalıcı orantısal sınır (LOP))
7. ASTM C 1116, Standard Specification for Fiber-reinforced Concrete
8. ACI 302.1R, Guide to Concrete Floor and Slab Construction
9. /ISO 14040-44/ ISO 14040:2006-10, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006) and Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)



# YAPIM YÖNETİMİ

Sürdürülebilir Döngüsel Ekonomi: Gelişimi ve Temel Prensipleri <i>Rıfat Akbıyıklı</i> .....	795
İnşaat Sektörü Proje Yöneticisi Rol ve Becerileri: Bir Literatür İncelemesi <i>Rıfat Akbıyıklı, Bilge Akbıyıklı</i> .....	811
Dünyanın ve Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretim Planı <i>Çetin Önder İncekara</i> .....	831
Kanal-İstanbul ÇED Raporundaki Yapım Yönteminin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarıyla Uzlaşmaz Çelişkileri <i>M. Necat Özgür</i> .....	845
İnşaat Mühendisliğinde Etik Kavramı ve Önemi <i>Mehmet Çakır</i> .....	859
Çelik Yapılarda Tasarım Yoluyla İş Güvenliğinin Sağlanması İçin Algoritma <i>Selçuk İz, Özgür Köylüoğlu</i> .....	867



## Sürdürülebilir Döngüsel Ekonomi: Gelişimi ve Temel Prensipleri

Rıfat AKBIYIKLI<sup>1</sup>

### ÖZET

Geleneksel al-yap-atık çıkar endüstriyel modelin ötesine bakan döngüsel bir ekonomi, toplum çapında olumlu faydalara odaklanarak büyümeyi yeniden tanımlamayı hedeflemektedir. Ekonomik aktiviteyi sınırlı kaynakların tüketiminden kademeli olarak ayırmayı ve sistemden atığın azaltılarak çıkarılmasını tasarlamayı hedefler. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişle desteklenen döngüsel model, ekonomik, doğal ve sosyal sermaye inşa etmektedir. Döngüsel bir ekonomi ister finansal ister üretilmiş, insani, sosyal veya doğal olsun, sermayeyi yeniden inşa etmeye çalışır. Bu durum, gelişmiş mal ve hizmet akışlarını sağlamaya çalışmaktadır. Döngüsel bir ekonomide, ekonomik faaliyet genel sisteminin sağlıklı çalışmasını yeniden oluşturur. Döngüsel Ekonomi kavramı, büyük ve küçük işletmeler, kuruluşlar ve bireyler için, küresel ve yerel olarak tüm ölçeklerde etkin bir şekilde çalışması gereken ekonominin önemini kabul eder. Döngüsel ekonomiye geçiş, yalnızca doğrusal ekonominin olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlayan düzenlemeler anlamına gelmez. Aksine, uzun vadeli dirençlilik oluşturan, iş ve ekonomik fırsatlar yaratan ve çevresel ve toplumsal faydalar sağlayan sistemik bir değişimi temsil eder. Döngüsel Ekonomi ve sürdürülebilirlik terimleri gerek akademi ve endüstri ve gerekse politika geliştiriciler arasında giderek daha fazla ilgi görürken, her iki kavram arasındaki benzerlikler ve farklılıklar de belirsizliğini korumaya devam etmektedir. Kavramlar arasındaki ilişki, kavramsal çerçevelerini bulanıklaştıran ve araştırma ve uygulamada yaklaşımları kullanmanın etkinliğini kısıtlayan literatürde açıklığa kavuşturulmamıştır. Sürdürülebilir bir döngüsel ekonomi, kalıcı olan ve yeniden kullanılabilen, onarılabilen ve yeniden üretilebilen ürünler tasarlamayı ve teşvik etmeyi içerir. Bu, yalnızca içerdikleri enerjiyi veya malzemeleri geri kazanmak ve sürekli olarak yeni ürünler üretmek yerine, ürünlerin işlevsel değerini korumayı hedefler. Bu çalışma, Döngüsel Ekonominin ne olduğunu ve inşaat sektöründe nasıl kullanılabileceğine ilişkin son gelişmeleri araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için sistematik bir literatür taraması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döngüsel ekonomi, Lineer Model, Sürdürülebilirlik.

---

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce - rifatakiyikli@duzce.edu.tr

## ABSTRACT

### *Sustainable Circular Economy: Development and Its Fundamentals*

*A circular economy that looks beyond the traditional buy-build-waste-profit industrial model aims to redefine growth by focusing on positive benefits across society. It aims to gradually separate economic activity from the consumption of limited resources and to design the reduction of waste from the system. The circular model, supported by the transition to renewable energy sources, builds economic, natural and social capital. A circular economy seeks to rebuild capital, whether financial or manufactured, human, social or natural. This seeks to ensure improved flows of goods and services. It re-establishes the healthy functioning of the overall system of economic activity in a circular economy. The Circular Economy concept recognizes the importance of an economy that must operate effectively at all scales, globally and locally, for businesses large and small, organizations and individuals. The transition to a circular economy does not only mean regulations aimed at reducing the negative effects of the linear economy. Rather, it represents a systemic change that builds long-term resilience, creates jobs and economic opportunities, and delivers environmental and societal benefits. While the terms Circular Economy and Sustainability are gaining more and more attention among academia, industry and policy makers, the similarities and differences between the two concepts remain unclear. The relationship between the concepts is not clarified in the literature, which blurs their conceptual framework and limits the effectiveness of using approaches in research and practice. A sustainable circular economy involves designing and promoting products that are durable and that can be reused, repaired and remanufactured. This aims at preserving the functional value of products, rather than merely recovering the energy or materials they contain and constantly producing new products. This study aims to explore the latest developments on what the Circular Economy is and how it can be used in the construction industry. To achieve this aim, a systematic literature review was conducted.*

*Keywords: Circular economy, Linear Model, Sustainability.*

## GİRİŞ

Türkiye Döngüsel Ekonomi Platformu (2022) Döngüsel Ekonomi kavramı için çeşitli tanımlar vermiştir. Bu tanımlardan bazıları şöyledir:

“Döngüsel ekonomi, atık oluşumunu en aza indirirken malzemeleri ve kaynakları kullanımlarının sonunda ürün döngüsüne geri döndürerek değerlerini mümkün olduğunca uzun süre korumayı hedefler.”

“Döngüsel ekonomi, kaynakları ekonomi içinde mümkün olduğunca uzun süre tutarken fiziksel kaynakların katma ve içsel değerini koruyan ve hammadde tüketimini, atığı ve değer zinciri risklerini en aza indirmek amacıyla kullanım ömrünün sonunda değeri yakalayan bir piyasa ekonomisidir.”

“Döngüsel ekonomi, atık kavramını tamamen ortadan kaldırdı, üretme ve tüketme şeklimizi temelden değiştirdi, ekonomi ve toplumda değer dolaşmasını sağlayan daha sağlıklı, başarılı bir ekosistem yarattı.”

Bu kavramla ilgili en çok atıfta bulunulan tanım kaynağı Ellen MacArthur Vakfı'dır ve bu konudaki farkındalığın artmasına yardımcı olmuştur. Döngüsel Ekonominin dünyada benimsenmesi için çok sayıda rapor yayınlamıştır (EMF, 2012, EMF, 2013, EMF, 2014, EMF, 2015). Döngüsel Ekonomi'yi “tasarım gereği onarıcı ve teknik ve biyolojik döngüleri ayırt ederek ürünleri, bileşenleri ve malzemeleri her zaman en yüksek fayda ve değerde tutmayı amaçlar” olarak tanımladılar (EMF, 2015).

Son otuz yılda inşaat sektörünün çok büyük doğal kaynak tükettiği ve 1990'larda ise 1990'larda %40'ın üzerinde olduğu bilinmektedir (Rees, 1999). Günümüzde ise bu oran %32'lere düştüğü rapor edilmiştir (Yeheyis ve diğerleri, 2013). İnşaat sektöründe yeni yapım ve yıkım tarafından üretilen atıklar, binaların yaşam döngüsü boyunca meydana gelmektedir. Planlama ve tasarım aşamaları boyunca bile bir projenin atık yönetimi ve atık azaltma konusu ve planlaması dikkate alınmamaktadır (Esa et al., 2016). Bununla birlikte, atık üretimi açısından en etkili aşama, atıkların %50'sini oluşturan kullanım ömrünün sonudur (Kibert, 2008). Bunun nedeni, öyle planlanmadıkları için, inşaat malzemelerinin birçoğunun yeniden kullanım potansiyeli olmamasındandır (Akanbi ve diğ., 2018). Bu sorun esas olarak İnşaat Sektörünün “al, yap, at” fikrine dayalı doğrusal bir ekonomik model kullanması nedeniyle ortaya çıkmaktadır (EMF, 2015).

Bu modelde, bu fikri öne çıkaran aşamalar, hammaddelerin doğadan çıkarılmasıyla başlar, daha sonra yapı malzemesi haline getirilmek üzere işlenir ve şantiyede yeniden kullanılması söz konusu olmayacak bir şekilde, bina ömrünün sonunda, tüm süreç boyunca üretilen atıklar, depolama alanlarına atılması veya yakılması suretiyle bina atıklarından herhangi önemli bir geri kazanım oluşmamaktadır (Mangialardo ve Micelli, 2018). Buna karşılık, son yıllarda dikkat çeken bir diğer ekonomik model, ana ilkeleri kaynakların daha iyi yönetimine sahip olan Döngüsel Ekonomi'dir (Pomponi ve Moncaster, 2017). EMF'nin (EMF, 2015) genel Döngüsel Ekonomi konseptinde önerdiği gibi, Döngüsel Ekonomi modellerinde, ömrünü tamamlamış yapı malzemeleri yeniden kullanılmalı ve bileşenleri ve parçaları, yeni binalar için malzeme bankası olarak hareket etmek, bileşenleri ve malzemeleri kapalı bir döngüde tutmak için yeniden kullanılmalıdır (Hopkinson ve diğ., 2019). Ancak, bu fikrin endüstride daha fazla benimsenmesi için hala bilgi ve araçların geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Lacy ve Rutqvist, 2015). Özellikle de yeniliğin ve değişimin uygulanmasının İnşaat Sektöründe bu bilgi ve araçların daha fazla zaman aldığı bilinmektedir (BIS, 2013). Bunun nedeni de binaların çoğu zaman, yalnızca karmaşıklığı artıran büyük bir tedarik zincirine sahip benzersiz projeler olmasına bağlanmaktadır (Pomponi ve Moncaster, 2017). Döngüsel Ekonomi'nin ana ilkeleri kaynakların daha iyi yönetilmesidir (Pomponi ve Moncaster, 2017). Ellen MacArthur Vakfı, bir dizi rapor aracılığıyla Döngüsel Ekonominin fikirlerini ve fırsatlarını tanıtmakta ve onu, malzemeleri kapalı bir döngüde en yüksek değerde tutmayı amaçlayan yenileyici bir sistem olarak tanımlamaktadır (EMF, 2015). EMF'nin genel Döngüsel Ekonomi konseptinde önerdiği gibi, Döngüsel Ekonomi modellerinde, ömrünü tamamlamış yapı malzemeleri yeniden kullanılmalı ve bileşenleri ve parçaları, yeni binalar için malzeme bankası olarak hareket etmeleri, bileşenleri ve malzemeleri kapalı bir döngüde tutmak için yeniden kullanılmalı istenmektedir (Hopkinson ve diğerleri, 2019).

Pomponi ve Moncaster (2017), İnşaat Sektörü için Döngüsel Ekonomiye “Döngüsel Ekonomi ilkelerine uygun olarak tasarlanan, planlanan, inşa edilen, işletilen, bakımı yapılan ve yıkılan bir bina” olarak değerlendirmiştir.

## DÖNGÜSEL EKONOMİNİN EVRİMİ

Endüstriyel ekolojiden (Jacobsen, 2008) geliştirilen Döngüsel Ekonomi (CE) kavramı, ortak nitelik ve özelliklere sahip çeşitli bilimsel alanlardan önceden var olan fikirlerin bir koleksiyonunu tek bir isim altında toplamaya çalışır, örneğin endüstriyel ekosistemler ve endüstriyel simbiyozlar (Endüstriyel simbiyoz, şirketlerin bir arada endüstriyel işbirliği içinde olduğu, birinin atığının diğeri için hammadde olduğu bir aracılık yapısıdır), 3R ilkesi (azalt, yeniden kullan ve geri dönüştür), üretim sistemlerinin döngüsel malzeme akışlarını, ürün-hizmet sistemlerini, eko-verimlilik, beşikten beşik tasarımı, yeşil büyüme, biyomimikri (Biyomimikri, Yunanca Bios (hayat) ve Mimesis (taklit) kelimelerinin birleşimiyle oluşturulmuştur ve hayata taklit etmek anlamına gelir. Biyomimikri, doğayı yaratıcı bir şekilde incelemenin ve bu incelemelere dayalı yeni ürün ve hizmetler tasarlanmasının bir yoludur), doğal kapitalizm (doğal

sermayenin, zenginliklerin yönetilme biçimi), sosyal-ekolojik sistemlerin dirençliliğini içeren daha temiz üretim sistemler, sıfır emisyon kavramı ve diğerleri (Eberhardt et al. 2020; EMF, 2016; Ghisellini et al., 2016; Korhonen et al., 2018).

Döngüsel Ekonominin gelişimi ve etkileri hala ilerlemektedir (Hossain et al. 2020) ve disiplinler arası doğası nedeniyle Döngüsel Ekonominin tek bir tanımı yoktur (Hart et al. 2019; Yuan et al. 2006).

## **DÖNGÜSEL EKONOMİNİN PRENSİPLERİ**

Döngüsel ekonomi, tasarım tarafından yönlendirilen üç ilkeye dayanmaktadır: (EMF, <https://ellenmacarthurfoundation.org/>)

1. *Atık ve kirliliği ortadan kaldırın:* Döngüsel ekonominin ilk ilkesi, atıkları ve kirliliği ortadan kaldırmaktır. Şu anda ekonomimiz al-yap-at sistemiyle çalışıyor. Dünyadan hammadde alıyoruz, onlardan ürün yapıyoruz ve sonunda onları atık olarak atıyoruz. Bu atıkların çoğu çöplüklerde veya yakma fırınlarında son buluyor ve kayboluyor. Gezegenimizdeki kaynaklar sınırlı olduğu için bu sistem uzun vadede çalışamaz.

2. *Ürünleri ve malzemeleri en yüksek değerde sirküle edin:* Döngüsel ekonominin ikinci ilkesi, ürünleri ve malzemeleri en yüksek değerde dolaşıma sokmaktır. Bu, malzemeleri bir ürün olarak veya artık kullanılmayacakları zaman bileşen veya hammadde olarak kullanımda tutmak anlamına gelir. Bu şekilde hiçbir şey israf olmaz ve ürün ve malzemelerin içsel değeri korunur.

3. *Doğayı yenile:* Döngüsel ekonominin üçüncü ilkesi, doğayı yeniden canlandırmaktır. Al-yap-atık doğrusal ekonomisinden döngüsel ekonomiye geçerek, doğal süreçleri destekliyoruz ve doğanın gelişmesi için daha fazla alan bırakıyoruz.

Döngüsel Ekonomi, yenilenebilir enerji ve malzemelere geçiş ile desteklenmektedir. Döngüsel bir ekonomi, ekonomik faaliyeti sınırlı kaynakların tüketiminden ayırır. İş, insan ve çevre için iyi olan esnek bir sistemdir. Bu ekonomik model, ürünlerin ömrünü uzatmamızı ve onlara ikinci bir hayat vermemizi sağlıyor. Bu nedenle 7R konsepti oluşturuldu:

Döngüsel ekonominin 7R'si

Yeniden tasarlama (Redesign) : Çevresel anlayış fikri, ürünleri tasarlarken dikkate alınması gereken başka bir faktör olarak çevresel etkileri hesaba katar;

Azaltın (Reduce): tüketiminizi azaltmak ve kaynakları optimize etmek;

Yeniden kullanım (Reuse): ürünlere ikinci bir kullanım verilmesi;

Onarım (Repair): bir ürünün kullanım ömrünün uzatılması;

Yenileme (Renovate): ürünleri, faydalı olabilecek başka şeyler için yeniden kullanmak;

Kurtarma (Recover): Döngüsel ekonomi bir şeyleri paylaşmayı destekler;

Geri dönüşüm (Recycling): atıklarımıza ikinci bir hayat vermek.

Doğrusal ekonomi ve döngüsel ekonomi temelde farklıdır - tebeşir ve peynir gibi. Doğrusal model, kaynakların sonsuz sayıldığı ve ekonomik faydaların her şeyden önce temel ölçüt olduğu bir endüstriyel ve üretim anlayışıdır. Çevre için, çok fazla atık üretimi içerdiğinden takip edilmesi iyi bir model değil, bu yüzden hükümetler ve şirketler bundan uzaklaşıyor. Doğrusal bir ekonominin bazı unsurları şunları içerir:

1. Aşırı üretim;
2. Azaltılmış yaşam döngüleri;



3. Atık birikimi;
4. Dünyanın doğal kaynaklarını tüketmek ve aşırı kullanmak.

Döngüsel ekonomi bu fikirden uzaklaşır ve israfı ve sınırlı kaynakların aşırı kullanımını azaltmaya odaklanır.

Döngüsel ekonomi, kaynak girdisinin yanı sıra atık ve emisyon üretimini en aza indirmek için tasarlanmış bir ekonomik modeldir. Döngüsel ekonomi, sınırlı kaynakların kullanımında, yenilenebilir kaynaklara kademeli geçişte ve kullanım ömürleri sonunda malzeme ve ürünlerin geri kazanımında maksimum verimliliğe ulaşmayı amaçlar. Ayrıca, finansal, beşeri, sosyal ve doğal olmak üzere mevcut tüm sermaye türlerini yeniden inşa etmeyi hedefler. Esasen, döngüsel bir ekonomi, yenileyici bir ekonomik sistemi tanımlar.

Doğrusal ekonomi, atık üreten bir modeldir. Üretim ve tüketim süreçleri nedeniyle kaynakların israf edildiği bir sistemdir (Mathews ve Tan, 2014). Doğrusal ekonomi modeli, kullanımdan sonra tüketiciler tarafından atılan ürünleri üretmek için hammadde çıkaran bir “al-yap-atık” yaklaşımıdır (McDonough ve Braungart, 2002; Jackson ve diğerleri, 2014). Bu, doğrusal malzeme işlemenin kaynak tükenmesi ve kirlilik gibi zorluklar içerdiğini göstermektedir (Greyson, 2007).

Bu nedenle, doğrusal ekonomi modeli sorunlu (Persson, 2015), ekolojik olarak verimsiz ve kısa ve orta vadede ekonomik olarak uygulanabilir olarak tanımlanabilir (Mathews ve Tan, 2011).

Birçok yazar (Andrews, 2015; Dom ve diğerleri, 2010; Murray ve diğerleri, 2015; Shi ve diğerleri, 2006; Su ve diğerleri, 2013), döngüsel ekonominin sürdürülemez materyalleri azaltan sürdürülebilir bir kalkınma konsepti olduğunu savunmuştur. Döngüsel ekonomi, doğrusal modele bir alternatif olarak görülmektedir. Kaynakları kullanan ve çevreyi etkin bir şekilde koruyan “kaynak – ürün – atık – kaynak üret” modeli olarak tanımlanmaktadır (Guohuis ve Yunfeng, 2012). Döngüsel ekonomi ile kaynakların verimli kullanımı ve yeniden kullanımı ve geri dönüşüm sayesinde kirlilik azaltılır ve atıklar en aza indirilir (Li, 2012).

Döngüsel ekonomi, sürdürülebilirliğe yönelik sistem düzeyinde bir değişimle ilgilidir ve hem teknik hem de biyolojik döngüleri kapsayacak şekilde ürünleri, bileşenleri ve malzemeleri her zaman en yüksek fayda ve değerde tutmayı amaçlamaktadır (Husgafuel ve Sakaguchi, 2022). Döngüsel ekonominin ilerlemesi, döngüsel ekonomiyi teşvik etmek için iyi bir çalışma ortamının yaratıcısı olarak kamu sektörünün rolü ve şirketlerin uygun şekilde değerlendirilmesine ve yatırımlarının ödüllendirilmesine olanak tanıyan kurumsal bir sistem kurma ihtiyacı da dahil olmak üzere, kamu ve özel sektör arasında işbirliğini gerektirir (Sitra, 2018).

Döngüsel ekonomi gelişmeyi, sürdürülebilir kalkınmayı sağlamayı amaçlar ve döngüsel ekonomi kavramı dört aşamada geliştirilir: (1) tasarım, (2) üretim, (3) tüketim, (4) atık yönetimi (Ogunmakinde, 2019).

## İNŞAAT SEKTÖRÜ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ

İnşaat Sektörü, doğal kaynakların çıkarılmasının %30'undan fazlasının yanı sıra dünyada üretilen katı atıkların %25'inden sorumludur. Bunun nedeni, inşaat sektörünün tek seferlik kullanım için inşa edildikleri binaların yapımında malzeme kullanma ve kullanım ömrü sonunda elden çıkarma gibi doğrusal bir ekonomik model olan “al, yap, at” şeklindedir. Son 20-25 yılda, yapımda kullanılan malzemelerin maksimum değerlerini korumak için kapalı bir döngüde tutmayı amaçlayan Döngüsel Ekonomi modelinin benimsenmesiyle sektörde genel olarak bir paradigma kayması meydana gelmiş ve bu nedenle inşaat sektöründe atık üretimi ve kaynak çıkarılmasında büyük bir azalma olduğu görülmüştür.

İnşaat sektörü, özellikle çevre dostu ürün ve teknolojilerin benimsenmesi yoluyla (EMF, 2017) Döngüsel Ekonomi stratejilerini uygulama potansiyeli yüksek olan üç sektörden biri olarak bilinmektedir (Smol, et al. 2015). İnşaat sektöründe Döngüsel Ekonomi ilkesinin benimsenmesi, sürdürülebilir malzemelerin kullanımını teşvik eder, malzeme geri kazanımını en üst düzeye çıkarır ve gereksiz atık oluşumunun ve çöp sahasına atılan atıkların önlenmesini sağlar (Akanbi, et al. 2018; Herczeg, et al. 2018; Ghisellini et al. 2018). Avrupa yapılı çevrede Döngüsel Ekonomi ilkelerini uygulayarak, 2030 yılına kadar kaynak ve enerji tasarrufu yoluyla 350 milyar € tasarruf edilmesinin mümkün olması beklenmektedir (EMF, 2015). Bununla birlikte, bu sektör, birçok açıdan Döngüsel Ekonomi ilkelerinin dahil edilmesini kolaylaştırmayan güçlü proje tabanlı kurumsallaşmış uygulamalar ve piyasa mekanizmaları ile karakterize edilir (Eberhardt et al. 2019). Bina projeleri için, projenin başarısı, her bir zincir kademesinin çevresel etkilere ve bina üretiminin maliyetine katkıda bulunduğu karmaşık bir tedarik zinciri içindeki çok sayıda paydaştan girdi gerektirir (Eberhardt et al. 2019; Nasir et al. 2017; Winkler, 2011). Bu bağlamda, hükümetlerin inşaat sektöründe Döngüsel Ekonomi geçişini desteklemek için ilgili yönergeleri ve politika müdahalelerini dikte ederek kilit rollerini oynamaları gerektiği açıktır.

Dünyadaki doğal kaynakların yaklaşık %50'si ve işlenmemiş enerjinin %40'ı binalarda ve inşaatlarda kullanılmaktadır ve küresel ölçekte inşaat sektörü sera gazı emisyonlarının yaklaşık %35'ini ve atıkların %30'unu üretmektedir. İnşaatla ilgili arazi kullanımı ve hammadde tüketimi hem doğal çevre hem de iklim üzerinde önemli etkilere sahiptir. Döngüsel ekonomi, gayrimenkul ve inşaat sektörü için iklim değişikliğini azaltmak ve biyolojik çeşitlilik kaybını önlemek için büyük fırsatlar yaratıyor. İnşaat malzemelerinin yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi gibi süreçler, doğal kaynakları korur ve yeni ürünlerin imalatında ortaya çıkan emisyonları ve atıkları azaltır (Ministry of the Environment Finland , 2022).

Aynı kaynağa göre, Döngüsel Ekonomi Binaların tüm yaşam döngüsü dikkate alır. Döngüsel ekonomi, bir binanın yaşam döngüsü boyunca teşvik edilebilir, ancak bu, tüm inşaat zincirinin ve sektörünün taahhüdünü gerektirir. Yeni binalarda Döngüsel Ekonomi aşağıdaki hususlarda kendini gösterecektir:

1. Binalar uzun ömürlü olacak,
2. Çok yönlü ve uygulanabilirliği olacak,
3. Bakımı ve onarımı kolay olacak,
4. Yeniden kullanılabilen veya geri dönüştürülebilir yapı bileşenleri ve malzemelerden inşa edilecek ve
5. Geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı en üst seviyeye çıkacak şekilde kullanılacaktır.

Bir bina, uygun ve zamanında onarım ve bakım önlemleri ile iyi durumda tutulup korunabilir. Bina bu şekilde amaçlandığı ve tasarlandığı için uzun süre hizmet edebilme kabiliyetine sahip olur.

İnşaat sektörü, dünyanın en büyük enerji ve hammadde tüketicilerinden biri olup çevreye çok zarar vermektedir. Avrupa Birliğinde (AB'de) CO<sup>2</sup> emisyonlarının yaklaşık %40'ından ve tüm atıkların yaklaşık üçte birinden inşaat sektörü sorumludur. Ancak doğrusal bir ekonomiden döngüsel bir ekonomiye geçiş, büyük ekolojik gelişmeler getirecektir. Dahası, yenilikçi yeni iş modelleri, 2025 yılına kadar çift haneli büyüme oranıyla 600 milyar Euro'yu aşan ek bir küresel pazar fırsatı oluşturacaktır (Roland Berger, 2022).

Roland Berger'e (2022) göre, döngüsel ekonomiyi içeren bir iş modelini benimsemek, inşaat boyunca şirketleri için çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Bunları gerçekleştirmek için endüstri aşağıdaki altı başarı faktörünü dikkate almalıdır. Bunlar:

1. Tüm tedarik zincirini yeniden düşünün. Kazanan iş modelleri ancak tüm tedarikçilerin doğrusal yaklaşımlar yerine döngüsellğe öncelik vermesi durumunda tasarlanabilir ve uygulanabilir.
2. Tüm proje yaşam döngüsünü göz önünde bulundurun. Bir inşaat projesinin tüm ömrü boyunca malzeme ve enerji akışlarını analiz edin ve verimliliği optimize edin.
3. İşbirliğine dayalı bir ekosistem oluşturun. Bütünsel dönüşüm ancak tedarik zinciri boyunca işbirliği yaparak sağlanabilir. Yatırımcılar, tasarımcılar ve inşaatçılar bir ekosistem oluşturmalıdır.
4. Dijital teknolojiyi benimseyin. İnovasyon ve Ar-Ge, inşaatta döngüsel iş modelleri için en güçlü olanaklardır.
5. Bir iş modeli planlama süreci geliştirin. Bu alanda başarılı olmak için titiz bir yaklaşım hayati önem taşımaktadır. Gerekli yetenekleri oluşturun ve "yap ya da satın al"ı içeren bir yatırım stratejisi oluşturun.
6. Genişletin ve ölçekleyin. En umut verici müşterilere yönelik bir pazar baskısı düşünün ve yeni iş modellerinden yararlanmak için bir kuruluşta yeni edinilen becerileri ölçeklendirin.

Roland Berger'e (2022) göre, su ve elektrikten çelik ve betona kadar konutlarımızı, ofislerimizi ve yollarımızı inşa etmek için çok büyük miktarda kaynak kullanılmaktadır. Ne pahasına bu yapılmaktadır? Avrupa'da inşaat, toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlasını oluşturuyor. Ayrıca, binaların ekonomik ve hizmet ömürleri sonunda, inşaat atıklarının sadece %40'ı geri dönüştürülmekte veya yeniden kullanılmaktadır. Bu geri dönüştürülmüş malzemelerin çoğu, yeni binalardan ziyade yollar gibi ikinci sınıf inşaatlar için geri dönüştürülmekte ve dolgularda kullanılmaktadır. O halde, inşaatın en sık Avrupa ülkelerinin döngüsel ekonomi stratejilerinde yer alması şaşırtıcı değildir. Avrupa ülkeleri, verimliliği artırarak ve ürün ve malzemeleri kullanımda tutarak atıkları ve kirliliği en aza indirmeyi (hatta ortadan kaldırmayı) amaçlamaktadır. İnşaat için bu, tasarım aşamasından bina, kullanım ve nihayetinde yıkım ve geri dönüşüme kadar her şeyi kapsayacaktır.

Yine aynı kaynağa göre, bu yeni döngüsel ekonomi ekosistemi, özellikle Avrupa'da inşaat sektörünün yılda %30'a varan güçlü büyüme ile yeni gelir ve kâr havuzları keşfetmesini sağlayacaktır. Bunun içinde, bazı yeni iş modellerinin kapsamı diğerlerinden daha büyük olacaktır. Pazar büyüklüğü nedeniyle yenilenebilir ve geri dönüştürülmüş malzemeler en büyük paya sahip olacaktır. Şu anda, yeni dairesel inşaat pazarının %70'inden fazlasını oluşturuyorlar. Döngüsel bir yaklaşımın faydaları sadece ekolojik olanın çok ötesine geçmekte ve aynı zamanda önemli sosyal ve ekonomik kazanımlar sağlayabilmektedir. Çevre dostu inşaat malzemelerinin kullanılması, örneğin refah üzerinde olumlu etkilere sahiptir ve verimliliği %10'a kadar arttırdığı gösterilmiştir. Tüm değer zinciri boyunca iş modellerini yenileyerek, 2025 yılına kadar yıllık %12 büyüme oranıyla 600 milyar Euro'yu aşan ek bir küresel pazar olması beklenmektedir. Avrupa'nın, 240 milyar Euro'luk pazar payıyla bu döngüsel ekonomide öncü bir rol oynaması beklenmektedir.

Sparrevik ve diğerleri (2021)'e göre inşaat sektörü, atıkları azaltarak, yapı malzemelerini yeniden kullanarak ve enerji üretimi ve biyolojik çeşitliliğin korunması için yenileyici çözümler benimseyerek giderek daha döngüsel hale gelmektedir. Döngüsellğin inşaat faaliyetleri üzerindeki etkileri oldukça karmaşıktır ve ileriye doğru uygun yolu seçebilmek için bu etkilerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Döngüsel çözümlerin değerlendirilmesi ve bunların çevresel etkinliği, genellikle çeşitli yaşam döngüsü tabanlı etki değerlendirmelerine dayalı olarak yapılması gerekmektedir.

Döngüsel ekonomi, daha sürdürülebilir bir toplum için, doğal ve teknik kaynakları yönetmek amacıyla anahtar bir kavram olarak tanınmaktadır (Geissdoerfer ve diğ, 2017). İnşaat sektörü, dünya çapında etkileri azaltmak ve kaynakları korumak için doğrusal düşünceden döngüsel

düşünceye geçişin önemli olabileceği, kaynak yoğun bir sektördür (Eberhardt ve diğ. 2020). İlaveten, yapılı çevre birçok farklı insan için çok sayıda önemli işleve sahiptir ve uzun yıllar hatta on yıllar boyunca işlev görecektir. Bu sektörde bugün yapılan seçimlerin bu nedenle öngörülebilir gelecekte yaygın toplumsal etkileri olması muhtemeldir. Yaşam döngüsü değerlendirmeleri (YDD) genellikle döngüsel çözümlerin çevresel performansını değerlendirmek için kullanılır. Gallego-Schmid ve diğ. (2020), kaynak döngülerini değiştirerek %30-50'lik bir emisyon azaltma potansiyeline işaret etmektedir, ancak sistem odaklı engellerin ve anlayış eksikliğinin uygulamada bu azalmanın gerçekleştirilmesini engellediği sonucuna varmaktadır. Gorecki ve diğ. (2019), döngüsel ekonominin yatay olarak, konular ve ilgili sektörler arasında ve bireysel projelerden uluslararası kuruluşlara kadar dikey olarak daha iyi anlaşılması için çağrıda bulunarak tartışmaya katkıda bulunmuştur.

### **İnşaat Sektörünün Döngüsel Özellikleri**

İnşaat sektörü ve yapılı çevre, doğal kaynakların en büyük tüketicisi olarak çevre üzerinde önemli bir baskı oluşturmakta ve dünya çapında her yıl üretilen enerjinin üçte birinden fazlasını tek başına kullanmaktadır (Munaro et al. 2020). Buna ek olarak, artan kentleşme oranı, dünya genelinde biyolojik çeşitlilik üzerinde giderek daha olumsuz bir etkiye sahip olmayı sürdürmektedir (McDonald ve diğ. 2008). Bu nedenle, doğrusal tüketim kalıplarından, daha döngüsel çözümlere geçerek yapılı çevre üzerine olan etkinin azaltılmasına çok ihtiyaç vardır (Arora ve diğ. 2020).

MacArthur (2013) döngüsellikle ilgili ve inşaat sektörü için geçerli olan üç ana ilkeyi tanımlamaktadır:

1. *Atık ve Kirliliği Tasarlama İlkesi*: Atık ve kirliliği tasarlamak, binaya bağlı malzemelerden ve kaynaklardan gelen gömülü emisyonlara odaklanmayı gerektirir. Kullanılan malzemelerin tasarımı ve dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi, daha az kaynak yoğun inşaat yöntemleri ve müteakip bina yıkımından kaynaklanan atıkların yeniden kullanılması, ömür boyu sera gazı emisyonlarını azaltabilir. Seçilen malzemelerdeki tehlikeli kimyasallardan kaçınılabilir, bu da binanın performansını ve daha fazla yeniden kullanım olanaklarını artırır.

2. *Ürün ve Malzemeleri Kullanımda Tutma İlkesi*: Kullanım sırasında yapı bileşenlerinin değiştirme oranlarında önemli farklılıklar olduğundan (Brand 1995) ve birçok yapı bileşeninin, binanın kullanım ömrünü aşan bir yaşam beklentisine sahip olduğundan, bina tasarımında yaygın olarak tartışılmaktadır. Örneğin, Munaro ve diğ. (2020), döngüsel ekonomi ve yapılı çevre ile ilgili tüm literatürün yaklaşık %40'ının malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü ile ilgili olduğunu belirtmektedir.

3. *Doğal Sistemlerin Yenilenmesi İlkesi*: Döngüsellik aynı zamanda doğal sistemlerin yenilenmesiyle de ilgilidir. Bir bina için bu, enerji ve su gibi dış kaynakların kullanımının nasıl en aza indirileceğini ve hatta yerleştirilmiş enerji üretimi yoluyla nasıl net bir enerji üreticisi olunacağını bulmak anlamına gelir. Aynı zamanda, doğal bitki örtüsü ve yağmur suyu yönetimi için çevreyi veya çatı alanlarını kullanarak biyo çeşitliliğin korunmasıyla da bağlantılıdır. Ayrıca hassas alanlarda yerleşimlerden kaçınılarak ve yenilenebilir ve sürdürülebilir malzemeler kullanılarak doğal sistemler üzerindeki baskı da azaltılabilir.

İnşaat sektöründeki döngüsellik, enerji kaynakları ve ilgili performans, ürün ve malzeme etkisi ve hatta doğa koruma çabalarının etkisi dahil olmak üzere birçok farklı konuyu içermektedir. Bu çok disiplinlilik oldukça ilgi çekici ve zorlayıcıdır. Bina çözümünün kullanım ömrü boyunca çevresel boyutları ve etkileri analiz etme yeteneğine sahip ve farklı etki kategorilerindeki katkılarını yakalayan çevresel performans araçları gerektirir.

Bina inşaat sürecinin çeşitli aşamalarında uygulanabilen, bina yaşam döngüsündeki çevresel performansı analiz etmek için birçok Yaşam Döngü tabanlı araç vardır. Bu araçların kullanımı daha sonra, tedarikçi ve tedarikçilerin değer zinciri içindeki döngüsellik gelişirmek için değerli ampirik sonuçlar sağlamaya da yarar.

Fet ve Knudson'a (2021) göre, sürdürülebilir çözümlerin sistematik olarak uygulanmasına yönelik araçlar, dört seviyede adım adım ilerleyerek organize edilebilir:

- (1) süreç iyileştirme,
- (2) ürün iyileştirme,
- (3) organizasyonel iyileştirme ve
- (4) (toplumsal) sistem iyileştirme.

Yöntemler, iki boyutta incelenebilir; (i) performansın kapsamlılığı açısından ve (ii) etkinin karmaşıklığı tarafından tanımlanan kapsam açısından. Her seviyenin içeriğinin nasıl tanımlandığı, giriş noktasına, yani sistemsal seviyelere hangi perspektiften bakıldığına bağlıdır.

Döngüsel ekonomi, kaynakların ve malzemelerin doğrusal kullanımından, yeniden kullanımın ekonomik olarak da kârlı olabileceği döngüsel uygulamalara dönüşümü çerçevelemek için çok ilgi çekici bir kavram haline gelmiştir (Korhonen ve diğ., 2018). İnşaat sektöründe, atıkların azaltılması ve yapı malzemelerinin döngüsel çözümlerle yeniden kullanılması özellikle odak noktası haline gelmiştir (López Ruiz ve diğ. 2020), ancak kavram, enerji üretimi ve doğanın korunması gibi diğer rejeneratif sistemler için de iyi bir şekilde uygulanabilmektedir. (Mulhall ve Braungart 2010).

## TÜRKİYE VE DÖNGÜSEL EKONOMİ

Türkiye'nin Yıllık Cumhurbaşkanlığı Programı, çimento sektörü için daha ekonomik çıktı odaklı bir strateji belirledi. Küresel endüstride rekabet edebilmek için öncelikle daha sürdürülebilir bileşiklerin (örneğin yangına ve depreme dayanıklı, yüksek ısıya ve neme dayanıklı, hafif) geliştirilmesi gerektiğini vurguladı. Türkiye'nin 50'li yıllarda kentleşme oranı %25'ti. 2012'de bu oran %77 gibi şaşırtıcı bir orana ulaşmıştı. Bu geçiş tempolu olmadığından, şehirler yeni sakinlerin girdilerini barındıracak altyapıdan yoksundu. Sonuç olarak, gecekondular, kaçak yapılar ve daha düşük dayanıklılık standartlarına sahip binalar uzun vadeli konut çözümleri haline geldi. Sonuç olarak, gecekondular, kaçak yapılar ve daha düşük dayanıklılık standartlarına sahip binalar uzun vadeli konut çözümleri haline geldi. Bunun yanı sıra Türkiye, en aktif deprem bölgelerinden biri olan KAF (Kuzey Anadolu Fay hattı) deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Türkiye topraklarının %92'si deprem kuşağı üzerindedir ve nüfusun yaklaşık %95'i burada ikamet etmektedir. Sadece İstanbul'da bulunan 1,2 milyon binanın %42'si 7,5 büyüklüğündeki bir depreme dayanma şartlarını karşılayamamaktadır. Bu kontrolsüz gelişmeler sonucunda oluşması muhtemel deprem felaketini önlemek için devlet ve özel sektör, "Kentsel Dönüşüm" girişiminin bir parçası olarak sürdürülebilir finansman modelleri sunarken riskli binaları yeniden inşa etmek için bir araya gelmiştir. Amaç, sürdürülebilir toplumlar için istikrarlı yapılar oluşturmak olsa da, yeniden yapılanmanın bedeli, dayanıklılığın bir döngüsellik parametresi olarak önemini vurgulayan daha yüksek hammadde tüketimi olacaktır. Yapılar, eskiden mimarlarından daha uzun ömürlüydü ama şimdi bunun tam tersi daha yaygın bir hale gelmiştir. Binalar, yeni yatırımlara yer açmak için beklenen hizmet ömründen önce yıpranıp yıkılmakta ve bu da kaynaklar için talep oluşturmaktadır. Ekim 2021'de hükümet, yıkımla ilgili ilk yönetmelik olan 'Bina Yıkımına İlişkin Yönerge'yi yayınladı, ancak yatırımcıların bir yapıyı zamanından önce yıkmasını engelleyen herhangi bir yasa veya düzenleme yapmamıştır. Çevre dostu olmasalar bile, yıkımlar ve yeni gelişmeler vasıfsız işçi istihdamı gibi sosyal faydalar sağlamaktadır. İnşaat sektörünün büyüklüğü düşünüldüğünde, sektör lobileri, belirli bölgelerde döngüsellik sağlamanın önündeki en büyük

engellerden biri olmaya devam etmektedir. Türkiye'de ülke genelinde istihdam edilen yaklaşık 27,5 milyon kişinin 2020 yılında 1,7 milyondan fazlası inşaat sektöründe çalışmaktadır (KPMG, 2022).

İnşaat ve yıkım projelerinin ardındaki potansiyel oldukça büyüktür. Bu projeler çok fazla atık üretmesine ve çeşitli doğal kaynakları kullanmasına rağmen, döngüsel bir ekonominin benimsenmesi için çeşitli fırsatlar sunmaktadır. Döngüsel ekonomi ilkelerini uygulayarak, sektör kaynak verimliliğini önemli ölçüde iyileştirebilir, doğal kaynaklara bağımlılığı azaltabilir, atıkları en aza indirebilir ve yeniden kullanabilir.

## **SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Şu anda döngüsel ekonomiyi (CE) uygulamak için devam eden birçok girişim var. Bu gelişmeyi yönlendiren ana aktörler, yasama ve hükümet organları, STK'lar ve danışmanlık firmalarıdır. Aynı zamanda, mevcut yaklaşımların çeşitliliği için ortak bir zemin oluşturulmamıştır.

Döngüsel ekonomiye geçiş bağlamında atık yönetiminin rolü önemlidir. Temel zorluklar, "sorun olarak atık" algısının ötesine "kaynak olarak atık"a geçmekle ilgilidir. Bu amaçla, atık endüstrisi ile döngüsel ekonomi iş modelleriyle uğraşan işletmeler arasında yüksek düzeyde işbirliğine ihtiyaç vardır. Yeniden kullanım, yeniden üretim ve geri dönüşüm için yüksek kaliteli atık akışlarının toplanması aynı zamanda belediyeden AB düzeyine vatandaş katılımını ve entegre altyapı geliştirmesini gerektirir.

Gelecek için iki temel zorluk şunlardır: (a) atık üretim seviyelerini azaltmak ve (b) atık yönetimi hedeflerini döngüsel ekonomininkilerle uyumlu hale getirmek.

Döngüsel ekonomi konseptinin merkezinde, malzemelerin ve ürünlerin değerinin mümkün olduğu kadar uzun süre yüksek tutulması fikri vardır. Bu, yeni malzeme ve enerji girdisi ihtiyacını en aza indirmeye yardımcı olur. Böylece kaynakların çıkarılmasından üretime ve kullanımdan döngüsel ekonomiye kadar ürünlerin yaşam döngüsüyle bağlantılı çevresel baskıyı azaltır. Kavram, kaynakların çıkarılmasından üretim, depolama ve tüketime, bertaraf veya ideal olarak geri dönüşüm ile biten ekonomik faaliyetin tüm yönlerini kapsar. Azaltma, yeniden kullanma ve geri dönüştürme yaklaşımı, atıkların önlenmesine öncelik verilmesine rağmen, bu kavrama doğru ilerlemede doğru ve uzun bir yol kat etmektedir.

Döngüsel ekonominin temel fikri, kavram, yaklaşım ve kapsamda daha küçük veya daha büyük farklılıklar içeren çeşitli akımlara ve varyantlara yol açmıştır. Bunlar arasında Ellen Mac Arthur Vakfı'nın döngüsel ekonomisi, mavi ekonomi konsepti, farklılıklar temel olarak biyo-tabanlı döngüler ve beşikten beşiğe ve sıfır atık (yenilenebilir enerji) kavram ve prensiplerinde yatmaktadır.

Halihazırda mevcut ekonomik sistemimiz doğrusaldır. Doğal kaynakları çıkarırız, işleyip ürün haline getiririz ve artık ihtiyacımız olmadığında ürünleri atık olarak atarız. Döngüsel bir ekonomide, kullandığımız malzemeleri mümkün olduğunca uzun süre tutarak hem kaynak çıkarma hem de atık minimumda tutulur. Döngüsel bir ekonomi, malzemeleri kullanım ömürleri boyunca kullanmak için bir stratejiler hiyerarşisi içerir. İnşaat sektörü için bu, bir binayı mümkün olduğunca uzun süre elde tutmak, bir sonraki seçenek olarak bileşenleri ve malzemeleri yeniden kullanmak, ardından yeniden üretim, ardından geri dönüşüm ve son olarak, yukarıdakilerin hiçbirini gerçekleştirilemezse yakma veya imha etme anlamına gelir.

İnşaat sektöründe etkili bir döngüsel ekonomi, bina tasarlamanın yeni yollarını gerektirecektir. Bu, "uyarlanabilirlik için tasarım" ve "yapı söküm ve yeniden kullanım için tasarım" olarak tanımlanabilir. Binaları uyarlanabilirlik için tasarlamak, onları değişen kullanıcı ihtiyaçlarına ve değişen iklime uyum sağlayacak şekilde tasarlamak anlamına gelir.

Bütün binalar, yapılarında minimum değişiklikle farklı zamanlarda farklı amaçlara hizmet edebilmelidir. Yeniden kullanım için tasarım ise, binaları modüler bir şekilde oluşturmaktan geçer. Bu modüler yapılarda ihtiyaç kalmadığında yıkılmak yerine, bunun gibi binalar sökülecek ve yeni şekillerde yeniden bir araya getirilecektir.

İnşaat sektöründe aşırı kaynak tüketimiyle mücadele etmenin temel stratejisi döngüsel ekonomide yatmaktadır. Döngüsel bir ekonomide, atık sistem dışında tasarlanır, kaynaklar daha verimli kullanılır ve yüksek değerli (tüketim sonrası) malzemeler sürekli olarak yeniden kullanıma alınır.

Bu çalışma sonucunda döngüsel ekonomiye ilişkin detaylı literatür incelemesine dayalı olarak bir dizi öneriler aşağıda verilmiştir. Bunlar:

1. Türkiye'nin döngüsel ekonomi ile ilgili inşaat sektörüne yönelik yapacak çok işi vardır. Türkiye'nin döngüsel projelerin uygulanmasında Türkiye ile AB arasında döngüsel işbirliği stratejilerine ihtiyacı vardır. Türkiye'nin döngüsel kapasite ve bilgi birikimi oluşturması gerekmektedir.
2. Türk tedarikçileri ve tedarik zinciri, tedarikçi seçim sürecinde döngüsel ekonomi kriterlerinin entegrasyonu yoluyla döngüsel ekonomi uygulamalarını benimsemelidir (standartlar belirli bir geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı yüzdesi ve enerji ve su yönetim sistemleri belirleyebilir).
3. Türk Müteahhitlerin temsilcileri AB düzeyinde mevzuat gelişimini daha iyi anlamak için AB'deki döngüsel ekonomi uygulama gruplarına katılmalıdır.
4. Tedarik sürecinde tasarım, inşaat ve proje teslim aşamalarında döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik bilincini artırılmalıdır.
5. Tedarik zinciri ile birlikte şantiyelerden ve tasarım ofislerinden veri toplama bilinci artırılmalıdır.
6. İnşa edilen varlıkların döngüsellliğini mümkün kılmak için farklı paydaşların tasarım beklentileri, tedarik zinciri kapasitesi ve kaynak bulma sorunları konusundaki farkındalığın artırılması.
7. Üniversitelerin döngüsel ekonomi ilkelerini ve uygulamalarını hedefleyen derinlemesine müfredatlar geliştirmesi gerekmektedir.
8. Döngüsel ekonomi ve inşaatta sürdürülebilir kalkınma konusunda bilgi kapasitesi oluşturmak için üniversiteler, kamu sektörü ve inşaat sektörü arasındaki ortak araştırma ve geliştirme projelerine şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır.

### Kaynaklar

1. Akanbi, L.A., Oyedele, L.O., O.O. Akinade, “*et al.* Salvaging building materials in a circular economy: a BIM-based whole-life performance estimator”, *Resour. Conserv. Recycl.*, 129, 2018, pp. 175-186, 10.1016/j.resconrec.2017.10.026
2. Andrews, D. “The circular economy, design thinking and education for sustainability”, *Local Econ.*, 30, 2015, 305–315.
3. Arora M, Raspall F, Cheah L, Silva A., “Buildings and the circular economy: estimating urban mining, recovery and reuse potential of building components”, *Resour Conserv Recycl* 154:104581, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104581>
4. BIS (Department for Business Innovation & Skills), “*Supply Chain Analysis into the Construction Industry: A Report for the Construction Industrial Strategy*”, *BIS Research Paper 145*, Department for Business, Innovation and Skills, London, United Kingdom, 2013.

5. Brand S (1995) *How buildings learn: what happens after they're built*. Penguin, London
6. Dorn, T.; Nelles, M.; Flamme, S., "Circular economy in China", In Proceedings of the ISWA World Congress, Hamburg, Germany, 15–18 November 2010.
7. Eberhardt, L.C.M., Birkved, M. and Birgisdottir, H., "Building design and construction strategies for a circular economy", *Architect. Eng. Des. Manag.*, 2020, pp. 1-21, 10.1080/17452007.2020.1781588
8. Eberhardt, L.C.M., Birgisdottir, H. and Birkved, M. B., "Potential of circular economy in sustainable buildings", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 471, 2019, 10.1088/1757-899X/471/9/092051
9. EMF (Ellen MacArthur Foundation), "Towards a Circular Economy: business rationale for an accelerated transition", Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> , 2015, Accessed 24th June 2022
10. EMF (Ellen MacArthur Foundation), "Towards the Circular Economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition", Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an-accelerated-transition>, 2012, Accessed 25th June 2022.
11. EMF (Ellen MacArthur Foundation), "Towards the Circular Economy Vol. 2: opportunities for the consumer goods sector", Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods-sector>, 2013, Accessed 25th June 2022.
12. EMF (Ellen MacArthur Foundation), "Towards the Circular Economy Vol. 3: accelerating the scale-up across global supply chains", Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-3-accelerating-the-scale-up-across-global-supply-chains>, 2014, Accessed 25th June 2022.
13. (EMF) Ellen MacArthur Foundation, "Circular economy schools of thought", <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought>, 2016, Accessed 28th June 2022.
14. (EMF) Ellen MacArthur Foundation, "Growth within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe", Ellen MacArthur Found 2015, Available at: [EllenMacArthurFoundation\\_Growth-Within\\_July15.pdf](#)
15. (EMF) Ellen MacArthur Foundation, SISTEMIQ, SUN Institute, "Achieving "Growth within" A €320-Billion Circular Economy Investment Opportunity Available to Europe up to 2025", Ellen MacArthur Found, 2017.
16. Esa, M.R., Halog, A. and Rigamonti, L. R., "Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 19 (3), 2016, pp. 1144-1154, <https://doi:10.1007/s10163-016-0516-x>
17. Fet, A., Knudson, H., "Transdisciplinarity in sustainability management. In: Keitsch MMV", Vermeulen WJ (eds) *Transdisciplinarity for sustainability: aligning diverse practices*, Routledge, London, 2021, pp 93–117.



18. Gallego-Schmid A., Chen H-M., Sharmina M., Mendoza JMF, “Links between circular economy and climate change mitigation in the built environment”, *J Clean Prod* 260:121115, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121115>
19. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, NMP., Hultink EJ, “The circular economy—a new sustainability paradigm”, *J Clean Prod* 143:757–768, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
20. Ghisellini, P., Cialani, C. and S. Ulgiati, “A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”, *J. Clean. Prod.*, 114, 2016, pp. 11-32, 10.1016/j.jclepro.2015.09.007
21. Ghisellini, P., Ripa, M. and Ulgiati, S., “Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review”, *J. Clean. Prod.*, 2018, 10.1016/j.jclepro.2017.11.207
22. Górecki, J., Núñez-Cacho, P., Corpas-Iglesias, FA., Molina V, “How to convince players in construction market? Strategies for effective implementation of circular economy in construction sector”, *Cogent Eng* 6:1690760, 2019, <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1690760>
23. Greyson, J. (2007), An economic instrument for zero waste, economic growth and sustainability. *Journal of Clean Production*, 15, pp. 1382-1390.
24. Guohui, S.; Yunfeng, L., “The effect of reinforcing the concept of circular economy in west china environmental protection and economic development”, *Procedia Environ. Sci.*, 12, 2012, pp. 785–792.
25. Hart, J., Adams, K., Giesekam, J., Tingley, D.D. and Pomponi, F., “Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment”, *Procedia CIRP*, 2019, 10.1016/j.procir.2018.12.015
26. Herczeg, G. H., Akkerman, R. and Hauschild, M.Z., “Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks”, *J. Clean. Prod.*, 2018, 10.1016/j.jclepro.2017.10.046
27. Hopkinson, P., Wang, Y., Chen, H., Lam, D. and Zhou, K., “Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings”, *Eng. Sustain.*, 172 (3), 2019, pp. 119-128, 10.1680/jensu.18.00007
28. Hossain, M.U., Ng, S.T., Antwi-Afari, P. and Amor, B., “Circular economy and the construction industry: existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2020, 10.1016/j.rser.2020.109948
29. Jackson, M., Lederwasch, A. and Giurco, D., “Transitions in theory and practices: Managing metals in the circular economy”, *Resources*, 3, 2014, pp. 516-543.
30. Jacobsen, N.B., “Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: a quantitative assessment of economic and environmental aspects”, *J. Ind. Ecol.*, 10, 2008, pp. 239-255, 10.1162/108819806775545411
31. Kibert, C.J., “*Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*”, John Wiley & Sons, Inc., 2008, New Jersey, Estados Unidos.
32. Korhonen, J., Honkasalo, A. and Seppälä, J., “Circular economy: the concept and its limitations”, *Ecol. Econ.*, 143, 2018, pp. 37-46, 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041
33. KPMG, “Preliminary Research on Circularity of Five Sectors in Turkey”, 2022, Available at: [https://dongusekonomiplatformu.com/tmm/post\\_turkiyede-5-sektorde-dongusellik-potansiyelinin-on-arastirma-raporu\\_312.html](https://dongusekonomiplatformu.com/tmm/post_turkiyede-5-sektorde-dongusellik-potansiyelinin-on-arastirma-raporu_312.html) Access: 10<sup>th</sup> July 2022.

34. Lacy, P. and Rutqvist, J., “*Waste to Wealth - the Circular Economy Advantage*”, Palgrave Macmillan, 2015, London, United Kingdom.
35. Li, S., “The research on quantitative evaluation of circular economy based on waste input-output analysis”, *Procedia Environ. Sci.*, 12, 2012, pp. 65–71.
36. MacArthur, E., “Towards the circular economy”, *J Ind Ecol* 2, 2013, pp. 23–44.
37. Mangialardo, A. and Micelli, E., “Rethinking the construction industry under the circular economy: principles and case studies”, *Proceedings of the International conference on Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions*, 1, 2018, pp. 333-344, 10.1007/978-3-319-75774-2\_23
38. Mathews, J.A. and Tan, H., “Progress towards a circular economy in China”, *Journal of Industrial Ecology*, 15, 2014, pp. 435-457.
39. McDonald, R.I., Kareiva, P. and Forman R.T.T., “The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation”, *Biol Cons* 141, 2008, pp. 1695–1703, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.025>
40. McDonough, W. and Braungart, M., “*Cradle to Cradle: Rethinking the Way We Make Things*”, North Point Press, 2002, New York, NY, USA.
41. Ministry of the Environment Finland, “Circular Economy in the construction sector”, 2022, Available at: <https://ym.fi/en/circular-economy-in-the-construction-sector> Erişim: 01 Temmuz, 2022.
42. Mulhall, D. and Braungart, M., “Cradle to cradle criteria for the built environment”, *EKONOMIAZ Rev vasca de Econ* 75, 2010, pp. 182–193.
43. Munaro, M.R., Tavares, S.F. and Bragança, L., “Towards circular and more sustainable buildings: a systematic literature review on the circular economy in the built environment”, *J Clean Prod* 260:121134, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121134>
44. Murray, A., Skene, K. and Haynes, K., “The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context”, *J. Bus. Ethics*, 140, 2015, pp. 1–12.
45. Nasir, M.H.A., Genovese, A., Acquaye, A.A., Koh, S.C.L. and Yamoah, F., “Comparing linear and circular supply chains: a case study from the construction industry”, *Int. J. Prod. Econ.*, 2017, 10.1016/j.ijpe.2016.06.008
46. Ogunmakinde, O.E., “A Review of Circular Economy Development Models in China, Germany and Japan”, *Recycling*, 4(3), 27, 2019, <https://doi.org/10.3390/recycling4030027>
47. Persson, O., “What is circular economy? The Discourse of Circular Economy in the Swedish Public Sector”, Master’s Thesis, Uppsala University, 2015, Uppsala, Sweden.
48. Pomponi, F. and Moncaster A. Moncaster, “Circular economy for the built environment: a research framework”, *J. Clean. Prod.*, 143, 2017, pp. 710-718, 10.1016/j.jclepro.2016.12.055
49. Rees, W.E., “The built environment and the ecosphere: a global perspective”, *Build. Res. Inf.*, 27 (4–5), 1999, pp. 206-220.
50. Roland Berger, “Sustainability and Climate Action”, 2022, Available at: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/It%E2%80%99s-time-for-construction-to-embrace-the-circular-economy.html> Accessed on: 30<sup>th</sup> June 2022.

51. Shi, L.; Xing, L.; Bi, J.; Zhang, B., “Circular economy: A new development strategy for sustainable development in China”, In *Proceedings of the Third World Congress of Environmental and Resource Economists*, Kyoto, Japan, 3–7 July 2006.
52. Sitra, “The Second World Circular Economy (WCEF), Yokohama, Japan. Summary of Closing Remarks from WCEF2018 Hosts”, 2015, Available on line: <https://enb.iisd.org/events/world-circular-economy-forum-2018-wcef2018/summary-report-22-24-october-2018> (accessed 0n May 15, 2022)
53. Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K. and Wzorek, Z., “The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy”, *J. Clean. Prod.*, 2015, 10.1016/j.jclepro.2015.02.051
54. Sparrevik, M., de Boer, L., Michelsen, O. *et al.*, “Circular economy in the construction sector: advancing environmental performance through systemic and holistic thinking”, *Environ Syst Decis*, 41, 2021, pp. 392–400, <https://doi.org/10.1007/s10669-021-09803-5>
55. Su, B.; Heshmati, A.; Geng, Y.; Yu, X., “A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation”, *J. Clean. Prod.*, 42, 2013, pp. 215–227.
56. Türkiye Döngüsel Ekonomi Platformu, “Döngüsel Ekonomi Nedir?”, 2022, [https://donguselekonomiplatformu.com/en/knowledge-hub/article\\_1-what-is-the-definition-of-a-circular-economy\\_11.html?page=6](https://donguselekonomiplatformu.com/en/knowledge-hub/article_1-what-is-the-definition-of-a-circular-economy_11.html?page=6) Erişim: 01 Temmuz, 2022
57. Winkler, H., “Closed-loop production systems-A sustainable supply chain approach”, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 2011, 10.1016/j.cirpj.2011.05.001
58. Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M.S., Eskicioğlu, C., Sadiq, R., “An overview of construction and demolition waste management in Canada: a life cycle analysis approach to sustainability”, *Clean Technol. Environ. Policy*, 15 (1), 2013, pp. 81-91, 10.1007/s10098-012-0481-6
59. Yuan, Z., Bi, J. and Moriguchi, Y., “The circular economy: a new development strategy in China”, *J. Ind. Ecol.*, 2006, 10.1162/108819806775545321



# İnşaat Sektörü Proje Yöneticisi Rol ve Becerileri: Bir Literatür İncelemesi

Rıfat AKBIYIKLI<sup>1</sup>, Bilge AKBIYIKLI<sup>2</sup>

## ÖZET

İnşaat sektörü, tasarım, planlama, malzeme üretimi, yapım, tesis yönetimi, tefriş, yıkım ve tamirati kapsayan yapıli çevreyi oluşturan tesislerinin yaşam döngüsü aşamaları içerisinde yer almaktadır. İnşaat sektörü proje tabanlı bir sektördür. İnşaat sektörü her ülkede olduğu gibi Türkiye’de de çok çeşitli mal ve hizmet üretimi ile doğrudan ilişkisi ve yoğun işgücü kullanımıyla ekonomik yapı içinde ayrı bir yere ve öneme sahiptir. Bir proje, iş yapmak ve yeni ve faydalı bir değişim elde etmek için bir araya getirilmiş geçici bir organizasyondur. İnşaat yönetimi inşaat proseslerinin yönetimi eylemi şeklinde özetlenebilir. İnşaat yöneticisi, inşaatın temel kaynaklarını yönetir. Genel olarak inşaat proje yönetimi, projelerin misyon odaklı yapılarından dolayı genel işletme yönetimden farklılık göstermektedir. Yönetici kendisine verilen kaynaklar arasında gerekli koordinasyonu ve iş birliğini sağlayan kişidir. İnşaat sektöründe projeler proje müdürü tarafından yönetilir. Bu çalışmanın amacı inşaat projelerinin yönetiminde çok önemli olan proje müdürlerinin insan, proses ve diğer kaynakların organizasyon ve yönetimi için ne tür rol ve becerilere sahip olmaları gerektiğini bir literatür çalışması ile incelemektir.

**Anahtar Kelimeler:** İnşaat sektörü, Organizasyon, Proje Müdürü, Proje Yönetimi.

## ABSTRACT

### **Role and Skills of the Construction Sector Project Manager: A Literature Review**

The construction industry is included in the life cycle stages of the facilities that create the built environment, including design, planning, material production, construction, facility management, furnishing, demolition and repair. The construction industry is a project-based industry. The construction sector has a special place and importance in the economic structure in Turkey, as in every country, with its direct relationship with the production of a wide variety of goods and services and the intense use of labour force. A project is a temporary organization put together to do business and achieve new and beneficial change. Construction project management can be summarized as the management action of construction processes. The construction manager manages the basic resources of the construction. In general, construction project management

---

1 Düzce Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce - rifatakbiyikli@duzce.edu.tr

2 Yakın Doğu Üniversitesi, Ekonomi ve İdari Bilimler Fakültesi, Lefkoşa - bilgeakbiyikli@gmail.com

*differs from general business management due to the mission-oriented nature of the projects. The manager is the person who provides the necessary coordination and cooperation among the resources given to him. Projects in the construction industry are managed by the project manager. The aim of this study is to examine with a literature survey what kind of roles and skills project managers should have for the organization and management of people, processes and other resources, which are very important in the management of construction projects.*

**Keywords:** *Construction industry, Organization, Project Manager, Project Management.*

## **GİRİŞ**

### **İnşaat Sektörü**

İnşaat sektörü içerisinde çok farklı profesyoneller ve yöneticiler yer almaktadır. Ayrıca, birçok profesyonel ve yönetici grupları da söz konusudur.

İnşaat projeleri fizibilite, planlama, tasarım, yapım ve yıkım aşamalarından geçen prosesler içerdiğinden her grup bu karmaşık prosesler içerisinde önemli roller ve görevler yerine getirmektedir.

İnşaat sektörünün parçalı yapısının yanı sıra (yani kurumsal yapıya sahip firmaların yanı sıra kişisel, küçük ve orta ölçekli firmalar, taşeronluk gibi yapıların varlığı) inşaat profesyonelleri arasındaki sorumluluk ayırımı ve bölünmüşlüğü ile meslekler ile müteahhitler arasındaki ayırım ve bölünmüşlük de en önemli sektör karakteristiklerini ortaya koymaktadır. Örneğin mimarlar ve projeci (statikçi) mühendisler genellikle yüklenici firma dışından bağımsız profesyoneller olarak yapım ve teslim sürecine katılmakta ve bağımsız firmalar olarak proje yönetim sürecine dahil olmaktadır.

Bu “ayırım” beraberinde yönetim zorlukları yaratmakta ve çok kritik edilen “muhalefet kültürü” ortaya çıkarmaktadır. İnşaat sektörü, yapı yığınlarının (alt- ve üst-yapılar) tasarım ve yapımında direkt olarak müdahil olan firmalardan oluşmaktadır. İnşaat sektörünün yapısı ve organizasyon şekilleri, onun yönetim ve yönetici profesyonellerini de belirlemektedir.

İnşaat sektörü, tasarım, planlama, malzeme üretimi, yapım, tesis yönetimi, tefriş, yıkım ve değiştirmeyi kapsayan yapıyı oluşturan tesislerinin yaşam döngüsü etapları içerisinde yer almaktadır. Sektörün performansı oluşturulan sosyal baskıyı karşılayacak işlevsel bir role sahip olup ülkelerin ekonomilerinde her türlü beceriye sahip işgücü istihdamı kapasitesi olması nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır.

Bu da sektör üzerine bütün iş görenlerine iyi çalışma şartları sağlanması sorumluluğunu yüklemektedir. İnşaat sektörünün ana uğraşlarından biri daha iyi çalışma şartları sağlayarak verimliliği artırma yönünde olacaktır. Kısıtlı ekonomik imkânlar ve fakirlik mevcut yapıyı çevrenin kalitesiyle direkt ilgilidir. Genellikle ülkemizde normal standartların altında yaşam sürdüren ve kötü binalarda yaşayan insanlarımız işsiz ve az eğitim almış olanlardır. İşsiz ve az eğitilmiş sektör çalışanları sektörün işgücüne dayalı karakteristiği nedeniyle çok önem arz etmekte ve işgücü eğitiminin artırılması hem istihdamı artıracak ve hem de yapıyı çevre kalitesini güçlendirecektir. İnşaat sektörü ayrıca, istihdam ve katma değer sağlama nedeniyle kırsal kesim ekonomisini stabilize ederek ülkelerin bölgesel ekonomik döngülerinin ve ulusal ekonominin performansının güçlenmesi için bir enstrümanı olarak da görülebilmektedir.

İnşaat sektörü yapıyı çevre içerisinde daha yaşanabilir ve çalışılabilir şartlar yaratmak mecburiyetindedir. Bütün bunlar inşaat sektörünü teknolojik gelişmeler sağlanarak pazar oluşturmaya çalışan teknolojiye dayalı bir endüstriden “teknoloji itmeli” bir sektörden stratejisini talep odaklı bir endüstri haline dönüştürülmesini mecbur kılmaktadır. Önümüzdeki on yıllarda

sektörün amacı performanstan önce sürdürülebilirlik olacaktır. Sektörün yeni başarı kriteri müşterilerin bütün ihtiyaçlarını memnun etme kabiliyeti olacağı şeklinde görülmektedir.

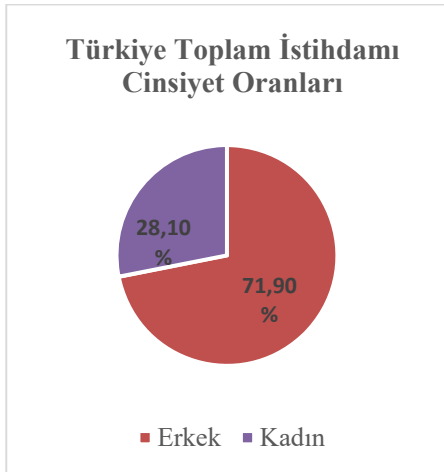
İnşaat sektörü çevreyi korumak ve su, enerji ve hammadde gibi tabii kaynakları korumak için öncü bir konuma ve role sahiptir. Ayrıca, bina, konut ve diğer alt-yapı tesislerimizin taşkınlarla, toprak kaymalarına ve depreme karşı doğru tasarım ve yapım gerçekleştirme sorumluluğu vardır. İş sağlığı ve güvenliği konusunda inşaat sektörü çok kötü durumdadır. En çok ölümlü kaza oranı inşaat sektöründe yaşanmaktadır. Gerekli önlemler alınarak bu duruma son verilmesi sektörün ajandasındaki en önemli konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yapı yönetiminin kapsamı; inşaat sözleşmeleri, yapım metotları ve malzemeleri, imalât, maliyet tahmini, maliyet kontrolü, kalite kontrolü ve güvenlidir. Bahsedilen bütün bu nedenlerden inşaat sektöründe yönetim çok önem arz etmektedir.

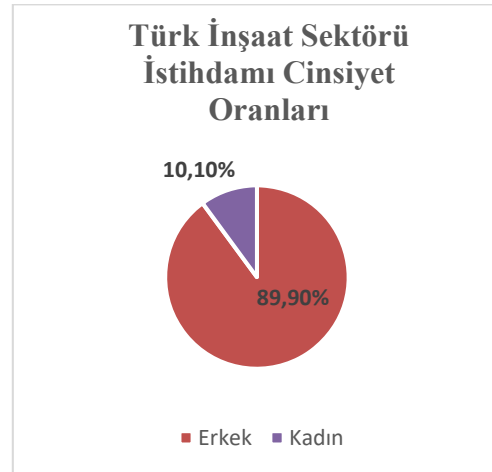
### Türkiye’de İnşaat Sektörü

Makroekonomi açısından bakıldığında inşaat sektörünün önemi, çarpan etkisinden kaynaklanarak, kendisine bağlı 250’den fazla sektörü doğrudan etkileme özelliği sayesinde gerek büyüme gerekse istihdam üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Son dönemlerde istikrarlı büyüme ve istihdam ihtiyacı daha da fazlaşan ülkemizde inşaat sektörü bir ekonomik araç olarak daha da öne çıkmıştır (İNTEK Sektör Raporu, 2016 ve 2017). İnşaat sektörünün ülke ekonomisi içindeki önemini yorumlamak için; üretim sürecinde ilişkide olduğu alt sektörlerle olan bağlantılarını ve bu bağlantıların düzeyini, inşaat sektörünün ve kendisine bağlı alt sektörlerin toplam üretim içindeki payını, kendisine bağlı alt sektörlerle beraber istihdam içindeki payını, ödemeler dengesi üzerindeki etkisini ve yurtiçi gelire sağladığı faydalarını bilmek gerekir. Bu bağlamda sektör, kendisine bağlı birçok alt sektör veya sektörlerin üretimini gerçekleştirdiği mal ve hizmetlere talep oluşturması açısından ve Türkiye ekonomisinin büyüme sürecine yaptığı katkılardan dolayı lokomotif bir sektör konumundadır. Bu konumda olmasından dolayı önemi ve yönetimi çok önem arz etmektedir.

İnşaat sektörü Türkiye ekonomik gelişmesinde çok önemli bir yere sahiptir ve kendisine girdi sağlayan birçok alt sektörün gelişimine de katkıda bulunarak ülkenin istihdam yaratma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Harmoni, 2020).

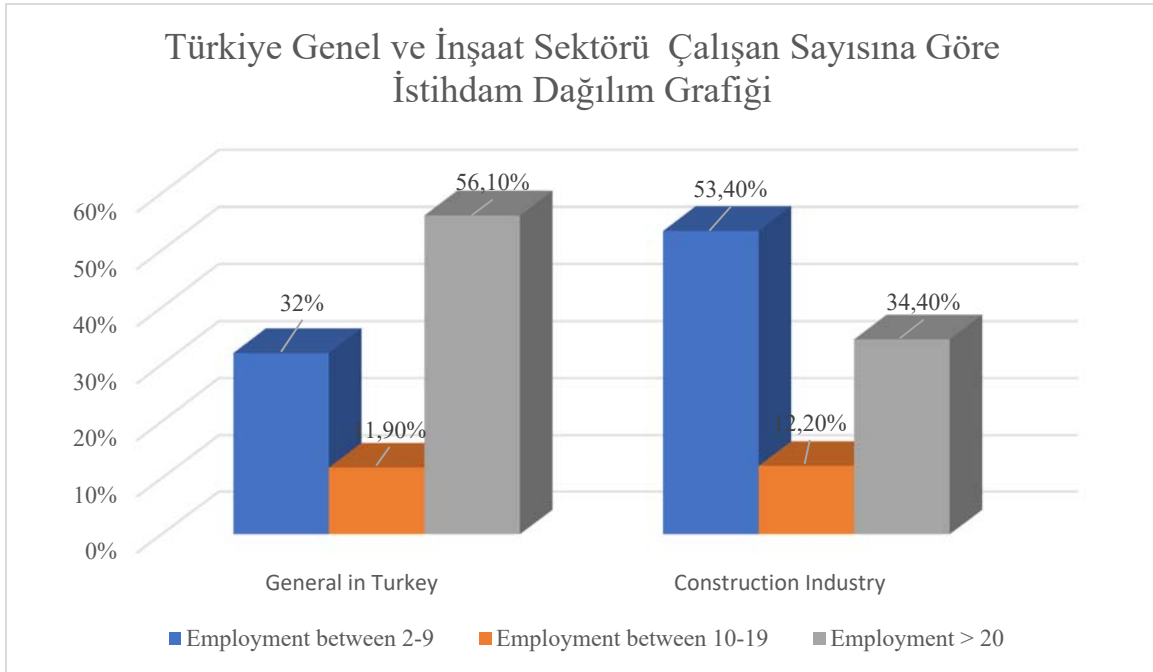


Şekil 1 - Türkiye Toplam İstihdamı Cinsiyet Oranları (Kaynak: İŞKUR, 2021)



Şekil 2 - Türk İnşaat Sektörü İstihdamı Cinsiyet Oranları (Kaynak: İŞKUR, 2021)

2021 yılı İşgücü Piyasası Araştırması kapsamında inşaat sektöründe 121 bin 351 işyeri için veri derlenmiş olup, bu işyerlerinde toplam 1 milyon 306 bin 768 çalışan tespit edilmiştir. Araştırma kapsamındaki işyerlerinin yüzde 8,6'sı ve çalışanların yüzde 8,8'i inşaat sektöründedir (İŞKUR, 2021). Sektörde araştırma kapsamına giren işyerlerinde toplam 1 milyon 306 bin 768 çalışan tespit edilmiştir. Çalışanların yüzde 89,9'u erkeklerden, yüzde 10,1'i ise kadınlardan oluşmaktadır. Araştırma kapsamında bulunan işyerlerinde Türkiye genelinde toplam çalışan sayısı 14 milyon 911 bin 962 olarak tespit edilmiş olup, Türkiye genelinde toplam çalışanların yüzde 28,1'i kadınlardan oluşmaktadır. İnşaat sektöründe kadınların ağırlığı Türkiye geneline göre 18 puan daha azdır. Sektörde çalışan her 10 kişiden yaklaşık olarak 1 tanesi kadındır (İŞKUR, 2021). İnşaat sektöründeki çalışanların yüzde 53,4'ü 2-9 arası istihdamlı işyerlerinde çalışmaktadır. Çalışanların yüzde 34,4'ü 20+ istihdamlı işyerlerinde ve yüzde 12,2'si 10-19 arası istihdamlı işyerlerinde çalışmaktadır. Türkiye genelinde ise 2-9 arası istihdamlı işyerlerindeki çalışanların toplam çalışanlar içindeki oranı yüzde 32 iken; 20+ istihdamlı işyerleri için yüzde 56,1 ve 10-19 istihdamlı işyerleri için yüzde 11,9'dur. Sektörde, Türkiye geneline göre 2-9 istihdamlı işyerlerinde çalışanların oranı fazladır.



**Şekil 3 - Türkiye Genel ve İnşaat Sektörü Çalışan Sayısına Göre İstihdam Dağılım Grafiği**  
(Kaynak: İŞKUR, 2021)

### **İnşaat Sektörünün Büyümeye Etkisi**

Katma değer ve istihdam oluşturmasıyla ülke ekonomilerinde genellikle kaldıraç görevi üstlenen inşaat sektörünün önemi büyüktür. Son yıllarda inşaat sadece bir yapının ya da yapıların inşası olarak değil, bakım, onarım ve her türlü işletme faaliyetlerini içermektedir. İnşaat üretimi deyince akla ilk olarak yapı üretimi gelse de çevre dostu, sosyal sorumluluk içeren, sosyal yaşam ve toplumsal yapıyla direkt bağlantılı anlaşılabilir ve sürdürülebilir projelerin üretimi anlamında da kullanılmaktadır (Ergül, 2007). Türkiye gelişmekte olan ve buna bağlı olarak sürekli artan ihtiyaçlara sahip bir ülke konumundadır. Başka ülkelerde olduğu gibi Türkiye'de de gelişimin ve büyümenin ana sebeplerinden birisi şüphesiz inşaat sektörüdür. Yollar, havaalanları, elektrik/enerji üretim tesisleri, barajlar, fabrikalar, hastaneler, kentsel mekânlar ve diğer tüm yaşam temelli binalar ve o binaları yaşanabilir yapan bütün altyapı faaliyetlerinin altında inşaat



yaftmaktadır. Sektöre bu anlamda girdi sağlayan ve üretim faaliyetlerini inşaat sektöründeki gelişmelere göre devam ettiren alt sektörlerin katkısı da hesaplandığında inşaat sektörünün Gayri Safi Milli Hâsıla (GSMH) içerisindeki payı %30 seviyelerine yaklaşmaktadır. Ayrıca istihdama katkısı %15 seviyelerindedir. İngiltere’de yapılmış bir araştırmaya göre, yeni yapılmış bir konutta yaklaşık 150 farklı meslek dalını ilgilendiren 23 bin parça bulunabilmektedir. Hiçbir sektörün doğrudan ya da dolaylı olarak bu kadar çok alt sektörü etkileme gücü olmadığı düşünöldüğünde, sektörün lokomotif gücünün Türkiye gibi gelişmekte olan ölkeler için ne kadar önemli olduğu görölmektedir (İNTES, 2018).

İnşaat sektörü Türkiye’nin en önemli iş kollarının başında gelmektedir. Hem yurtiçinde hem de yurtdışındaki projelerde sergilenen başarılar, inşaat sektörünü Türkiye ekonomisinin en önemli belirleyicilerinden birisi haline getirmiştir. GSYİH içerisindeki doğrudan payı %8 seviyelerine yaklaşan inşaat sektörünün kendisine bağlı alt sektörlerle beraber payı %30 seviyelerine ulaşmış durumdadır (KPMG, 2017 ve 2018).

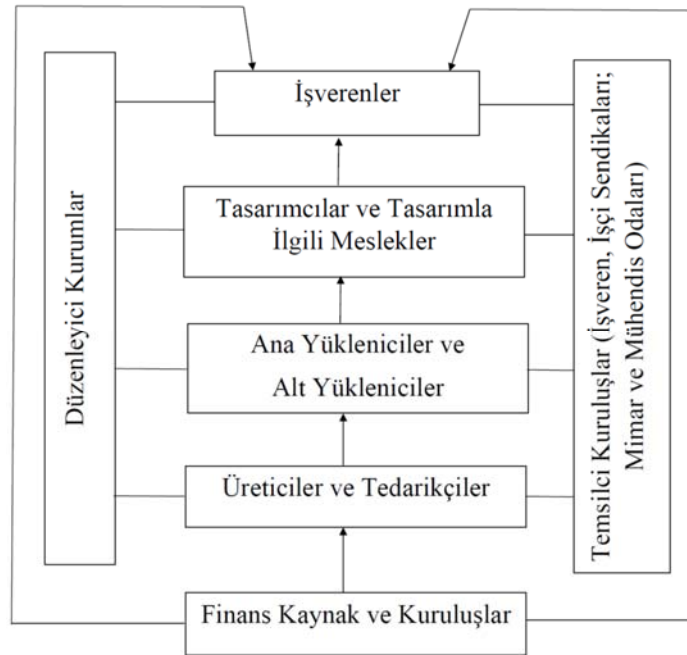
### Uluslararası Alanda Türk İnşaat Sektörü

Türk inşaat firmaları uluslararası alanda da artan oranda inşaat işleri yerine getirmiştir. Mesela 2016 yılı itibarıyla dünyanın en üst 250 uluslararası inşaat firmasının toplam geliri 468.12 milyar ABD dolarının %5.5’i Türk inşaat firmaları tarafından yerine getirilmiştir (ENR, 2017).

ENR (Engineering News Record) öncü uluslararası endüstri dergisi Ağustos 2021 yayında 2021 verilerine dayandırılarak yayınlanmış olan “Dünya’nın Top 250 Uluslararası İnşaat Firması Listesinde” 40 Türk firması da yerini almıştır. Bu listede Çin 78 firma ile listenin ilk sırasında yer almakta, ABD 41 firma ile ikinci sırasında ve Türkiye ise 40 inşaat firması ile üçüncü sırada bulunmaktadır (ENR, 2021).

### İNŞAAT SEKTÖRÜNDE YÖNETİM

İnşaat sektörü çok büyük, geniş coğrafi yayımlı ve parçalı bir yapıya sahiptir. Sektörü meydana getiren bileşenleri özetle aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi özetleyebiliriz (Bowen, 2021).



Şekil 4 - İnşaat Sektörü Bileşenleri (Bowen, 2021’den uyarlanmıştır)

## **Projeler ve Proje Yönetimi**

Proje Yönetimi, işgücü, malzeme, zaman, para, teknoloji ve yönetim kaynaklarını kullanarak yapılması gereken işlemleri tanımlama, liderlik, izleme ve tamamlama işlevlerini yerine getirerek, belirlenen performans ölçütlerine uygun, belirlenen maliyet çerçevesinde, belirlenen süre içerisinde, organizasyonun ana çalışma sistemini bozmadan gerçekleştirilmesi sürecidir. Geçici organizasyon yapısı şantiyede kurulur ve proje bitiminde dağılır. İnşaat sektörü proje temelli bir sektör olup proje yönetiminin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Her inşaat projesi, belirlenen maliyet ve belirlenen süre içerisinde teknoloji kullanarak gerçekleştirilir; farklı özellikleri taşıyıcı, insan gücü, malzeme, zaman, para ve enformasyon teknolojisi kaynakları kullanarak bir organizasyon sistemi içerisinde çalışmayı gerektirir. Organizasyonlar, yöneticilerin aksiyonlarına temel teşkil edecek bir iskelete veya *resmi örgütsel yapı* 'ya sahiptirler. Bu yapı, organizasyonun değişik kısımlarını ve bu kısımların birbirleri ile nasıl ilişkiler içinde olduğunu gösterir. Yapıdaki görevlerin bir tarifini ve bu görev pozisyonlarının nasıl koordine edildiğini verir. Otoritenin hiyerarşik ilişkileri, yapının gerekli parçalarını birbirine bağlayarak gösterilmiştir. Organizasyon yapısı, organizasyon hedeflerini yerine getirmek için planlanmıştır. Proje yönetiminde, niyet ve istekleri hayata geçirmek için amaçlı bir aktiviteye, aksiyona ihtiyaç vardır ve bu da yönetim organizasyonu aracılığı ile oluşmaktadır. İşleri *organize etmek* her şeyden önce aktivite ile ilgilidir. Aşağıda belirtilen hususlar için bir süreci teşkil eder:

- a) Aktivitelerin belirlenmesi, gruplandırılması ve yapılandırılması
- b) Aktivitelerin gruplandırılması ve yapılandırılmasından ortaya çıkan rollerin dağıtılması, verilmesi
- c) İletişim, karar verme ve sorun çözümü dâhil olmak üzere işin detaylı olarak kural ve sistemlerinin tayini

Yöneticiler, hedef ve amaçlarına en iyi şekilde ulaşabilmek için organizasyon yapıları tasarımı yapmak mecburiyetindedir. Bu organizasyon tasarımları, kendilerini yeni şart ve isteklere karşı adapte edebilecek esneklikte olmalıdır.

## **İnşaat Proje Sistemleri**

### **1. Projenin Sosyal Sistemi**

İş gücü, bireysel veya takım olarak, teknik sistemin çalıştırılmasında girdileri sağlar. Bu sosyo-tekniğin ilişkisi, Tavistock Enstitüsü tarafından çok geniş çaplı olarak araştırılmış ve Higgin & Jessop (1965) tarafından da inşaat projelerine uygulanmıştır. Tavistock Enstitüsüne göre, bir inşaat projesindeki katılımcılar esas itibarıyla "*kaynak kontrolörleri*" olup amaçları, algılamaları ve motivasyonlarına (isteklendirmelerine) bağlı olarak kontrolleri altındaki kaynaklarla sağlarlar. İnşaat sektörü projelerinde yaygın olan geçici proje takımlarındaki katılımcılar veya takım üyeleri *seyrek-dokunmuş koalisyon* meydana getirirler. Böyle geçici bir yapıda takım üyeleri projeyi algılamaları doğrultusunda proje amaçlarından önce kendi amaçlarına daha çok bağlı kalacaklardır. Pek çok projedeki sorunların temelinde de bu durum yatmaktadır. Diğer bir faktör ise proje ilerledikçe takımların yapısı da yeni gelen ve ayrılan işgücü ile değişmektedir. Bu duruma Cyert & March (1963) "*değişken çok hedefli koalisyon*" adını vermektedir. İnşaat projelerinde en çok görülen sorunlar iletişim, koordinasyon, yöneticilik, isteklendirme, zıtlık (fikir uyumsuzluğu) şeklinde kendini göstermektedir. Geçici takımlar içerisinde bireylerin yarış içinde olması ve tartışma ortamının olması, sağlıklı ve yapıcı olduğu sürece faydalıdır. Ancak zıtlık, problem yaratma ise zararlı olup iyi bir takım ruhu yaratarak ciddi bir idarecilik becerisi gerektirmektedir.

## 2. Projenin Yapısal Sistemi

Proje yapısı, projedeki rollerin, ilişkilerin, sistemlerin ve prosedürlerin yanı sıra proje kültürünün kurulmasıdır. Roller, belirli bir projede belirli bireylerin doldurduğu fonksiyonlardır. Bu roller hem teknik ve hem de idari parçalar içerir. Katılımcılar arasındaki açık ve net ilişkiler ile sistem ve prosedürler, projenin resmi ve gayri resmi organizasyon yapısının temelini teşkil eder. Projenin resmi ve gayri resmi organizasyonunun yapısı bir "kültür" yaratacaktır. Bu proje yapısının "kişiliği" olup alınacak kararlar ve projenin başarısı üzerinde çok etkili olacaktır.

## 3. Projenin Yönetim Sistemi

Bir projeyi yönetmek, izlenmesi ve takip edilmesi gereken birçok farklı yönü ve birçok şeyi içerir. Proje görevlerinin belirlenmesi için bir program oluşturmalı, kaynakları atanmalı ve sorunları ve riskleri belirleyip izlenmelidir. Bir projenin başarısından proje müdürü sorumludur.

Bir proje yönetim sistemi, bir projenin farklı yönlerini planlayarak, organize ederek ve yöneterek proje başarısı elde edilir. Proje yönetimini tanımlamanın temeli olarak bir "sistem" kavramı alınır, bu ana sistemi tanımlayan "alt sistemler" aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Cleland,1977):

(a) *Kolaylaştırıcı Organizasyonel Alt Sistem veya Organizasyonel Düzenleme:* Proje ekiplerini işlevsel yapı üzerine yerleştirmek için kullanılan sistemdir. Ortaya çıkan "matris" organizasyonu, belirli projeleri başlatmak ve tamamlamak için kurumsal bir odak noktası sağlamayı amaçlayan resmi yetki ve sorumluluk kalıplarını ve kişisel raporlama ilişkilerini tanımlar. Böyle bir organizasyon bağlamında birbirini tamamlayan iki organizasyon birimi ortaya çıkma eğilimindedir: Proje ekibi ve işlevsel birimler.

(b) *Proje Planlama Alt Sistemi:* Projelerin seçimi, proje amaç ve hedeflerinin belirlenmesi ve bu amaç ve hedeflerin gerçekleştirileceği stratejinin formülasyonu ile ilgilenen alt sistemdir. Proje planları, başarılı proje başarısı için hem amaçları hem de araçları belirler. Proje planı, nerede bulunursa bulunsun organizasyonel kaynaklara dayanan projeyi desteklemek için kaynakların nasıl tahsis edileceği ile ilgilenir.

(c) *Proje Kontrol Alt Sistemi:* Proje takvimi, bütçe ve teknik performans için performans standartlarının seçimini sağlar. Bu alt sistem, fiili ilerlemeyi planlanan ilerlemeyle karşılaştırmak için bilgi geri bildirim ve gerektiğinde düzeltici eylemin başlatılmasıyla ilgilenir. Bir kontrol alt sisteminin mantığı, sonuçları zamanında ve bütçe dahilinde teslim etmek için proje üzerinde çalışmakta olan çeşitli organizasyonel birimlerin izlenmesi ihtiyacından doğar.

(d) *Proje Yönetimi Bilgi Alt Sistemi:* Projelerin etkin kontrolü için gerekli olan bilgi ve iletişimi içerir. Bu alt sistem, doğası gereği gayri resmi olabilir- proje katılımcıları ile periyodik toplantılardan oluşabilir- veya projede neler olup bittiğine dair sık sık "çıkıtı" sağlayan resmi bir bilgi alma sistemi olabilir. Bu alt sistem, proje ekibi üyelerinin proje yönetiminde kararlar almasına ve uygulamasına olanak sağlamaya çalışır.

(e) *Teknikler ve Metodoloji:* Bu alt sistem teriminin kullanıldığı anlamda gerçekten bir alt sistem değildir. PERT, CPM gibi çizelgeleme teknikleri, modelleme, simülasyon, doğrusal programlama, regresyon analizi ve proje kararlarının alınmasında risk ve belirsizlik faktörlerinin değerlendirilmesine yardımcı olan bu tür yönetim bilimi teknikleri gibi teknikler ve metodolojilerden oluşur.

(f) *Kültürel Ambiyans Alt Sistemi:* Kültürel ortamın doğasının çoğu, insanların- sosyal grupların- organizasyonda proje yönetiminin yürütülme şekli hakkında nasıl hissettikleri ile tanımlanabilir. Sosyal grupların duygusal kalıpları, algıları, tutumları, önyargıları, varsayımları, deneyimleri, değerleri, hepsi organizasyonun kültürel ortamını geliştirmeye yarar. Bu ortam, insanların nasıl davrandıklarını ve tepki verdiklerini, nasıl düşündüklerini, hissettiklerini ve organizasyonda ne söylediklerini etkiler ve bunların hepsi nihayetinde organizasyonda sosyal olarak kabul edilebilir davranış olarak kabul edilenleri belirler.

Bir organizasyonun kültürel ortamı sadece organizasyona dahil olan kişiler değildir. Proje organizasyonu aracılığıyla projede amaçlanan sonucu gerçekleştirmek amacıyla politika, planlar, prosedürler ve resmi organizasyonel raporlama ilişkileri yoluyla birleştirilen insanlardır. Organizasyonla amaçlanan resmi ilişkiler, organizasyon şemalarında, proje yönetimi kılavuzlarında, iş tanımlarında, politikalarda, planlarda, prosedürler gibi belgelerde tanımlanır. Bu dokümantasyon, organizasyonda işleri yapmanın “resmi” yolunu belirlemek için geliştirilmiştir.

## **PROJE BAZLI ORGANİZASYONLAR**

“Proje fonksiyonları” ve “Proje bazlı organizasyonel faaliyetler” i anlamaya çalışmadan önce “Proje’nin ne olduğunu anlamamız ve tanımlamamız gerekir. Literatürde bir Proje için çok fazla tanım bulabiliriz. Proje Yönetimi Enstitüsü (PMI) tarafından yayınlanan Proje Yönetimi Bilgi Birimi (PMBOK) tarafından verilen kısa ve özlü bir tanım vardır:

*“Proje, benzersiz bir ürün veya hizmet yaratmak için üstlenilen geçici bir çabadır”* (PMBOK, 2000).

Yaygın olarak atıfta bulunulan bir başka tanım Turner (2009) tarafından verilmiştir. Turner'ın tanımı:

*“Nitel ve nicel amaçlarla tanımlanan faydalı değişimi başarmak için belirli bir şartnameye sahip benzersiz bir çalışma kapsamını, maliyet ve zaman kısıtlamaları dahilinde üstlenmek için insan, finansal ve malzeme kaynaklarının yeni bir şekilde düzenlendiği bir çabadır”.*

Bu kuralcı bir tanımdır. Turner'ın (2009) daha az kuralcı bir tanımı şöyledir:

*“Proje, faydalı değişiklik sağlamak için iş yapmak üzere kaynakların atandığı geçici bir organizasyondur”.*

Bir projenin ne olduğu belirlenince akla şu soru geliyor; proje yönetimi nedir?

Proje yönetimi, vizyon ve konuları proje tanımına dönüştürmekle ilgilidir. Proje tabanlı yönetim, gelecekteki durumun başarıyla teslim edildiği yapılandırılmış süreçtir. Cleland ve Kerzner'e (1985) göre projenin altında yatan önemli özelliklerden bazıları şunlardır:

1. Sınırlı bir bütçe ve tamamlanma süresi ile sınırlıdır.
2. Etkili koordinasyon gerektiren çeşitli kaynaklar veya organizasyon üyeleri tarafından gerçekleştirilen bir dizi karmaşık ve birbirleriyle ilişkili faaliyetlerden oluşurlar.
3. Açıkça tanımlanmış bir amaca veya ulaşıldığında Proje'nin sonunda ve proje ekibinin dağılmasına neden olan bir dizi hedefin gerçekleştirilmesine yöneliktirler.
4. Bir dereceye kadar, her proje kendine özgüdür, benzersizdir.

Turner ve Müller (2003) ile Turner ve Keegan (2001) projeleri aşağıdaki gibi değerlendirmektedir. Bunlar:

- 1) *Üretim fonksiyonu olarak* (çok sayıda çizim ve plan, projenin girdi ve çıktılarını alıp satan ve İşveren'in projeden beklediği faydaları maksimize eden proje müdürü tarafından yönetilir);
- 2) *Geçici bir organizasyon olarak* (Geçici bir organizasyon olarak projeler belirli amaçları elde edebilmek ve onun temsilciliğini yapmak için ana organizasyon tarafından kurulur. Ana organizasyon, İşveren'in maksimum kârlılık elde edebilmesi için proje müdürünün almış olduğu kararları denetleyebilmek amacıyla yapılanması ve iletişim kanalları kurması gereklidir);

3) *Bir değişim temsilciliği olarak* (Ana organizasyonlar projeleri değişim yaratmak için bir araç veya temsilci olarak görmektedir. Proje müdürü bu değişim, transformasyon ve değer yaratma sürecinde çok önemli bir yere sahiptir).

4) *Kaynak kullanımı temsilciliği olarak* (Projeler, değişim yaratmak için kaynakların kullanılmasını sağlayacak bir araç ve bir organizasyon şekli olarak kullanılır. Projeler, geçici organizasyonlar olduklarından gerekli kaynaklarını her başladıkları zaman yeniden sağlamak zorundadırlar. Projeler, organizasyonlardaki değişimi sağlamak için gerekli kaynakların en etkin bir şekilde kullandırıldığı şeklinde algılanmaktadır. Proje yönetimi ise “kaynak kontrolörlüğü rolünü yerine getirmektedir);

5) *Belirsizlik yönetimi temsilciliği olarak* (Belirsizliğin azaltılması projelerin en önemli misyonlarından biridir. Bu belirsizlik projenin hem amacı ve hem de yapısı ile ilgilidir).

Yukarıdaki özellikler, proje tabanlı çalışmayı diğer organizasyonel faaliyet biçimlerinden ayıran çekirdeği oluşturur. Yukarıdaki özellikler, projeleri yönetmede önemli ve zorlayıcı özelliklerdir.

### **Bütçe ve Program Kısıtlamaları:**

Projeler faaliyetlerini sürdürürken iki önemli sınırlama ile karşılaşırılar:

1. Tamamlanmaları ve teslim edilmeleri için belirli bir süreye,
2. Sınırlı bir bütçe içinde tamamlanmaları.

Projeler, belirli bir sorunu çözmeyi amaçlayan geçici girişimlerdir. Proje organizasyonunun işlevsel operasyonları, ulaşmayı amaçladıkları hedeflere ulaşana kadar devam eder. Bu hedefler tamamlandığında proje sona erer.

Bütçe ve zaman kısıtlamalarının, proje organizasyonunun sahip olduğu mevcut en iyi (bazen iyimser) bilgilere dayanan tahminler olduğunun özellikle belirtilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, öngörülemeyen maliyetlere veya olaylara bu tahminler içerisinde hata payı olarak yer vermek oldukça olağandır.

Projeler, amaçlarını, izin verilen süre ve maliyet sınırları dahilinde gerçekleştirir ve dağılırlar.

### **Karmaşıklık**

Projeler, faaliyetlerin fonksiyonlar arası doğası nedeniyle tipik olarak bir dereceye kadar karmaşıklık içerir. Proje bazlı inşaat işinin disiplinler arası doğası, herhangi bir departmanda bulunan olağan karmaşıklık seviyelerine çok daha fazlasını ekler.

İnşaat projeleri, proje ekibinin farklı üyeleri tarafından aynı anda yürütülen birden fazla faaliyet nedeniyle genellikle karmaşık ve birbiriyle ilişkili olarak sınıflandırılır. Proje ekibi üyeleri genellikle gerilim kaynağı olarak görülen güç ve çatışma sorunları yaşarlar. Bu gerilim kaynakları nedeniyle planlanmış görevler, doğru sırayla, zaman ve bütçe ile yerine getirilmezse, tüm proje tehlikeye girebilir.

Sonuç olarak, projenin geçici doğası ve proje yöneticisinin karşılaştığı kendisine verilen güç ve takdir yetkisi üzerindeki yönetimin getirdiğı sınırlamalarla birleştğinde, projeyi etkili bir şekilde yönetmek imkansızlaşır ve projenin kötü yönetilmesinin temel sorununu oluşturur.

Proje tabanlı organizasyonun yapısı heterojendir ve insanları farklı görevlere entegre etmek için oluşturulacak sistemlere ihtiyaç duyar. Yukarıda bahsedilenlerin ışığı altında proje yöneticisinin görevi şu şekilde özetlenebilir:

- a) Farklı fonksiyonel geçmişlere sahip bir takım ekip üyeleri arasında tutarlı bir çalışma ilişkisi kurmak,
- b) Proje faaliyetlerinin etkinliği için bir planlama, çizelgeleme ve kontrol sistemi oluşturmak.

Proje yöneticileri farklı bir dünyada çalışıyor. Bir inşaat projesindeki problemler geçicidir (projeye özel) ve projenin nasıl yapılandırılması ve yürütülmesi gerektiğine ilişkin kuralların iyi ve projeye uygun olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Proje yöneticileri, proje bazlı çalışmayı karakterize eden kısa süreli riskler ve belirsizliklerle karşılaşır.

## **PROJE YÖNETİMİ NEDİR?**

PMBOK'a (2017) göre proje yönetimi, *“proje için paydaş gereksinimlerini karşılamak veya aşmak için bilgi, beceri, araç ve tekniklerin uygulanmasıdır”*.

Başarılı bir proje yönetimi, aynı anda hem insan kaynağı ile ilgili ve hem de teknik zorluklar içerir. Ayrıca, günlük bazda ortaya çıkan çatışmalara ve sorunlu alanlara tepki verme esnekliği ile birlikte ileri görüşlü bir stratejik bakış açısı gerektirmektedir. Günün sonunda, mesleklerinde başarılı olan proje yöneticileri, sürekli olarak en büyük ödül olan projenin başarılı bir şekilde tamamlanmasına odaklanmalarını sürdürürken, proje ekipleri ve kişisel hareket özgürlüğü üzerindeki kısıtlamalarla başa çıkmayı ve bunları öngörmeyi de öğrenmek durumundadır.

Proje yönetimi, genel yönetim kavramından “misyon odaklı” yapısı nedeniyle farklılık gösterir. İnşaat projeleri, modern yönetim bilgilerinin yanı sıra tasarım ve yapım prosesinin de bilinmesini gerektirir. Bir inşaat proje organizasyonu yapım işi misyonunun tamamlanmasını müteakip dağılır (Prabhakar, 2009).

Stuckenbruck (1986)'ya göre ana proje yönetim çerçevesini oluşturan ögeler aşağıdaki gibidir:

1. Genel Yönetim bilgisi,
2. Destek Disiplinleri (bilgisayar, istatistik ve olasılık analizleri)
3. Özel Bilgi Alanları (lineer programlama, regresyon analizleri, yapay sinir ağları ve bulanık mantık analizleri, planlama ve programlama teknikleri, vb)

Turner (2009) proje yönetimini şöyle tanımlar: “Proje yönetimi, vizyon ve projeye ilişkin konuları proje tanımına dönüştürmekle ilgilidir. Proje tabanlı yönetim, gelecekteki durumun başarıyla teslim edildiği yapılandırılmış süreçtir”.

## **Proje Ekiplerinin Yapılandırılması**

Proje yönetiminin en zorlu yönlerinden biri, proje ekiplerinin proje bazlı şantiye organizasyonunun geri kalanıyla olan ilişkisinde yatmaktadır. Proje bazlı saha organizasyonunun çoğu, bir tür standart fonksiyonel yapı kullanır (Pinto ve Rouhiainen, 2001). Bu yapıda, çoğu etkinlik bu işlevsel ekipler içinde gerçekleşir. Bu işlevsel görevler, kuruluşun faaliyetlerinin gerekli parçaları olarak hareket eder.

Belirli bir düzeyde heterojenliğe sahip uyumlu bir ekip oluşturmak, en yetenekli proje yöneticileri için bile zorlu bir görevdir (Pinto ve Rouhiainen, 2001).

Bir projenin başarılı uygulamalarından sorumlu proje yöneticisi, teknik veya organizasyonel nitelikteki sorunların erken uyarı işaretlerinin farkında olmalıdır. Proje yöneticileri ayrıca, uygulama başarısı veya başarısızlığı olasılığını belirlemede önemli bir rol oynayabilecek kritik başarı faktörleri (CSF'ler) olarak adlandırılan geniş kapsamlı sorunlardan bazılarının farkında

olmalıdır. CSF'lerin kullanımı proje yöneticilerine uygulamanın davranışsal ve organizasyonel yönlerini değerlendirmede önemli bir araç sunar (Pinto ve Rouiainen, 2001).

### **Proje Ekibinde Doğru Kişiler**

Projenin nihai başarısını olumlu yönde etkilemek için gerekli teknik ve idari becerilere sahip kişilerin işe alınması, seçilmesi ve eğitilmesinin önemi yeterince vurgulanmamaktadır. Bu konuda önemli bir soru şu olabilir: “Proje ekibi üyeleri gruba nasıl atılıyor?”.

Pek çok inşaat projesi organizasyonunda, ekip üyeleri, teknik niteliklere, insan becerilerine veya etkin bir şekilde performans gösterecek idari becerilere sahip olup olmadıklarına bakılmaksızın, proje ekiplerine tamamen uygunluk esasına göre atanır. Başarılı proje yöneticisi, ortaya çıkabilecek teknik sorunların ve zorlukların farkında olmalıdır. Ayrıca, davranışsal ve organizasyonel sorunlar genellikle daha yaygındır ve şantiyelerde proje yöneticisinin rolünün yerine getirilmesi için bu hususlar ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle, proje ekibi, projenin çıktısında çok büyük bir öneme sahiptir.

Proje, faydalı bir değişiklik elde etmek için iş yapmak üzere kaynakların atandığı geçici bir organizasyondur. Proje üzerinde çalışmak için organizasyon genelindeki kaynakların entegre edilmesi gerekir. Projede, yönetici ve iş görenler aciliyet ve belirsizlik duygusu altında çalışırlar. Çalışanların çabalarını koordine etmek için sağlam ve esnek bir plan ve programın olması gereklidir. Bu plan ve program hedefe yönelik ve uygulanabilir olacaktır.

Proje yönetiminin özü, risk ve belirsizliği yönetmektir. Bir projede, yönetim odağı, faaliyetlerle dikey olarak değil, proje süreciyle yatay olarak sürdürülmelidir. Proje teslimini yönetici ve çalışanlar yönlendirir. Bunu, projenin etkin ve verimli bir şekilde çalışması için gerekli işlevleri yerine getirerek yaparlar. Projeye ilgili faaliyetler, bir kişi tarafından, bir grup insan tarafından tanımlanmış rollere göre yerine getirilmektedir.

Kolektif bir çalışma çabasını koordine etmek, herhangi bir projenin başarısı için son derece önemlidir. Koordinasyonun nasıl gerçekleştiğine bakılmaksızın, destekleyici liderlik modelleri ve proje ekipleri ile diğer paydaşlar arasındaki sürekli katılım ve iletişim başarılı sonuçların temelini oluşturur.

Proje başarısına ulaşmanın en önemli parametresi insandır (PMBOK Guide, 2021).

### **Proje Yönetimi**

Project Management Body of Knowledge PMBOK'a (2017) göre proje yönetimi, "proje için paydaş gereksinimlerini karşılamak veya aşmak için bilgi, beceri, araç ve tekniklerin uygulanmasıdır".

Projelerin başarılı yönetimi, aynı anda hem insani hem de teknik bir zorluktur ve uzak görüşlü bir stratejik bakış açısı ile günlük olarak ortaya çıkan çatışmalara ve sorunlu alanlara tepki verme esnekliği gerektirmektedir.

### **ORGANİZASYON SİSTEMLERİ**

Projeler, yapıları ve yönetim çerçeveleri aracılığıyla ana kuruluş tarafından dayatılan kısıtlamalar dahilinde işlevini yerine getirirler. Etkin ve verimli bir şekilde çalışmak için proje yöneticisinin, organizasyon içinde sorumluluk, hesap verebilirlik ve yetkinin nerede olduğunu iyi anlaması gerekir.

Bu anlayış, proje yöneticisinin projeyi başarılı bir şekilde tamamlamak için gücünü, yetkinliğini, liderliğini ve politik yeteneklerini etkin bir şekilde kullanmasına yardımcı olacaktır. Bir inşaat proje organizasyonu içindeki birden fazla faktörün etkileşimi, o oluşan sistemde çalışan projeyi etkileyen kendine özgü bir sistem yaratmaktadır. Kurulan sistemler, bir proje organizasyonu yönetiminin sorumluluğunun temelini teşkil eder (PMBOK, 2017).

PMBOK (2017) 6. Baskı'ya göre yönetim öğeleri, bir organizasyonda yönetimin temel işlevini oluşturan bileşenlerdir ve aşağıdakileri içerir:

- İşi gerçekleştirmek için özel beceriler ve beceri uygunluğunu kullanarak iş bölümü,
- İşi yapmak için verilen yetki,
- İşin yapılması için verilen sorumluluk,
- Eylem disiplini (otoriteye, kişilere ve kurallara saygı),
- Emir birliği (herhangi bir eylem için bir kişiye (asta) sadece bir üst emir vermeli),
- Organizasyonun hedefleri bireysel hedeflerin üzerinde yer alır,
- Yapılan iş için adil ücret ödenmesi,
- Kaynakların optimum kullanımı,
- Açık iletişim kanalı,
- Çalışma ortamında insanlara adil ve eşit davranılması,
- Çalışma alanındaki kişilerin güvenliği,
- Optimum moral.

Bu yönetim öğelerinin performansı, kuruluş içinde seçilen kişilere atanır.

## **PROJE MÜDÜRÜ**

Proje tabanlı organizasyonun yapısı heterojendir ve farklı görevlere sahip insanları entegre etmek için sistemler oluşturulmasına ihtiyaç duyar. Yukarıdakilerin ışığı altında proje yöneticisinin görevi şu şekilde özetlenebilir:

- a. Farklı geçmişlere sahip çok sayıda ekip üyesi arasında tutarlı bir çalışma ilişkisi kurmak,
- b. Proje faaliyetlerinin verimliliği için bir planlama, iş programı ve kontrol sistemi oluşturmak.

Proje yöneticileri farklı bir dünyada çalışmaktadır. Bir inşaat projesindeki problemler geçicidir (özel, spesifik ve kendine özgüdür) ve projenin nasıl yapılandırılması ve yürütülmesi gerektiğine ilişkin kurallar şantiyelerde geliştirilmemiştir. Proje yöneticileri, proje bazlı çalışmayı karakterize eden türden riskler ve belirsizliklerle karşılaşmaktadırlar.

Mesleklerinde nihai olarak başarılı olan proje yöneticileri, sürekli olarak proje başarısı olan nihai ödüle odaklanmayı sürdürürken, proje ekipleri ve kişisel hareket özgürlüğü üzerindeki kısıtlamalarla da başa çıkmayı öğrenmek mecburiyetindedir.

Buradaki temel soru şudur: Proje yöneticileri için bir projedeki nihai hedef nedir? Başarılı ve başarısız bir projenin belirleyicileri nelerdir? Proje müdürü, proje ekibi performansını nasıl değerlendirmelidir?

Herhangi bir deneyimli proje yöneticisi, başarılı bir projeyi zamanında, bütçenin altında ve şartnamelere uygun olarak bitirilip teslim edilmiş bir proje olarak tanımlar. Bu, proje yönetiminin üçlü kısıtına (triple constraints) atıfta bulunulan çok yaygın bir tanımdır. Bu nedenle proje



yöneticileri, projenin başarısı için işgücünü, süreçleri ve diğer ilgili kaynakların yönetimini nasıl yöneteceklerini öğrenmek zorundadırlar.

## **PROJE MÜDÜRÜNÜN (PM) ROLÜ**

Proje yöneticisi, proje hedeflerine ulaşmak için proje ekibinin liderliğinde kritik bir rol oynar. Bu rol proje boyunca açıkça görülmektedir. Birçok proje yöneticisi, başlangıcından kapanışına kadar bir projeye dahil olur. Proje yöneticisinin rolü organizasyondan organizasyona değişebilir.

Proje yönetimi rolü, proje yönetimi süreçlerinin projeye uyacak şekilde uyarlanmasıyla aynı şekilde organizasyona uyacak şekilde uyarlanmıştır (PMBOK, 2017) 6. baskı.

### **Proje Müdürünün (PM) Roller:**

1. Proje Müdürü, ekiplerinin proje sonucunu etkileyen ürettiklerinden sorumludur. Proje Yöneticisi, ekibin üreteceklerine bütünsel bir bakış açısıyla bakarak bunları planlamak, koordine etmek ve tamamlatmalıdır. PM, projenin başarıyla tamamlanması için hem projenin ve hem de çalışanın vizyon, misyon ve hedeflerine ilişkin yönetim sergiler. Proje Müdürü, proje hedeflerini başarıyla tamamlamaya yönelik çalışan ekiplerinin iletişimini ve motivasyonunu kendi yorumunu da katarak sağlamaya çalışır.

2. Proje Müdürünün, bir projedeki her rolü yerine getirmesi beklenmez. Proje Müdürünün, proje yönetimi bilgisine, teknik bilgiye, dinleme-anlama ve deneyime sahip olması gerekir. Proje Müdürü, iletişim yoluyla proje ekibine liderlik, planlama ve koordinasyon sağlar. Ayrıca, yazılı ve sözlü iletişim sağlar.

### **Proje Yöneticisinin Tanımı:**

Bir proje yöneticisinin rolü, işlevsel bir yönetici veya operasyon yöneticisinin rolünden farklıdır. İşlevsel yönetici, işlevsel bir birim için yönetim gözetimi sağlamaya odaklanır. Operasyon yöneticileri, ticari operasyonların verimli olmasını sağlamaktan sorumludur. Proje yöneticisi (PM), proje hedeflerine ulaşmaktan sorumlu ekibe liderlik etmek üzere performans gösteren kuruluş tarafından atanan kişidir.

Proje Yöneticisi, proje ekibini proje hedeflerini ve paydaşların beklentilerini karşılamaya yönlendirir. Proje yöneticisi, proje üzerindeki birbirine rakip kısıtlamaları mevcut kaynaklarla dengelemek için çalışır. Proje Yöneticisi, işveren, ekip üyeleri ve diğer paydaşlar arasındaki iletişim rollerini yerine getirir. Bu, projeye yön vermeyi ve başarı vizyonunu içerir. Proje yöneticisi, projenin paydaşlarının çatışan ve rekabet eden hedeflerini dengelemek için yumuşak beceriler (kişiler arası beceriler ve insanları yönetme becerisi) kullanır.

### **Proje Yöneticisi Yetkinlikleri:**

Proje Yöneticisi Yetkinlik Geliştirme Çerçevesine “Project Manager Competency Development Framework” (PM, 2001 & PMBOK, 2017) göre proje yöneticisi yönetsel yetkinlikleri ve becerileri şu şekilde sıralanabilir:

1. Teknik Proje Yönetimi
2. Liderlik
3. Stratejik ve İş Yönetimi

Ek yeterlilik listesi şu şekilde özetlenebilir:

1. Proje, program ve portföy yönetiminin belirli alanlarıyla ilgili bilgi, beceri ve davranışlar.
2. Organizasyona yardımcı olmak için bir ekibi yönlendirmek, motive etmek ve organize etmek için gereken bilgi, beceri ve davranışlar.
3. Performansı ve iş sonuçlarını daha iyi artıran sektör ve organizasyona ilişkin bilgi ve uzmanlık.

En etkili proje yöneticileri olmak için bu üç beceri setinin bir dengesine sahip olmaları gerekmektedir.

### **Proje Yöneticisi Liderlik Becerileri:**

Liderlik becerileri, bir takımı yönlendirme, motive etme ve yönetme becerisini içerir. Bu beceriler, müzakere, esneklik, iletişim, problem çözme, eleştirel düşünme ve kişilerarası beceriler gibi temel yetenekleri içerebilir.

Tüm projelerde ortak payda insandır. İnsanlar sayılabilir ama onlar sayı değildir. Proje yöneticisinin rolünün büyük bir kısmı insanlarla ilgilenmeyi içerir. Proje yöneticisi, insanların davranışlarını ve motivasyonlarını incelemelidir. Liderlik, organizasyonlardaki projelerin başarısı için çok önemlidir.

Proje yöneticileri, proje düzeyinde gerçekten neyin gerekli olduğuna odaklanmak için ekibin birlikte çalışmasına rehberlik etmekten sorumludur. Bu, süreçlerin, bilginin ve insanların entegrasyonu yoluyla elde edilmektedir.

Projeler, organizasyonların stratejik hedeflerine ulaşmak için üstlenilir ve proje yöneticisi liderlik rolünü üstlenmekten sorumludur (Müller & Turner, 2007; Müller & Turner, 2010a & 2010b). Crawford (2005), proje yönetimi yeterliliklerinin proje performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu ve bunun sonucunda tüm organizasyonun performansının da etkilenebileceğini bildirmektedir. Yönetici, projeyi proje hedeflerine ulaştırmaktan sorumludur.

Farklı organizasyonlar (Chipulu et. al., 2013) ve farklı proje türleri (Tackey & Carvalho, 2015), proje yöneticileri için farklı yetkinlikler gerektirdiğini raporlamışlardır. Çeşitli proje yönetimi kurumları, projeleri yönetmek için gerekli yetkinlikleri belirlemek ve geliştirmek için kılavuzlar, çerçeveler ve standartlar oluşturmuştur. Bazı örnekler şu şekilde sıralanabilir:

1. Proje Yönetimi Yetkinlik Gelişimini “Project Management Competency Development” (PMCD) oluşturan Proje Yönetimi Enstitüsü “Project Management Institute” (PMI), (PMI, 2007)
2. Proje Programı ve Portföy Yönetimi (ICB) için Bireysel Yeterlilik Temelini “Individual Competence Baseline for Project Programme and Portfolio Management” oluşturan Uluslararası Proje Yönetimi Derneği “International Project Management Association” (IPMA), (IPMA, 2015)
3. APM “Association for Project Management” APM Yetkinlik Çerçevesini “APM Competence Framework” (ACF) geliştiren Proje Yönetimi Derneği (APM), (APM, 2015)
4. Proje Yönetimi için Profesyonel Yeterlilik Standartlarını “Professional Competency Standards for Project Management” (PCSPM) geliştiren Avustralya Proje Yönetimi Enstitüsü “Australian Institute of Project Management” (AIPM), (AIPM, 2010a ve 2010b).

Bu standartlara ek olarak, Medina ve Medina (2014) ve Takey & Carvelho (2015) ve doVale, et. al (2018), proje yöneticilerinin temel yeterliliklerini incelemişlerdir.

Proje ne kadar büyük ve karmaşık olursa, genel yönetim işlevi de o kadar kritik hale gelmektedir (Udo ve Koppensteiner, 2004).

Udo ve Koppensteiner (2004), genel olarak proje yöneticilerinin, projenin genel başarısından sorumlu tutuldukları için resmi bir yetkileri olmadığını iddia etmektedir. Proje yöneticileri, her birinin kendi beklentileri ve proje başarı kriterleri olan tüm paydaş grupları arasındaki etkileşimi yönetmekten sorumludur. Proje yöneticisinin pozisyonu, genel olarak tanımlanmış bir beceri seti ve kişilik profili gerektirmektedir.

## **TÜRKİYE'DE BÜYÜK ALTYAPI PROJELERİNDE PROJE YÖNETİCİLERİNDE ARANAN ÖZELLİKLER**

Özetlenecek olursa, inşaat projeleri proje yöneticileri için belirli bir düzeyde teknik becerilere ihtiyaç duyar. Tüm proje teknolojilerinde en iyi olmaları gerekmez ve beklenmez. Proje organizasyon şekline bağlı olarak, proje yöneticisi programlanan işe ekip üyeleri ve bu üyelere de iş atayacak ve iş ilerlemelerini değerlendirecek ve kontrol edecektir.

Proje Yöneticisi, proje faaliyetleri için gereken tüm kaynakları planlamalı ve bu kaynakları edinmelidir. Proje yöneticisinin iletişim gereksinimleri, ekip üyesinden üst yönetime ve tedarikçilerden müşterilere kadar tüm proje paydaşlarını kapsamaktadır. Bu iletişim becerileri, fonksiyonel yöneticiler ve kaynak tedarikçileri ile müzakere etmek ve müşterilere teslim edilenleri takip etmek için gereklidir. Proje yöneticisinin fonksiyonel bir organizasyon içinde bir koordinatör veya bir matris organizasyon içinde yönetici olup olmadığına bakılmaksızın, proje yöneticisi resmi ve gayri resmi yetkisiyle sorunları çözmesi beklenmektedir. Etkili liderlik sağlamak için teknik, idari ve kişilerarası becerilerin bir karışımına sahip olmalıdırlar. Yetki ve sorumluluk bir arada verilmezse proje yöneticisi sorunları çözmekte zorlanacaktır.

Pek çok organizasyon yapısında, Proje Yöneticisinin projeyi tamamlayacak insanlar üzerinde doğrudan bir yetkisi olmadığı için, iyi müzakere ve ikna becerileri önemli beceriler olarak görülmektedir. Bütün projelerin ortak üç performans hedefi, bütçe hazırlama, program hazırlama, izleme ve kontrol becerileri her inşaat proje yöneticisinde olmak gerekmektedir. Proje Yöneticisinde olması gereken asgari beceriler aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

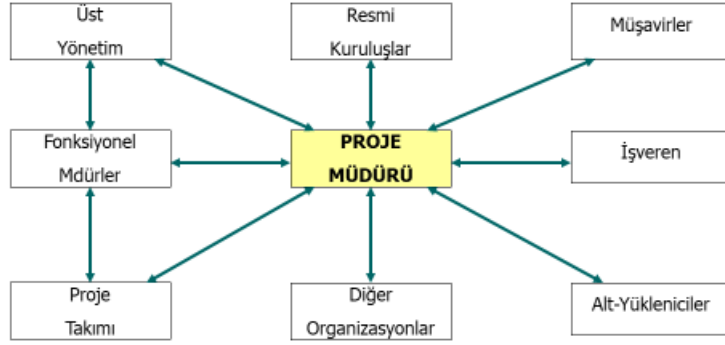
1. Teknik Beceriler
2. Kaynak Yönetim Becerileri
3. Liderlik Becerileri
4. İletişim Becerileri
5. Görüşme Becerileri
6. Müşteri İlişkisi Becerileri
7. Maliyet Bütçeleme Becerileri
8. İş Planlama ve Süre Yönetim Becerileri

Bu görevleri yerine getirirken proje yöneticisi aşağıda şekil 2' de görüldüğü gibi ilişkiler içerisinde olmaktadır.

Proje Yönetiminin ana fonksiyonları ise özetle aşağıda listelenmiştir:

1. Amaçlara ve yapılacak işi yeterli derecede detaylı bir şekilde tanımlayarak *projenin amacını* yönetmek.
2. Projedeki *insan gücünü* (İnsan Kaynaklarını) yönetmek.
3. Projeyi planlandığı şekilde yürütebilmek için proje katılımcılarını yeterli derecede enformasyon sahip kılabilmek için *iletişim akışlarını* yönetmek.

4. İş planlama ve programından şaşmadan *süreyi* yönetmek.
5. Proje sonuçlarının tatmin edici olması için *kaliteyi* yönetmek.
6. Bütçe içerisinde projenin etkin bir şekilde yürütülmesi için *maliyetleri* yönetmek.



Şekil 5 - Proje Müdürü İlişkileri

Yukarıda belirtilenlere ilave olarak proje kapatma ve teslim aşamasında proje yöneticilerinden beklentiler doruk noktasına ulaşmakta ve çok sıkıntılı bir döneme girilmektedir. Aşağıdakiler kendi proje yönetim tecrübelerinden derlenmiştir.

Yapım işinin en sıkıntılı olan proje teslim ve işi kapatma bölümünde, takım dağılmaya başlamadan önce tüm işin tüm yönlerinin ve bileşenlerinin uygun şekilde bitirilmesi ve imzalanması gerekir. Yapım ve proje yöneticisi, projenin tüm bölümlerinin gerçekten eksiksiz onaylı projesine ve sözleşme şartlarına uygun olduğundan emin olmalıdır.

Bu aşamada, proje veya saha yöneticisi tüm proje gereksinimlerinin karşılandığını, tüm işlerin tamamlandığını ve tüm sözleşme dışı verilen yazılı talimatların yerine getirildiğini kontrol ederek onaylayacaktır. Bu, işverene karşı yükümlülüklerin yerine getirildiğinden emin olmak için herhangi bir değişiklik talebini gözden geçirme, tüm çalışmalarını gözden geçirme ve kesin hesap aşamasında bunların dikkate alınıp alınmadığını gözden geçirme zamanıdır. Bunun için:

- Tüm işlerin orijinal sözleşmede veya sözleşmede belirtildiği gibi tamamlandığının belgelenmesi; bir şey eksik, eksik veya doğru yapılmamışsa belgelenmesi ve düzeltmek için gerekli adımların atılması gerekir.
- Yasal gereksinimlerin incelenmesi ve tüm şartların karşılandığından emin olunması gerekir.
- Proje tesliminden önce bunların tamamlandığından emin olmak için tüm değişiklik siparişlerin incelenmesi gerekir.
- Herhangi bir talebin yerine getirildiğinden ve işin teslim edilmeye gerçekten hazır olduğundan emin olmak için işverene yapılmış olan yazışmaların incelenmesi gerekir.

Türkiye’de büyük alt yapı işleri için proje müdürlerinde aranan beceri ve özellikler kendi tecrübelerime dayanarak aşağıda özetlenmiştir.

- Güçlü planlama becerileri
- İnsan yönetimi becerileri
- Güçlü problem çözücü

- Liderlik özellikleri
- Proje Yönetimi prensiplerini bilme
- Müzakere Becerileri
- Ticari olarak farkındalık (ekonomiklik analizleri)
- Son teslim tarihlerine kadar riskli ve zor inşaat sahalarında çalışabilme
- Sözlü Anlatım: Başkalarının anlayabilmesi için konuşma sırasında bilgi ve fikirleri iletme yeteneği.
- Sözlü Anlama: Sözlü sözcükler ve cümleler aracılığıyla sunulan bilgi ve fikirleri dinleme ve anlama yeteneği.
- Problem Duyarlılığı: Bir şeylerin yanlış olduğunu veya muhtemelen ters gideceğini söyleyebilme yeteneği. Problemi çözmeyi değil, sadece bir problem olduğunu kabul etmeyi içerir.
- Yazılı Anlama: Yazılı olarak sunulan bilgi ve fikirleri okuma ve anlama yeteneği.

## SONUÇ

İnşaat sektörü küresel ekonomide önemli bir sektör olmasına rağmen, azalan verimlilik, işyeri güvenliği ve sözleşmesel uyuşmazlıklar gibi sorunlarla uğraşmaktadır. İnsan unsuru- özellikle inşaat proje yöneticileri- bu devam eden sorunların çoğunu çözmeyi anahtarıdır. İnşaat proje yöneticilerinin performansının kapsamlı bir şekilde anlaşılması, eğitim ihtiyaçlarının belirlenmesi için önemlidir. Ayrıca, inşaat proje yöneticilerinin bilgi ve beceri birikimlerinin bilinmesi bu yöneticilerin uygun projelerle daha iyi eşleştirmelerine imkân verecektir. Bir proje iyi tasarlanmış ve yeterince finanse edilmiş olabilir; kaynakları ve uzmanları oldukça deneyimli olabilir, ancak tüm proje katılımcıların çabaları profesyonelce koordine edilmez ve yönetilmezse, proje bütçeyi aşabilir, programı karşılayamayabilir veya operasyonel ve teknik kalitede yetersiz kalabilir. Proje ne kadar büyük ve karmaşık olursa, proje yönetim işlevi o kadar kritik hale gelir. İnşaat sektöründe proje yöneticisi (müdürü) olmadan bir inşaat projesinin yürütülmesi düşünülemez.

"Proje yöneticisi" veya onun sorumlulukları için üzerinde anlaşmaya varılan tek bir tanım yoktur. Görevlerin kapsamı, idarecilikten milyonlarca bütçeli proje yöneticiliğine kadar uzanır. Buna ek olarak, birçok şirket proje yöneticisi seçim kriterlerini belirsiz bir şekilde tanımlamakta ve genellikle pozisyon için yeterlilikten çok organizasyona uyum sağlamaya odaklanılmaktadır. Proje yöneticileri, genel olarak, projenin genel başarısından sorumlu tutulsalar da resmi bir yetkiye sahip değildirler. Her biri kendi beklentileri ve proje başarı kriterleri olan tüm paydaş grupları arasındaki etkileşimi yönetmekten sorumludurlar. Özetle, proje yöneticisinin pozisyonu, genel olarak tanımlanmış bir beceri seti ve kişilik profili gerektirmektedir.

Farklı Proje Yönetim Organizasyonları farklı proje yöneticisi becerileri tanımlamaktadır.

Proje Yönetim Enstitüsü (PMI) üç farklı yetkinlik boyutu tanımlar: bilgi, kişisel ve performans. Hem performans yetkinlikleri olarak bilgi hem de Proje Yönetimi Bilgi Kitabı Rehberinde (PMBOK Rehberi) açıklanan on proje yönetimi bilgi alanı etrafında düzenlenmiştir. Kişisel yeterlilikler 6 alana bölünmüştür: Kişisel yeterlilikler 6 alana bölünmüştür: başarı ve eylem, yardımlaşma ve insan hizmeti, etki, yönetsel, bilişsel, kişisel etkinlik.

Avrupa merkezli Uluslararası Proje Yönetimi Derneği (IPMA), bilgi, deneyim ve kişisel tutumla ilgili çeşitli nitelik ve yeterlilikleri değerlendirmektedir. IPMA Yetkinlik Temel Dayanağı (ICB), bilgi ve deneyim için 42 temel yetkinliğin yanı sıra kişisel tutum için 8 ve genel izlenim için 10 yönü tanımlamaktadır. Avustralya Proje Yönetimi Enstitüsü (AIPM), sektörle istişare ederek ve Avustralya Ulusal Eğitim Kurumu'nun (ANTA) himayesi altında Proje Yönetimi için Ulusal

Yetkinlik Standartlarını (NCSPM) geliştirdi. AIPM, NCSPM için bilgi tabanı olarak PMBOK Kılavuzunu benimsemiştir ve on bilgi alanı etrafındaki yetkinlikleri tanımlamıştır.

Farklı proje yönetimi kuruluşları, belgelendirmeyi proje yönetimi yeterliliğinin bir ölçüsü olarak kullanır. Belgelendirme, projeleri yönetmede gösterilen yeteneği ölçmek için bir yöntem olarak görülmektedir. Piyasada birkaç proje yönetimi sertifikası bulunmaktadır.

1. PMI'nin iki sertifika düzeyi vardır- Proje Yönetiminde Sertifikalı Ortak (CAPM) ve Proje Yönetimi Uzmanı (PMP). PMP sertifikası, başvuru sahibinin sınava girmeden önce son 6 yılda en az üç yıllık benzersiz proje yönetimi deneyimine ve en az 35 saat proje yönetimi eğitimi olmak üzere toplamda en az 4500 saatlik proje yönetimi deneyimine sahip olmasını gerektirir.

2. IPMA'nın dört seviyeli bir sertifika programı vardır- Proje Yönetimi Uygulayıcısı (PMP), Kayıtlı Proje Yönetimi Uzmanı (PMP), Sertifikalı Proje Yöneticisi (CPM) ve Sertifikalı Program Direktörü (CPD). Sertifikasyon, kanıtlanmış deneyim, öz değerlendirme, resmi sınav, yazılı bir proje raporu ve bağımsız bir üçüncü taraf görüşmesinin bir kombinasyonunu içerir. Sertifikasyon elde etmek için, her aday proje yönetiminde kabul edilmiş bir anlayış, bilgi ve pratik deneyim düzeyi göstermelidir.

3. Avustralya AIPM sertifikası, RegPM, üç düzeyde mevcuttur- proje ekibi üyesi/proje uzmanı (QPP), proje yöneticisi (RPM) ve proje yöneticisi/program yöneticisi (MPD). Adayların, üç seviyeden birinde yetkin olduklarını gösteren bir kanıt kayıt defteri derlemesini gerektiren, yetkinlik bazlı, işyeri değerlendirme programıdır.

Proje yönetimindeki farklı roller, farklı yetkinlikler gerektirecektir. Proje yönetimi ortamı, değişim, sorumluluklar ve dolayısıyla gerekli bilgi ve beceri seviyeleri ile karakterize edildiğinden, sürekli olarak değişime uğramaktadır. Bu nedenle kilit yetkinliklerden biri, her durumda esnek ve uyarlanabilir olmaktır. Belgelendirme, bir proje yöneticisini tek başına nitelendirmese de adayın kavramlar ve metodolojiler hakkındaki bilgisinin bir göstergesidir. Ayrıca adayın mesleğe adanmış olduğunu da göstermektedir.

McNamara (2003)'ün dediği gibi, "Başarılı proje yöneticileri, bir yargıcın tarafsız adaletini, bir diplomatın becerilerini, bir generalin otoritesini ve bir ebeveynin anlayışını gösterme yeteneğine sahiptir".

Bu çalışma, bir literatür incelemesi vasıtasıyla inşaat proje yöneticileri için gerekli yetkinlikleri incelemiştir.

### **Kaynaklar**

1. AIPM Professional competency standards for project management, PART A, "Australian Institute of Project Management", Introduction. June, Sydney, Australia, AIPM (2010a).
2. AIPM Professional competency standards for Project management, PART C, Certified Practicing Project Manager (CPPM), "Australian Institute of Project Management", February, Sydney, Australia, AIPM (2010b).
3. Association for Project Management. APM Competence Framework 2nd Edition, Buckinghamshire, UK, APM (2015).
4. Chipulu, M., Neoh, J.G., Ojiako, U.U. & Williams, T., "A multidimensional analysis of Project manager competences", IEEE Transactions on Engineering Management, 60(3), 2013, pp. 506-517.
5. Bowen, B., The American Construction Industry: Its Historical Evolution and Potential Future. Routledge, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, U.K., 2021

6. Cleland, D. I., “Defining a project management system. Project Management Quarterly”, 1977, 8(4), 37–40.
7. Cleland, D.I. & Herzner, H., “A Project Management Dictionary of Terms”, New York: Van Nostrand Reinhold, 1985, p.199
8. Crawford, L., “The impact of a training programme designed to target the emotional intelligence abilities of Project managers”, International Journal of Project Management, 28(5), 2005, pp.461- 468.
9. Cyert, R.M. & March, J.G., “A Behavioural Theory of the Firm”. Englewood Cliffs, Prentice Hall (republished 1992, Blackwell), 1963.
10. do Vale, J.W.S.P., Nunes, B. & de Carvalho, M.M., “Project Manager’s Competences: What do Job Advertisements and the Academic Literature Say” Project Management Journal, Vol. 49(3), 2018, pp.82 – 97, SAGE.
11. ENR, “Engineering News Record”, <https://www.enr.com/toplists/2017-Top-250-International-Contractors-1>, 2017, (Erişim: 22.06.2022).
12. ENR, “Engineering News Record”, 2021, <https://www.enr.com/toplists/2021-Top-250-International-Contractors-Preview> (Erişim: 23.06.2022)
13. Ergül N, “İnşaat Sektöründe Globalleşmenin Etkileri”, Vergi Sorunları Dergisi, 2007, Sayı: 227.
14. Harmoni, “Harmoni Gayri Menkul Değerleme ve Danışmanlık, İnşaat Sektörü Raporu”, 2020, Erişim: [harmonigd.com.tr/harmoni-2020-inaaat-sektoru-raporu-html](http://harmonigd.com.tr/harmoni-2020-inaaat-sektoru-raporu-html) 01.06.2022 tarihinde erişildi.
15. Higgin, G. & Jessop, N., “Communications in Building Industry”, 2nd Edn. Tavistock Institute, 1965, London, UK.
16. IPMA, “International Project Management Association”, ICB – IPMA individual competence baseline for Project, programme and portfolio management version 4.0. Nijkerk, 2015, the Netherlands.
17. İNTES, “İnşaat Sektörü Raporu”, Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası, 2016, Ankara
18. İNTES, “İnşaat Sektörü Raporu”, Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası, 2017, Ankara
19. İNTES, “İnşaat Sektörü Raporu”, Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası, 2018, Ankara.
20. İşkur, Türkiye İş Kurumu, 2021 Yılı İnşaat Sektörü İşgücü Piyasası Raporu, 2021, <https://media.iskur.gov.tr/51150/inaaat-sektoru.pdf> Erişim: 18.06.2022
21. KPMG, “Sektörel Bakış”, KPMG Bağımsız Denetim ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2017.
22. KPMG, “Sektörel Bakış (İnşaat)”, KPMG Bağımsız Denetim ve Serbest Muhasebeci Mali Müşavirlik A.Ş., 2018.
23. McNamara, J.P., “The “Neutral” Project Manager”, PMI Global Congress North America, September 2003, Baltimore, MD.
24. Medina, R. & Medina, A., “The Project manager and the organization’s long term competence goal”, International Journal of Project Management, 32(8), 2014, pp.1459 - 1470.

25. Müller, R. & Turner, J.R., “Matching the Project manager’s leadership style to Project type”, *International Journal of Project Management*, 2007, 25(1), pp.21-31.
26. Müller, R. & Turner, J.R., “Attitudes and leadership competences for Project success”, *Baltic Journal of Management*, 5(3), 2010a, pp.307-329.
27. Müller, R. & Turner, J.R., “Leadership competency profiles of successful Project managers”, *International Journal of Project Management*, 25, 2010b, pp.437-448.
28. Pinto, J.K. and Rouhiainen, P., “Building Customer-Based Project Management”, John-Wiley & Sons, March 2001, 240 pp., New York.
29. PMBOK, “A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)”, 2000 Edition, Project Management Institute, 2000, Newton Square, Pennsylvania, USA.
30. PMBOK, “Project Management Body of Knowledge”, Upper Darby, PA: Project Management Institute (PMI), 2017.
31. PMBOK Guide, “A Guide to the Project Management Body of Knowledge and The Standard for Project Management”, 7th Edition, ANSI/PMI 99-001-2021, Project Management Institute, 2021, Newton Square, PA, USA.
32. PMI, “A Guide to the Project Management Body of Knowledge”, Project Management Institute, Upper Darby, 2000.
33. PMI, “A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)”, PMI Publications, Project Management Institute, Newton Square, Pennsylvania, 2001, USA, ISBN 978-1-933890.
34. PMI, Project Management Institute, “Project manager competency development (PMCD) framework”, Newton Square, PA, 2007, USA.
35. Prabhakar, G., “What is Project Success: A Literature Review”, *International Journal of Business and Management*, Vol.3, 2009, No.9.
36. Stuckenbruck, L.C., “Who determines Project success?”, *PMI Annual Seminar and Symposium*, Montreal, 1986, 85-93.
37. Takey, S.M. & Carvalho, M.M., “Competency mapping in Project management: An action research study in an engineering company”, *International Journal of Project Management*, 33(4), 2015, pp.784 - 796.
38. Turner, J.R. & Keegan, A.E., “Mechanisms of Governance in the project-based organisations: Role of the broker and steward”, *European Management Journal*, Vol.19, No.3, 2001, pp. 1-8.
39. Turner, J.R. & Müller, R., “On the Nature of the Project as a Temporary Organization”, *International Journal of Project Management*, Vol. 21, 2003, pp.1-8.
40. Turner, R.I., “The Handbook of Project-Based Management: Leading strategic change in Management”, 3rd Edition, McGrawHill, 2009, ISBN: 978-0-07-154975-2)
41. Turner, R.J., “The Handbook of Project Management: Leading Strategic Change in Management”, 3rd Edition, 2009, McGraw-Hill, US.
42. Udo, N. & Koppensteiner, S., “What are the core competencies of a successful Project manager?”, Paper presented at PMI Global Congress – EMEA, Prague, Czech Republic, PMI-Newton Square, PA – USA, 2004.



# Dünyanın ve Türkiye'nin Yenilenebilir Elektrik Üretim Planı

Çetin Önder İNCEKARA<sup>1</sup>

## ÖZET

Yenilenebilir kaynakları; -güneş, rüzgâr, hidro, biyoyakıtlar ve diğerleri- daha az karbon salınımı yaptıkları için daha sürdürülebilir bir enerji sistemine geçişin merkezinde yer almaktadır. Küresel Covid-19 pandemisi; ekonomik faaliyetlerdeki yavaşlama küresel elektrik üretimini etkilemiştir. Covid-19 pandemisi döneminde; fosil yakıt kullanarak enerji üretiminde önemli bir düşüş meydana gelirken, yenilenebilir enerji kullanımı -Covid döneminde- küresel boyutta yeni bir ivme kazanmıştır. 2020 yılında küresel yenilenebilir elektrik üretimi; öncelikle yeni güneş ve rüzgâr enerji santrali yatırımları sayesinde yaklaşık %7 artmıştır. 2020'nin ilk yarısında 13 ülke tarafından küresel enerji üretimine yaklaşık 50 GW'lık yeni yenilenebilir kapasite ilavesi yapılmıştır. Çin'in 25 GW ulusal güneş PV ihalesi ise Haziran 2020'de sonuçlanmıştır. Pandemi döneminde Avrupa'da Almanya, Fransa, İtalya ve Portekiz; güneş PV ve rüzgâr enerji santralleri ihalelerini yaparak yeni enerji santral yatırım programlarını tamamlamışlardır. Küresel Covid-19 pandemisinden dolayı 2022 yılında Türkiye'de elektrik üretim kapasitesine yönelik büyüme planlarında rüzgâr ve güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir kaynaklı enerji santrallerinin kullanılması, başrolde olması hedeflenmektedir. 2050 yılına kadar Küresel Net Sıfır Emisyon hedefine ulaşmak için küresel yenilenebilir enerji kullanımı hedefi doğrultusunda hala önemli ölçüde yenilenebilir enerji yatırımı yapılması gerekmektedir. Söz konusu hedefe ulaşabilmek için; 2040 yılında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji payının küresel elektrik üretiminin %80'inden fazla olması hedeflenmeli ve gerekli adımlar atılmalı, enerji yatırımları bu duruma göre yapılmalıdır. Bu çalışmada; ülkemizin BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve Kyoto Protokolü sorumlulukları çerçevesinde bir elektrik üretim artış planlaması yapmayı amaçlayan yeni bir matematiksel model kullanılmış ve ülkemizin 2022-2040 yılları arasındaki elektrik üretim planı elde edilmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) enerji hedefleri ve özel sektörün enerji hedefleri dikkate alınarak, çok kriterli bulanık optimizasyon modeli; yeni bir bulanık çok amaçlı programlama (MOP) yöntemi kullanılmıştır. Çok amaçlı modelin amaçları; enerji üretiminin enerji maliyetinin minimizasyonu, sera gazı emisyonlarının minimizasyonu, ithal edilen enerjinin minimizasyonu, santrallerin verimliliğinin maksimize edilmesi ve yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılması, santrallerde fosil yakıt kullanımının minimizasyonudur. Çalışmada kamu ve özel sektörde çalışan enerji yöneticileri ve mühendisleri (KV: DM) ile ülkemizin enerji projeleri hakkında anketler/görüşmeler yapılmıştır. Yapılan anketler/görüşmeler sonucunda; ülkemizin elektrik üretim santralleri yatırım planlaması

---

<sup>1</sup> BOTAŞ, Ankara - cetinincekara@gmail.com

seçiminde kullanılmak üzere 6 ana kriter ve 19 alt kriter belirlenmiştir. Çalışmada elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları, yenilenebilir enerji kaynaklarının ağırlıkları ve amaç fonksiyonları bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. MOP matematiksel modeli ile Türkiye'nin yenilenebilir ağırlıklı 2022-2040 yılları arasındaki 18 yıllık elektrik üretim planı elde edilmiştir. 2040 yılında Türkiye'nin elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı; %25,5'i güneş, %20,7 rüzgar, %17,4 hidro, %11,5 jeotermal, %9,9 biyokütle olmak üzere yüksek talep senaryosu altında %85 oranına ulaşmıştır. IEA 2040 yılında dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı %37 olacağı öngörülmesine rağmen çalışma sonucu dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım %44 oranına ulaşmıştır. 2040 yılına kadar elektrik üretimimizde %80'inden fazlasının yenilenebilir kaynakların kullanılmasıyla ülkemiz 2050'e kadar Küresel Net Sıfır Emisyon hedefine ulaşabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** COVID-19, Enerji, Küresel Net Sıfır Emisyon Planı, Elektrik Üretim Planı, Yenilenebilir Enerji, Bulanık AHP, Bulanık TOPSIS, Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi, Dünya, Türkiye.

## ABSTRACT

### **World's and Turkey's Renewable Power Generation Plan**

Renewables, including hydro, solar, wind, hydro, biofuels and others, are at the center of the transition to a less carbon-intensive and more sustainable energy system. Global Covid-19 slowdown in economic activities and therefore it affects the global power generations. Covid-19 brought a significant decline in energy generation using fossil fuel, while renewable power gained new global momentum during Covid-period. In 2020 global renewable electricity generation rose approximately 7%, primarily driven by new solar and wind energy projects/investments that came online. 13 countries awarded new renewable capacity addition of approximately 50GW in the first half of 2020. China's national solar PV auction awarded 25 GW in June 2020. In Covid period in Europe; Germany, France, Italy and Portugal each completed new energy investments via wind and solar PV auctions. Due to the global Covid-19 pandemic, in Turkey it is aimed that renewable-based energy sources, especially wind and solar, will play a leading role in energy generation capacity growth plan in 2022. Global renewable power deployment still needs to expand significantly to meet the Global Net Zero Emissions by 2050 Scenario, i.e. renewable share in global energy mix should aim more than 80% of generation by 2040. In this study Turkey's power generation plan between 2022 and 2040 is obtained by using a new mathematical model that aims to make a generation expansion planning to have an acceptable level of a pollutant in the air considering the UN Framework Convention on Climate Change and Kyoto Protocol's responsibilities of Turkey. The used method is multi-criteria fuzzy optimization model, i.e. a new fuzzy multi-objective programming (MOP) method, by considering the energy objectives of Turkey's Ministry of Energy (MoE: MENR) and private sector's energy targets. The multi-objective model aims; energy cost minimization of energy production, minimization of greenhouse gases emissions, minimization of the imported energy, maximization of efficiency of power plants and usage of renewable resources, minimizing the use of fossil fuels in power plants. In the study surveys/interviews were conducted with the energy managers & engineers (DM) working in public and private sectors about Turkey's energy projects. As a result of surveys/interviews; 6 main criteria and 19 sub-criteria have been determined for the selection of Turkey's energy projects/resources used in power plants. In the study the weights of the renewable energy resources used in power generation and objective functions are determined by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods are used. By solving MOP mathematical model, Turkey's 18-years power generation plan between the years 2022 and 2040 based on mainly renewable resources is obtained, and by 2040 the percentage of renewable energy resources in Turkey's power generation is increased by 85% which includes 25.5% solar energy, 20.7% wind energy, 17.4%

hydro energy, 11.5% geothermal, 9.9% biomass under high-demand scenario. Although IEA predicts that the usage of the world's renewable energy resources will be 37% in 2040, as a result of the study the usage of the world's renewable energy resources has reached 44%. Turkey will reach the Global Net Zero Emissions by 2050 Scenario share of more than 80% of its power generation by 2040.

**Keywords:** COVID-19, Energy, Global Net Zero Emissions Plan, Generation Expansion Plan, Renewable Energy, fuzzy AHP, fuzzy TOPSIS, Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Method, World, Turkey.

## 1. GİRİŞ

Enerji hayatın her alanında çok sık karşımıza çıkmaktadır. Sahip olduğu önemden dolayı, enerji üzerindeki mücadeleler artırmaktadır, bu yüzden enerji; dünya politikasının merkezine yerleştirmiştir. Enerjiyle ilgili pek çok tanım yapılmıştır. Enerji, bir şeyi yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir (Energy, 2006). Sürdürülebilir kalkınmanın; ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları vardır.

Net sıfır emisyon, insan faaliyeti nedeniyle atmosfere salınan karbondioksit, metan, azot gibi gazların miktarının yeryüzü tarafından doğal olarak emilen sera gazı miktarıyla dengelenmesi ve karbon nötr olmasıdır. Net sıfır emisyon hedefi açıklayan ülke sayısı giderek artmasına rağmen, Birleşmiş Milletler verilerine göre küresel emisyonların 2030'a kadar 2010 seviyesine göre yüzde 16 artacağı hesaplanmıştır. Bu yüzden küresel çapta bir eylem planı ile küresel emisyonlar hızla ve acilen düşürülmelidir. Net sıfır emisyon hedefinde, küresel karbon gideriminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda ülkemiz ve ETKB tarafından önemli adımlar atılması gerekmektedir. Söz konusu hedeflere ulaşmak için ilgili adımların tanımlanması gereklidir, dünyanın ve ülkemizin net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda söz konusu çalışma yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan çok-kriterli-karar-verme yöntemi ile literatürde pek çok çalışma (Abilock 1980, Borges 2003, Chang 1996, Chen et al. 1992, Chen 2001, Deng 1999, Kablan 2004, Ghodsypour 1998, Leung 2000, Shukla 2014, Satrovic 2019, İncekara 2018, İncekara 2019, İncekara 2020, İncekara 2021) yapılmıştır.

### 1.1. Türkiye'nin Enerji Potansiyeli/Durumu

ETKB' dan alınan verilere göre ülkemizin enerji kaynak potansiyeli Tablo 1' de özetlenmiştir.

**Tablo 1 - Ülkemizin enerji kaynak potansiyeli (ETKB, 2019).**

Enerji Kaynakları	Elektrik Üretim Potansiyeli (GWh/year)
Taşkömürü	11.000
Linyit	118.000
Asfaltit ve Bitümlü Şist	16.000
Hidrolik	140.000
Rüzgar	144.000
Jeotermal	15.200
Biyokütle	93.000
Güneş	380.000

ETKB' dan alınan verilere göre ülkemizin elektrik üretim miktarı Tablo 2' de özetlenmiştir.

**Tablo 2 - Ülkemizin elektrik üretim miktarı (ETKB, 2022).**

Yıl	Elektrik Üretim Miktarı (GWh)
2014	251.963
2015	261.783
2016	273.387
2017	294.912
2018	300.109
2019	303.674
2020	290.811
2021	327.729

### 1.1.1. Ülkemizin Enerji Talebi

Türkiye'de 2021'de 327,7 milyar kilovatsaate çıkmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın enerji talep artışı tahminlerine göre 2023 yılına kadar yüksek talep senaryosunda % 7,5, düşük talep senaryosunda % 6,5 artacağı; 2023-2030 yılları arasında ise yüksek talep senaryosunda % 3,6, düşük talep senaryosunda % 2,5 artacağı öngörülmüştür. Bu kapsamda 2040 yılın yüksek talep senaryosunda tüketimimiz 795 Milyar kWh, düşük talep senaryosunda kurulu gücümüz 735 Milyar kWh a ulaşması beklenmektedir.

### 1.2. Dünyanın Enerji Talebi

Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) 2020 yılında Dünya Enerji Görünümü Raporu'na göre, 2040 yılında küresel elektrik talebi, her yıl yüzde 2 büyüyerek, 39 milyar 47 milyon megavat-saat ulaşacak. IEA göre üretimde fosil yakıtların payı yüzde 52'ye gerilerken, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı yaklaşık yüzde 37'ye ulaşacağı öngörülmektedir. IEA 2040 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından 14 milyar 271 milyon megavatsaat elektrik üretileceği öngörmektedir. Yenilenebilir kaynaklardan en çok üretim 6 milyar 230 milyon megavatsaatle hidroelektrik santrallerinden sağlanacağını öngörmektedir. Bunu 3 milyar 881 milyon megavatsaatle rüzgar enerjisi ve 2 milyar 391 milyon megavatsaatle güneş enerjisi izleyeceğini öngörmektedir. IEA göre 2040 yılında dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı şu şekildedir: %15,96 hidro, %9,94 rüzgar, %6,12 güneş olacağı öngörmektedir.

### 1.3. Net Sıfır Emisyon

Mevcut insan kaynaklı sera gazı emisyonları, atmosferdeki sera gazlarının giderilmesi (karbon giderimi olarak da bilinen bir işlem) ile dengelendiğinde net sıfır emisyon hedefini yakalayabileceğiz. Her şeyden önce, fosil yakıtlı araçlar ve fabrikaların sebep olduğu insan kaynaklı emisyonlar mümkün olduğu kadar sıfıra indirgenmelidir. Mevcut sera gazları, örneğin ormanları onararak veya doğrudan hava yakalama ve depolama teknolojisi ile eşdeğer miktarda karbon giderimi ile dengelenebilir. Net sıfır emisyon kavramı "iklim nötrlük (climate neutrality)" ile benzerlik göstermektedir.

Net sıfır emisyon, insan faaliyeti nedeniyle atmosfere salınan karbondioksit, metan, azot gibi gazların miktarının yeryüzü tarafından doğal olarak emilen sera gazı miktarıyla dengelenmesi ve

karbon nötr olmasıdır. Net sıfır emisyon kavramı ilk olarak 2015'te imzalanan Paris Anlaşması'nda (BM tarafından düzenlenen) kullanılmaya başlanmıştır, İsveç 2017'de, 2045'te karbon nötr olma taahhüdünde bulunan ilk ülke olmuştur. Paris Anlaşması kapsamında küresel sıcaklık artışını 1,5 dereceyle sınırlandırmak için verilen taahhütler kapsamında net sıfır emisyonla ulaşmayı hedefleyen ülke sayısı giderek artış göstermiştir.

Yaklaşık 200 ülkeden 25 bin delegenin katılımının beklendiği ve 31 Ekim-12 Kasım 2021'de İskoçya'nın Glasgow kentinde yapılan BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) 26. Taraflar Konferansı (COP26) öncesi ise net sıfır emisyon taahhüdünde bulunan ve bu hedefi açıklayan 135 ülke vardır.

Climate Watch verilerine göre, BMİDÇS'nin imzacısı 197 ülkeden, Avrupa Birliği, Kanada ve Birleşik Krallık'ın içinde bulunduğu 12 taraf net sıfır emisyon taahhütlerini kanunlaştırırken, ABD, Brezilya ve Avustralya'nın aralarında bulunduğu 32 taraf ülke ise net sıfır hedefini enerji politikası haline getirmiştir. COP26' da aralarında Türkiye, Arjantin, Çin, Rusya, Suudi Arabistan'ın bulunduğu 16 imzacı ülkenin ise net sıfır emisyon hedefi siyasi taahhüt olarak açıklanmıştır.

Paris Anlaşması kapsamında, ülkeler ısınmayı 2°C'nin altında ve ideal olarak da 1,5°C ile sınırlamayı kabul etmiştir. Dünya geneline yayılmış olan iklim etkileri, sadece 1,1°C'lik ısınmayla bile buzulların erimesi, yıkıcı ısı dalgalarının ve sert fırtınaların gerçekleşmesi ile birlikte, sıcaklık artışının en az 1,5°C düşürülmesi acilen gerekmektedir. Son araştırma, Paris Anlaşması sıcaklık hedeflerine ulaşmak için dünyanın net sıfır emisyonla aşağıdaki zaman dilimlerinde ulaşması gerektiğini göstermektedir.

- Isınmayı 1,5°C'ye kadar sınırlayan senaryoda; karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ortalama olarak 2050 (hedefi az aşan veya hiç aşmayan senaryolarda) ile 2052 (sıcaklık artışının düşürülmeden önce 1,5°C'nin üzerine çıktığı, hedefin çok aşıldığı senaryolarda) yılları arasında net sıfıra ulaşır. Toplam sera gazı emisyonları ise 2063 ile 2068 arasında net sıfıra ulaşmaktadır.

- Isınmanın 2°C'ye vardığı senaryolarda ise; CO<sub>2</sub> ortalama olarak 2070 (2°C'ye kadar olan ısınmanın sınırlandırılma olasılığının %66'dan fazla olduğu senaryolarda) ile 2085 (%50-66 arası olasılık) yılları arasında net sıfıra ulaşır. Toplam sera gazı emisyonları ise yüzyılın sonuna doğru net sıfıra ulaşmaktadır.

Paris Anlaşması'nın kabul edilmesinden sonra tarafların Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneline (IPCC) verdikleri görev sonucunda 2018 yılında IPCC'nin 1,5 Derece Özel Raporu yayımlanmıştır. Rapora göre sıcaklık artışını 1,5 derecede sınırlamak hayati önem taşır ve bu hedefi gerçekleştirebilmek için küresel emisyonları 2030'da 2010 seviyesinin %45 altına indirmek ve 2050'de sıfırlamak gerekmektedir. IPCC'nin 1,5°C Küresel Isınma Özel Raporu, dünyanın net sıfır emisyonla 10 yıl erken, yani 2040'a kadar ulaşması durumunda, ısınmayı 1,5°C'ye kadar sınırlandırma şansının oldukça yüksek olduğunu tespit edilmiştir.

Dünya çağında enerji ve emisyon politikalarının, teknoloji ve davranış biçiminin bir değişim geçirmesi gerekmektedir. Örneğin, 1,5°C için yapılan projeksiyonlarda 2050 yılına kadar elektriğin %75-80'inin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması beklenmektedir. Enerji verimliliği ve yakıt değiştirmeye yönelik önlemler ulaştırma sektörü için de kritik öneme sahiptir. Gıda üretiminde verimliliği artırmak, yemek yeme alışkanlarını değiştirmek, ormanların tahrip edilmesini durdurmak, vasfını yitirmiş arazileri onarmak ve gıda kaybını ve israfını azaltmak da emisyonları azaltmada önemli bir potansiyele sahiptir. Isınmayı 1,5°C ile sınırlandırmak için gerekli olan yapısal ve ekonomik geçişin, özellikle yüksek karbonlu sanayiler için ele alınması gerekmektedir.

Bunlara ek olarak, karbon giderimine yatırım yapılması gerekmektedir. BMİDÇS tarafından 1,5°C hedefini başarmak için değerlendirilen farklı yollar, farklı seviyelerde karbon giderimine dayanmaktadır. CO<sub>2</sub>'nin atmosferden kaldırılması, havacılık gibi sıfır emisyonla ulaşmanın daha

zor olduğu sektörlerden kaynaklanan emisyonları telafi etmek için gerekli olacaktır. Karbon giderimi, kara kökenli yaklaşımlar (ormanların onarılması ve toprağın karbon alımının artırılması gibi) ve teknolojik yaklaşımlarla (doğrudan hava yakalama ve depolama veya madenleştirme gibi) gerçekleştirilebilecektir. Küresel karbon gideriminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çok önemli bir rol oynamaktadır.

Net Sıfır Senaryosu'nda; 2050'de Net Sıfır Emisyon hedefi doğrultusunda emisyonları azaltmak için gerekli enerji politikalarının, -yenilenebilir enerji politikalarının-, izlenmesi durumunda, , ülkemiz söz konusu hedeflere ulaşacaktır. Elektrik sektöründe yenilenebilir enerjinin payını artırılmalı ve fosil yakıtların payı azaltılmalıdır. İstanbul Politikalar Merkezi (İPM)'e göre (İPM, 2021); Net Sıfır Senaryosuna erişmek için yenilenebilir enerji potansiyeli özellikle rüzgâr ve güneş için en üst düzeyde ve mümkün olduğu kadar hızlı kullanılmalıdır. Kömür; elektrik üretiminden 2035'te büyük ölçüde çıkartılmalı, doğal gaz ise 2050'de çok düşük kapasiteye indirilmelidir, böylece elektrik sektörü 2050'ye kadar büyük ölçüde karbonsuzlaşacaktır. Net Sıfır Senaryosu'nda yenilenebilir kaynak kullanımı büyük bir hızla artmaktadır. Baz Senaryo'da 2018'de 7,5 GW olan ve 2040'lara kadar hızla artan rüzgâr kurulu gücünün daha sonra 2070'e kadar Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak verilen 48 GW'de sabit kalmaktadır. Rüzgâr kurulu gücü Net Sıfır Senaryosu'nda artmaya devam etmekte ve 2050'de 62 GW'yi geçerek, elektrik üretimi 2018'de 20 TWh'den 2030'da 90 TWh'ye, 2050'de 146 TWh'ye çıkmaktadır.

## **2. MATERYAL VE METOT**

Çalışmada ülkemizin 2023 enerji hedefleri ile enerji verimliliğini dikkate alan, kesintisiz, çevreci, ülkemizin enerji üretim maliyetinin düşürülmesini hedefleyen 2040 yılına kadar (uzun dönemli), çok kriterli bir enerji optimizasyon probleminin çözümü için bir matematiksel model (MOP) geliştirilmiştir. MOP matematiksel modeli ile Türkiye'nin yenilenebilir ağırlıklı 2022-2040 yılları arasındaki 18 yıllık yenilenebilir ağırlıklı elektrik üretim planı elde edilmiştir.

## **3. HESAP YÖNTEMİ**

Günümüz dünyası karmaşık olup karmaşıklıktan dolayı belirsizlik bulunmaktadır. Çağımızda karar vermemiz gereken pek çok olayda tam bir karara varamadığımızdan kesin kararımızı söyleyemediğimizden dolayı günlük hayatımızda her zaman bir belirsizlik vardır. Bu yüzden günümüzde karar verme sürecine çok sık bulanık mantık teorisi kullanılmaktadır. Bulanık mantık; karar vermemizdeki belirsizlik, karmaşıklık ve kesin karar verilemeyişi dilsel ifadeler sayesinde tutarlı, doğru kararlar vermeyi sağlayan bir mekanizmadır.

### **3.1. BMT-Bulanık Mantık Teorisi**

BMT 1965 yılında ilk Zadeh'in çalışması ile literatüre girmiştir. Zadeh (1965) bulanık kümeler teorisi ile teorinin temel kavramları, klasik kümelerdeki bazı özellikleri bulanık kümelerde uygulayacak (her elemanına 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecesi atayan bir üyelik fonksiyonuyla/sistemiyle tanımlanan küme) şekilde tanımlayan bir çalışma yapmıştır (İncekara, 2019). BMT; günümüzde günlük hayatımızda karşılaştığımız problemlerin yaklaşık olarak modellenmesini ve matematiksel olarak karmaşık olmayan çözümler ile problemin çözülmesini hedeflenmiştir. BMT; Karar Vericiler (KV) vasıtasıyla problemin değerlendirilmesini dilsel değişkenler ile çözüm sürecine dâhil edilerek, çok-kriterli-karar-verme (ÇKKV) problemlerinde çok sık karşılaşılan belirsizlikleri modelleyerek/çözümleyerek problemin çözümünü sağlamaktadır (İncekara, 2018).

### 3.1.1. BAHP-Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Yöntemi

BAHP; Karar Vericiler dilsel değişkenler vasıtasıyla karşılaşılan ÇKKV probleminin belirsizliklerini değerlendirerek/giderilerek, problemin çözümü için katkı sağlayan bir yöntem olan AHP'nin avantajlarını (Saaty, 2008) içeren bir yöntemdir.

Zadeh ile kullanılmayan başlayan BMT yöntemi; günümüzde çok sık kullanılmaktadır. BAHP yöntemi ile literatürde (Klir, 1995; Buckley, 1985, Chen vd, 1992; Chan vd, 2007; Wang, 2015; Chen, 2001; Kumar, vd, 2016; Satrovic, 2018; Shukla, 2014; Incekara, 2019; Incekara, 2020; Incekara, 2018; Incekara, 2021) pek çok çalışma yapılmıştır. Tablo 3 ile çalışmada, problemin çözümünde kullanılan dilsel ifadeler için kullanılan üçgen bulanık sayılar ve ilgili ters bulanık sayıları sunulmuştur.

**Tablo 3 - BAHP yöntemi: Dilsel ifadeler, Bulanık Sayılar ve Ters Bulanık Sayılar**

Çalışmada Kullanılan Dilsel ifadeler	BAHP Kullanılan Bulanık Sayılar	BAHP Kullanılan Ters Bulanık Sayılar
EÖ:Eşit Önem	[1,1,3]	[1/3,1,1]
BDÖ:Biraz Daha Önemli	[1,3,5]	[1/5,1/3,1]
OÖ:Oldukça Önemli	[3,5,7]	[1/7,1/5,1/3]
ÇÖ:Çok Önemli	[5,7,9]	[1/9,1/7,1/5]
SDÖ:Son Derece Önemli	[7,9,9]	[1/9,1/9,1/7]

Günümüzde karar problemleri pek çok belirsizlikleri içermektedir; belirsizlik durumu altında BAHP yöntemi, AHP yöntemine göre sonuçları daha güvenilirdir. BAHP ile bireysel kararlar ile grup kararları vermek için çok uygun bir yöntemdir. 1996 yılında Chang üçgen bulanık sayılarla karşılaştırmaların yapay mertebeye değerleri hesaplamasına dayanan BAHP modelini ortaya koymuş olup günümüzde literatürde en çok tercih edilen/kullanılan Bulanık yöntemlerden biridir.

Çalışmada kullanılan Bulanık AHP yöntemi adımları aşağıda özetlenmiştir (İncekara 2020).

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_p\}$  nesne seti ve  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$  amaç seti; her amaç için "r ölçüde" analiz yapılmıştır.

$$X_{hi}^1, X_{hi}^2, \dots, X_{hi}^r \quad (i=1,2,\dots,p; j=1,2,\dots,r) \quad (1)$$

Burada, tüm  $X_{hi}^j$  ( $i=1,2,\dots,r$ ) bulanık sayılar olup  $i$ . için ilgili bulanık sentetik mertebesi formül (2) ile gösterilmiştir.

$$S_i = \sum_{j=1}^r X_{hi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^r X_{hi}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

$X_1 \geq X$ 'nin olabilirlik derecesi formül (3) ile gösterilmiştir.

$$B(X_1 \geq X_2) = \sup_{k \geq t} [\min(\mu_{X_1}(k), \mu_{X_2}(t))] \quad (3)$$

$h \geq t$  ve  $\mu_{X_1}(k) = \mu_{X_2}(t)$  durumunu sağlayan  $(k, t)$  gibi bir çift varsa;  $B(X_1 \geq X_2) = 1$ 'dir.  $X_1$  ve  $X_2$ ; konveks bulanık sayılardır;

$$X_1 \geq X_2 ; B(X_1 \geq X_2) = \mu_{X_1}(e) \quad (4)$$

Burada e,  $\mu_{X1}$  ve  $\mu_{X2}$  arasında en yüksek kesişim noktası E'nin ordinatıdır.

$X_1 = (a_1, b_1, c_1)$  ve  $X_2 = (a_2, b_2, c_2)$  olduğunda; E'nin ordinatı Denklem (5) ile hesaplanır.

$$B(X_2 \geq X_1) = \frac{a_1 - c_2}{(b_2 - c_2) - (b_1 - a_1)} \quad (5)$$

$X_1$  ve  $X_2$ 'nin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için  $B(X_1 \geq X_2)$  ve  $B(X_2 \geq X_1)$  değerlerine ihtiyaç vardır.

$$\begin{aligned} B(X \geq X_1, X_2, \dots, X_f) &= B[(X \geq X_1)] \text{ ve } [(X \geq X_2)] \\ &\text{ve...ve } [(X \geq X_f)] \\ &= \min B(X \geq X_i), \quad (i=1,2,3,\dots,f) \end{aligned} \quad (6)$$

$d'(A_i) = \min B(S_i \geq S_f)$  ve  $k = 1,2,3,\dots,v; f \neq i$  ağırlık vektörü Denklem (7) ile gösterilmiştir.

$$W' = (d'(Z_1), d'(Z_2), \dots, d'(Z_f))^T \quad (7)$$

“W” bulanık olmayan bir sayı olup; normalize ağırlık vektörü Denklem (8) ile gösterilmiştir:

$$W = (d(Z_1), d(Z_2), \dots, d(Z_i))^T \quad (i= 1,2,\dots,f) \quad (8)$$

### 3.1.2. BTOPSIS-Bulanık TOPSIS Yöntemi

1981 yılında Hwang ve Yoon geliştirmiş olduğu TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) yönteminin temelinde; karar noktalarının pozitif ve negatif ideal çözüme ne kadar yakın/uzak olduğunun belirlenmesi ve karar noktalarının kendi içinde sıralama yapılmasını içermektedir (Chen, 2000). Pİ-pozitif ideal çözümde karar noktalarının problemin çözümünde yaklaşması istenen hedefleri, Nİ-negatif ideal çözüm ise problemin çözümünde uzaklaşılması gereken hedefleri belirtmektedir. TOPSIS yönteminde Pİ-pozitif ideal çözüm “1”, Nİ-negatif ideal çözüm ise “0” değeri ile gösterilir. Problemin çözümünde; karar noktaları “1” ile “0” değerleri arasında değerler alır(Incekara, 2019). TOPSIS yönteminde; ideal çözüm/hedef faydayı maksimize eden maliyeti minimum yapan çözüm olup problemin çözümünde alternatiflerin Pİ-pozitif ideal çözüm ile Nİ-negatif ideal çözüm değerlerine yakınlık katsayısı (H) hesaplanarak, alternatiflerin H'a yakınlığına göre sıralanır.

**Tablo 4 - BTOPSIS yöntemi: Dilsel ifadeler, Bulanık Sayılar ve Ters Bulanık Sayılar (Chen, 2000)**

Çalışmada Kullanılan Sözel Değişkenler	Çalışmada Kullanılan Üçgen Bulanık Sayılar
ÇK:Çok Kötü	[0,0,1]
K:Kötü	[0,1,3]
BK:Biraz Kötü	[1,3,5]
O:Orta	[3,5,7]
Bİ:Biraz İyi	[5,7,9]
İ:İyi	[7,9,10]
Çİ:Çok İyi	[9,10,10]



BTOPSIS yöntemi literatürde ilk kez Chen (2000) tarafından kullanılmıştır. BTOPSIS yönteminde Karar Vericiler (KVler), problemin karar kriterleri ile problemin çözüm alternatifleri ile ilgili değerlendirmeleri Tablo 6.'da yer alan dilsel ifadeler kullanarak yapmıştır. Bulanık TOPSIS yönteminde KVler kriterleri ve alternatifleri değerlendirmeleri bulanık sayılara dönüştürülerek alternatiflerin H değerleri (yakınlık katsayısı) hesaplanır, bu sayede problemin alternatifleri sıralanır ve problemin çözümü ortaya çıkar. Chen tarafından önerilen ve çalışmada problemin alternatiflerinin KV'ler tarafından değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ile buna karşılık gelen bulanık sayılar Tablo 4'de gösterilmiştir.

Çalışmada kullanılan Bulanık TOPSIS yöntemi adımları aşağıda özetlenmiştir (İncekara 2020).

$w_j^K$  için j nci karar kriterlerinin önem ağırlığı formül (9) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{w}_{ij} = \frac{1}{K} [ \tilde{w}_{ij}^1 \oplus \tilde{w}_{ij}^2 \oplus \tilde{w}_{ij}^K ] \quad (9)$$

$X_{ij}^K$  nin i nci önem ağırlığı formül (10) ile gösterilmiştir:

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{1}{K} [ \tilde{X}_{ij}^1 \oplus \tilde{X}_{ij}^2 \oplus \tilde{X}_{ij}^K ] \quad (10)$$

Çok kriterli bir karar verme problemi formül (11) ile gösterilmiştir:

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}, \quad \tilde{W} = [ \tilde{w}_1, \tilde{w}_2 \dots \tilde{w}_n ] \quad (11)$$

Burada  $\tilde{x}_{ij}$  ve  $\tilde{w}_j$  dilsel değişkenlerdir.  $A_1, A_2, A_3 \dots A_m$ , alternatifler,  $C_1, C_2, C_3 \dots C_n$  karar kriterleri gösterir. Burada  $\tilde{W}$  bulanık matrisi ifade etmektedir, bulanık sayılar ise  $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$  ve  $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$  dir. Bulanık karar matrisi oluşturulur, sonrasında formül (12) ile gösteren normalize edilmiş karar matrisi (bulanık) elde edilir:

$$\tilde{N} = [ \tilde{n}_{ij} ]_{p \times r} \quad i=1,2, \dots, p \quad j=1,2, \dots, r \quad (12)$$

Normalize edilmiş karar matrisi (bulanık) hesaplanması; formül (13 ve 14) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{n}_{ij} = \left( \frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right), \quad c_j^+ = \max c_{ij} \quad (13)$$

$$\tilde{n}_{ij} = \left( \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), \quad a_j^- = \min a_{ij} \quad (14)$$

Formülden de görüleceği gibi normalize edilmiş karar matrisinde (bulanık); bulanık sayı değerleri  $[0,1]$  aralığındadır. Kriterlerin önem ağırlığı ile  $\tilde{V} = [ \tilde{v}_{ij} ]_{m \times n}$  şeklinde gösterilen (weighted) ağırlıklandırılarak normalize edilmiş karar matrisi hesaplanır (formül (8) ile).

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{n}_{ij} \cdot \tilde{w}_j \quad (15)$$

$\tilde{V}$  matrisi hesabı; formül (16) ile gösterilmiştir.

$$\tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 \tilde{n}_{11} & \cdots & \tilde{w}_r \tilde{n}_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{w}_1 \tilde{n}_{p1} & \cdots & \tilde{w}_r \tilde{n}_{pr} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\tilde{V}$  matrisinin hesabından sonra pozitif ideal çözüm (bulanık)  $A^+$  ile negatif ideal çözüm (bulanık)  $A^-$  hesaplanır:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_r^+\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_r^-\},$$

$$\tilde{v}_j^* = \max_i \{v_{ij3}\} \text{ ve } \tilde{v}_j^- = \min_i \{v_{ij1}\} \quad (17)$$

$$i=1,2,3,\dots,p \text{ ve } j=1,2,3 \dots r$$

ile hesaplanır. Formül (17) ile hesaplanan  $A^+$  ve  $A^-$  dan sonra d uzaklıkların formül (18 ve 19) ile hesabı yapılır.

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+); i=1,2, \dots,p \quad (18)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-); i=1,2, \dots,p \quad (19)$$

Vertex metodu kullanılarak ideal çözüme yakınlıkları hesaplanır. İki üçgen bulanık sayı olan  $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$  ve  $\tilde{B}=(b_1,b_2,b_3)$  arasındaki uzaklık(d) hesaplanması; formül (20) ile gösterilmiştir.

$$d_v(\tilde{a}, \tilde{b}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]} \quad (20)$$

Alternatifler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için yakınlık katsayıları(CC) hesaplanması; formül (21) ile gösterilmiştir (Chen et al. 2006).

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (21)$$

Alternatifler için yakınlık katsayısı  $CC_i$  değerlerine göre sıralanarak karar verilir.

#### 4. UYGULAMA VE BULGULAR

Çalışmada problemin çözümünde; BAHP ve BTOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Enerji sektöründe çalışan enerji uzmanları Karar Vericiler (KV'ler) ile bir anket çalışması yapılarak, sonrasında KV'ler ile görüşme/değerlendirme yapılmıştır. Böylece enerji sektörünün enerji konusunda beklentileri değerlendirilmiştir. Problemin çözümünde/karar vermede etkili olan kriterlerin önem ağırlıkları BAHP ile belirlenmiştir. Problemin çözümünde alternatiflerin sıralanması BTOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada belirlenen kriterler/alt kriterler için enerji sektöründe çalışan enerji uzmanı, müdür ve yönetici görevinde 23 kişi ile görüşülmüş olup KV'ler ile yapılan görüşmeler sonrasında problemin kriterleri ile alt kriterleri (6 ana kriter ile 19 alt kriter) belirlenmiştir. Sonrasında enerji sektöründe çalışan enerji uzmanı 39 kişiye bir anket çalışması düzenlenmiştir. Çalışmada faktörlerin/kriterlerin ağırlıkları BAHP yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup sıralaması ise BTOPSIS yöntemi ile belirlenmiştir.

BAHP ve BTOPSIS yöntemleri kullanılarak KV'ler vasıtasıyla anketler hazırlanmış, KV'ler ile görüşülerek konu değerlendirilmiş, enerji sektöründe çalışan enerji uzmanları 2040 yılında dünyanın ve Türkiye'nin elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı hesaplanmıştır. Değerlendirme KV'ler ile bir anket çalışmasıyla gerçekleştirilmiştir, anket çalışmasında kamuda ve özel sektörde çalışan enerji uzmanlarıyla (KV) mülakatlar yapılmıştır.

Tablo 3’de verilen bulanık ikili karşılaştırma ölçeği kullanılarak enerji sektöründe enerji uzmanı olan karar vericilerin yaptığı değerlendirmelere göre ana kriter ve alt kriterlerin önem ağırlıkları BAHP yöntemine göre hesaplanmıştır. Tablo 5’de yer alan ana amaca göre ikili karşılaştırmalar matrisindeki bulanık değerler; BAHP yöntemine göre (Denklem (1)...(9) kullanılarak) hesaplanmıştır.

**Tablo 5 - Ana Kriterlere Göre Bulanık İkili Karşılaştırmalar Matrisi**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	(1,1,1)	(1/9,1/9,1/7)	(1/7,1/5,1/3)	(3,5,7)	(1/9,1/7,1/5)	(1/9,1/7,1/5)
C2	(7,9,9)	(1,1,1)	(5,7,9)	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)
C3	(3,5,7)	(1/9,1/7,1/5)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/9,1/7)
C4	(1/7,1/5,1/3)	(1,3,5)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/9,1/7)
C5	(5,7,9)	(5,7,9)	(1,3,5)	(1,3,5)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)
C6	(5,7,9)	(1,3,5)	(7,9,9)	(7,9,9)	(1,3,5)	(1,1,1)

Bulanık ikili karşılaştırma matrisleri elde edildikten sonra BAHP yöntemi ile tüm kriterlerin önem ağırlıkları elde edilmiştir. Bulanık AHP ile elde edilen kriter ağırlıklarına göre BTOPSIS yöntemi ile KV’ ler ile görüşülerek oluşturulan 6 kriter değerlendirilmiş, kriterler arasında sıralama ve seçim gerçekleştirilmiştir. BTOPSIS yönteminin aşamaları şu şekildedir; karar vericilerin oluşturulması, alternatiflerin ve değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi, kriter ağırlıkları ve alternatifler için dilsel değişkenlerin belirlenmesi, bulanık ağırlıkların hesaplanması, bulanık karar matrisinin oluşturulması, normalize edilmiş bulanık karar matrislerinin elde edilmesi, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisinin hesaplanması, her bir alternatif için bulanık pozitif ideal çözüm ve bulanık negatif ideal çözüm arası uzaklığın hesaplanması, yakınlık katsayılarının hesaplanması, en uygun yakınlık katsayısına ait alternatifin seçilmesi aşamalarıdır. Karar probleminin çözümünde BAHP ile kriterin önem ağırlıkları bulunduktan sonra BTOPSIS yöntemi ile alternatiflerin bu kriterlere göre değerlendirilmesi yapılmıştır.

Çalışmada dünyanın ve ülkemizin 2040 yılında elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı değerlendirmesi BAHP+BTOPSIS yöntemleri kullanılarak yeni bir matematiksel model geliştirilerek konu değerlendirilmiştir. Bulanık AHP+Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanarak yapılan; ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı şu şekildedir: %25,5’i güneş, %20,7 rüzgar, %17,4 hidro, %11,5 jeotermal, %9,9 biyokütle olmak üzere yüksek talep senaryosu altında %85 oranına ulaşmıştır.

IEA göre 2040 yılında dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı şu şekildedir: %15,96’ı hidro, %9,94’ü rüzgar, %6,12’i güneş olacağı öngörülmesine rağmen çalışma sonucunda (Bulanık AHP+Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanarak) %17,6’ı hidro, %10,8’i güneş, %10,2’i rüzgar, %3,2’i jeotermal, %2,1’i biyokütle olmak üzere yüksek talep senaryosu altında %44 oranına ulaşmıştır.

## 5. SONUÇ

Çalışmada problemin çözümünde; BAHP ve BTOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Enerji sektöründe çalışan enerji uzmanlarıyla bir anket çalışması yapılarak, sonrasında KV’ler ile görüşülmüş ve konu değerlendirme yapılmıştır. Böylece enerji sektörünün enerji konusunda beklentileri değerlendirilmiştir. Problemin çözümünde/karar vermede etkili olan kriterlerin önem ağırlıkları BAHP ile belirlenmiştir. Problemin çözümünde alternatiflerin sıralanması BTOPSIS

yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada belirlenen kriterler/alt kriterler için enerji sektöründe çalışan enerji uzmanı, müdür ve yönetici görevinde 23 kişi ile görüşülmüş olup KV'ler ile yapılan görüşmeler sonrasında problemin kriterleri ile alt kriterleri (6 ana kriter ile 19 alt kriter) belirlenmiştir. Sonrasında enerji sektöründe çalışan enerji uzmanı 39 kişiye bir anket çalışması düzenlenmiştir. Çalışmada faktörlerin/kriterlerin ağırlıkları BAHF yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup sıralaması ise BTOPSIS yöntemi ile belirlenmiştir.

Çalışmada; 2040 yılın yüksek talep senaryosunda tüketimimiz 795 Milyar kWh, düşük talep senaryosunda kurulu gücümüz 735 Milyar kWh a ulaşması beklenmektedir. Çalışmada ülkemizin 2040 yılında elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı değerlendirilerek BAHF+BTOPSIS yöntemleri kullanılarak yeni bir matematiksel model geliştirilerek konu değerlendirilmiştir. Bulanık AHP+Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanarak yapılan; yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı şu şekildedir: %25,5'i güneş, %20,7 rüzgar, %17,4 hidro, %11,5 jeotermal, %9,9 biyokütle olmak üzere yüksek talep senaryosu altında %85 oranına ulaşmıştır, çalışma sonucunda (Bulanık AHP+Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanarak) %17,6'ı hidro, %10,8'i güneş, %10,2'i rüzgar, %3,2'i jeotermal, %2,1'i biyokütle olmak üzere yüksek talep senaryosu altında %44 oranına ulaşmıştır. IEA 2040 yılında dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranı %37 olacağı öngörülmesine rağmen çalışma sonucu dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım %44 oranına ulaşmıştır.

İPM'e göre (İPM, 2021); ülkemizin Net Sıfır Senaryosu'nda yenilenebilir kaynak kullanımı büyük bir hızla artmaktadır. Baz Senaryo'da 2018'de 7,5 GW olan ve 2040'lara kadar hızla artan rüzgâr kurulu gücünün daha sonra 2070'e kadar ETKB tarafından Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyeli olarak verilen 48 GW'de sabit kalmaktadır. Rüzgâr kurulu gücü Net Sıfır Senaryosu'nda artmaya devam etmekte ve 2050'de 62 GW'yi geçerek, elektrik üretimi 2018'de 20 TWh'den 2030'da 90 TWh'ye, 2050'de 146 TWh'ye çıkmaktadır. Çalışmada 2040 yılına kadar elektrik üretimimizde %80'inden fazlasının yenilenebilir kaynakların kullanılmasıyla ülkemiz 2050'e kadar Küresel Net Sıfır Emisyon hedefine ulaşabileceği görülmüştür.

### **Kaynaklar**

1. Borges A.R., ve Antunes C.H., "A Fuzzy Multiple Objective Decision Support Model for Energy-Economy Planning." *European Journal of Operational Research*. Vol. 145, 2003, 304-316.
2. Buckley J.J., "Fuzzy Hierarchical Analysis," *Fuzzy Sets and Systems*. 17, 1985, 233-247.
3. Buckley J.J., "Fuzzy Probabilities, New Approach and Applications", *Physica Verlag*, 2003, New York.
4. Chan F.T.S., Kumar N., "Global Supplier Development Considering Risk Factors Using Fuzzy Extended AHP-based Approach," *Omega International Journal of Management Science*, 35, 2007
5. Chang D., "Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP." *European Journal of Operational Research*, 95, 1996, 649-655.
6. Chen G., & Pham T.T., "Introduction to Fuzzy Sets," *Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, 2001, LLC.
7. Chen C.T., and Lin C.T., and Huang S.F., "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management," *International Journal of Production Economics*, 102, 2006, 289-301.
8. Chen S.J, Hwang C.L., "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications," *Berlin Heidelberg: Springer*, 1992.

9. Chen G., Pham T.T., “Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems,” 2001, CRC Press, USA.
10. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA). 2020. Dünya Enerji Görünümü Raporu.
11. İncekara Ç.Ö., ve Oğulata S.N., “Turkey’s energy planning considering global environmental concerns,” *Ecological Engineering*. Elsevier, A.B.D., 2017, 589-595.
12. Incekara C.O., “Türkiye’ nin Elektrik Üretiminde Doğalgaz Talep Tahminleri,” *Journal of Turkish Operations Management*, Cilt 3, 2, 2020, 298-313.
13. Incekara C.O., “Evaluation of Turkey’s International Energy Projects by Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods,” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Volume (8), 2020, Issue (9): 206-217.
14. Incekara C.O., “Bulanık Topsis ve Bulanık Vikor Yöntemleriyle Bir Enerji Şirketinde Kurumsal Hafızanın Oluşturulması,” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Volume 8, Issue 16, 2021, 211-229.
15. Incekara C.O., “Evaluation of Turkey’s International Energy Projects By Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods,” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Volume 7, Issue 9, 2020, 206-217.
16. Incekara C.O., “Bulanık Mantık ile Sanayii Sektöründe ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi Uygulaması,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 20, Sayı 6, 2020, 991-1013.
17. İncekara Ç.Ö., “Enerji Sektöründe Faaliyet Gösteren Bir İşletmede İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, Cilt 4, 1, 2020, 152-177.
18. Incekara C.O., “Post-COVID-19 Ergonomic School Furniture Design under Fuzzy Logic,” *Work*, Volume 69, 2021, 1197–1208.
19. Incekara C.O., “Use of an Optimization Model for Optimization of Turkey’s Energy Management by inclusion of Renewable Energy Sources,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, Springer, 2019, 121-133.
20. İncekara Ç.Ö., “Türkiye ve AB’nin Enerji Stratejileri ve Politikaları,” *Journal of Turkish Operations Management*, Cilt 3, 2, 2019, 298-313.
21. İncekara Ç.Ö., “Turkey’s Energy Management Plan by using Fuzzy Modeling Approach,” *Scholars’ Press*, Book, 2019, 38-52.
22. Klir G.J. & B.Y., “Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications,” *Prentice Hall PTR*, 1995, New Jersey.
23. Kumar Sahu A., Datta S., Mahapatra S.S., “Evaluation and selection of resilient suppliers in fuzzy environment,” *Benchmarking: An International Journal*, 23(3), 2016, 651-673.
24. Saaty T.L., “Decision making with the Analytic Hierarchy Process,” *International Journal of Services Sciences*. 1(1), 2008, 83-98.
25. Saaty T.L., and Vargas L.G., “Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process,” *Springer Science & Business Media*, 2012, New York.
26. Satrovic E., “The Human Development Relies on Renewable Energy: Evidence from Turkey. 3rd International Energy & Engineering Congress,” 19-27.Sherwood, D., 2014. 2018, *The Valuation of Easements*. Right of Way Magazine, November/December: 36-39.

27. Sabancı Üniversitesi İstanbul Politikalar Merkezi-İPM, Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır raporu, 2021.
28. Shukla A.K., "Interpretability Assessment in Fuzzy Rule Based Systems," International Journal of Scientific & engineering Research, Volume 5, Issue 7, 2014, 506-509.
29. Šnajberg O., "Valuation of Real Estate with Easement," ScienceDirect Magazine Procedia Economics and Finance, 25, 2015, 420-427.
30. Wang C., "A Study Of Membership Functions On Mamdani-Type Fuzzy Inference System For Industrial Decision-Making," PhD Theses And Dissertations. Lehigh University, 2015, (Paper:1665).
31. Zadeh L.A., "Fuzzy Algorithms. Information and Control," 12(2), 1965, p.94-102.
32. UNFCCC, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.UN, 1997.
33. WEO, Energy Outlook. 2014, 75-82.

# Kanal-İstanbul ÇED Raporundaki Yapım Yönteminin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarıyla Uzlaşmaz Çelişkileri

M. Necat ÖZGÜR<sup>1</sup>

## ÖZET

Kanal-İstanbul'un yaratacağı çevresel, siyasal, toplumsal ve ekonomik etkiler yıllar öncesinden kamuoyunun gündeminde öne çıkmıştır. Bu alt-başlıkların içerdiği yaşamsal tehditler apaçık ortadayken işin inşaat mühendisliği boyutlarıyla birlikte ele alınması şimdiye dek pek ilgi uyandırmamıştır. Projenin başlaması durumunda karşımıza çıkacak yapım aşamalarının da Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Raporunda sergilendiği biçimiyle gerçekçi ve eleştirel bakışla irdelenmesi gerekir aslında. İnşaat Mühendisliği Yapım Yönetimi sistematigi açısından bakıldığında raporda önerilen yapım yöntemiyle bile proje, çözümüne hiç kafa yorulmamış ciddi sorunlar içermektedir. Bildiride, raporda sunulan yapım süreci çözümlenerek, kanalın kuramsal açıdan bölgede yerleşik yaklaşık yirmi milyon insanın yaşamı felç edilmeden tamamlanamayacağı gerçeği ortaya konmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kanal-İstanbul, ÇED, İnşaat Mühendisliği, Yapım Yöntemi.

## ABSTRACT

### ***Uncompromising Contradictions of the Construction Method in the EIA Report of Canal-Istanbul with the Implementations of Civil Engineering***

The environmental, political, social and economic impacts of Canal-Istanbul have been featured in the public agenda since years. While the vital threats included under these subtitles are clearly obvious, handling the subject within its civil engineering dimensions has not been a point of interest by now. The construction stages displayed in the Environmental Impact Assessment (EIA) Report to be faced in case the project starts should also be investigated with a realistic and criticizing look in essence. From the viewpoint of Construction Management Systematic, the Project to be built within the proposed construction method of the Report contains serious problems solutions of which have not been thought of. In the article, the fact that the project cannot be finished without paralysing the life of some twenty millions of people residing in the region is revealed by analysing the construction process presented in the Report.

**Keywords:** Canal-Istanbul, EIA, Civil Engineering, Construction Method.

---

<sup>1</sup> İMO TMH Yayın Kurulu Üyesi, Ankara - necatozgur@yahoo.com

## AMAC

Bu çalışmada, İnşaat Mühendisliğinin Yapım Yönetimi anabilim dalı kapsamı içinde bir proje müdürü ya da şantiye şefi bakış açısından Kanal-İstanbul Projesi incelenecek, ana öğeleri aşağıdaki şekilde verilen bu kanalın yapımının gerçekçi fiziksel koşullar göz önüne alındığında ülkemiz ve ulusumuz için nelere mal olacağı ortaya çıkarılacaktır. Şekil 1’de Kanalla birlikte yapılması öngörülen Karadeniz ve Marmara konteyner limanları, Lojistik Merkezi, Küçükçekmece Yat Limanı görülmektedir. Karadeniz kıyısında rekreasyon amaçlı büyük bir dolgu da (resimde yeri gösterilmişse de bir birim olarak değinilmemektedir) aslında temel bir yapım etkinliğidir.



Şekil 1 - Projenin ana öğeleri (1)

## GİRİŞ

Mühendislik, üretilen bilimsel bilgileri uygulamada kullanabilme işidir. Bu yönüyle mühendislik, bilimden ayrılmayacağı gibi, kapsama alanlarında sürekli ilerleme göstererek bilime de belki de en yüksek katkıları yapan bir olgudur. İnşaat Mühendisliği, şimdi pek çok dala ayrılmış olan mühendisliğin tarihsel açıdan başlangıcı kabul edilir; binlerce yıldır bilimin ışığında insanlığa yarar sağlamaktadır. Bilimin gelişmesiyle, ayrışan her mühendislik dalı kendi içinde de uzmanlıklara bölünmüştür. İnşaat Mühendisliğinin alt bölümlerinin neler olduğu en kolay biçimde fakültelerin anabilim dallarından izlenebilir. Bu kapsamda “Yapım Yönetimi” de inşaat mühendisliğinin birebir uygulanmasında temel bir alt bölüm olmuştur. Sonuç olarak “Yapım Yönetimi” bir mühendislik tasarımının doğal yaşam ve insan etkinliklerinin zarara uğramadan teknolojiyi en verimli biçimde kullanarak uygulanabilmesinin yöntemlerini ortaya koyan bir alt dal olarak gelişmiştir.

Asıl gerekçesi İstanbul Boğazı trafiğini rahatlatmak olarak sunulan Kanal-İstanbul projesinin tanıtımında siyasal iktidar tarafından sözü edilen, Kanal çevresinde gelir elde etme amacıyla yeni



kurulacak kent ve bu yeni kentin altyapısı ise nedense projenin ÇED Raporunun kapsamına alınmamıştır. Tüm imar planlarını, dolayısıyla toplumsal yaşamı olumsuz etkileyecek bu eksiklik -ki resmi makamların yeni yerleşimler için övgüleri kamuoyunun gözü önünde apaçık cereyan etmektedir- ÇED Raporunu en baştan anlamsızlaştırmaktadır.

Bu bildirinın konusu Kanal-İstanbul projesinin çevresel, siyasal, toplumsal, ekonomik etkileri gibi kamuoyunda büyük rahatsızlığa yol açmış yönleri ve yarattığı planlamaya ilişkin sorunlar değil, inşaat mühendisliğinin “Yapım Yönetimi” disiplini açısından içerdiği açmazlardır.

## İş Programı

ÇED Raporu içinde -bu tür raporlar için gereğinden de fazla kapsamlı sayılacak- 172 etkinlik içeren bir inşaat iş programı bulunmaktadır. Programdaki ayrıntıya dikkat çekmek amacıyla çeşitli başlangıç işleri aşağıdaki şekilde büyütülmüş olarak gösterilmektedir. (Şekil 2)

ID	WBS	Aktivite Adı	Süre	Başlangıç	Bitiş
1	1	Kanal İstanbul Projesi	2697 d	1.10.2018	18.02.2026
2	1.1	Teklif Süreci	282 d	1.10.2018	10.07.2019
3	1.1.1	İhale ilanı verilmesi	0 d	1.10.2018	1.10.2018
4	1.1.2	Tekliflerin hazırlanması ve sunulması	188 d	2.10.2018	8.04.2019
5	1.1.3	Tekliflerin değerlendirilmesi ve sözleşmenin imzalanması	93 d	8.04.2019	10.07.2019
6	1.2	Hazırlık Dönemi	540 d	10.07.2019	31.12.2020
7	1.2.1	Hazırlık Dönemi 1	270 d	10.07.2019	5.04.2020
8	1.2.2	Hazırlık Dönemi 2 (Kredinin Yürürlüğe Girmesinde Görevli Şirket Kusuru Olmaması Halinde Uzatılacaktır)	270 d	5.04.2020	31.12.2020
9	1.2.3	Arazi Çalışmaları, Uygulama Projeleri, Mobilizasyon, Şantiye Yolları, Kıyı Dolgu Alan Koruma Yapıları Yürütülecektir	540 d	10.07.2019	31.12.2020
10	1.3	Sözleşmenin Yürürlüğe Girmesi	0 d	31.12.2020	31.12.2020
11	1.4	Yapım Dönemi	2425 d	1.01.2019	22.08.2025
12	1.4.1	Karadeniz Dolgu Koruma Yapıları İmalatlarına Devam Edilmesi	900 d	31.12.2020	19.06.2023
13	1.4.2	Kanal İmalatları	2425 d	1.01.2019	22.08.2025
14	1.4.2.1	KM-1+500 - KM0+000 Kanal İmalatları	1140 d	1.01.2021	15.02.2024
15	1.4.2.1.1	Marmara Denizi Taraması	90 d	1.01.2021	1.04.2021
16	1.4.2.1.2	Dalgakıran Yapımı	1080 d	2.03.2021	15.02.2024
17	1.4.2.2	ALTYAPILAR KM0+000-KM0+500	752 d	1.01.2019	22.01.2021
18	1.4.2.2.1	D100 (E5) - KGM	752 d	1.01.2019	22.01.2021
19	1.4.2.2.2	D100(E5) Asma Köprü Tamamlanması - KGM	0 d	22.01.2021	22.01.2021
20	1.4.2.2.3	Büyükcemece-Sefaköy Temizsu hattı - ISKI	752 d	1.01.2019	22.01.2021
21	1.4.2.2.4	Küçükçekmece-Baharsüy ve Avcılar Atıksu hatları - ISKI	752 d	1.01.2019	22.01.2021
22	1.4.2.2.5	Atıksu arıtma tesisi - ISKI	752 d	1.01.2019	22.01.2021
23	1.4.2.2.6	Çelik doğalgaz hatları - NATO	752 d	1.01.2019	22.01.2021
24	1.4.2.2.7	Hava/enerji nakil hatları - EİGM	752 d	1.01.2019	22.01.2021
25	1.4.2.3	KM0+000-KM0+500 Kanal İmalatları	240 d	20.02.2021	18.10.2021
26	1.4.2.3.1	Tarama	90 d	20.02.2021	21.05.2021
27	1.4.2.3.2	TMB-MD Römoör Bağlama Alanı	150 d	21.05.2021	18.10.2021
28	1.4.2.4	KM0+500 - KM9+000 Kanal İmalatları	650 d	21.05.2021	2.03.2023
29	1.4.2.4.1	Küçükçekmece Gölü tarama	650 d	21.05.2021	2.03.2023
30	1.4.2.5	ALTYAPILAR KM9+000-KM9+500	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
31	1.4.2.5.1	E80 (TEM) - KGM	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
32	1.4.2.5.2	Halkalı - İspartakale Konvansiyonel Demiryolu Banlyü Hattı - TCDD	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
33	1.4.2.5.3	Petrol ve doğalgaz boru hatları - EİGM	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
34	1.4.2.5.4	Terkos-Alibeyköy hamsu hattı - ISKI	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
35	1.4.2.5.5	Hava/enerji nakil hatları - EİGM	1128 d	1.01.2019	2.02.2022
36	1.4.2.6	KM9+000 - KM9+500 Kanal İmalatları	52 d	2.03.2023	23.04.2023
37	1.4.2.6.1	Kanal kazısı	27 d	2.03.2023	29.03.2023

Şekil 2 - Yapım İş Programı Başlangıç Etkinlikleri (1)

Programa ilk bakışta göze çarpan, programlama tekniği açısından yaşamsal bir eksikliğe değinmek gerekmektedir. 12. sıradaki “Karadeniz Dolgu Koruma Yapıları İmalatlarına Devam Edilmesi” adlı iş kaleminin ön koşulu olan “Karadeniz Dip Taramaları” bu etkinliğe bağlanmış olmadığı gibi bir iş kalemi olarak da hiç görünmemektedir. Kritik yörünge üstünde olan bu dolgunun, miktar olarak en önemli bölümünü 20 milyon m<sup>3</sup> dip tarama malzemesi

oluşturmaktadır. Bu eksiklikle, daha doğrusu Kanal kazısının başlayabilmesinin ön koşulu olan bu önemli dolgu için yetersiz kalacak malzeme miktarıyla, Kanal inşaatı iş programı bu işin yapılamayacağını en baştan dosta düşmana göstermektedir.

İşin daha ilginç başka bir boyutu da bu dolgu koruma yapıları sürerken, Kanalın neredeyse yarısının kazılarının -ki koruma yapıları bittiğinde Kanal kazılarının bu yapıların içine dökülmeleri gerekmektedir- iş programına göre yapılmakta olmasıdır. 600 milyon m<sup>3</sup> mertebesinde, Atatürk Barajının 10 katı büyüklüğündeki bu kazıların nerede depolanıp, ileride Karadeniz dolgu bölgesine nasıl taşınacağı belirsizdir. Daha doğrusu böyle bir çözüm fiziksel anlamda olanaksızdır.

İş Programının ÇED Raporunda verilen bir özeti incelediğimizde ilk bakışta Kanal ve Deplasman işlerinin 2 ayrı sözleşmeyle yaptırılacağı görülmektedir. (Şekil 3) İki ayrı sözleşme yöneliminin nedeni, Kanal için yap-işlet tarzı bir model düşünülüyorsa eğer, karmaşık altyapı aktarımlarını devlet bütçesiyle yaptırarak, külfetini Kanal yatırımcısına yüklememek olabilir. Aksi takdirde, tek işin iki ayrı sözleşmeyle yapılmasını önermek, böyle üstünde durulan kritik bir konuda İdare'nin göz göre göre gecikmeye yol açması anlamına gelmektedir.

Aktivite	1. Yıl				2. Yıl				3. Yıl				4. Yıl				5. Yıl				6. Yıl				7. Yıl				8. Yıl			
	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek	1. Çeyrek	2. Çeyrek	3. Çeyrek	4. Çeyrek				
Kanal Yapımı Teklif, İhale ve Sözleşme Süreci	■	■	■																													
Kanal İnşaat Hazırlık Süreci				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																
Kanal İnşaatı																																
Kanal İşletmeye Açılış																																
Altyapı Deplasmanları Yapımı Teklif, İhale ve Sözleşme Süreci	■	■	■																													
Altyapı Deplasmanları İnşaatı	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			

Şekil 3 - Kanal iş programı özeti (1)

Altyapı deplasmanlarında hiç düşünülmeyen kamulaştırma sorununun salt Kanal yapımında dikkate alındığı, "Hazırlık Süreci" başlıklı aktiviteye deplasmanlar bölümünde yer verilmemesiyle ortaya çıkmaktadır. Altyapı deplasmanlarının daha ihale sürecinin başında devreye giriyor olması bu bakımdan hiç gerçekçi değildir, bir aylık hazırlık süreci de hiç kimseyi ikna edemez elbette.

Kanal yapımının, Altyapı deplasmanlarının bitmesine koşullandırılmış olması elbette doğru ve seçeneği olmayan bir yaklaşımdır; Trakya ve İstanbul'da yaşamın felç edilmesi hiç göze alınabilir mi? Raporu hazırlayanlar yirmi milyon insanın yaşam koşullarının sürebilmesi için önce altyapının aktarılması gerektiğini kabul etmişlerse de, önerdikleri iş programının bu kabule hiç de uygun olmadığı, ayrıntılı incelememizin sonraki aşamalarında görülecektir.

ÇED Raporu bölümlerinin daha başında altyapı deplasmanları önkoşuluyla çelişen ve bu nedenle yapımı teknik açıdan mümkün görülmemeyen öneriler bulunmaktadır. Bu çelişkiler yukarıda verilen Şekil 2'deki ana iş programında, Kanal ve altyapı yapımları iki ayrı bölgede, birbirinden bağımsız yürütülerek kendisini göstermektedir. Ana program ve özeti bu bakımdan apaçık bir tutarsızlık içermektedir. Altyapı tümüyle aktarılmadan, geçici derivasyonlarla ana kanala belli bölümlerde başlamak bölgede günlük yaşamın sürebilmesi açısından hiç uygun değildir.

Özet programdaki gibi deplasmanları -ki koca köprüler, tüneller, kara ve demiryollarının yapımı söz konusudur- 2 yılda bitiren programa ne ölçüde uyulabilir sorusu hemen akla gelmekte, ÇED Raporu incelendikçe köprü yapım sürelerinin raporun ilerleyen sayfalarında 3 yıla çıkarıldığı (1) şaşkınlıkla görülmektedir! Bu tür çelişkiler, ÇED Raporunu hazırlayanların da olaya pek alıcı gözle bakmadıkları kuşkusunu uyandırmaktadır. 7 yılda “İşletmeye Açılış” savı o nedenle ciddiye alınmamalıdır.

Henüz Kanal kazısına geçmeden yapılması zorunlu olan aktarım işlerini şöyle sıralayabiliriz:

1. Kamulaştırma (1. yıl)
2. Köprülerin yapımı. (Kanal kazısından önce Trakya trafiğinin sürmesi sağlanmalıdır.) (4. yıl)
3. Güzergâhın altındaki ve üstündeki teknik altyapı boru ve hatlarının (ENH, kablo, gaz, petrol, su vs.) yeniden (bir bölümünün yeni köprülerden) geçirilmesi (5. yıl)
4. Sıyırma kazıları ve kazı taşıma yollarının yapımı ile İstanbul’un yok edilecek içme suyu kaynakları olan Sazlıdere Barajı ve Terkos Gölü yerine yeni su temini (6. yıl)

Kanalın her iki yakasında kurulacağı resmi makamlarca tüm dünyaya duyurulan yeni kent ve bu kentin altyapısının ÇED kapsamında hiç ele alınmamış olmasının bir açıklaması yoktur; bu belirsizlik iş programının tümünden çökeceğinin bir başka göstergesidir, çünkü bu büyük iş kaleminin gerçekleştirilmesi de Kanalın diğer iş kalemleriyle bağlantısı kurulmadan düşünülemez. Yapım yönetimiyle hiçbir bağı bulunmayan bir kişi bile bir büyük kanal ile yanındaki milyonluk kentin yapımının birbiriyle ne denli iç içe olacağını kolaylıkla duyumsayabilir. Eğer yeni kentin kurulmasına Kanal işletmeye açıldıktan sonra girişilecekse, İstanbul’un daha çok çekeceği var demektir.

### **Altyapı Deplasmanları**

Kanal kazısı öncesinde İstanbul’da daha doğrusu tüm Marmara Bölgesinde yaşamın sürebilmesi için güzergâhın kestiği tüm altyapılar kanalın üstünden ya da altından geçecek biçimde yenilenmeli, güzergâhta bulunan tesisler de daha sonra Kanal kazısıyla birlikte ortadan kaldırılmalıdır. Bu kapsamda, dar ve sıkışık bir alanda deplasman işleri için ihale yapacak Kurumlar ilk bakışta DSİ, TEİAŞ, BOTAŞ, TCDD, TCK, OGM, İBB, MSB olarak ortaya çıkmaktadır. Tam bir kaos söz konusudur. Tek tek incelemek gerekmektedir değişecek teknik altyapıyı.

### **Ulaşım**

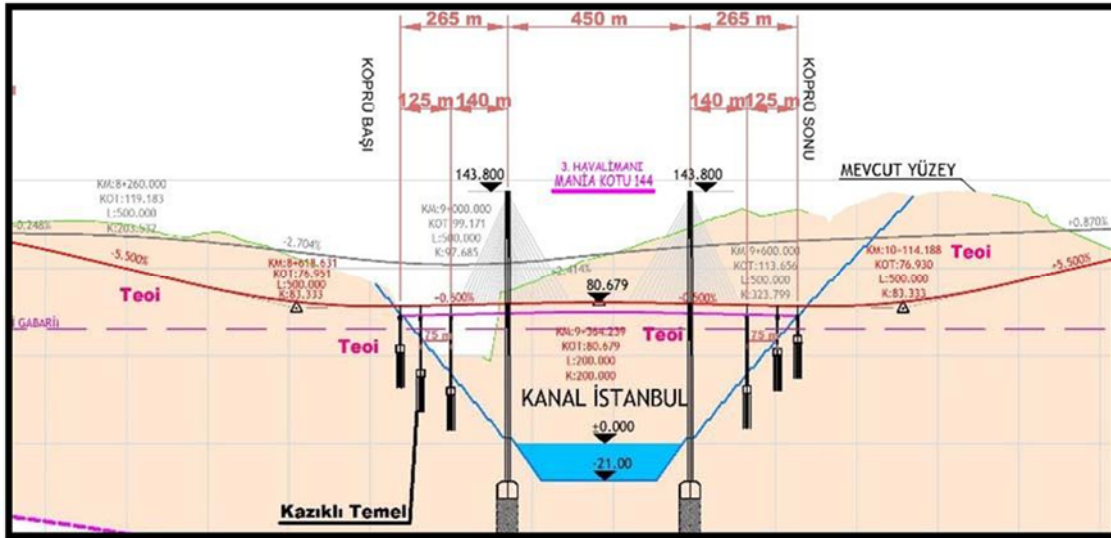
Öncelikle elbette yerel ve uluslararası ulaşımın kesilmemesi gerekmektedir. 2 demiryolu ile 2 metro hattı ve 7 Karayolu su yüzeyinden en az 60 m yukarıda olacak köprülere aktarılacaktır. (Şekil 4) Eğim koşulu gereği olarak köprüler her iki yanda yeterince uzaktan başlatılmalıdır. Tünelle geçirmek düşünülürse derinliğin hesabı gerekir, aksi takdirde sonradan Kanal kazısının patlatmaları bu tünelleri riske sokacaktır. Aktarılacak yapılar -halihazırda paralı olan Kuzey Marmara ve TEM dışında- seçeneksiz oldukları için yap-işlet değil, Kamu olanaklarıyla yapılacaktır. Süre kısıtları ve finans açısından bu yapıların gerçekçi ihalelere konu olabilmeleri için kaynak ayrıldığı şimdiye dek duyurulmamıştır. Yapılmış iki ihale olan Sazlıbosna karayolu geçişi (Kuzey Marmara Kesim 7 geçişi) ile Halkalı-Ispartakule demiryolu geçişi Kanal-İstanbul projesinden bağımsız olarak bu yolların önceden belirlenmiş parçalarıdır. Bu yol geçişleri zorunlu aktarım değil, yeni yapılar olduğu için ÇED Raporundaki iş programında belirtilen öncelikli işler arasında da yer almamaktadır.

Demiryolu Güzergahı	Karayolu Güzergahı
TCDD Halkalı - İspartakule Konvansiyonel Demiryolu Banliyö Hattı	E5 (D100) Karayolu Geçişi
TCDD 3. Köprü – 3. Havaalanı – Halkalı Hattı	Küçükçekmece-Avcılar Karayolu Geçişi
Müselles Geçişi	E80 (TEM/O3) Otoyolu Geçişi
Metro Güzergahı	Kuzey Marmara Otoyolu Kesim-7 Geçişi
Mahmutbey Esenyurt Metro Hattı Geçişi	Sazlıbosna Karayolu Geçişi
Yenikapı Sefaköy Beylikdüzü Metro Hattı Geçişi	Kuzey Marmara Otoyolu Kesim-2 Geçişi
	D-020 Karayolu Geçişi

Şekil 4 - Altyapı Deplasmanı, ulaşım (1)

ÇED Raporundan aldığımız bir aktarım örneğini kesitten incelemek, önemli başka olguları da açığa çıkarmaktadır. (Şekil 5)

Şekil 5'te köprülere kazıklı ve keson temel önerilmesi, çok zayıf bir zeminin göstergesidir. Kazılarda heyelan elbette en önemli bir risk ögesi olacaktır. O nedenle, sonradan yapılacak Kanal kazısı sırasında bu bölgelerde patlatma yapılamaz, köprü ayakları yakınında elle kazı zorunludur. Köprü ayaklarını çevreleyen yüz binlerce m<sup>3</sup> elle kazıdan söz ediyoruz. Bu tür teknik konular incelenmemiş olduğundan deplasman işleri için iş programında öngörülen sürelerin düşürüldüğü açıktır. Deplasman dönemi kazılarının nereye taşınacağı da belirsizdir.

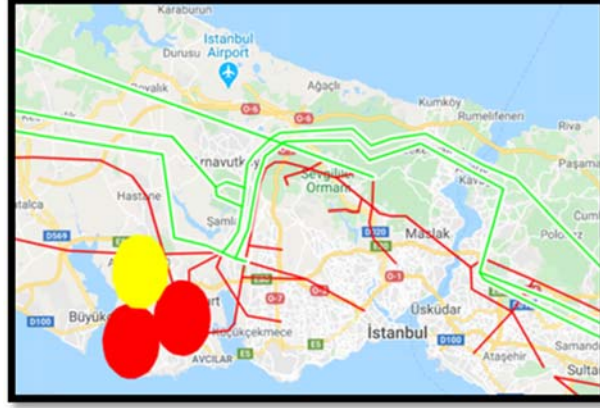


Şekil 5 - Bir Köprü Kesiti (1)

#### Enerji Nakil Hatları (ENH):

9 ENH kazıdan önce Kanalın üstünden geçirilecektir (Şekil 6). Fiber altyapı, Yeraltı Kabloları, Alçak Gerilim, Telekomünikasyon da sıradadır. Güzergâhtakileri sökmeyen, yenileri köprü hollerine ve direklerle yerleştirmelidir ki yaşam sürsün. Demek ki önce köprü yapımları bitecek; köprüler üstünden aktarımlar da beşinci yıla sarkacaktır. Altyapı deplasmanları için iş programında 2 yıl olarak verilen, ÇED Raporunun sonraki sayfalarında belli etmeden 3 yıla

çıkarılan deplasman süresi, bazı aktarımların köprülerin bitişine bağlı olması nedeniyle, görüldüğü gibi çok daha uzamaktadır.



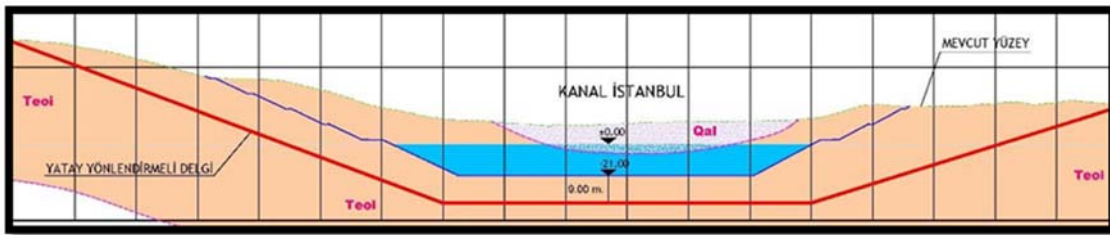
Şekil 6 - Enerji Hatları (2)

#### Boru Hatları:

Rusya'dan gelen "Türk Akımı" K. Çekmece gölü girişindeki ana doğalgaz hattıyla Anadolu'ya gaz gönderecektir. ÇED Raporu, bu hattın Kanal çıkışının 5 km güneyinden geçtiğini, üstüne B.A. kemer yapılarak korunacağını belirtiyor; ancak, Marmara Denizinin bu bölümünde 16.500.000 m<sup>3</sup> olarak belirlenen tarama gereksinimi Türk Akımı hattının güvenliği açısından -ki ÇED Raporunda üstünde durulmamaktadır- kuşku yaratmaktadır.

NATO akaryakıt boru hattı da TEM otoyolunun kuzeyinde Kanal projesiyle kesişmektedir. Bir köprüye güvenlik nedeniyle monte edilemez, bunun için de ayrı ve özel bir köprü yapılması gerekmektedir. Bu konuya da raporda değinilmemektedir.

İGDAŞ Doğalgaz hatları Kanalın altından yönlendirmeli yatay sondajla 1-2 km geçirilecektir. (Şekil 7) Delme, genişletme, sürme aşamaları gerektiren ve iş programına göre tümü birlikte yapılacak 7 hat! Ne var ki, ülkede 7 hattı birden yapacak makine parkı yoktur! Altyapı deplasman sürelerinde böyle aksama nedenleriyle hep karşılaşılacaktır.

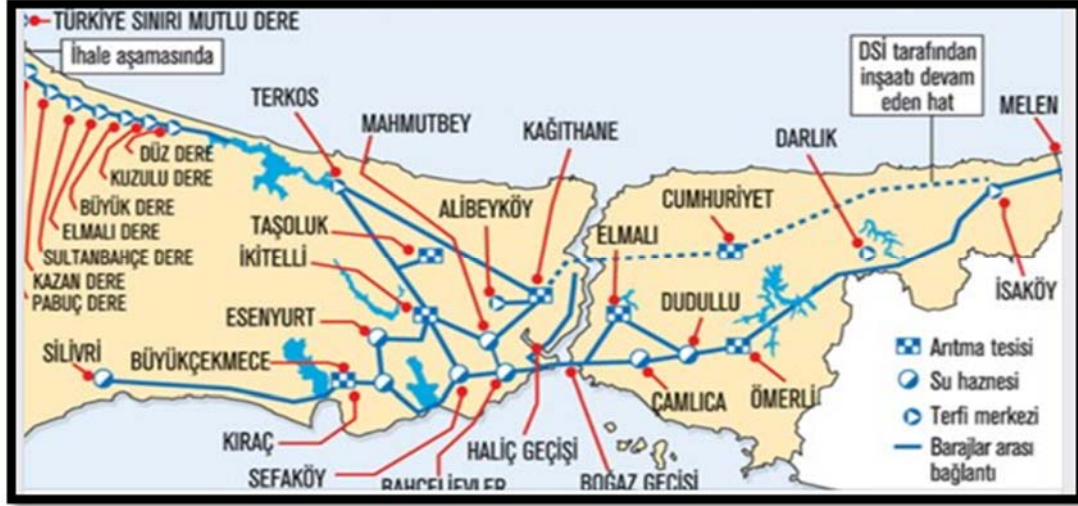


Şekil 7 - Yatay Sondaj (1)

#### Su:

Istranca (Yıldız) Dağlarındaki barajlardan gelen su Terkos Gölünde depolanır (Şekil 8). Terkos, Silivri, Sazlıdere ve B. Çekmece barajlarından gelen sular artık İstanbul'a erişemez çünkü üstlerinden kanal geçecektir. Kanalın tuzlu suyu tüm tatlı su akiferlerini basacaktır; mevcut tesislerin artabilmesi söz konusu değildir. Tüm mevcut isale hatları ve su arıtmaları çöpe gidecektir!

İstanbul'a su sağlanmalı kanal kazısına başlamadan önce, yoksa koca kent susuz kalacaktır. Peki, İstanbul'a su nereden gelecek? Raporunda belirtilen Düzce'deki Melen barajından hayır yoktur; çatlaklar içindedir, ayakta kalabilecek mi bilinmemekte, onarım işine de henüz başlanabilmiş değildir. Melen Barajı onarımı için yapılacak ek beton dolgunun ilk dolgudan da büyük olduğunu belirtmek gerekir. Böylece, çözümsüz 7 yıl geçmiş olacak, ama henüz Kanalın kendisi yoktur ortada.



Şekil 8 - İstanbul'un Kaybolacak Suları (2)

Su konusu, İstanbul'u besleyen suların başına geleceklerle bitmemektedir. Dağıtım ayrı bir çıkmazdır. Kanal-İstanbul ile kesişen içme suyu iletim hatları 8, atık su hatları da 4 adettir; 3200 mm'ye dek çıkan çaplarıyla (1). Bu bilgilerin alındığı ÇED Raporuna göre su hatları tünelle ya da köprü hollerine monte edilerek deplase edilecektir. Düşünebiliyor musunuz, 3 yılda yapılabileceği varsayılan köprüler bittikten sonra ancak İstanbulluların su hatlarının aktarımına başlanabilecektir.

Atık su hatları için Rapordan kelimesi değiştirilmeden alınan aktarım yöntemi ise tam bir yanılsamadır (1): "Bütün toplayıcı hatların ve batıda kalan hatların yeni Atık Su Arıtma Tesislerinde (AAT) arıtılması ve deşarj yönetmeliklerine uygun olarak Kanal-İstanbul'a deşarj edilmesi sağlanacaktır." Söylenen şudur: 5 yeni AAT yapılarak yeni atık su hatları bunlara bağlanacak, atık su aktarımı böylece tamamlanmış olacak; AAT çıkış suları da Kanal-İstanbul'a deşarj edilecek. Bu tam bir aymazlıktır, çünkü Kanal henüz yoktur ki ortada. İstanbul halkının atık suları Kanal yapımı öncesinde ortada kalacaktır bu durumda. Sonuç olarak, uzun deşarj hatları gerekmektedir Karadeniz'e ya da Marmara'ya doğru, kilometrelerce tünellerle deniz deşarjları! Gereken süre ve maliyet artışı ÇED Raporunun baştan yazılmasını gerektirir aslında!

Ayrıca, bu büyük çaplı hatlar dışında bölgede irili ufaklı içme suyu ve atık su hatları ÇED Raporu ifadesiyle uygulamada planlanacaktır! Plansızlığın bir ÇED Raporundaki umarsızlığı da ancak böyle ifade edilir, "hat kapanırsa kapanır, halk çeksin eziyeti" mantığıyla. Bu kaos yönteminin inşaat mühendisliği yapım yönetimi mantığıyla hiçbir ilgisi yoktur. ÇED Raporu İş Programında belirtilmiş olan altyapı deplasman sürelerinin mühendislik hesaplarına bağlı olmadığı açıktır.

### Karadeniz Rekreasyon Alanları

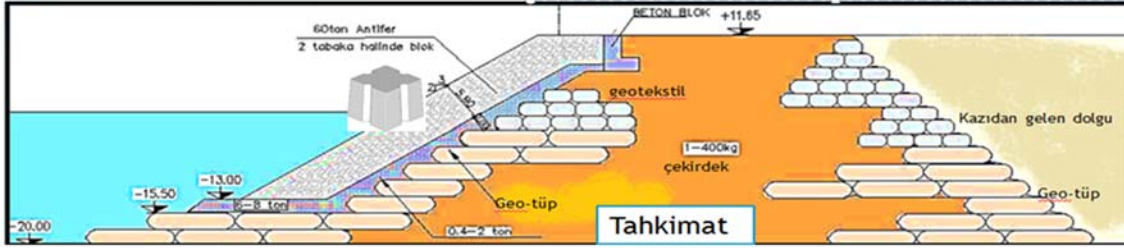
Kanal-İstanbul kazısı başlayınca kanal kazı malzemesi Karadeniz'deki rekreasyon alanlarına taşınacaktır. (Şekil 9) 38 km boyundaki bu alanların dolgu için kullanılabilmesi kazı öncesinde

gerekli olan deniz altı tahkimat yapılarının bitirilerek güvenli dolguya hazır duruma getirilmelerine bağlıdır. Bu işlem Kanal inşaatına başlanmasının da en önemli ön koşuludur.



Şekil 9 - Karadeniz Dolgu alanları (1)

Deniz altı tahkimat kesiti Şekil 10'da verilmektedir. İş programına göre 4,5 yılda bitirilecek tahkimatın 70 milyon m<sup>3</sup> hacmi Atatürk Barajı kadardır. Ana tahkimat malzemesi Karadeniz dip taramalarından çıkacak 20,281,000 m<sup>3</sup> çamurun torbalara konulmasıyla elde edilmektedir (1). Süreç “geo-tüp doldurma, depolama ve kurutma” içerir. Geo-tüplerin tahkimatta kullanılabilmesi için bu süreç zorunludur, denizden alınan malzeme doğrudan tahkimata getirilememektedir. Ancak, 10 adet Sazlıdere Barajı büyüklüğündeki bu çamurun depolama yeri belli değildir.



Şekil 10 - Deniz Altı Tahkimat Yapıları (1)

Antifer (4 ayaklı iri B.A. kıyı tahkim malzemesi) ve beton bloklarla, çekirdekte kullanılacak (50 milyon m<sup>3</sup> kadar) kaya, taş ocaklarından getirilecektir. Bu ocakları bulmak ve yeni taşıma yolları yapmak gerekmektedir ama ÇED Raporu bunları konu etmemekte, bu ağır beton blok imalatının da tüm tahkimatla birlikte biteceğini belirtmektedir. Kanal kazısının bu kritik ön koşulunun yapımının da halkın oturduğu konut alanlarının içinden yıllarca sürececek kaya taşımaları açısından, daha Kanal kazısı bile başlamadan toplum için ne denli eziyet verici bir işlem olduğu açıktır.

### Altyapı Deplasmanları Sonrası

Yıllar geçti, milyar dolarlar harcandı, köprüler ve tüm teknik altyapı aktarımı bitirildi diyelim. “Kazıya başlarız” diye düşünülür elbette. Kazıdan çıkan malzemeyle de deniz dolgusu yapılacaktır. Mümkün değil; çünkü sıyırma kazısı diye bir şey var sırada. Güzergâhın üst katmanındaki ağaç, çalı, bitkisel toprak, organik madde temizlenmeden projeli dolguda kullanamazsınız; dolgunuz çöker çünkü. ÇED Raporuna göre 30 cm kalınlık kabulüyle 8,5 milyon m<sup>3</sup> kadar sıyırma kazısının nereye depolanacağı daha belli değildir. Bir yıl daha böyle uçup gidecek Kanala başlayamadan. (ÇED: Uygun bölümleri depolanıp sonradan Karadeniz dolgu alanına serilecek! ÇED: İki yüz bin ağaç da Orman Gn. Md. tarafından nakledilecek!) (1)

Sıyırma kazısı bitince artık kanal kazısına geçebilir misiniz? Ne yazık ki, henüz değil! Önce Kanala koştur taşıma yolları tasarlanıp yapılacak, üst kotlardan aşağı doğru yenilenen yollar! Kazı, Kanal platformu düzeyine gelince, ana taşıma yolları sabitlenecek; her şantiyenin ortak bulvara çıkışında kavşaklar düzenlenecek. Yol standardının elbette çok yüksek olması gerekmektedir. Türkiye'nin en büyük kazı-dolgu projesi olan Atatürk barajında 100 milyon m<sup>3</sup> toprak hareketi (25m<sup>3</sup> kapasiteli 4m eninde kamyonlarla) 7 yılda bitirilmiştir. Kanalın her iki yanında her birinde yüzlerce iş makinesi olan Atatürk barajına eşdeğer sekizer şantiye kurulacak, birbirinden bağımsız yönetilmesi gerekecektir.

Kanal kazısı için önkoşul değilse de, diğer dip taramaları da bu arada yapılmalıdır; K. Çekmece: 52.968.000 m<sup>3</sup>, Marmara: 16.529.000 m<sup>3</sup>. K. Çekmece Gölünün dip taramasının başlayabilmesi için önce D100 Karayolunun aktararak köprüsünün yapılması, ayrıca mavna seferleri için göl-deniz bağlantısının da açılması gerekmektedir.

“Kanalın güney girişindeki D100 (E-5) karayolunun köprüye alınması inşaatın en kritik noktalarından birisidir. Bu aktarım yapılmadan Küçükçekmece Gölü taramasına girilemeyecektir.” (ÇED Bölüm 3-50) (1) Ne var ki, Kanal kazısı ile dip tarama etkinliklerinin eşgüdümü iş programında ele alınmamıştır. Dip taramasının döküm alanı da bilinmemektedir. Yol açacağı çevre sorunu önemsenmemiş, “geo-tüp” içinde bekletme düşünülmüş? Peki, bekletilirken nereye sığacak bu tüpler acaba? Yine 70 milyon m<sup>3</sup> mertebesinde bir hacim söz konusudur.

Buraya kadar yazılanlar aslında ne anlatıyor, özetleyelim: Şantiyede tam bir kaos yaşanmaktadır: Karadeniz’le K. Çekmece Gölünün arasında 30 km kadar bir uzaklık olduğu düşüncesiyle, bu cephe boyunca 4 Raylı sistem, 7 Karayolu, 9 ENH, 7 D. Gaz, 1 Akaryakıt ve 12 su olmak üzere 40 mevcut geçiş, 40 aktarma şantiyesi söz konusudur (Küçük çaplı İSKİ hatları, Fiber altyapı, YAK, AG, telekomünikasyon dışında)! 80’in üstünde işlev görülürken bu güzergâhta, ÇED Raporu uygun yerlerde Kanal kazısını da yaptırmaktadır! 325 m’de bir ya deplasman şantiyesi ya da (yol, boru hattı gibi) mevcut ve işlevsel altyapı geçişi varken, bu işler tamamlanıp aktarımlar yapılmadan güzergahın herhangi bir bölümünde Kanal kazısı yapmak ve taşımak olanaksızdır.

Karadeniz ve Marmara limanları ile Lojistik merkezine kanal kazısından değil, taş ocaklarından ayrıca dolgu taşınması bir başka büyük sorundur. Bu işlerin milyonlarca metreküp tutan malzemesini hangi ocaklardan elde edecekler, hangi yollardan taşıyacaklar, belirsizdir. ÇED Raporu Anadolu’da da taş ocakları işletilmesini önererek eziyetin bu yakada oturanlara da yayılacağını gizlememektedir. (1)

### Asıl Kazı Aşaması

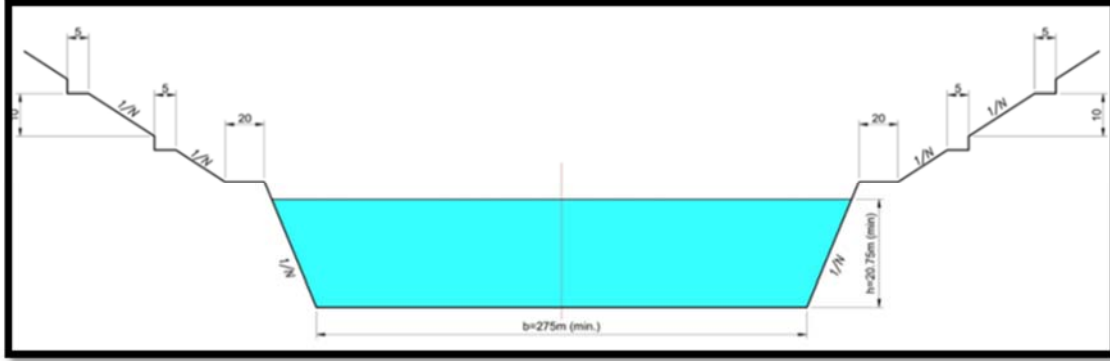
1.155.668.000 m<sup>3</sup> olarak hesaplanan asıl kazı aşamalarını ÇED Raporundan çeşitli alıntılarla izliyoruz. (1)

“Açık maden ocaklarında çalışan devasa kazıcı ve kamyonların kullanımı.” “Günde 850.000 m<sup>3</sup> kazı ve deniz depolaması.” “Kepçe hacmi 50 m<sup>3</sup> olan 17 kazıcı ile hacmi 200 m<sup>3</sup> olan 365 adet kamyon!” “Taş dolgu ve asfalt yolların platform genişliği minimum 34 m.” “Makineler yerleşim yerlerinden, yollardan geçemez. Şantiyede fabrika kurulur, montaj yapılır.”

Seçilen iş makineleri, üretimi özel yapılan türlerinin en büyük örnekleridir, ancak açık madenlerde düşünülebilir; kent içlerinde kullanıldıkları görülmemiştir. Ne fabrika-atölye için yer, ne sevk için yol bulunabilir yoğun inşaat yapılan arazide, ÇED Raporunda da önerilen bir montaj yeri yoktur! Aslında, en baştan, kazının en az %30 olması beklenen kabarması taşımalarında dikkate alınmayarak toplam süreyi kaçınılmaz biçimde etkileyecek büyük bir taşıma zamanlaması hatası yapılmıştır. Aşağıdaki kesitte (Resim 9) ÇED Raporu kendini yalanlamaktadır; en önemli kazı taşıma yolu olan platform 34 m değil -ki seçilen kamyonlara bu yol genişliği gidiş, geliş ve geçiş



şeritlerinin gereksinimi için bu en ancak yeterlidir- 20 m olarak belirlenmiştir çünkü. Bu zayıf zeminde 25 m yüksekliğindeki kazının bu diklikte durabileceğine inanılması da düşündürücüdür! Bu iki cümledeki gerçekler aslında kazı miktarının en az ikiye katlanacağını ifade eder. Belirtilen kamyon ve kazıcılar da 5 m. enindeki palyelere sığmaz, şev kesemez. İş makinelerine uygun kesit yapılırsa eğer, kazı daha da katlanacaktır.



Şekil 11 - Kanal tip kazı kesiti (1)

ÇED Raporu kazıya Kuzeyden başlamayı önermektedir. (1) Güzergâhtaki su kaynaklarını çevirmeden, kurutmadan nasıl yapılabilir ki? Mümkün değildir. Sazlıdere Barajını yıkmakla işe başlanmalıdır bu durumda. Kentin su sorunu henüz çözülmeden bu nasıl yapılabilir ki? Önce 100 milyon m<sup>3</sup> su dip-savaktan K. Çekmece Gölüne akıtılacaktır, minimum düzeyin altında kalanı da pompaj yoluyla. 2 milyon m<sup>3</sup> baraj dolgusu ile rezervuarda birikmiş o kadar alüvyon nereye dökülecek, belirtilmemiştir.

Diyelim ki engeller bitti; kazıya artık tam anlamıyla girişilebilecek. Ne ki, mevcut ve planlanan metro hatları Kanala çok yakındır; kazıda kullanılacak patlayıcıların gerilme dalgalarının metro tünellerini çatlatma riski gibi teknik sorunlar da raporda incelenmemiştir.

Kazı yöntemine biraz daha girelim. ÇED s. 5-205 ne diyor (1): “İnşaat sırasında kazı alanına gelecek yağmur, sel ve yeraltı suyu anında uzaklaştırılacaktır.” Kanal tabanı platformdan 25m, deniz düzeyinden 21m aşağıdadır. Kanal kazıları su düzeyinin altına indikçe kazı alanı su altında kalacaktır; kamulaştırma sonrasında tarım ve sulama yapılmayacağı için yıllar içinde yükselecek yeraltı suyunun da hesaba katılması gerekmektedir! Kazılardaki suyun gönderileceği daha düşük kotta bir vadi bulunmamaktadır; en çukur yer yine kazı alanıdır! Fizik kuralıdır bu; çukurdan pompalarla atılan su zeminden sızarak en düşük noktaya geri gelecektir. Kazıda sudan kurtuluş yoktur; 25 m derinlikte kalıcı drenaj mümkün değildir.

### İşletme Döneminde Mühendislik

ÇED Raporunun yüzeyselliğini ve yanlışlarla dolu yapım yöntemini okudukça, işletme döneminin incelenmesinde de Mühendislik bakışını sürdürmekte yarar görülmektedir. Diyelim ki 14 yılın sonunda gemiler artık Kanaldan geçebilecek. Peki, ne zamana dek? Karadeniz’den taşınan sürüntü maddeleri ile Marmara dip akıntısının getirdikleri K. Çekmece Gölünü ve önündeki Marmara çıkışını yavaş yavaş yeniden doldurana dek! (Buna örnek İzmit Körfezi-Sapanca gölü arasındadır. Birleşik olan bu iki su alanı Marmara’dan gelen alüvyonun arayı doldurmasıyla binlerce yıl önce birbirinden ayrılmıştır.) ÇED Raporu Kanalın ömrüyle doğrudan ilişkili bu konuyu incelemeye değer bulmamıştır!

ÇED Raporu Kanaldaki suyun olumsuz etkilerine karşı bir uygulama öneriyor: “Kanalın güneyinde KN 09+500 ile KN 14+650 arasında kalan yaklaşık 5,2 km’lik kesimde geo-sentetik beton şilte” (1)! Bu önlem kanalın tuzlu suyunun yeraltı suyuna geçmesini önlemeye yöneliktir. Peki, tuzlu su dinler mi bu sınırları, kaplamalı bölgeden başka bölgelere yol bulup sızarak yeraltı suyuna geçmesi engellenebilir mi? Kanaldaki tuzlu suyun kısmi yalıtımla yeraltı suyunu kirletmesinin engellenmesi mümkün değildir. Ayrıca, gemilerin Kanalda demir atma gereksinimi doğduğunda beton tabanda olacaklar da bu kapsamda düşünülmemiştir; bu işlemin olası sonuçları kirlenmeyi hızlandıracaktır elbette. (Şekil 12)



Şekil 12 - Kanal temsili beton kaplaması ve olası demir atma hasarı (2)

## SONUÇ

İnşaat Mühendisliği açısından bakıldığında, Kanal-İstanbul Projesinin gerçekleştirilebilmesi ancak bölgede yaşayan 20 milyon kişinin yaşamının felç edilmesiyle mümkündür. ÇED raporunda 2 yıl olarak belirtilen ama gerçekçi bakışla en az 6 yıl olan altyapı aktarımları bitirilmeden Kanal kazısına başlayabilmek, yukarıda ayrıntılarıyla açıklandığı gibi olası değildir. Yapım Yönetimi açısından projenin uygulanmasındaki başlıca açmazlar aşağıda dikkate sunulmaktadır.

1. ÇED Raporundaki iş programında belirtildiği gibi Kanal kazısının yaklaşık yarısını deplasmanlar bitmeden yapıp, bir yerlerde geçici olarak depoladıktan sonra deniz dolgusuna getirmek de miktarların büyüklüğü açısından fiziksel olarak söz konusu değildir.
2. Kanalın bitirilmesi için -hesaplanmış kazı miktarının en az ikiye katlanacağı gerçeği göz önüne alınarak- 8 yıl daha geçeceği de yukarıdaki bölümlerde gösterilmiştir.
3. Raporda Altyapı aktarımlarının kamulaştırmaya konu olmadığı izlenimi verilmektedir. Oysa kamulaştırma gereksinimi için en az 1 yıl süreye gereksinim vardır.
4. İş Programında 2 yıl olarak belirtilen köprü yapım süreleri Rapor içinde 3 yıla çıkarılmış olsa da sürenin değiştirildiği saklanmaktadır. Böylece, bu etkinliğin gerçekleştirilebilmesi için 4 yıl geçmiş olacaktır.
5. Çeşitli elektrik ve su altyapısı gibi aktarımlar yeni köprülerin bitmesine bağlıdır, çünkü yeni hatlar bu köprülere monte edilecektir. Bu gerçek de, bu etkinlikler için süreyi en az 5 yıla çıkartmaktadır.
6. Sıyırma kazılarının, ardından kazı taşıma yollarının yapımı gibi zorunlu işler altyapı aktarım süresinin en az 6 yıl olacağına temel gerekçeleridir.
7. ÇED Raporunu hazırlayanlar önermiş oldukları yapım sürelerini savunabilirler elbette, ancak bu sürelerin hesabında dayandıkları teknik gerekçeler önemli ve hatta vahim hatalar içermekteyse tüm kabulleri çökmüş olmayacak mıdır? Böyle bir kritik hata atık su aktarımlarında söz konusudur. 5 adet Atık su Arıtma Tesisi (AAT) yapılarak mevcut hatların yenilendikten sonra bunlara bağlanacağı, AAT çıkışlarının da Kanala verileceği Raporda belirtilmektedir. Ne var ki, altyapı deplasmanları Kanal Yapımı başlayabilsin

diye yapılmaktadır; AAT yapımları bitince çıkışlarının bağlanacağı bir kanal henüz ortada yoktur. AAT çıkışlarının kilometrelerce tünellerle denizlere deşarj edilmesinden başka çözüm yoktur; bu hem aktarım süresini katlayacak, hem de maliyete birkaç milyar dolar daha ekleyecek bir büyük hatadır.

8. Ayrıca, İstanbul'a aktarım sonrasında şehir suyunun nereden geleceği gibi çözümü belirsiz sorunlar ile kazı öncesinin zorunlu bir yapım etkinliği olan 70 milyon m<sup>3</sup> hacmindeki deniz altı tahkimatının 4,5 yılda bitirileceği fantezisi de altyapı deplasmanları olgusunun ÇED Raporunda ciddiyetle ele alınmadığı ve bu nedenle güvenilemeyeceği saptamasına yol açmaktadır, ne yazık ki.

Raporda yer almamakla birlikte, siyasal iktidarın kamuoyuna, proje giderlerini karşılayacağı yönünde yaptığı açıklamalarla çok önem verildiği anlaşılan kurulacak yeni kentteki “taşınmaz rantı” da çelişkiler içermektedir.

Yapım süresi içinde Kanala bakan konutlar yapılamayacak; yapılsa da kimse o karmaşanın içinde oturmak istemeyecektir. Bu ağır ve uzun yapım süreci içinde kim orada her gün binlerce kamyonun tozunu ve gürültüsünü çekmek ister ki? Ayrıca, Kanal zemini kazı sırasında patlatılırken yakınındaki binalar sağlam kalabilecek midir? Mümkün görülmemektedir.

Proje sahiplerinin, kendileri tarafından verilmiş uluslararası duyurulardaki görsellerde, içinde küçük teknelerin gezdiği kanal manzaralı binalar yapmak amacı yer almaktadır. Ne var ki, ÇED Raporu bile “turizm teknelerinin, küçük yat teknelerinin ve feribotların seyrinin tehlikeli olması nedenleriyle proje kapsamından çıkarılmıştır” diyerek en azından işin bu kısmında gerçekçi olabilmiştir. Projenin kesin değerlendirilmesinde bu çelişkinin de bir kanaat oluşturabileceği umulur.

Kanal-İstanbul çevresel, doğal, toplumsal, siyasal, ekonomik nedenlerle ulusumuz için yıkım projesidir. Bu temel konularda hiç güven duyulmayan ÇED Raporunu bu yazımızda salt İnşaat Mühendisliği uygulamalarındaki çözüm önerileri açısından eleştirdik; bu önerilerin uygulanmasıyla Kanal yapımının çıkmaza gireceğini, yarı yolda tıkanacağını ortaya koyduk. Yapım için ısrar edenler konunun uygulama mühendisliği açısından içerdiği engelleri hiç akla getirmemekte, zorunlu geri dönüş noktasına gelindiğinde bu büyük israfın altından nasıl kalkabileceklerini de umursamamaktadırlar. Kanalın yapımına baş koyanlar belki de gerçekten bu olasılığın ayırında değillerdir. Konunun bu açıdan da irdelenmiş olması karar vericiler açısından Projenin iptali için bir başka önemli gerekçe olarak değerlendirilmelidir.

ÇED raporunu yazanlara bir öneriyle bitirelim: Hiç olmazsa Kanalın iki ucuna birer kapak yapıverin. Çevre mahvolduğunda kapatır, Kanalın içini doldurarak eski durumuna getirirsiniz. O da başlı başına iyi bir getirim projesi olur.

### Kaynaklar

1. T. C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, “Kanal-İstanbul ÇED Raporu,” Aralık 2019
2. “Google” Görselleri



# İnşaat Mühendisliğinde Etik Kavramı ve Önemi

Mehmet ÇAKIR<sup>1</sup>

## ÖZET

*İnşaat mühendisliğinde meslek etiğinin önemini, eksikliğindeki nedenleri ve yol açacağı sonuçları sunacağım.*

*Meslek etiğine gelmeden önce kişinin insan olarak doğru, dürüst, vicdanlı, yeşili ve doğayı seven, tüm canlılara saygılı, toplumsal yaşama uyumlu bir birey olması gerektiğini belirtmek gerekir. Bunun sağlanması için ise ailenin, çevrenin ve üniversiteye kadar alınan eğitimin önemi ortaya çıkmaktadır. İnşaat mühendisliğinde meslek etiğinin sağlanamaması; can güvenliğini, yapı kalitesini, iş güvenliğini, afetlere karşı yapı dayanıklılığını, mesleğin saygınlığını tehdit etmekte ve meslekte aktif olarak görev alan mühendislerin gelir düzeylerinin azalmasına neden olmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Etik, inşaat mühendisliği, meslek etiği.

## ABSTRACT

### *The Civil Engineering Ethics and Its Importance*

*I aim to present the importance of the civil engineering ethics, the causes and consequences of lack of ethical approach in professional practice in this presentation.*

*It is obvious that before allowing professional dignity, people should have honest, conscientious, environmentally- friendly personality, they should respect to all of other creatures, and every individual should be compatible to social life. To provide of this requirements family, the environment where they grow up, and schools are crucial components.*

*Breaking the ethics rules in civil engineering threats many significant factors such as the quality of construction, workplace and life safety, the resistance against potential disasters, professional dignity. Also, not allowing the ethic rules can cause a decline in the salaries of civil engineers working actively.*

**Keywords:** Ethics, Civil engineering, Professional dignity.

---

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisleri Odası Afet Hazırlık ve Müdahale Kurulu, Ankara  
İnşaat Mühendisleri Odası Afet Riski Altındaki Alanlar ve Kentsel Dönüşüm Komisyonu, Ankara -  
mhtcakir@hotmail.com

## **AMAC**

İnşaat mühendisliğinde etik kavramının önemini, başlıca nedenlerini ve sonuçlarını tartışarak bu kavramın meslek hayatındaki rolünü bu alanda çalışmakta olan genç meslektaşlarımız ve inşaat mühendisliği öğrencileri için vurgulamayı amaçlıyorum.

## **İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE ETİK KAVRAMI VE ÖNEMİ**

Bazı üniversitelerdeki eğitimin yeterli olmaması, yeterli bilgiye ve mesleki yeterliliğe sahip olmadan mezun verilmesi meslek etiğini baltalamaktadır. Ayrıca inşaat mühendisi sayısının ihtiyacın ve yatırımlara göre fazlalığı nedeniyle özellikle yeni mezun hatta tecrübeli inşaat mühendisleri iş bulamama korkusuyla etik değerleri düşünmeden, birden çok projede ve uygulamada, inşaat mühendisleri odasının belirlediği ücretlerin çok altında, hatta sigortasız veya yetersiz sigorta güvenceleriyle çalışmaktadır. Meslek etiğine dikkat eden mühendisler ise işsiz kalma riskiyle karşı karşıya kalmaktadır.

Amerikan İşgücü İstatistikleri Bürosunun verilerine göre Amerika'da 1900'lü yılların başından 2000'li yıllara kadar yaklaşık olarak 1 inşaat Mühendisi başına 1400 nüfus düşmektedir (3). Ancak Amerika'da bu rakam, 2021 yılında 1100 kişiye 1 inşaat mühendisi oranına gerilemiştir. Maalesef Türkiye'de, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yapılmış, benzer bir işgücü istatistiği tutulmamaktadır. Benzer bir istatistik İnşaat Mühendisleri Odasına (İMO) kayıtlı üyeler üzerinden yapılabilir. Ancak, üyelerin hangi oranda işgücü piyasasında oldukları bilinmediğinden bu çıkarımın hata içermesi olasılığı da yüksektir. 2021 yılı için Türkiye'de 680 kişi başına 1 inşaat mühendisi bulunduğu hesaplanmaktadır. Bu rakam, ne kadar hata da içerse, neredeyse Amerika'daki oranın iki katıdır. Ayrıca, ülkemizde böyle bir istatistiğe ulaşılamaması da işgücü ile ilgili bir planlama yapılmadığının açık bir göstergesidir.

İnşaat mühendisleri odası genel merkezinde, meslek etiğine karşı yanlış faaliyetlerde bulunan inşaat mühendislerine gerekli yaptırımları yerine getirmek amacıyla kurulmuş ve faaliyette olan bir onur kurulu bulunmaktadır. Bu kurulun faaliyet raporunu göre, meslek etiğine uymayan, kendi şubelerinde çözümlenemeyen ve genel merkeze kadar ulaşan şikayetler, ihbarlar ve bunlar için onur kurulu tarafından alınan kararların dağılımı Tablo 1'de gösterilmektedir (Tablo.1). Bu sayıların, İnşaat Mühendisleri Odasına kayıtlı üyeleri kapsadığı, bu nedenle odaya kayıtlı olmayan ve/veya odaya ulaşmayan olayların sayısal olarak ne olduğu konusu bilinmediği akılda tutulmalıdır.

Aşağıdaki tabloda da görüldüğü gibi onur kuruluna gelen mesleki sorunların çoğunluğunu 1999 Gölcük depremi sonrasında hayata geçen yapı denetim sistemi ile ilgili sıkıntıların oluşturduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu durum ise bu sistemde ve uygulanmasında sorunlar olduğunu, bu alanda etik değerlere yeterince uyulmadığını göstermektedir.

İMO 47. Dönem Yönetim Kurulu faaliyet raporunda etik uygulamalar ile ilgili kısımda bu konuya şu şekilde yer verilmiştir; 47. dönem yönetim kurulu tarafından değerlendirilen soruşturma kararları soruşturulmak üzere odamıza bildirilen ve İMO 47. Dönem Yönetim Kurulunun 1'den 60 no.lu toplantısına kadar karara bağlanmış olan şikayet dosyası sayısı 1129, şikayet edilen üye sayısı 2479'dur. Geçtiğimiz dönemlerde Bakanlık tarafından gönderilen 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun ve ilgili mevzuat uyarınca denetim görevinin yerine getirilmediği tespiti ile Odamız mevzuatı hükümlerine göre işlem yapılması talepli yazı ekinde sadece İl Yapı Denetim İMO 47. Dönem Çalışma Raporu 90 Komisyonu Kararı mevcuttu. Odamızca yapılan yazışmalar ve sıkı takibimiz sonucunda 2021 yılında Bakanlıktan gelen yazı formatı değiştirilmiş, yazının İl Müdürlüklerine de dağıtımını gönderilerek İl Yapı Denetim Komisyonu Kararı eki Teknik İnceleme Raporlarının meslek odalarına iletilmesi sağlanmıştır. 20/2/2020 tarih ve 31045 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan değişiklikle Yapı Denetimi Hakkında Kanunun 8. Maddesi, "Bu Kanun hükümleri çerçevesinde görevini yerine getirmediği tespit edilen mimar ve

mühendisler hakkında meslek odaları, kendi mevzuatı uyarınca cezai işlem yaparak neticesini Bakanlığa bildirir” şeklinde değiştirilmiştir. Değişiklikten önce “sorumlu denetim elemanları ve proje müellifi” hakkında işlem yapılması talebiyle gönderilen yazılar, yapılan değişiklikle İl Yapı Denetim Komisyonu Kararında adı geçen tüm üyelerimizi kapsayacak şekilde genişletilmiştir. \* Gerek Teknik İnceleme Raporlarının Odamıza gönderilmesi gerekse pandemi nedeniyle şantiye kontrollerinin yapılamamasından dolayı ağırlıklı olarak İdari Para Cezası dosyalarının bildirilmesi nedeniyle “soruşturmaya gerek yok” ve “yazılı uyarı” kararlarında geçmiş dönemlere oranla artış meydana gelmiştir (2).

**Tablo 1 - İMO 47. dönem Onur Kurulu faaliyet raporuna göre şikayetlerin ve alınan kararların dağılımı**

	Herhangi Bir Ceza Tesisine Gerek Görülme	Uyarı Cezası 7. madde	Para Cezası 8. Madde	MUY 9. Madde	Yargı Süreci Beklenmesi	Odadan İhraç	Toplam
Proje ve Uygulama Denetçisi	11	6		13			30
Uygulama Denetçisi	7	6		13	1		27
Kontrol Elemanı	24	27		3	2		56
Kuruluş Ortağı	5	4		11	1		21
Laboratuvar Denetçisi	2	2					4
EKB	1	15	1				17
Diğer	3	4	1	8	2	1	19
SİM/İTB	2		9	1			12
Proje Müellifi	3			2			5
Şantiye Şefi		3		4			7
<b>Toplam</b>	<b>58</b>	<b>67</b>	<b>11</b>	<b>55</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>198</b>

*EKB: Enerji kimlik belgesi, SİM: Serbest inşaat mühendisliği, İTB: İş yeri tescil belgesi, MUY mesleki uygulamadan yasaklama*

İnşaat mühendisliği eğitiminde meslek etiği dersleri mutlaka yeterli bilgi ve tecrübeye sahip akademisyenler tarafından verilmelidir. Ayrıca, meslek odalarından yetkin mühendisler tarafından, mezuniyet sonrası meslek içi eğitim olarak, genç meslektaşlara meslek etiği dersleri verilmelidir.

Can ve mal güvenliği ile ülke çıkarlarını doğrudan etkileyen bir meslek olan inşaat mühendisliğinin, meslek etiğinden uzak bir nitelik taşıması düşünülemez. Geleceğin mühendislerinin yetiştirilmesi sürecinde ve mesleğin içinde olan mühendislere etik, meslek etiği kavramlarının, eğitim ve meslek içi eğitim sürecinde yeterince benimsetilememesi, ülkenin ve insanın bugününe olumsuz etki etmesinin yanında geleceği etkileyeceği gerçeği açıktır.

## ULUSLARARASI ÖRNEKLER

Etik uygulamaları kapsamında, pek çok ülkenin meslek örgütlerince belirlenen ve düzenli aralıklarla güncellenen kurallar bütünü bulunmaktadır. İncelendiğinde, hepsinin temel aldığı kavramların ortak olduğu görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avrupa Birliği’ndeki inşaat mühendisliği etiğine dair kuralları şu şekilde özetleyebiliriz.

### **Japonya İnşaat Mühendisleri Derneği (Japan Society of Civil Engineers)**

Mevcut kurallar bütünü, Japonya İnşaat Mühendisleri Derneği Yönetim Kurulu tarafından 9 Mayıs 2014 tarihinde revize edilmiştir (5). Dernek, inşaat mühendisleri için temel etik ilkesi, 'Etik ilkelere bağlı bir inşaat mühendisi, mesleğinin hem insan toplumu hem de doğa ile olan derin ilişkisinin her zaman bilincinde olmalı, teknolojinin gelişmesi için çalışmalı, bilgilerini derinleştirmeli ve pekiştirmeli; böylece bilgi ve becerileri aracılığıyla toplumun barış ve refahına katkıda bulunmalıdır.' şeklinde açık olarak belirtilmiştir.

Mesleki davranış kurallarının detaylandırıldığı ikinci bölümde ise inşaat mühendislerine yönelik olarak şu maddelere yer verilmiştir;

1. Toplumda katkıda bulunun.
2. İnsanların barış ve refahını ve toplumun gelişimini sürekli endişeleri olarak akılda tutarak, kamu yararına olan sorunlara kapsamlı çözümler geliştirmek ve uygulamak için uzmanlık ve deneyimlerinden yararlanın.
3. Hem doğaya hem de medeniyet ve kültür dokusuna saygı gösterin. Doğaya saygı, farklı medeniyetlere ve kültürlerle saygı gösterirken insanlığın hayatta kalması ve gelişmesi için vazgeçilmezdir.
4. Toplumun güvenliğini sağlamak ve afetleri azaltmak. İnsanların hayatlarını ve mallarını korumaya yardımcı olmaya, geniş bir disiplin yelpazesindeki meslektaşlarla birlikte çalışmaya, mesleki uzmanlıklarının ötesinde insanların endişelerine bakmaya, teknolojinin insanlarla ilgili hem yeteneklerini hem de sınırlamalarını fark etmeye kararlı olun.
5. Mesleki sorumluluklarınızı her koşulda yerine getirin. Çalışmalarınızın özünde sosyal önemini kabul edin ve böylece topluma karşı görevlerinizi yerine getirmeye çalışın.
6. Herhangi bir çıkar çatışmasından kaçının. İnsanlarla, müşterilerle, çalıştığınız kuruluşlarla tüm etkileşimlerinizde adil ve tarafsız olun, görevlerinizi sadakat ve dürüstlikle yerine getirin ve her türlü çıkar çatışmasından kaçının.
7. Bilgilerinizi açıkça sunun ve halkla açık iletişimde bulunun. Genel refah adına, çabalarınızda uzmanlığınızı ve bilgilerinizi paylaşmaktan kaçınmayın ve insanlarla açık bir şekilde görüş alışverişinde bulunun.
8. Araştırma çabalarınızda bulunun ve sonuçlarınızı takip edin. Bulgularınızı ve önerilerinizi hem bilimsel kanaatlerinize hem de kendi vicdanınıza uygun olarak yayımlayın, bunları hem meslektaşlarınızla hem de halkla paylaşın, nesnel gerçekleri ve başkalarının entelektüel başarılarını her zaman dikkate alın.
9. Kendinizi geliştirmek ve insan kaynaklarını geliştirmek için çaba gösterin. Erdemlerinizi, genel bilgilerinizi ve mesleki yeterliliklerinizi geliştirin, teknolojik ilerlemeler adına hem bilimsel hem de pratik olarak bilimsel çalışmalarınızı sürdürün ve bireysel yeteneklerinizi ve deneyimlerinizi, mühendislerin eğitim ve öğretimi için kullanın.
10. Çalışmalarınızı tüm yasaları, kuralları ve yönetmelikleri ve aynı zamanda sağlam temellere dayanan ilkeleri tam olarak anlayarak, toplumsal standartlara uyulmasında önderlik ederek ve bunları hem sosyal hem de teknolojik değişime yanıt olarak iyileştirmeye çalışarak yürütün.



### **Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği (American Society of Civil Engineers, ASCE)**

Amerika Birleşik Devletleri'nde inşaat mühendisliği etik ilkeleri ilk olarak 1914 yılında benimsenmiş ve en son 26 Haziran 2006 tarihinde revize edilerek ve güncel halini almıştır. ASCE'ye ait etik kurallar 7 ana kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallar şu şekilde özetlenebilir (6);

1. Mühendisler, halkın sağlığını, güvenliğini ve refah düzeyini her şeyden üstün tutmak ve mesleki görevlerini yerine getirirken kendilerini sürekli geliştirmek zorundadırlar.
2. Mühendisler, sadece kendi yetki alanlarında hizmet vermelidirler.
3. Mühendisler, kamuoyuna açıklama yaparken dürüst ve objektif olmalıdırlar.
4. Mühendisler, mesleki sorunlarda her işveren veya müşteri için güvenilir bir temsilci veya vekil olarak hareket etmeli ve çıkar çatışmalarından kaçınmalıdırlar.
5. Mühendisler, mesleki itibarlarını kendi hizmetlerinin değerleri üzerine inşa etmeli ve diğer meslektaşlarıyla haksız rekabetten kaçınmalıdırlar.
6. Mühendisler, mühendislik mesleğinin onurunu, namusunu ve itibarını muhafaza etmek ve geliştirmek amacıyla hareket etmeli, rüşvet, dolandırıcılık ve yolsuzluğa sıfır tolerans göstermelidirler.
7. Mühendisler, kariyerleri boyunca mesleki gelişimlerine devam etmeli ve gözetimlari altındaki diğer mühendislere mesleki gelişimleri için imkân sağlamalıdırlar.

### **Avrupa İnşaat Mühendisleri Konseyi (European Council of Civil Engineers, ECCE)**

Türkiye İMO'nun (İnşaat Mühendisleri Odası) da üyesi olduğu ECCE'ye ait etik ilkeler Mayıs 2010 tarihinde revize edilip güncel halini almıştır (7). Buna göre; bir inşaat mühendisinin temel amacı, insanların yaşam koşullarını iyileştirmek, her zaman can, sağlık ve mülkiyeti korumaktır. İnşaat Mühendisi, toplumun hizmetkarı, aynı zamanda kültür ve yaşam kalitesinin de destekleyicisidir. Bir İnşaat Mühendisi, günümüzün taleplerini araştırmalı, analiz etmeli ve gelecekteki gelişmeleri öngörebilmelidir.

İnşaat mühendisliği etiği ilkelerini; toplum, çevre, meslek, müşteriler ve diğer inşaat mühendisleri açısından inceleyerek beş ana başlık altında toplamışlardır. Bu başlıklar;

1. Toplum için bir mühendis;

Kamu yararının tamamını göz önünde bulunduracak şekilde hareket etmelidir.

Halkın, diğer meslektaşların ve çalışanların sağlık ve emniyetlerini gözetmelidir.

İnşaat mühendisliğinin yararları için halkın gerekli bilgi düzeyini geliştirmeye çalışmalıdır.

Sadece yeterli bilgi düzeyine sahip olduğu konularda profesyonel görüşlerini beyan etmelidir.

Rüşvetin her türünü reddetmelidir.

Kamusal işlerde, kamu yararını gözetecek hizmetleri sağlamak her zaman önceliği olmalıdır.

2. Çevre için bir mühendis;

Yaptığı işlerin toplum ve doğal çevre üzerindeki etkileri konusunda bilinçli olmalıdır.

Sürdürülebilirlik kavramını ve gelişimini sağlamayı amaçlamalıdır.

Çevrenin iyileştirilmesi ve yaşam kalitesini arttırmaya yönelik çalışmalarda kararlı olmalıdır.

İnşaat mühendisliği ile ilgili çalışmalardan kaynaklı değişiklikleri adapte edilmek için gezegenimizin ekosistemlerini tanımalıdır.

Çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmelidir.

Yenilenebilir ve geri dönüşümlü malzemelerin kullanımını teşvik etmelidir.

Kendi çalışmalarını gerçekleştirmek için doğal kaynakların mümkün olan en düşük seviyede kullanılmasına çaba göstermelidir.

3. Meslek için bir mühendis;

Mesleğinin standartlarını korumalı ve işinin verimliliğini arttırmak için aktif rol almalıdır.

Meslek onurunu ve şerefini zedeleyebilecek davranışlardan kaçınmalıdır.

Mesleğini korumak için yanlış tanıtım ve kötü temsil edilmeleri önlemek için gayret göstermelidir.

4. Müşteriler / işverenler için bir mühendis;

Müşterilere / işverenlere adalet ve hakkaniyete sahip sadık bir çalışan olmak için çabalamalıdır.

Müşteriyi/işvereni oluşabilecek çıkar ilişkisi ve menfaat çatışmaları hakkında derhal bilgilendirmelidir.

Yapılan çalışmaların can ve mal güvenliği üzerinde herhangi bir risk taşımadığının garantisini verecek ya da şayet risk söz konusuysa, müşteri/işveren ve diğer ilgililerin var olan risk hakkında bütünüyle bilgilendirilmesini sağlamalıdır.

Eğer verdiği kararlar kurallara uygun değilse bunu müşteriye/işverene açıkça belirtmelidir.

Müşteri/işverenin rızası olmadan işle ilgili gizli bilgileri ifşa etmemelidir.

Müşteri/işveren için giriştiği iş ile ilgili olarak üçüncü şahıslardan komisyon kabul etmemelidir.

Yetkili olmadığı konularda aracı olmak için komisyon ücreti kabul etmemelidir.

Çalışmanın sonucunda başarısızlık olacağına inandığı zaman bunu müşteriye / işverene bildirmelidir.

Düzenli çalıştığı proje dışında işverenin bilgisi olmadan başka bir iş kabul etmemelidir.

5. Diğer inşaat mühendisleri için bir mühendis;

Talep edilen bir işi yapan kişiye yaptığı iş dolayısı ile hak ettiği övgüyü vermelidir.

Diğer mühendislerin ve mühendis adaylarının eğitimleri, öğretimleri ve mesleki gelişimlerini ilerletmek için yardımcı olmalıdır.

Diğer mühendislerin itibarlarına, kariyerlerindeki ilerlemeye veya çalışmalarına zarar vermemelidir.

Başka bir mühendisin suçlu olduğuna ya da etik olmayan veya yasadışı bir uygulamanın içinde bulunduğu inandığında bunu ilgili makamlara bildirmelidir.

## **SONUÇ**

Tüm topluma etik değerlerin önemi okullarda ve üniversitelerde ders olarak verilmeli, sonrasında ise meslek odalarında meslek içi eğitimlerle meslek etiğinin benimsenmesi sağlanmalıdır. Meslek etiğine sahip bir inşaat mühendisi öncelikle kendisi ve ailesiyle birlikte huzurlu bir yaşama sahip olacaktır. Sonrasında tüm inşaat mühendislerinin meslek etiğine sahip çıktığını bilerek mühendise yakışır şekilde yaşayacaktır. Bu süreçte yaşanacak zorluklar olduğunun baştan kabul edilmesi gerektiği de açıktır. Ama bu zorluklar bizleri yılgınlığa sevk etmemelidir. Meslek etiğinin meslek odaları, ilgili resmi kurumlar ve ilgili bakanlıkların ortak ve uyumlu şekilde birlikte çalışarak

hazırlayacağı etik değerlere uygun bir yasa ile bu sorunun daha fazla büyümeden çözülmesi kanımca en uygun çalışma olacaktır. Tabi ki meslek odalarının düzenli olarak oda üyelerine vereceği meslek içi eğitim ve teknik kongreler ile bilgilendirmeler gerekli olacaktır. Ek olarak, meslek odalarının bu eğitimler sonrasında, inşaat mühendislerine, referans belgesi ve yetkin mühendis belgesi verilmesi amacıyla eğitimler sonrasında uygun değerlendirmeler yapılması mesleki etiğin oluşmasındaki yeri çok önemlidir.

### **Kaynaklar**

1. <https://www.bls.gov/news.release/pdf/ocwage.pdf>. Son erişim tarihi 01.08.2022
2. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası. 47. Dönem Çalışma Raporu. 2020-2022.
3. [http://www.jsce-int.org/about/p\\_engineer](http://www.jsce-int.org/about/p_engineer). Son erişim tarihi 01.08.2022
4. <https://www.asce.org/-/media/asce-images-and-files/career-and-growth/ethics/documents/asce-code-ethics-july-2017.pdf>. Son erişim tarihi 01.08.2022
5. [http://www.eceengineers.eu/about/code\\_of\\_conduct.php](http://www.eceengineers.eu/about/code_of_conduct.php). Son erişim tarihi 01.08.2022



## Çelik Yapılarda Tasarım Yoluyla İş Güvenliğinin Sağlanması İçin Algoritma

Selçuk İZ<sup>1</sup>, Özgür KÖYLÜOĞLU<sup>2</sup>

### ÖZET

Çelik yapıların tasarımında alınan kararlar imalat ve montaj sırasında ciddi yaralanma ve ölümcül kazalara önemli katkıda bulunur. Çelik yapı imalat ve montaj işlerindeki ölümlerin %25 'i tasarımla ilgili sorunlardan kaynaklanmaktadır. Avrupa'da ve Amerika'da yapılan çalışmalarda ölümcül kazaların yüzde altmışı saha çalışması başlamadan önce alınan kararlardan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Tüm ölüm ve yaralanmaların çoğunluğu tasarım kararları veya imalat montaj planlama eksikliğine bağlanabilir. Bu nedenle çelik yapıların saha çalışmalarında tasarım yoluyla can güvenliği seviyesinin yükseltilmesi ile ilgili bir algoritma geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik Yapı, Tasarım yoluyla iş güvenliği, İş güvenliği

### ABSTRACT

#### **Algorithm to Ensure Occupational Safety through Design in Steel Structures**

Decisions made in the design of steel structures contribute significantly to serious injury and fatal accidents during fabrication and assembly. 25% of deaths in steel structure fabrication and installation work are due to design related problems. Studies conducted in Europe and the United States have concluded that sixty percent of fatal accidents result from decisions taken before fieldwork begins. The majority of all deaths and injuries can be attributed to a lack of design decisions or manufacturing assembly planning. For this reason, an algorithm has been developed to increase the level of life safety through design in field studies of steel structures

**Keywords:** Steel Structures, Design for safety, Occupational safety

---

1 Yeditepe Üniversitesi, İstanbul - selcuk.iz@yeditepe.edu.tr

2 Yeditepe Üniversitesi, İstanbul - ozgur.koyluoglu.yeditepe.edu.tr

## GİRİŞ

### ÇALIŞMANIN AMACI

Yapısal çelik imalat ve montaj işlerinde yapılan istatistiklere göre kazaların olduğu kaynaklar şunlardır: Kesim işlemi, Elektrik çarpması, Düşme, Parça düşmesi, Vinç kazaları, Yanma ve donma, Aşırı zorlama kas sistemi hastalıkları, Yüksekten veya yatay açıklıklardan atlama sırasında, (1, 2, 3). Kazaların büyük çoğunluğunda tasarım, işle ilgili ciddi yaralanma ve ölümlere önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (3). Çelik imalat ve montaj işlerindeki iş kazaları içerisinde en büyük paya sahip olan, yüksekten düşme, parça düşmesi, eleman göçmesi ve elektrik çarpması kazalarının olası sebepleri, Tablo 1’de özetlenmiştir, (4).

**Tablo 1 - Çelik imalat ve montaj işlerinde en sık rastlanan kazaların sebepleri (4)**

Düşme Kazaları (D)	Parça Düşmesi Kazaları (P)
D1- Metodun veya prosesin yanlış olması	P1- Bulonların sabitlerken düşmesi
D2- Duruş şeklinin yanlış olması	P2- Çelik yapı parçalarının düşmesi
D3- Temizlik eksikliği nedeniyle objeye takılma	P3- Montaj ekipmanları düşmesi
D4- Yanlış kaynak sebebiyle yer değiştirme	P4- Dengesiz kaldırma işlemi
D5- Yetersiz tabliye rijitliği	P5- Taşıma kablosu kopması
D6- Vidalama sırasında denge kaybı	P6- Taşıma kancasının çıkması
D7- Tehlikeli yerlerde yürümek	P7- Yanlış istifleme
D8- Kayma, tökezleme	P8- Fazla zorlama
D9- Geçici sabitleme hataları	P9- Kaldırma aracı taşıma kapasite azlığı
D10- Çelik elemanların taşınırken çarpması	P10- Taşıma şeklinin yanlış olması
D11- Tabliye imalatı sırasında düşme	P11- Proses yanlışlığı
D12- Kiriş montajı ve sabitlemesi sırasında düşme	Eleman Göçmesi Kazaları (C)
D13- Kolon sabitleme sırasında düşme	C1- Tehlikeli montaj prosedürü veya metodu
Elektrik Çarpması Kazaları (E)	C2- Gevşek veya stabil olmayan mesnetleme
E1- Güç kaynağı kesici bulunmaması	C3- Kablo ayarlarken uygunsuz işlem
E2- Statik elektrik şoku	C4- Çelik kolonları sabitlemede yetersizlik
E3- Topraklanmamış iletken veya jeneratör	C5- İstifleme hataları
E4- Kaynak için voltaj düşürücü eksikliği	C6- İnşaat makinalarının yapıya çarpması
E5- Kaynak sırasında elektrik çarpması	C7- Hizalarken yapı elemanı göçmesi
E6- Montaj sırasında elektrik çarpması	C8- Çelik parçaların montaj sırasında göçmesi
	C9- Taşıma sırasında parçaların çarpışması

Yapılan bu çalışmada tasarım ve planlama aşamasında montaj ve imalat sırasındaki kazaların azaltılmasına yönelik bir akış şeması oluşturularak planlama aşamasında olası iş kazalarını en aza indirmek için bir iş akış şeması ve algoritma oluşturulmuştur.

## İNŞAAT İŞLERİNDEKİ KAZALARDA ÖLÜM ORANININ MESLEKLERE DAĞILIMI İSTATİSTİĞİ

Türkiye’de kaydedilen ölümlü iş kazalarına dair istatistik çalışması bulunmadığı için Amerika işçi sağlığı ve güvenliği kurumunun istatistikleri değerlendirilmiştir (1). İş kazalarındaki ölüm oranı çelik imalat ve montaj işlerinde çok yüksek olduğu Şekil 1’de görülmektedir. Yaralanmalı kazaların yüzde elli sekizi ölümlü sonuçlandığı dikkate alındığında, bu oranın Türkiye’de istatistik çalışması bulunamamasına rağmen daha yüksek çıkacağı tahmin edilmektedir. 1990 ve 2003 yılları arasında ABD’deki 224 ölümün% 42’sinin tasarımla bağlantılı olduğu düşünülmektedir, (1), (2), (3). Avrupa çalışma yaşamı koşulları iyileştirme vakfının 1991 yılında yapmış olduğu bir çalışmada ölümcül kazaların yüzde altmışının kısmen saha çalışması başlamadan önce alınan kararlardan kaynaklandığı sonucuna varmıştır (5).

YARALANMALI KAZALARDA ÖLÜM ORANININ MESLEKLERE DAĞILIMI	
Haddane ve Çelik üretim işçisi	%61.6
Yüksek gerilim montaj işçisi	%58.6
Çatı ve Çelik konstruksiyon montaj işleri	%32.1
Kamyon sürücüsü	%23.5
İnşaat işçisi	%21.5
Kaynakçı	%20.3
Saha mühendisi	%16
Yardımcı eleman	%15.6
Kazı operatörü	%14.3
Formen	%11.5
Blektrik teknisyeni	%10.4
Duvar işleri ustası	%8.8
Boyacı	%8.1
Isıtma havalandırma işleri	%7.8
Proje müdürü	%7.7
Tesisatçı	%7.2
Marangoz	%6.9
Alçıpan işleri	%4.9
Diğer inşaat işleri	%10.8

Şekil 1 - Yaralanmalı Kazalarda ölüm oranının mesleklere dağılımı, (1)

## ÇELİK İMALAT VE MONTAJ İŞLERİNDEKİ İŞ GÜVENLİĞİ VE SAĞLIĞINI TASARIM SÜRECİ İLE ENTEGRE ETMEK

Çelik imalat ve montaj işleri ile ilgili tehlikeleri ve hastalıkları ortadan kaldırmak veya azaltmak ve bunlarla ilgili riskleri en aza indirmek; bu yolla tesis malzeme ve can kayıplarını düşürebilmek için öncelikle tasarım esnasında can güvenliğini sağlayacak tedbirleri almak gereklidir.

Çelik yapıların montaj ve imalatı sırasında dizayn aşamalarındaki kararların iş güvenliğine büyük katkılarının olması nedeniyle fayda/kazanç durumuna bakıldığında, Şekil 2’de gösterildiği üzere, hiyerarşik olarak en etkili çözümler tasarım aşamasında üretilebilmektedir.



Şekil 2 - İş güvenliği hiyerarşik yapısı

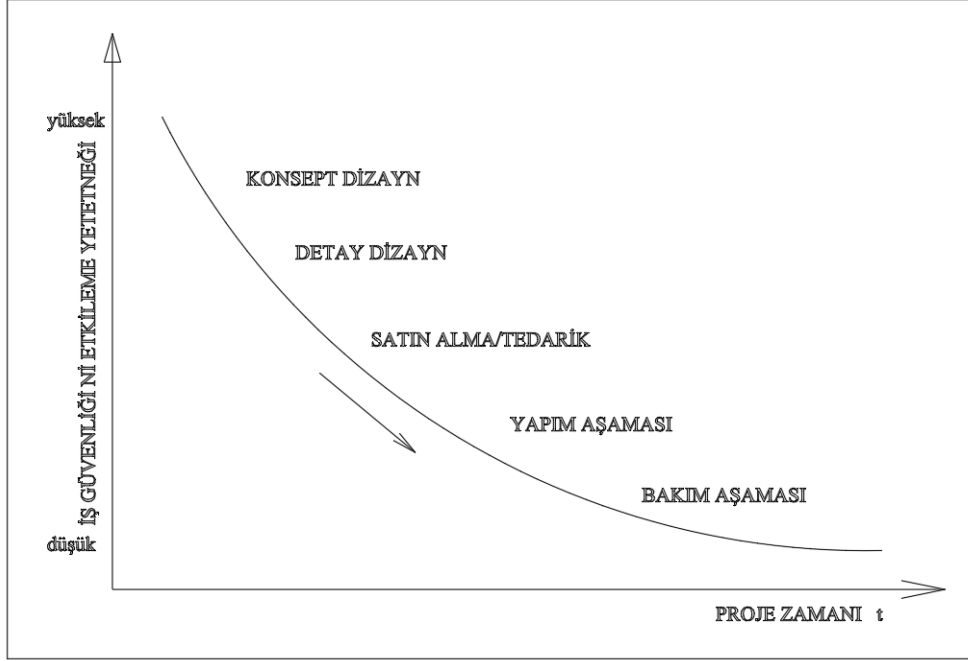
Tablo 2’de, tasarım sürecinin her aşamasında, tasarımcının iş güvenliği açısından yapabilecekleri yer almaktadır (6-12).

Tablo 2 - İş güvenliği sistemi oluşturma aşamaları

AŞAMA	AKTİVİTE
Konsept Dizayn	İş güvenliği ve sağlığı hedeflerini oluşturmak, İş güvenliği tehlikelerini tanımlamak
Ön Dizayn	Bu aşamada mümkünse tehlikeleri ortadan kaldırmak; daha az tehlikeli olacak tehlikeler için risk minimizasyon hedefleri oluşturmak; risk belirleme; risk kontrol alternatifleri geliştirmek
Detay Dizayn	Tüm düşünülen tehlikeleri kaldıracak şekilde süreci planlamak
Satın alma / Tedarik	Kullanılacak Ekipman özelliklerini geliştirin ve tedariklere dahil edin; tedarik edilecek malzeme ve teçhizatın “kontroller ve testlerini” geliştirin
Yapım Aşaması	Şantiye iş güvenliği teşkilatını tanımlayarak , Yüklenici veya taşeronların iş güvenliği kurulunu oluşturun.
İş Güvenliği ve Denetimi	İş güvenliği sağlığı denetimini yürütecek kişi ve kurumları uzmanlık alanına göre belirlemek , “kontroller ve testler” için prosedürleri gerçekleştirin; güvenlik öncesi değerlendirmeleri gözden geçirin; standart işletim prosedürlerinin iş güvenliği sağlığı yönetim sisteminin geliştirilmesi; risk / maruziyet değerlendirmesi; ve kalan risklerin yönetimi
Başlangıç ve Bakım devresi	Eğitim Çalışmalarını temin etmek yol boyu iş güvenliği prosedür ve kontrolünü yenilemek ve geliştirmek



Tasarım sırasında alınan kararların iş güvenliğini etkileme potansiyeli, Şekil 3'te görüldüğü gibi çok yüksektir. Bu nedenle tasarım sürecinde mutlaka iş güvenliğini göz ardı etmeyecek şekilde tasarımın iş güvenliği ile birlikte değerlendirilmesinin doğru olacağı açıktır.



Şekil 3 - Proje aşamalarının iş güvenliğini etkileme yetenekleri, (3).

Bu durumda tasarım yoluyla kazaları önleyebilmek için aşağıdaki çözümler sıralanabilir:

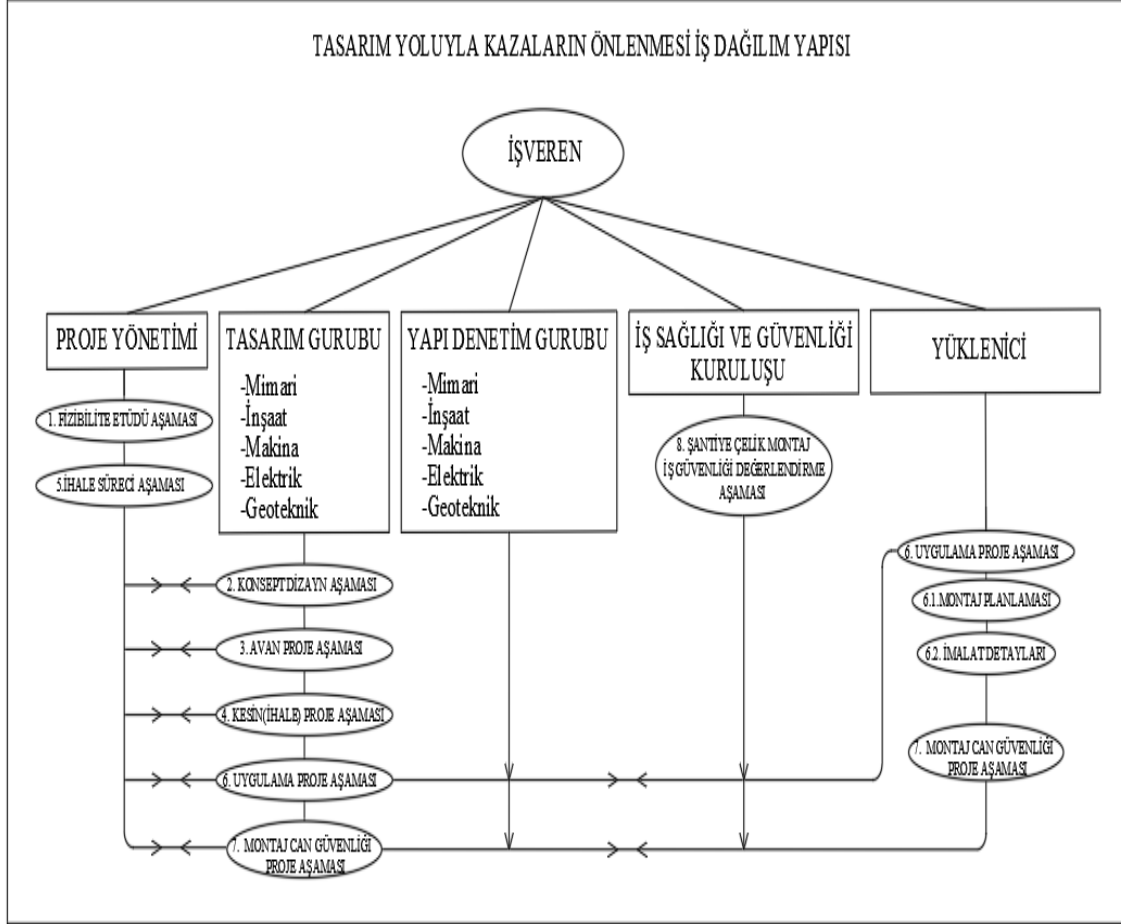
- Zorunlu standartlar ve mühendislik etiği eğitimleri oluşturmak
- İnşaat tehlikelerini belirlemek
- Tasarımda ilgili güvenlik sorunlarını gözönünde tutmak
- Finansal ve mali yükü olmayan çözümler getirmek
- Pratik çözümler ile yapılabilirliği oluşturmak
- Tehlike analizi yapmak
- Güvenliği tasarım belgelerine dahil etmek
- Parça eleman etiketleme ve montaj için bir üç boyutlu modeli oluşturmak

Tasarım yoluyla kazaları önlemede yapılabilirliği ve iş güvenliğini de göz ardı etmeyen uygun dizaynı yapabilmek için tasarımcı tasarımının uygunluğunu aşağıdaki dört parametre ile kontrol etmelidir.

- Yapım Maliyeti
- Yapım Süresi
- Yapım Kalitesi
- İş sağlığı ve güvenliği(Emniyet)

## TASARIM YOLUYLA İŞ KAZALARINI ÖNLEME PROSESİ (T.Y.İ.Ö)

Tasarım yoluyla iş kazalarının azaltılabilmesi için; Önleme beklentilerini oluşturmak; İnşaat ve işletme perspektifini dahil etmek; Önleme sürecini ve araçlarını tanımlamak gerekmektedir. Proje paydaşlarının tanımlanması ile birlikte oluşan süreç Şekil 4'te açıklanmaktadır.



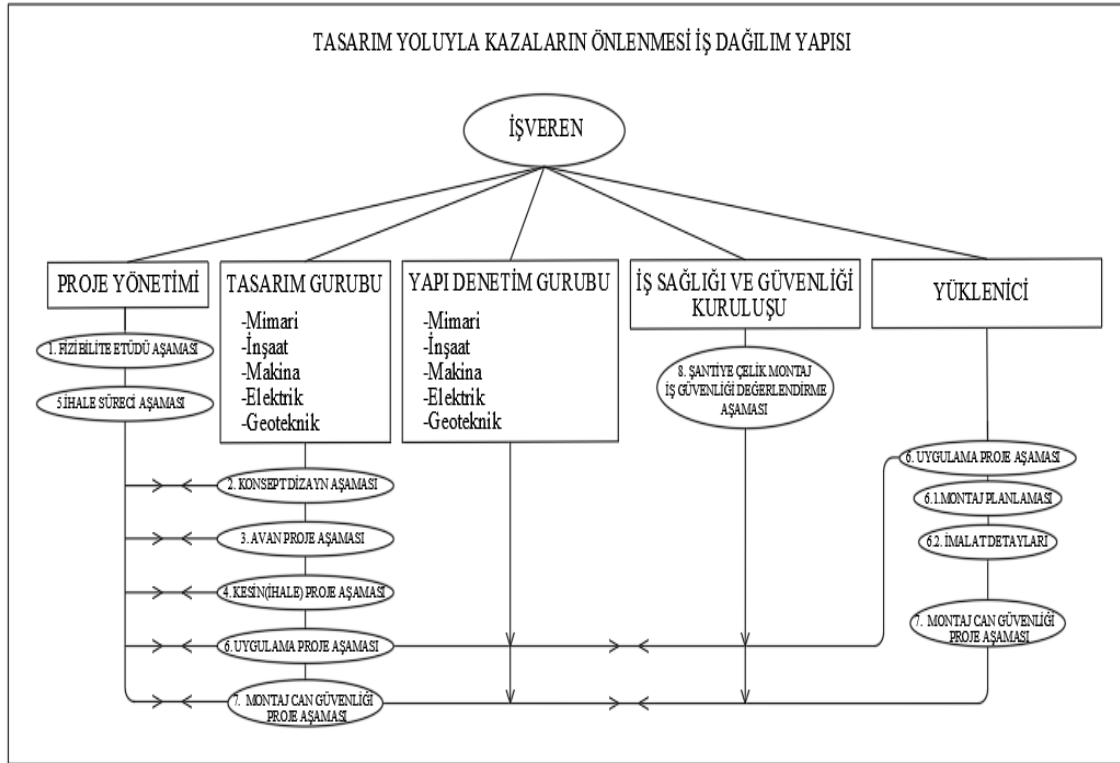
Şekil 4 - Tasarım yoluyla iş kazalarını önleme süreci akış şeması

Öncelikle, tasarım ekibinin ilk toplantısında işin yapım aşamalarında iş kazalarının önlenmesi beklentilerini oluşturmak, şantiyenin işletme perspektifini oluşturarak çalışmaların sıfır iş kazası hedefinde yürütülmesi için koordinasyonun sağlanması beklenmektedir. Dizayn aşamasında yüklenici uzman ekipleri ile iş sağlığı güvenliği uzmanının ve yapı denetim yetkilisinin görüşleri alınarak dizayn aşamalarının yürütülmesi gerekmektedir. Dahili ve harici inceleme aşamalarında işin yapım kalite güvence ve iş sağlığı aşamaları değerlendirilmelidir. Bu incelemeler sonucunda işin yapımı sırasında iş güvenliği sorunu bulunması halinde dizayn aşamasına geri dönüş yapılarak gerekli düzeltmelerin yapılması tasarımcıdan istenilmeli, iş güvenliği sorunları giderilerek dizayn sonlandırılabilir. Bu proje döngüsü iş güvenliği sorunları giderilene kadar devam edebilir.

## PROJE YÖNETİMİNDE TASARIM YOLUYLA İŞ GÜVENLİĞİ SAĞLANMASI ALGORİTMASI

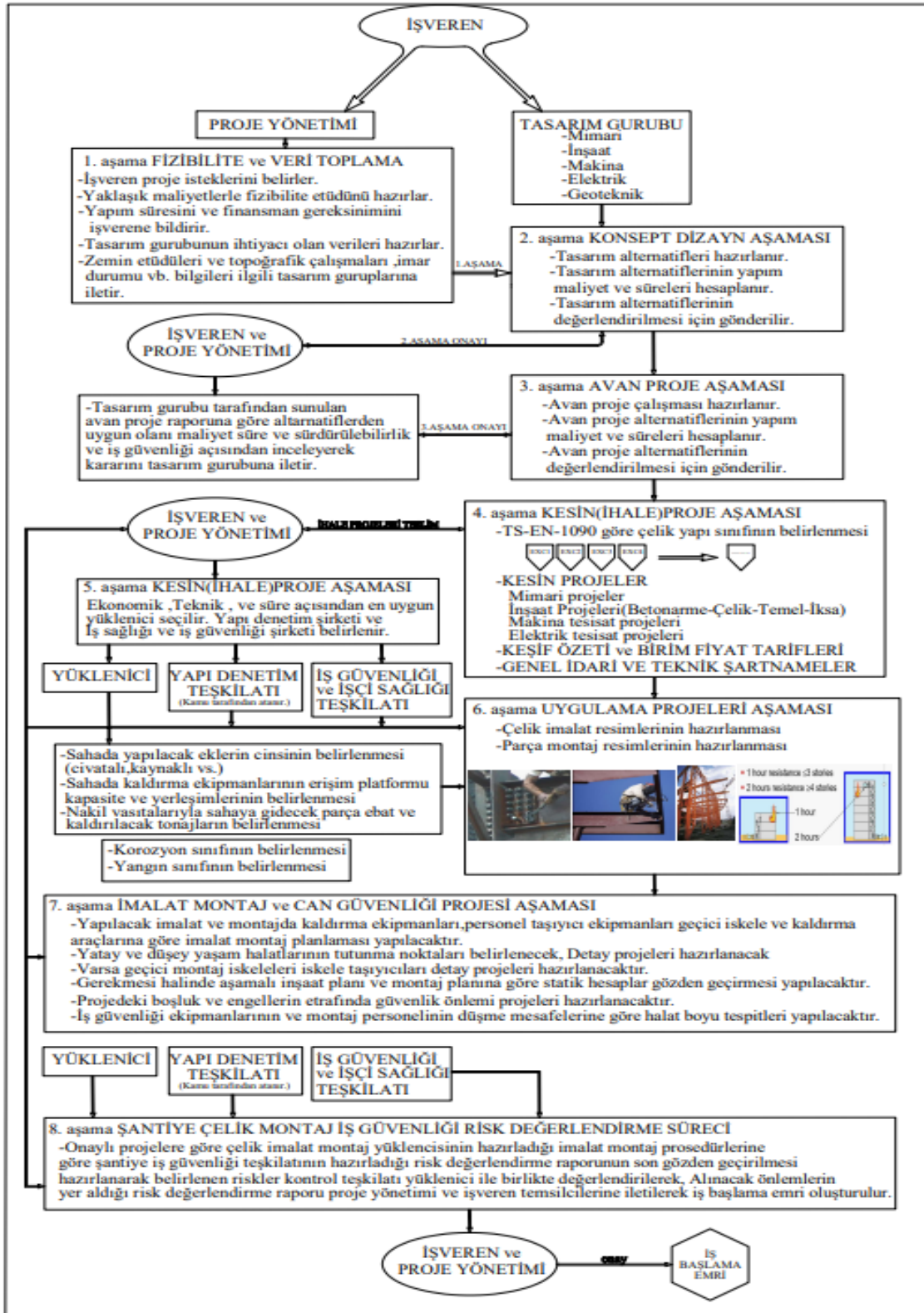
Proje yönetiminde tasarım yoluyla can güvenliğinin sağlanması için sekiz aşamalı bir algoritma düşünülmüştür. Bu aşamalar sırasıyla şunlardan oluşmaktadır.

- 1. Aşama: Fizibilite etüdü aşaması
- 2. Aşama: Konsept dizayn aşaması
- 3. Aşama: Avan Proje aşaması
- 4. Aşama: Kesin proje ve ihale projeleri süreci aşaması
- 5. Aşama: İhale süreci aşaması
- 6. Aşama: Uygulama projeleri aşaması
- 7. Aşama: İmalat montaj ve can güvenliği projeleri aşaması
- 8. Aşama: Şantiye çelik montaj ve iş güvenliği risk değerlendirme aşaması



Şekil 5 - Tasarım yoluyla kazaların önlenmesi iş dağılım yapısı

Şekil 5'teki iş dağılım yapısına bakıldığında ihale projesi aşamasından sonra yüklenicinin veya yüklenicinin alt çelik imalat ve montaj taşeronunun uygulama projesi aşamasında montaj ve imalat detaylarını hazırlayıp gerek tasarım gurubu gerekse iş sağlığı ve güvenliği ve yapı denetim gurubu ile koordinasyon yaparak Montaj ve montaj esnasında can güvenliği proje çalışmalarına onay alması gerekmektedir.



Şekil 6 - Tasarım yoluyla can güvenliğinin sağlanması öneri algoritması

Şekil 6'da verilen algoritmada, birinci aşamada işvereni temsil eden proje yönetimi gurubu fizibilite etüdünü hazırlayarak işin yapılması kararı verildikten sonra tasarımın yapılması için gerekli olan tüm verileri toplayarak tasarım guruplarına iletir. İkinci aşamada tasarım gurubu işveren verilerine göre konsept dizayn aşamasında çeşitli alternatifleri çalışarak her bir alternatifin yaklaşık maliyetini de göz önüne alarak konsept dizayn çalışmasını onay için işveren proje yönetimine gönderir. Yapılan değerlendirme sonuçlarına göre üçüncü aşama olan avan proje aşamasına geçilir, Bu aşamada yapılan alternatifler maliyet ve yapım süresinde göz önüne alınarak değerlendirilmesi için işveren proje yönetimi teşkilatına onay için gönderilerek dördüncü aşama olan kesin proje süreci başlatılır. Bu aşamada TS-EN 1090 çelik yapıların teslim ve yapım kuralları şartnamesine göre çelik yapının sınıfı belirlenir. İhaleye esas olacak kesin projeler tamamlanarak keşif özeti ve birim fiyat tarifleri teknik ve idari şartnameler hazırlanarak işveren proje yönetimine ihaleye çıkması için gönderilir. İhale aşaması ile birlikte yüklenici firma , yapı denetim şirketi ve iş güvenliği işçi sağlığı teşkilatı belirlenir. Bu arada uygulama projesi safhasına geçmek için çelik imalat ve montaj yüklenicisi tarafından sahada yapılacak eklerin cinsi(kaynak, bulon, perçin vs.) belirlenir. Şantiyede kullanılacak kaldırma ekipmanlarının cinsi kapasiteleri ve personel taşıyıcı erişim platformlarının kapasite ve yerleşim bilgileri tasarım gurubuna iletilir. Nakil vasıtalarıyla taşınabilecek parça ebat tonaj bilgileri de uygulama projelerinde göz önüne alınacak şekilde iletir. İşveren proje yönetimi korozyon sınıfını (Galvaniz, Boya, vs.) belirler. Yönetmelik sınırları altında kalmamak kaydıyla yangın dayanım sınıflarını tasarım gurubuna uygulama projelerinde dikkate alması için gönderir. Uygulama projelerinin bu bilgiler ışığında hazırlanmasından sonra yedinci aşama olan imalat montaj iş güvenliği projesi, çelik imalat ve montaj yüklenicisi tarafından hazırlanır. Montaj personelinin kullanacağı yatay ve düşey yaşam hatları ve tutunma noktaları belirlenerek detaylandırılır. Varsa geçici montaj iskeleleri ve iskele taşıma noktaları projelendirilerek tasarım gurubundan onay alınır. Gerekmesi halinde aşamalı inşaat planı ve montaj planına göre statik ve dinamik hesaplar gözden geçirilir. Projedeki boşluk ve engellerin etrafında güvenlik önlemi projeleri hazırlanır. İş güvenliği ekipmanlarının ve montaj personelinin düşme mesafelerine gerekli yaşam halatı boylarının tespiti yapılır. Bu aşamadan sonra sekizinci aşamada çelik imalat ve montaj firması yetkililerin hazırladığı montaj prosedürü ve iş güvenliği projeleri iş güvenliği teşkilatı tarafından değerlendirilir. Alınacak önlemlerinde yer aldığı risk değerlendirme raporu proje yönetiminin onayına sunulur işe başlama emri verilir. Bu aşamalarla birlikte şantiyenin tasarım yoluyla iş başlamadan almış olduğu tüm kararlarda iş güvenliğinin sağlanması planlanmıştır.

## **ÇELİK YAPI PROJE YÖNETİMİNDE TASARIM YOLUYLA İŞ GÜVENLİĞİ SAĞLANMASI AŞAMALARININ İŞ KAZALARINA ETKİ ORANLARI**

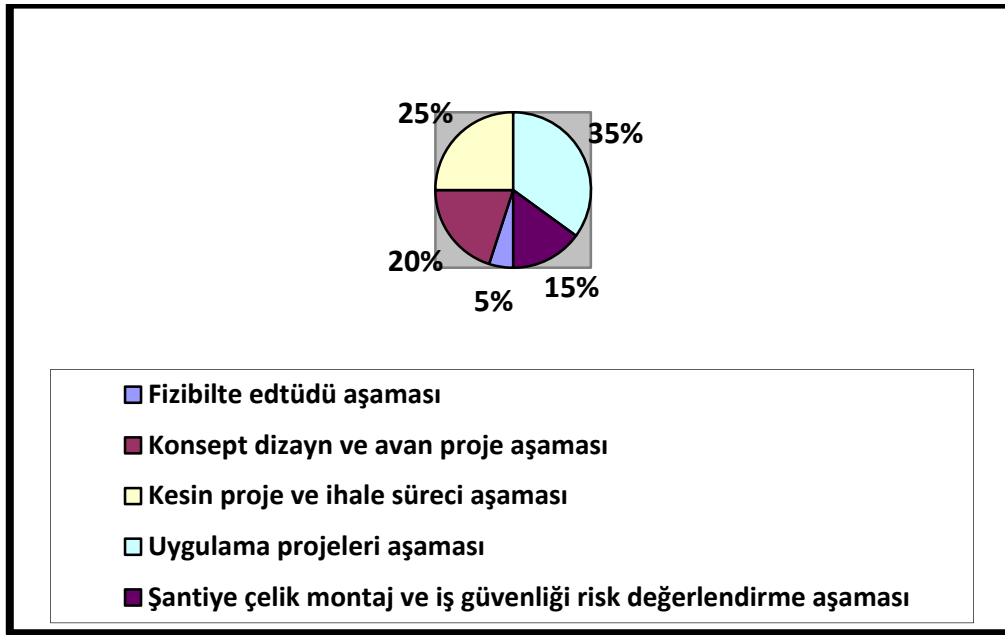
- Fizibilite etüdü aşaması  
Bu aşamadaki kararların iş kazalarına etkileri çok az seviyededir. İş güvenliğine etkisi yoktur.
- Konsept dizayn ve Avan proje aşaması  
Konsept dizayn aşaması kararları iş kazalarına etkisi orta seviyededir. Bu aşamadaki kararlar tasarımın ana kararları olup can güvenliği ile doğrudan ilişkilidir.
- Kesin proje ve ihale süreci aşaması  
Bu aşamadaki çalışmalar ihale genel ve teknik şartnameler ve ihale evraklarında iş güvenliğine verilecek önem seviyesi doğrudan can güvenliği ile bağlantılıdır. Kesin proje aşamalarının ise orta seviyede can güvenliğine etkisi olmaktadır.
- Uygulama projeleri , İmalat montaj ve can güvenliği projeleri aşaması

Bu aşmadaki süreçlerin iş kazalarına etkisi ileri seviyede olup alınacak kararlarda detayların, kaldırma ve montaj ekipmanlarının seçiminin direkt etkisi vardır. Bu aşamanın iş güvenliğine etkisi ileri seviyededir.

- Şantiye çelik montaj ve iş güvenliği risk değerlendirme aşaması

İş güvenliği risk değerlendirme aşamasının iş güvenliğine etkisi yüksek seviyede olup risklerin değerlendirilemediği şantiyelerde iş ve can güvenliği ile ilgili problemlerin yaşanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Yukarıda yer alan aşamaların iş kazalarına etkilerine dair yaklaşık oranlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7 - Tasarım aşamalarının iş kazalarına etkilerinin oranı

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye iş gücünün %16’sı inşaat iş kolunda istihdam edilmektedir. İş ve trafik kazalarından ölümlerin %40’ı inşaat işlerinde meydana gelmektedir. Ortalama yılda iki bin can kaybı yaklaşık yirmi bin yaralanma olmaktadır. İş kazaları için Türkiye de yeterli istatistik çalışma olmamasına rağmen, dünyada ve Avrupada yapılan çalışmalarda (1, 2, 3, 4), tasarım kararlarının uygulamada olabilecek ilgili yaralanmalara önemli ölçüde katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. İş kazalarındaki ölümlerin %25’i tasarımla ilgili sorunlardan kaynaklanmaktadır. Genellikle ölümlü kazalar Düşme, Çarpma, Sıkışma, Vinç kazaları, Elektrik çarpması, Yanma, Kesilme vb. şekillerde görülmektedir. Tasarım yoluyla kazaların önlenmesi için geliştirilen bu algoritmada çalışan personelin kaza riskinin tahmin edilmesi, sıfır kaza hedefinin projede ana hedef olarak kabul edilmesi, gerekmesi halinde işyeri tehlikelerini azaltmak ve ortadan kaldırmak için tasarımda değişikliğe giderek montajda daha güvenilir ekipmanlar kullanmak öne çıkmaktadır. Bu çalışmadaki algoritmaya uygun tasarım hedeflerine gidilmesi halinde, tehlike riskinin azalması dolayısıyla daha az yaralanma, azalmış işçi tazminat sigorta maliyetleri, artan verimlilik, kaza nedeniyle olabilecek gecikme, artan yapımcı-tasarımcı işbirliği, işin durma sürelerinin en aza indirilmesi, şantiye çalışma moralinin yükseltilmesi, işçilik maliyetlerinin azaltılmasına yol açacağı aşikardır. Önerimiz çelik imalat ve montaj işlerinde bu algoritmaya uygun çalışma planlanmasıdır.

Tasarım yoluyla can güvenliğinin sağlanması konusunda özellikle son yıllarda araştırmalar yoğunlaşmıştır. İbrahim ve diğ. (13), yapım mühendisliğinde güncel ve beklenen gelişmelere ilişkin yaptıkları araştırma makalesinde, tasarım yoluyla can güvenliğinin sağlanması konusunda İngiltere, Kuzey Avrupa ülkeleri ve diğer bazı bölgelerde hayat geçirilen yönetmelikler ve kanuni düzenlemeler, etkin bir sistem kurabilmek için kullanılacak araçlar, organizasyon yapısı, tasarım yoluyla can güvenliği konusunda yapılan deneysel çalışmalar, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) yoluyla tasarım aşamasında potansiyel risklerin belirlenmesi, eğitim alanında yapılabilecekler gibi çeşitli başlıklar altında yapılan çalışmalar özetlenmiş, bu kavramın uygulanabilirliği, getirileri ve deneyimlerin sonuçlarına dair ölçülebilir verilere ilişkin çalışmalara ihtiyaç olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Collinge diğ. (14) ise BIM için Tasarım Yoluyla Önleme (PtD) yaklaşımına uygun bir Güvenlik Risk Kütüphanesi oluşturmuştur. İbrahim ve diğ. (16) çalışmasında ise gelişmekte olan ülkelerdeki tasarımcıların Tasarım Yolu ile Önleme (PtD) uygulamaları açısından yetkinliğini değerlendiren ve Malezya, Güney Amerika ve Nijerya özelinde yürüttükleri çalışmalarında, tasarımcıların bu anlamdaki yetkinliklerini artırmak bakımından teorik ve uygulamalı eğitimlere ihtiyaç bulunduğunu ortaya koymuştur. Ülkemizde bu konuda eğitimlerin artırılarak devam etmesi gerekmektedir.

### **Teşekkür**

Çalışmamızın her aşamasında bizi destekleyen Yeditepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat mühendisliği bölüm başkanımız Prof. Dr. Nesrin Yardımcı 'ya teşekkürü bir borç biliriz. Ayrıca üyesi olduğumuz Türk Yapısal Çelik Derneği'ne, verdikleri katkılar nedeniyle teşekkür ederiz

### **Kaynaklar**

1. Bureau of Labor Statistics [BLS] [2003–2009]. Census of Fatal Occupational Injuries. Washington, DC: U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics.
2. BLS [2006]. Injuries, illnesses, and fatalities in construction, 2004. By Meyer SW, Pegula SM. Washington, DC: U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Office of Safety, Health, and Working Conditions
3. “Construction safety and health through design, Michael Behm, PhD, CSP; John Gambatese, PhD, PE; and T. Michael Toole, PhD, Published as a chapter in “Construction Safety Management and Engineering, 2nd Ed. Darryl C. Hill, Editor. Des Plaines,
4. Sou-Sen Leu, Ching-Miao Chang, [2013]. “Bayesian-network-based safety risk assessment for steel construction projects” , Accident Analysis and Prevention 54, Elsevier, 122-133.
5. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions [1991]. From drawing board to building site (EF/88/17/FR).
6. Gambatese JA, Hinze J, Haas CT [1997]. “Tool to design for construction worker safety.” Arch Eng 3(1):2–41.
7. Gambatese JA [1996]. Design for safety. RS101-1. Austin, TX: Construction Industry Institute.
8. Hecker S, Gambatese J, Weinstein M [2005]. “Designing for worker safety: moving the construction safety process upstream.” Professional Safety, Journal of the American Society of Safety Engineers (ASSE) 50(9):32–44.

9. Hinze J, Wiegand F [1992]. "Role of designers in construction worker safety." *Journal of Construction Engineering and Management* 118(4):677–684.
10. Lipscomb HJ, Glazner JE, Bondy J, Guarini K, Lezotte D [2006]. "Injuries from slips and trips in construction." *Appl Ergonomics* 37(3):267–274.
11. Main BW, Ward AC [1992]. "What do engineers really know and do about safety Implications for education, training, and practice." *Mechanical Engineering* 114(8):44–51.
12. Toole TM [2005]. "Increasing engineers' role in construction safety: opportunities and barriers." *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice* 131(3):199–207.
13. Toole TM, Gambatese J [2008]. "The trajectories of prevention through design in construction." *Safety Res* 30(2):225–230.
14. Che Ibrahim, C. K. I., Manu, P., Belayutham, S., Mahamadu, A. - M., Antwi-Afari, M. F., "Design for safety (DfS) practice in construction engineering and management research: A review of current trends and future directions", *Journal of Building Engineering*, Volume 52, 2022, 104352, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104352>.
15. Collinge, W. H., Farghaly, K., Mosleh, M. H., Manu, P., Cheung, C. M., Osorio-Sandoval, C. A., "BIM-based construction safety risk library", *Automation in Construction*, Volume 141, September 2022, Article number 104391, ISSN 09265805, DOI 10.1016/j.autcon.2022.104391.
16. Harrison, D., Hallowell, M., Littlejohn, R., Goodrum, P., Bhandari, S., "The influence of spatial cognition and variability of mental workload among construction hazard prevention through design tasks", *Safety Science*, Volume 152, August 2022, Article number 105770, ISSN 09257535, DOI 10.1016/j.ssci.2022.105770.
17. Che Ibrahim, C. K. I., Belayutham, S., Awuzie, B. O., Oke, A. E., "Analysis of designers' Prevention through Design (PtD) competence in the construction industry: A study of Malaysia, Nigeria, and South Africa", *Safety Science*, Volume 150, June 2022, Article number 105710, ISSN 09257535, DOI 10.1016/j.ssci.2022.105710.
18. Sinha, N. K., Das, R., Sinha, S. B. K., Shalini, K., Das, S., "Prevention through Design in major construction projects - Case study from Tata Steel", 2021 International Conference on Maintenance and Intelligent Asset Management, ICMIAM 2021, Ballarat, 12 December 2021 through 15 December 2021, ISBN 978-166546671-4, DOI 10.1109/ICMIAM54662.2021.9715221.





# HİDROLİK VE SU KAYNAKLARI

Yıllık Standart Süreli Maksimum Yağışların Durağan Olmayan Frekans Analizi <i>Ayşegül Yarcı, Türkey Baran</i> .....	881
Gediz Havzası Örneğinde Entropi Tabanlı Bölgesel Yağış Tahmini <i>Özgür Bozoğlu, Türkey Baran, Filiz Barbaros</i> .....	889
Güncel Hidrometeorolojik Ölçüm Ağı Olmayan Bir Havzada Su Potansiyeli Hesabı: Gürcistan Örneği <i>Eray Usta, Aldonat Köksal</i> .....	899
Milas İlçesinde Rusle Yöntemi Kullanılarak Erozyon Riskinin Belirlenmesi <i>Kutay Yılmaz, Yakup Darama</i> .....	909
Termal Deşarjın Kıyı Bölgesinde Seyrelme Sürecinin Nümerik Modelleme Yöntemiyle İncelenmesi <i>Murat Aksel, Fatih Buğrahan Yorğun, Mehmet Yusuf Erbişim, Şevket Çokgör, Oral Yağcı</i> .....	919



# Yıllık Standart Süreli Maksimum Yağışların Durağan Olmayan Frekans Analizi

Ayşegül YARCI<sup>1</sup>, Türkay BARAN<sup>2</sup>

## ÖZET

Sunulan çalışmada, iklim değişikliğine bağlı olarak durağanlık yapıları değişen yağış süreçlerinin farklı olasılık dağılımlarıyla modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Standart süreli yıllık maksimum yağış (SSMY) verileri kullanılarak tamamlanan çalışma kapsamında, öncelikle SSMY verilerine eğilim testleri uygulanmıştır. Eğilim sonuçlarından bağımsız olarak, incelenen tüm istasyonların farklı sürelerdeki yağışları için hem durağan hem de durağan olmayan kabulleriyle Genelleştirilmiş Ekstrem Değer (GEV) dağılımlarının uygunluğu araştırılmıştır. GEV dağılım parametreleri, parametreler için uygunluk analizleri ile muhtelif yıllık dönüş sürelerinde olması beklenen yağışlar R Studio açık kaynak yazılımında exTremes ve ismev paketleri kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, eğilim gözlenen yağış süreleri için durağan olmayan dağılımların daha uygun olduğu saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Frekans analizi, Durağan olmayan frekans analizi, Standart süreli yıllık maksimum yağışlar, Eğilim, Genelleştirilmiş Ekstrem Değer dağılımı.

## ABSTRACT

### *Non Stationary Frequency Analysis of Annual Standard Duration of Maximum Precipitation*

In the presented study, modelling of precipitation processes under the non-stationary conditions, as a consequence of the climate change, was carried out by using different probability distribution functions. Within the scope of the study, which was modelling Standard annual maximum precipitation data, trend tests were applied first. Regardless of the test results, Generalized Extreme Value (GEV) distributions with both stationary and non-stationary parameters were fitted to the data received from stations for different periods of time. GEV distribution parameters, goodness of the fit of the distributions and the precipitations expected to occur during various return periods were calculated via the exTremes and ismev packages in the R Studio open source software. As a result of the study, it was found that non-stationary distributions are more suitable for precipitation periods where the trend is observed.

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - aysegul.yarci@kavram.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - turkay.baran@deu.edu.tr

**Keywords:** Frequency analysis, Non stationary frequency analysis, Standart duration annual maximum precipitation, Trend, Generalized Extreme Value distribution

## GİRİŞ

Su yapılarının inşası, yüksek maliyetli ve yapımı uzun süren, meşakkatli bir süreçtir. Bu yapıların tasarımı ve planlanması sırasında dikkate alınması gereken ekstrem hidrolojik olayların (sağanaklar gibi) frekans analizi, su mühendislerinin öncelikli çalışma alanına girmektedir. Son yıllarda etkisi artan iklim değişikliği sebebiyle meydana gelen küresel ısınma sonucu yağışlar düzensizleşmiştir. Aşıkoğlu ve Çiftlik, Ege Bölgesinde gözlenen yağışlara eğilim testleri uyguladıkları çalışmalarında Devlet Su İşleri (DSİ) ve Devlet Meteoroloji İstasyonları'na (DMİ) ait 47 istasyonun yıllık yağış verilerinde parametrik Student-t testine göre 15 istasyonda, Mann-Kendall ve Spearman's Rho testine göre ise 14 istasyonda azalış eğilimi tespit etmişlerdir [1].

Yağışlarda gözlenen düzensizleşmeler sonucunda yağışlarda ortaya çıkan eğilimler yağışların durağanlık özelliklerini bozduğundan ekstrem yağışları modellemede durağan olmayan, zamana bağlı olarak değişen parametreler içeren modeller kullanılmalıdır. Wi, Valdes, Steinschneider ve Kim'in, Güney Kore'de 65 yağış istasyonundan alınan 1 - 6 - 12 ve 24 saatlik yağış verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada, tüm yağış süreleri için oluşturulan zaman serilerine durağan ve durağan olmayan model parametreleri ile GEV ve GPD (Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı) dağılımları uydurulmuştur. Dağılımlar arası karşılaştırmalar durağan olmayan modellerden elde edilen tasarım yağışı değerlerinin, aynı zaman serilerine uygulanan durağan modellerden elde edilen tasarım yağışı değerlerinden daha büyük olduğunu göstermiştir [2]. Bu durum durağan modellerle türetilen verilere dayalı tasarım yaklaşımının hatalı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Oruç, Karadeniz Bölgesindeki 17 istasyondan aldığı 5 - 10 - 15 ve 30 dakikalık ve 1 - 3 - 6 ve 24 saatlik maksimum yağış verilerini kullanarak yaptığı çalışmada durağan olmayan frekans analizi gerçekleştirmiştir. Durağan olmayan GEV dağılımının yer ve şekil parametrelerinin zamana bağlı değişecek şekilde, ölçek parametresinin ise sabit kalacak şekilde modellendiği çalışmada, yağış verilerine hem durağan parametrelerle hem de durağan olmayan parametrelerle GEV dağılımları uydurulmuş, model uygunlukları>NNL (Negatif Log Olasılığı) ile test edilmiştir. Sonuçta durağan olmayan parametrelili GEV dağılımı modellerinin model uygunluk testlerine göre geçeceği temsil etmede daha iyi performans sergiledikleri tespit edilmiştir [3].

Bu çalışmalar, ekstrem yağışlar, taşkınlar gibi durumlarda durağan olmayan davranışın gözlenme olasılığı yüksek olduğundan, tasarım aşamasında kullanılacak yağış verilerinin durağan olmayan durumlar göz önüne alınarak modellenmelerinin daha uygun olacağını göstermektedir.

## AMAÇ

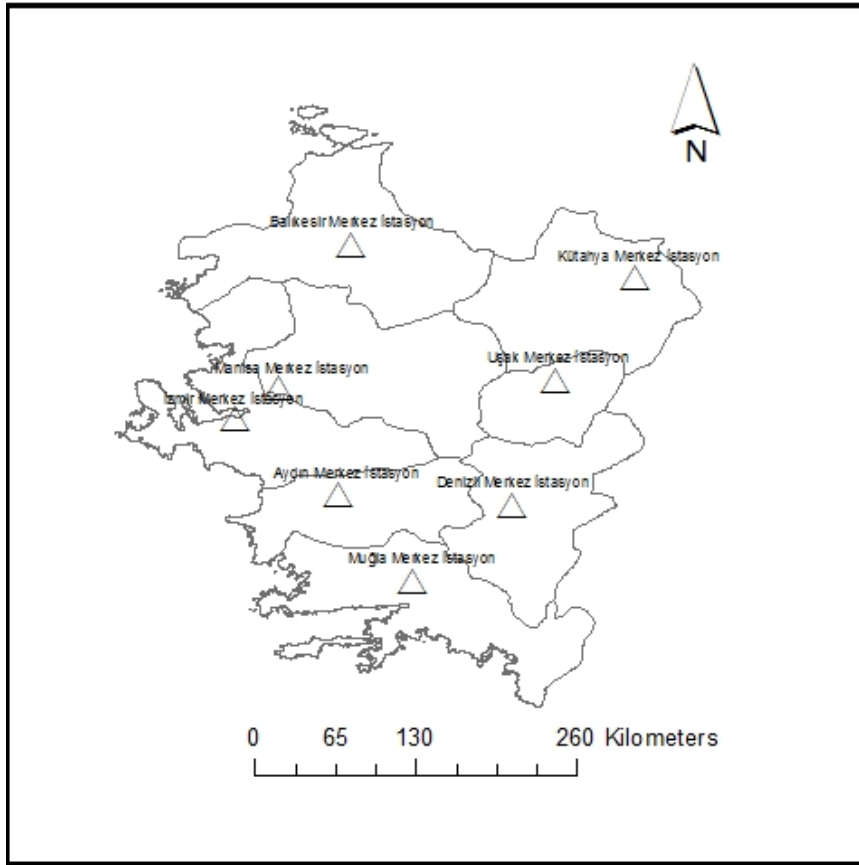
İklim değişikliğine bağlı olarak, incelenen hidrolojik süreçte durağanlık bozulmasının temel nedenlerinden biri yağışlarda artan/azalan eğilim gözlenmesidir. Bu nedenle, özellikle modelleme yapılırken veri analizinin ayrılmaz parçalarından biri eğilim analizleri olmalıdır. Ancak bu adımdan sonra hidrolojik sürecin olasılık modelinin hangi kabuller altında belirleneceği ortaya konulabilecektir. Bu kapsamda gözlenmiş yıllık standart süreli maksimum yağış (SSMY) değerlerinden oluşan seriler önce eğilim açısından araştırılmıştır. Bu amaçla parametrik (Student-t testi) ve parametrik olmayan (Mann-Kendall ve Spearman's Rho testleri) eğilim testleri kullanılmıştır. Ardından tüm yağış süreleri için gözlenmiş SSMY serilerine durağan ve durağan olmayan kabulleriyle olasılık dağılım fonksiyonları uydurulup tasarım yağışı değerleri elde edilmiştir. Süreci temsil eden en uygun modele karar verebilmek için Akaike ve Bayes Bilgi Kriterlerine bakılmıştır. Son olarak elde edilen her dağılım fonksiyonu için muhtelif dönüş sürelerine karşılık gelen yağış miktarı tahminleri yapılmıştır. Çalışmanın amacı, iklim değişikliğine bağlı olarak değişmesi beklenen yağış süreçleri için uygun dağılımı belirleyerek, en uygun tasarım büyüklüğünü belirleyebilmektir.

## ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

Bu çalışmada Ege Bölgesindeki il merkezlerindeki uzun süreli gözlemlere sahip meteoroloji istasyonlarından alınan 5 ila 30 dakikalık ve 1 ila 24 saatlik maksimum yağış verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan verilerin elde edildiği istasyonlara ve yağış sürelerine ilişkin bilgiler Tablo 1’de, istasyonların Ege Bölgesi içindeki konumları Şekil 1’de sunulmuştur.

**Tablo1** - Meteoroloji Genel Müdürlüğü yağış gözlem istasyonları

İstasyon No	İstasyon Adı	Gözlem Aralığı	Yıllık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	Yükseklik
17155	Kütahya	1941-2010	563,6	969m
17186	Manisa	1958-2010	747,3	212m
17188	Uşak	1941-2010	557,6	919m
17220	İzmir	1938-2010	713,8	29m
17234	Aydın	1959-2010	661,7	56m
17237	Denizli	1959-2010	568,7	425m
17292	Muğla	1944-2010	1209,1	646m
18433	Balıkesir	1957-2010	599,4	110m



**Şekil 1** - Meteoroloji Genel Müdürlüğü yağış gözlem istasyonları konumları

## YÖNTEM

### Eğilim Testleri

SSMY verilerine olasılık dağılım fonksiyonu uydurulmadan önce durağan olmayan davranışın saptanabilmesi için, zaman serilerinin eğilim (trend) içerip içermedikleri kontrol edilmelidir. Bu amaçla her bir yağış süresi için gidiş analizlerine bakılmış ardından verilere parametrik Student-t testi ve parametrik olmayan Mann-Kendall ve Spearman's Rho eğilim testleri uygulanmıştır.

Parametrik testler normal dağılıma uyan değişkenlerde eğilimi tespit etmede parametrik olmayan testlere kıyasla daha iyi sonuçlar verebilmektedirler [4]. Ancak hidrometeorolojik veriler genellikle normal dağılıma uymama eğilimi göstermektedirler [5].

Önöz ve Bayazıt tarafından eğilim testleri konusunda gerçekleştirilen bir çalışmada, incelenen hidrolojik süreç normal dağılıma uyduğunda Student-t testinin eğilim tespit etmede Mann-Kendall testine kıyasla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, verilerin çarpıklık katsayısı arttığında parametrik testin performansının düştüğü görülmektedir. Dağılımın çarpıklığının az olması durumunda ise Student-t testi de Mann-Kendall testi kadar iyi performans göstermektedir. Aynı çalışmada, verilerin homojen olması durumunda parametrik olmayan testlerin dağılımın türünden bağımsız olarak eğilimi tespit etmede iyi performans gösterdiği belirtilmektedir [6].

Yue, Pilon ve Cavadas'ın yaptığı çalışmada Mann-Kendall ile Spearman's Rho testlerinin eğilim araştırmalarında hemen hemen aynı sonuçları verdiği belirtilerek, iki yöntemin birlikte kullanımının gerekli olmadığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, Mann-Kendall testinin eğilim tespit etme performansının incelenen sürece ait olasılık dağılımına göre dramatik olarak değiştiği gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre Mann-Kendall testi EV tip3 dağılımında en iyi performansı sergilerken, Lognormal-2 dağılımında en düşük performansı sergilemiştir [7].

Wang vd tarafından yapılan çalışma Mann-Kendall testinin performansının özellikle veri sayısının az olduğu ve/veya varyansın büyük olduğu durumlarda düştüğünü göstermektedir [8].

Yukarıda belirtildiği gibi, eğilim testlerinin performansı konusunda farklı bulgular olduğundan, çalışma kapsamında hem parametrik Student-t testi, hem de parametrik olmayan Spearman's Rho eğilim testi de Mann-Kendall ile çok benzer sonuçlar vermesi beklenmesine rağmen bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Eğilim testlerinin eğilim olan ve olmayan yağış verilerindeki performanslarının karşılaştırılması bulgular bölümünde tartışılmıştır.

### Olasılık Dağılım Fonksiyonları ve Parametre Tahminleri

Hidrometeorolojik olayların görülme sıklığının (frekans) araştırıldığı analiz türüne frekans analizi denir. Frekans analizinde grafik (frekans histogramları ve poligonları) veya analitik yöntemler kullanılabilir. Analitik yöntemde önce gözlenmiş frekansları temsil edebilmesi için verilere olasılık dağılım fonksiyonları uydurulmakta, daha sonra bu dağılım fonksiyonlarının parametre tahminleri yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında yıllık maksimum yağış değerleri ile çalışıldığı için, maksimum değerleri modellemede tercih edilen GEV dağılımı kullanılmıştır.

### Genelleştirilmiş Ekstrem Değer (GEV) dağılım modeli

GEV dağılımı Gumbel dağılımının birinci ikinci ve üçüncü hallerini kapsayan genelleştirilmiş bir matematiksel ifade şeklindedir. GEV dağılımının olasılık dağılım fonksiyonu Denklem 1'de görüldüğü gibidir:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{\kappa(x-\xi)}{\alpha} \right]^{1/\xi} \right\} \quad (1)$$

Denklem 1’de ifadesi verilen olasılık kütle fonksiyonunda  $\xi$  lokasyon parametresi,  $\alpha$  ölçek parametresi ve  $\kappa$  de dağılımın tipini belirleyen şekil parametresidir.  $\kappa = 0$  olduğunda GEV dağılımı Gumbel dağılımına dönüşür.  $|\kappa| < 0,3$  olduğunda ise GEV dağılımının biçimi Gumbel dağılımına benzer.  $\kappa > 0$  olduğunda, dağılım  $\xi + \alpha / \kappa$  ile ifade edilebilen bir üst sınıra sahiptir ve EV tip 3 dağılımına uygunluk gösterir.  $\kappa < 0$  içinse dağılımın yoğunluk fonksiyonu sağa yatık ince bir kuyruğa sahiptir ve EV tip 2 dağılımına uygunluk gösterir.

Çalışma kapsamında kullanılan durağan ve durağan olmayan GEV dağılımının parametre modellemeleri Tablo 2’de görülmektedir.

**Tablo 2 - GEV Dağılımları parametre modellemeleri**

Model	Parametreler		
GEV	$\alpha$ =sabit	$\xi$ =sabit	$\kappa$ =sabit
GEV1	$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$	$\xi$ =sabit	$\kappa$ =sabit
GEV2	$\alpha$ =sabit	$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 t$	$\kappa$ =sabit
GEV3	$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$	$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 t$	$\kappa$ =sabit

### Modellerin Seçimi

Hidrometeorolojik zaman serilerinde süreci en iyi temsil edecek modelin seçimi ve geçerliliği, gelecekte beklenecek olay tahminlerini çok etkileyecektir. Bu nedenle, öngörülen modeller arasında en uygun olanın seçimine yönelik uygunluk testlerinin de yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, süreci en iyi temsil edecek, gelecek tahminini en gerçeğe yakın biçimde verebilecek modelin seçimine karar vermek için, Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ve Bayes Bilgi Kriteri (BIC) kullanılmıştır.

AIC ve BIC, en uygun model seçimini ele alsa da, AIC’de tahmin edilen herhangi bir istatistiksel modelin uyum iyiliği gösterilirken; BIC, farklı sayıda parametreye sahip bir grup parametrik model arasında karmaşıklığın bir ölçütü olarak tanımlanabilir. Model karşılaştırmalarında her zaman en düşük AIC ve BIC değerini veren model tercih edilir.

Akaike Bilgi Kriterinde  $L(\hat{\theta})$  maksimize edilmiş olabirlik fonksiyonu,  $\theta$ , model altında  $\theta$  parametre vektörünün maksimum olabirlik tahmini ve  $k$  modeldeki bağımsız parametre sayısını göstermek üzere eşitlik denklem 2’de gösterilmektedir [9]:

$$AIC = -2\text{Log}L(\hat{\theta}) + 2k \quad (2)$$

Bayes Bilgi Kriterinde  $\theta$ , model (ya da dağılım) parametrelerinin kümesini (veya vektörünü),  $\text{Log}L(\hat{\theta})$ , aday modelin logaritmik en çok olabirlik tahmininde değerlendirildiği değeri ve  $k$ , aday modeldeki tahmin edilen parametre sayısını göstermek üzere eşitlik denklem 3’de gösterilmektedir [10]:

$$BIC = -2\text{Log}L(\hat{\theta}) + k \log n \quad (3)$$

**BULGULAR**

Çalışma kapsamında meteoroloji istasyonların alınan yağış verilerine yapılan eğilim testlerinin sonuçları ve AIC ve BIC'e göre seçilen en uygun modeller Tablo 3 ve 4'de özetlenmektedir.

**Tablo 3 - Eğilim görülen yağış süreleri için en uygun dağılımlar**

İstasyon	Eğilim Görülen Yağış Süreleri	Student-t	Mann-Kendall	Spearman's Rho	En Uygun Dağılım
Aydın	30 dakika ila 12 saat	↑	↑	↑	GEV 3
Balıkesir	5 dakika	↓	↓	↓	GEV 2
İzmir	30 dakika ila 24 saat	↑	↑	↑	GEV 3
Kütahya	12 ila 18 saat	↓	↓	↓	GEV 3
Manisa	24 saat	↓	--	↓	GEV
Muğla	8 ila 18 saat	↓	↓	↓	GEV 3

**Tablo 4 - Eğilim görülmeyen yağış süreleri için en uygun dağılımlar**

İstasyon	Eğilim Görülen Yağış Süreleri	Student-t	Mann-Kendall	Spearman's Rho	En Uygun Dağılım
Aydın	5 dakika ila 15 dakika + 24 saat	--	--	--	GEV
Balıkesir	10 dakika ila 24 saat	--	--	--	GEV
Denizli	5 dakika ila 24 saat	--	--	--	GEV
İzmir	5 dakika ila 15 dakika	--	--	--	GEV
Kütahya	5 dakika ila 8 saat + 24 saat	--	--	--	GEV
Manisa	5 dakika ila 18 saat	--	--	--	GEV
Muğla	5 dakika ila 30 dakika + 1 saat ila 6 saat +24 saat	--	--	--	GEV
Uşak	5 dakika ila 24 saat	--	--	--	GEV

Çeşitli araştırmacılar tarafından normal dağılım gerektirdiği için Student-t testinin performansının düşeceği belirtilmekle birlikte Tablo 3 ve Tablo 4'den görüldüğü gibi, Student-t testi ile Mann-Kendall ve Spearman's Rho testlerinin sonuçlarının -Manisa 24 saatlik yağış verisi hariç- tamamen uyumlu olduğu görülmektedir.

Manisa 24 saatlik yağış verisi için, parametrik Student-t ile parametrik olmayan Spearman's Rho testleri azalış eğilimi gösterirken, Mann-Kendall testi anlamlı bir eğilim yoktur sonucunu vermektedir. Ancak aynı veri seti için GEV dağılımının en uygun olması ile Tablo 4 sonuçları birleştirildiğinde, Manisa 24 saatlik verileri için de Mann-Kendall testinin önerdiği gibi eğilim yok kararının verilmesinin uygun olduğu düşünülmelidir.

Eğilim görülen yağış sürelerinde durağan olmayan parametrelerle kurulan modellerin AIC ve BIC'e göre en uygun dağılımları (GEV2 ve GEV3) simgeledikleri gözlenmektedir. Dolayısıyla, eğilim gözlenen yağış süreleri için tasarım aşamasında iki ya da çoğunlukla üç parametrelili durağan olmayan GEV dağılımlarının kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Tablo 4'de görüldüğü gibi eğilim olmayan yağış süreleri için durağan parametrelerle kurulan standart GEV dağılımlarının hidrolojik süreci temsil etmede daha başarılı oldukları görülmüştür. Dolayısıyla tasarım aşamasına geçilmeden önce, incelenen hidrometeorolojik süreçler için eğilim analizlerinin yapılmasının büyük önem taşıdığı görülmektedir.



## SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma bulgularına göre,

Aydın il merkezinde 5, 10, 15 dakika ve 24 saatlik SSMY değerlerinde eğilim görülmediği için durağan GEV modelinin kullanılabilceği; 30 dakika ve 1 ila 12 saatlik SSMY değerleri için artış eğilimi görüldüğünden durağan olmayan GEV3 dağılımının kullanılmasının uygun olacağı;

Balıkesir il merkezinde sadece 5 dakikalık SSMY değerleri için azalış eğilimi görüldüğünden durağan olmayan GEV2 dağılımının kullanılmasının önerildiği, bunun dışında kalan tüm süreler için eğilim gözlenmediğinden durağan GEV modelinin kullanılabilceği;

Denizli, il merkezinde gözlenmiş SSMY değerleri için tüm sürelerde eğilim gözlenmediği ve tasarım amaçlı yağış değerlerinin belirlenmesinde durağan GEV dağılımının kullanılmasının uygun olduğu;

İzmir il merkezinde sadece 5, 10 ve 15 dakikalık SSMY değerleri için eğilim görülmediği için durağan GEV modelinin kullanılabilceği; 30 dakika ve 1 ila 24 saatlik SSMY değerleri için artış eğilimi görüldüğünden durağan olmayan GEV3 dağılımının kullanılmasının uygun olacağı;

Kütahya il merkezinde 12 ila 18 saatlik SSMY değerleri için azalış eğilimi görüldüğünden durağan olmayan GEV3 dağılımının kullanılmasının önerildiği, bunun dışında kalan tüm süreler için eğilim gözlenmediğinden durağan GEV modelinin kullanılabilceği;

Manisa il merkezinde gözlenmiş SSMY değerleri için tüm sürelerde eğilim gözlenmediği ve tasarım amaçlı yağış değerlerinin belirlenmesinde durağan GEV dağılımının kullanılmasının uygun olduğu;

Muğla il merkezinde 8 ila 18 saatlik SSMY değerleri için azalış eğilimi görüldüğünden durağan olmayan GEV3 dağılımının kullanılmasının önerildiği, bunun dışında kalan tüm süreler için eğilim gözlenmediğinden durağan GEV modelinin kullanılabilceği;

Uşak il merkezinde gözlenmiş SSMY değerleri için tüm sürelerde eğilim gözlenmediği ve tasarım amaçlı yağış değerlerinin belirlenmesinde durağan GEV dağılımının kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir.

Artış eğilimi görülen Aydın ve İzmir İstasyonlarında özellikle taşkın modellemelerinde durağan kabule göre yapılan modellemelerin durağan ve durağan olmayan tasarım yağışı değerleri arasındaki nedeniyle, su yapılarının maruz kalabileceği tasarım debileri açısından risklerin artacağı düşünülmelidir. Bu kapsamda mevcut risklerin durağan olmayan frekans analizleriyle gözden geçirilmesi önerilir.

Muğla ve Kütahya İstasyonlarındaki azalış eğilimleri göz önüne alındığında, tarım ve su kaynaklarının etkin kullanımı açısından yağışların seyrinin daha geniş bir kapsamda araştırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda özellikle meteorolojik kuraklık riski açısından bu bölgelere yönelik çalışmalar yapılması önerilmektedir.

### Semboller



: Artış eğilimi



: Azalış eğilimi

--

: Eğilim yok

GEV

: Genelleştirilmiş Ekstrem Değer Fonksiyonu

GPD

: Genelleştirilmiş Pareto Dağılımı

EV tip 2

: Ekstrem Değer Tip 2 Dağılımı

EV Tip 3	: Ekstrem Değer Tip 3 Dağılımı
$\xi$	: Lokasyon parametresi
$\alpha$	: Ölçek parametresi
$\kappa$	: Şekil parametresi
AIC	: Akaike Bilgi Kriteri
$L(\hat{\theta})$	: Maksimize edilmiş olabilirlik fonksiyonu
$\hat{\theta}$	: Model altında parametre vektörünün maksimum olabilirlik tahmini
k	: Modeldeki bağımsız parametre sayısı
BIC	: Bayes Bilgi Kriteri
$\theta$	: Model (ya da dağılım) parametrelerinin kümesi
$\text{Log}L(\hat{\theta})$	: Aday modelin logaritmik en çok olabilirlik tahmininde değerlendirildiği değer
k	: Aday modeldeki tahmin edilen parametre sayısı

#### Kaynaklar

1. Aşıkoğlu, O. L., and Çiftlik, D., “Recent rainfall trends in the Aegean region of Turkey”, *Journal of Hydrometeorology*, Volume 16, Issue 4, pp 1873-1885
2. Wi, S., Valdés, J. B., Steinschneider, S., and Kim, T. W., “Non-stationary frequency analysis of extreme precipitation in South Korea using peaks-over-threshold and annual maxima”, *Stochastic environmental research and risk assessment*, Volume 30, Issue 2, 2016, pp 583-606
3. Oruç, S., “Non-stationary investigation of extreme rainfall”, *Civil Engineering Journal*, Volume 7, Issue 9, 2021, pp 1620-1633
4. Ucal, M. Ş., “Ekonometrik Model Seçim Kriterleri Üzerine Kısa Bir İnceleme”, *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2, 2016, s 41-56
5. Onyutha, C., “Statistical uncertainty in hydrometeorological trend analyses”, Volume 2016, 2016, 26 p.
6. Önöz, B., and Bayazıt, M., “The power of statistical tests for trend detection”, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Volume 27, Issue 4, 2003, pp. 247-251
7. Yue, S., Pilon, P., and Cavadias, G., “Power of the Mann-Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series”, *Journal of Hydrology*, Volume 259, Issue 1-4, 2002, pp 254-271
8. Wang, F., Shao, W., Yu, H., Kan, G., He, X., Zhang, D., and Wang, G., “Re-evaluation of the power of the Mann-Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series” *Frontiers in Earth Science*, Volume 8, Issue 14, 2020, 12 p.
9. Posada, D., and Buckley, T. R., “Model selection and model averaging in phylogenetics: advantages of Akaike information criterion and Bayesian approaches over likelihood ratio tests”, *Systematic biology*, Volume 53, Issue 5, 2004, pp 793-808
10. Bierens, H. J., “Information criteria and model selection”, *Manuscript*, Penn State University, August 27, 2004, 6 p.

# Gediz Havzası Örneğinde Entropi Tabanlı Bölgesel Yağış Tahmini

Özgür BOZOĞLU<sup>1</sup>, Türkay BARAN<sup>2</sup>, Filiz BARBAROS<sup>3</sup>

## ÖZET

Shannon entropisi, hidrolojik süreçlerin bilgi içeriğini ölçmek için hidroloji ve su kaynaklarında kullanılan bir kavramdır. Entropi, su kaynakları mühendisliğinde belirsizliklerin çözümünde kullanılan araçlardan biridir. Sunulan çalışmada, entropi kavramı kullanılarak, öngörülen uzun dönem yıllık toplam yağışın, bölgesel dağılımı tanımlanmaya çalışılmaktadır. "Şiddet Dağılımı Entropisi - ŞDE" olarak adlandırılan frekans histogramı, her istasyon için kaydedilen uzun dönem toplam aylık yağış verilerinin frekans analizinde kullanılarak, entropi değerleri elde edilmektedir. Her bir ölçüm istasyonu için belirlenen ŞDE değerleri uygulanarak bölgesel analiz ile bir eş-entropi haritası oluşturmak mümkündür. Sunulan çalışma ile ŞDE değerleri kullanılarak Gediz Havzası için oluşturulan eş-entropi haritası aracılığıyla uzun dönemli bölgesel yağış bilgisi tanımlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Su kaynaklarının yönetimi, Entropi, Belirsizlik, Şiddet Dağılım Entropisi, Gediz Nehri Havzası.

## ABSTRACT

### *Entropy Based Regional Precipitation Prediction in the Case of Gediz Basin*

Shannon entropy is a concept used in hydrology and water resources to measure the information content of hydrological processes. Entropy is one of the tools used in the solution of uncertainties in water resources engineering. In the study, the regional distribution of the predicted long-term annual total precipitation is defined by using the concept of entropy. The frequency histogram called "Intensity Distribution Entropy - IDE" is used in the frequency analysis of the long-term total monthly precipitation data recorded for each station to obtain entropy values. It is possible to create an isoentropy map by regional analysis by applying the IDE values determined for each measuring station. In the presented study, regional information was obtained with the maps created for the Gediz Basin using the IDE values.

**Keywords:** Water Resources Management, Entropy, Uncertainty, Intensity Distribution Entropy, Gediz River Basin.

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - zgr\_tmz@hotmail.com

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - turkay.baran@deu.edu.tr

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - filiz.barbaros@deu.edu.tr

## GİRİŞ

Nüfus artışı, teknolojinin gelişmesi gibi etkenler günlük su tüketimini sürekli olarak arttırmaktadır. Talep artışı sonucunda su rezervleri bakımından dünya sıralamasında alt sıralarda yer alan ülkelerde kriz yaşanmaktadır. Su kıtlığının gelecekte dünyamız için daha da büyük boyutlarda bir tehdit oluşturması beklenmektedir.

Su potansiyelinin belirlenme süreci, su kaynakları sistemlerinin planlanmasında ilk sırada yer almaktadır. Potansiyelin belirlenmesinde kullanılan hidrolojik gözlemlerin doğruluğu, güvenilirliği ve hassasiyeti büyük önem taşımaktadır. Diğer yandan, yeni bilgi getirmeyen her ölçüm değeri ülke ekonomisinde kayıplara neden olmakta, ayrıca işlem kalabalığına yol açmaktadır. Bilgi kuramında tanımlanan Shannon'un entropi kavramı, gözlem değerlerinin taşıdığı bilgi miktarını saptamakta nesnel bir ölçüt olarak kullanılmaktadır.

Hidroloji ve su kaynaklarındaki hidrolojik süreçlerin bilgi içeriğini ölçmek için tanımlanan Shannon entropi kavramı, su kaynakları sistemlerinin planlanmasında objektif bir ölçüt olarak kullanılmaktadır.

## Çalışmanın Amacı

Sunulan çalışmanın amacı, entropi teorisini kullanarak uzun dönem yıllık toplam yağışın beklenen değerini belirlemektir. Bu amaçla, gözlemlenen uzun süreli aylık toplam yağışların frekans analizi yapılır ve entropi değerleri "*Şiddet Entropisi - ŞDE*" olarak adlandırılan frekans histogramı ile belirlenir. Frekans histogramı, her istasyon için kaydedilen uzun dönem toplam aylık yağış verilerinin frekans analizinde kullanılarak, entropi değerleri elde edilmektedir. Her bir ölçüm istasyonu için belirlenen *ŞDE* değerleri uygulanarak bölgesel analiz ile eş-entropi haritası oluşturmak mümkündür. Ölçüm istasyonlarının çeşitli gözlem eksikleri olması durumunda dahi, ilgili herhangi bir bilgiyi kaçırmadan, *ŞDE* değerleri ile uzun dönem yağışlar hakkında bölgesel bilgileri tanımlamak mümkün olmaktadır. Ayrıca yağış-yükseklik ilişkilerini oluşturmak için eksik gözlem yıllarına (aylarına) ait verilerin tamamlanmasına gerek yoktur.

Gediz Havzası'nda yapılan çalışmada, *ŞDE* değerlerinin belirlenmesi için uzun dönem verileri olan 44 yağış istasyonu değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Gediz Havzası için, yıllık toplam yağış değerlerinin, *ŞDE* değerleri ( $r = 0.99$ ) ile güçlü istatistiksel ilişkilere sahip olduğunu göstermiştir. Böylelikle, Gediz havzasının su potansiyeli ile aynı anlama gelen yıllık toplam yağışın beklenen değeri için, *ŞDE* değerleri, bölgesel bilgileri tanımlamak için kullanılabilir.

## YÖNTEM

Entropi, Shannon (1948) tarafından tanımlanan, bilgi teorisi kullanılarak, kesikli veya sürekli formda verilen bir rastgele değişkenin, bilinen veya hesaplanan olasılık dağılım fonksiyonu veya olasılık yoğunluk fonksiyonu ile belirlenen bir değerdir (1). Aylık yağışın şiddeti (veya miktarı) rasgele bir değişken olarak ele alındığında, *ŞDE*, Denklem 1 kullanılarak tahmin edilebilir; burada  $p_i$  bir dizi yağışta meydana gelme olasılığı olarak alınmıştır.

$$H = \sum_{i=1}^k p_i \log p_i \quad (1)$$

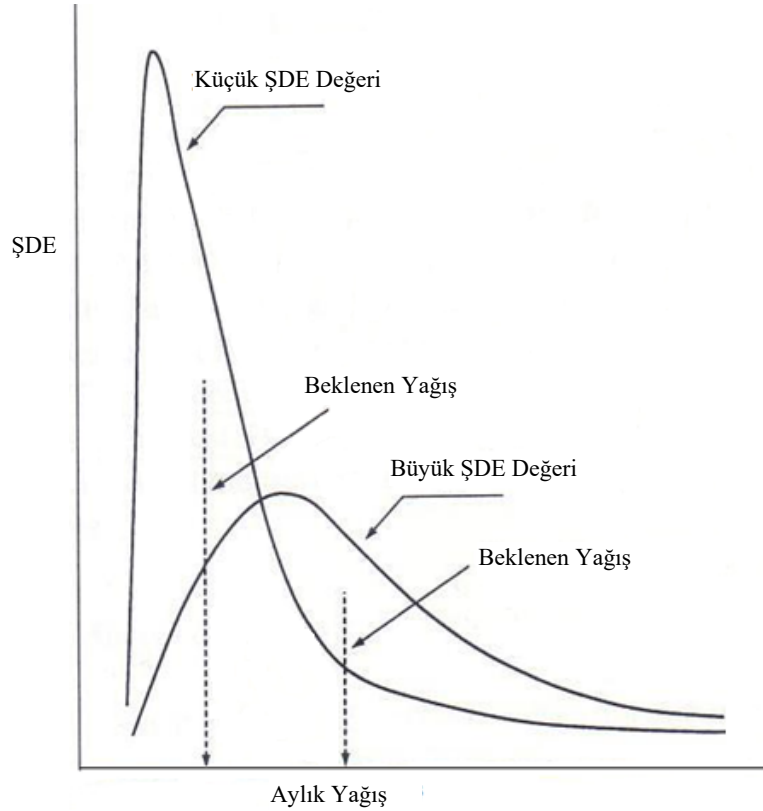
Belirli bir yağış için olasılıklar, mevcut tüm aylık yağış değerleri ve bunların meydana gelme olasılıkları dikkate alınarak ayrı bir biçimde ifade edilir. *ŞDE* belirlenirken aşağıdaki adımlar takip edilir:

- $m$ -yıllık kümelerdeki aylık yağış verileri, herhangi bir dizi özelliği olmaksızın tek bir veri kümesi altında listelenir,

- (b) Aylık yağış aralığının tamamı aynı sınıf aralığında  $n$  adet sınıfa ayrılır,
- (c) Daha sonra frekans dağılım tablosu hazırlanması için, her bir  $i$  sınıfı için,  $f_i$  frekans değerleri sayılır,
- (d) Her  $i$  sınıfı için nispi frekans ( $f_i/N$ ), olasılık yoğunluk fonksiyonu ile tüm aylık yağış aralığı için ayrı bir biçimde hesaplanır ve,
- (e) Bu göreceli frekanslara dayalı olarak,  $\$DE$  değerleri Denklem 2 kullanılarak hesaplanır; burada;  $n$ , sınıf sayısı;  $f_i$ ,  $i$ . sınıfının frekansıdır.  $\$DE$  değerlerinin hesaplanmasında  $e$  tabanında logaritma kullanıldığında, entropi değeri birimi “*napiier*”; 2 tabanında logaritma kullanılıyorsa “*bit*” olarak elde edilir (2). Dolayısıyla, sunulan çalışma kapsamında, Denklem 2 kullanılarak hesaplanan  $\$DE$  değerleri “*napiier*” biriminde elde edilmiştir.

$$\$DE = \sum_{i=1}^k \frac{f_i}{N} \ln \frac{f_i}{N} \quad (2)$$

Beklenen yağış değerleri, artan  $\$DE$  sonuçları ile Şekil 1'de verilen biçimde artmaktadır. Bu,  $\$DE$ 'nin beklenen yağış ile pozitif korelasyona sahip olduğunu ve bu nedenle toplam yağış miktarının tahminine bir alternatif olabileceğini düşündürmektedir (3, 4).  $\$DE$ , istasyonlar farklı gözlem periyotlarına sahip olsa bile bölgesel bilgileri tanımlamak için kullanılabilir. Yöntemin bir diğer avantajı da, eksik gözlem yıllarının tamamlanmasına, yükselti-yağış ilişkilerinin ve orografik haritaların tanımlanmasına gerek olmamasıdır. Gözlemlerin rastgele olduğu ve dolayısıyla aralarında otokorelasyon olmadığı kabul edilmektedir (5).



Şekil 1 - Artan  $\$DE$  değeri ile artan beklenen yağış miktarı.

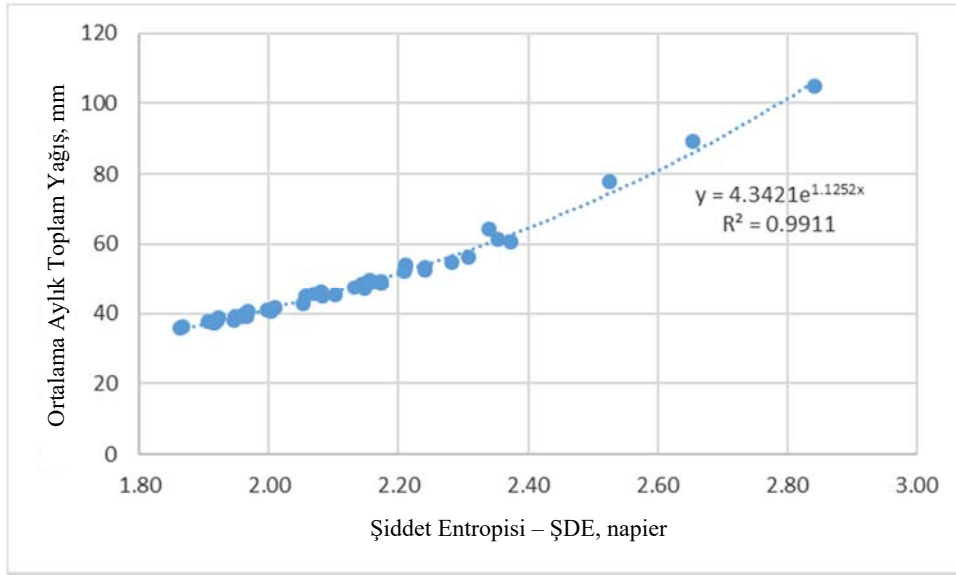


**Tablo 1** - İstasyonların Toplam Yıllık Yağış ve Entropi Değerleri.

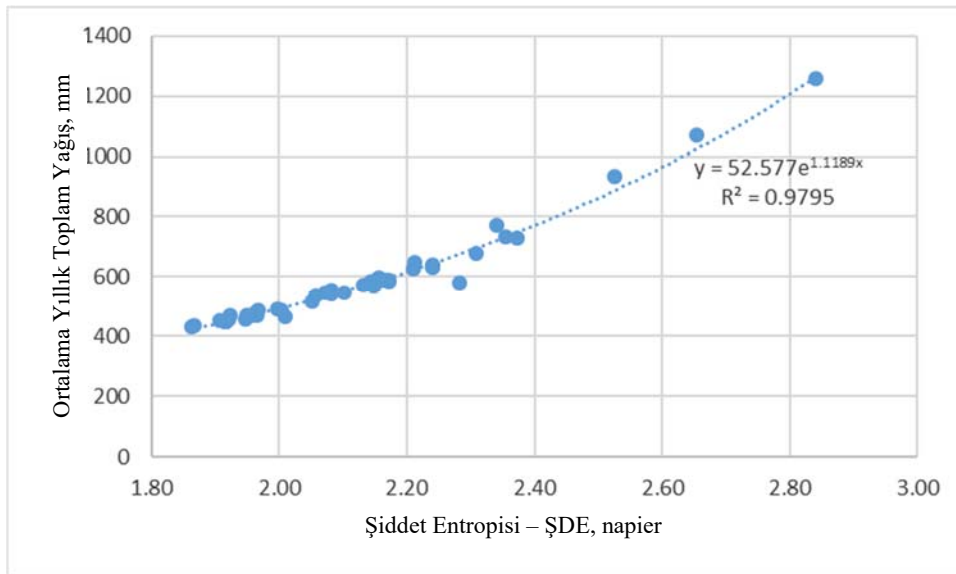
İstasyon Adı	Yükseklik (m)	Yıllık Toplam Ortalama Yağış	ŞDE değerleri
Ahmetli	100	485.66	1.9667
Akhisar	93	585.11	2.1725
Alaşehir	189	467.22	1.9221
Avşar Dam	275	430.54	1.8622
Beşyol	530	772.68	2.3399
Borlu	250	541.12	2.0823
Bozdağ	1150	1258.62	2.8409
Buldan Dam	470	468.34	1.9572
Çınardibi	705	932.89	2.5249
Demirci	851	581.42	2.2826
Demirköprü Dam	290	466.32	2.0095
Dindarlı	685	455.37	1.9459
Doğanlar	650	630.46	2.2410
Eşmataşköyü	930	468.63	1.9653
Fakılı	715	447.13	1.9151
Foça	10	555.24	2.0808
Gediz	825	569.79	2.1322
Gölmarmara	150	546.23	2.1026
Gördes	550	638.46	2.2399
Göynükören	1020	467.93	1.9484
Güre	650	452.27	1.9066
Hacırahmanlı	45	483.33	1.9653
Hanya (Güneşli)	640	634.88	2.2409
İçikler	710	568.13	2.1477
Kavakalan	460	625.49	2.2097
Kemalpaşa	200	1071.88	2.6545
Kıranşih	670	589.25	2.1659
Köprübaşı	250	447.80	1.9166
Kula	675	590.45	2.1728
Manisa	71	728.83	2.3722
Marmara Lake Reg.	75	435.23	1.8667
Menemen Topraksu	10	537.57	2.0571
Muradiye	25	648.74	2.2117
Ören	940	735.21	2.3539
Salihli	111	490.15	1.9979
Sarıgöl	225	486.72	2.0030

**Tablo 1** - İstasyonların Toplam Yıllık Yağış ve Entropi Değerleri. (devam)

İstasyon Adı	Yükseklik (m)	Yıllık Toplam Ortalama Yağış	ŞDE değerleri
Sarılar	340	595.23	2.1563
Saruhanlı	50	454.74	1.9198
Selendi	575	514.42	2.0522
Süleymanköy	240	472.56	1.9604
Şaphane	925	677.85	2.3085
Turgutlu	120	584.02	2.1441
Üçpınar	100	547.93	2.0710
Yukarı Poyraz	630	588.53	2.1617



**Şekil 3** - Gediz Havzasında Ortalama Aylık Toplam Yağış ve ŞDE değerlerinin ilişkisi.



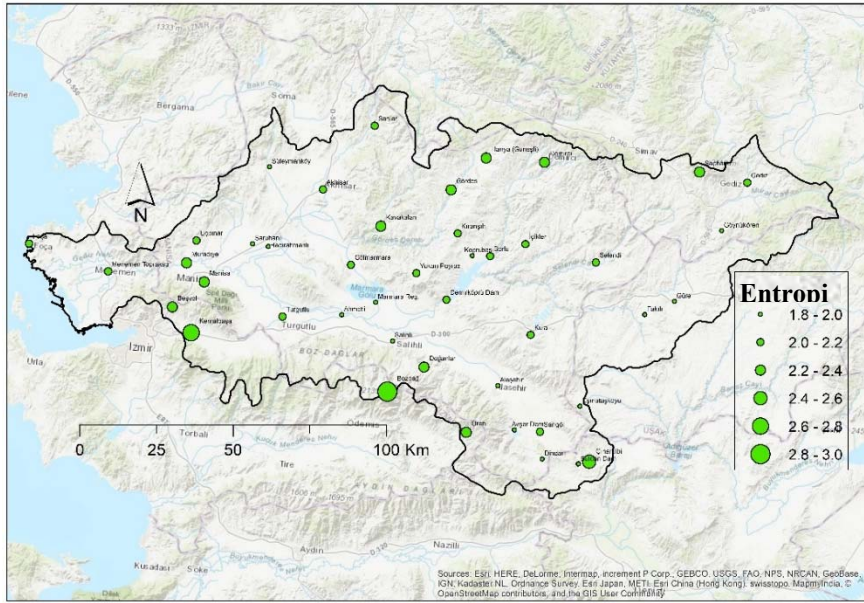
**Şekil 4** - Gediz Havzasında Ortalama Yıllık Toplam Yağış ve ŞDE değerlerinin ilişkisi.



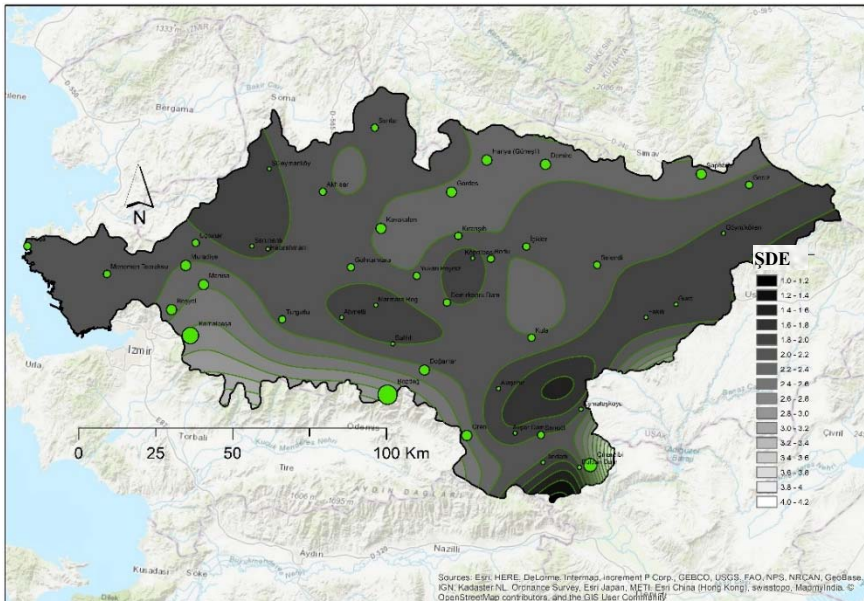
Tüm istasyonlar değerlendirildiğinde, gözlem süresi boyunca, hem ortalama aylık toplam yağış (Şekil 3), hem de yıllık ortalama toplam yağış miktarı (Şekil 4) sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu görülmektedir.  $\$DE$  ile ortalama aylık/yıllık toplam yağış arasındaki dönüşüm korelasyonları, logaritmik ilişki için yüksek istatistiksel bağımlılık göstermektedir (Aylık değerler için  $R^2 = 0.991 \rightarrow r = 0.996$  ve yıllık değerler için  $R^2 = 0.979 \rightarrow r = 0.990$ ).

Yıllık toplam yağış değerleri ile hesaplanan  $\$DE$  değerleri ( $r = 0,99$ ) grafiksel analiz ile değerlendirilmiş ve Şekil 4'de verilen grafikten, Denklem 3'te verilen ilişki elde edilmiştir.

$$P = 52,58. e^{1,12 (\$DE)} \quad (4)$$



Şekil 5 - Gediz Havzası için belirlenen  $\$DE$  değerleri.



Şekil 6 - Gediz Havzası için  $\$DE$  Dağılımı.

Gediz havzası için belirlenen  $\$DE$  değerleri ve bölgesel  $\$DE$  dağılımı Şekil 5 ve 6'da sunulmuştur. Bölgesel dağılım,  $\$DE$  değerlerinin Spline algoritması ile havza çapında enterpolasyonu yoluyla elde edilmiştir ve Şekil 9'da sunulmuştur. Araştırmacılar, Şekil 6 ve Denklem 4'ü kullanarak, uzun vadede brüt su potansiyeli anlamına gelen, yıllık toplam yağış miktarını tahmin edebileceklerdir.

## SONUÇLAR

Shannon'ın entropi teorisine dayanan *Şiddet Dağılımı Entropisi* yöntemini kullanarak, yağış düzensizliği açısından potansiyel su kaynaklarının mevcudiyetini değerlendirmek için sunulan çalışma kapsamında bir yöntem önerilmektedir. Ortalama, standart sapma ve varyans gibi geleneksel istatistiklerden farklı olarak, entropi yöntemi, potansiyel su kaynaklarının mevcudiyetinin değerlendirilmesi için değişken aylık yağışlar tarafından oluşturulan bilgi içeriğine odaklanır.

Sunulan çalışmada, uzun vadeli yıllık toplam yağışın beklenen değeri, entropi teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Gözlemlenen uzun süreli aylık toplam yağışın frekans analizi yapılır ve entropi değerleri, frekans - "*Şiddet Dağılımı Entropisi - \\$DE*" histogramı ile belirlenir.

Bu çalışma kapsamında aylık yağış şiddetleri (aylık toplam yağış) rastgele değişken olarak alınmıştır. Değişkenin seçilen bir zaman diliminde meydana gelme olasılığı (sıklığı) ile aylık yağış şiddeti arasındaki ilişki, entropi tabanlı ifade olarak tanımlanmıştır.  $\$DE$ , istasyonlar farklı gözlem aralıklarına sahip olsa bile bölgesel bilgileri tanımlamak için kullanılır.

İklim değişikliğinin herhangi bir etkisinden kaçınmak için mevcut tüm veriler eğilim analizleri ile incelenmiştir. Mevcut verilerden herhangi bir bilgiyi kaçırmadan bölgesel bilgileri tanımlamak ve entropi kavramı ile bölgesel bilgileri doğru bir şekilde elde etmek için, mevcut tüm veriler kullanılarak doğrulanmış bir bölgesel sınıf aralığı belirlenmiştir.

Önerilen yöntemin avantajı, araştırmacıların farklı dönemlerdeki tüm veri setlerini uygulamada kullanmalarının mümkün olmasıdır. Böylelikle, benzer yöntemlere alternatif olarak daha basit-hızlı-güvenilir ve güçlü bir araç elde edilmiştir.

## Kaynaklar

1. Shannon, C. E., Mathematical Theory of Information. The Mathematical Theory of Information, the University of Illinois Press: Urbana, IL, USA, Vol. 27, 1948, ss. 170–180.
2. Bozoğlu, Ö., Baran, T., Barbaros, F., Entropy Based Regional Precipitation Prediction in the Case of Gediz River Basin. *Teknik Dergi*, 2022, 33 (4), DOI: 10.18400/tekderg.724164.
3. Maruyama T., Kawachi T., Singh V. P., Entropy-based Assessment and Clustering of Potential Water Resources Availability. *Journal of Hydrology*, Vol. 309, 2005, ss. 104-113.
4. Barbaros, F., Batı Karadeniz Havzası yağış değişkenliklerinin entropi tabanlı bir yaklaşımla değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 344-356, DOI: 10.17714/gumusfenbil.995514.
5. Temiz Ö., Baran T., Determination of Expected Value for Monthly Total Precipitation by Entropy Based Method Case Study: Gediz Basin. 10<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering, Bildiri No. 769, 2012, 10 s.
6. Baran T., Harmancıoğlu N., Çetinkaya C. P., Barbaros F., An Extension to the Revised Approach in the Assessment of Informational Entropy. *Entropy*, 2017, 19(634), DOI: 10.3390/e19120634.

7. DSİ - Devlet Su İşleri II. Bölge Müdürlüğü -İzmir, Gediz Havzası Çevre Master Planı, 2005.
8. Baran, T., Barbaros, F., Gül, A., Gül Onuşluel G. (2018) Entropy as a Variation of Information for Testing the Goodness of Fit. *Water Resources Management* 32, 5151–5168, DOI: 10.1007/s11269-018-2144-9.



## Güncel Hidrometeorolojik Ölçüm Ağı Olmayan Bir Havzada Su Potansiyeli Hesabı: Gürcistan Örneği

Eray USTA<sup>1</sup>, Aldonat KÖKSAL<sup>2</sup>

### ÖZET

*Su kaynaklarının etkin yönetimi için gerekli olan en önemli noktalardan biri su potansiyeli miktarının saptanmasıdır. Bu sebeple, güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan havzalarda, uzaktan algılama metotlarıyla elde edilen meteorolojik verileri girdi olarak kullanabilen hidrolojik modellerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma kapsamında güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan Gürcistan'ın Kvemo-Kartli bölgesi sınırları içerisinde bulunan Mashavera Nehri üzerinde sulama ve enerji amaçlı olarak yapılması planlanan barajın su potansiyeli tahmini HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) hidrolojik modeli kullanılarak 1991-2021 periyodu için yapılmıştır. Model parametreleri aks yerinde 1981-1993 yılları arasında ölçümü olan akım gözlem istasyonunun ölçümleriyle kalibre edilmiştir. Nash-Sutcliffe Verimlilik ölçütü kullanılarak performansı değerlendirilen modelin başarıları sayılabilecek ve umut vadeden sonuçlar verdiği gözlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Su potansiyeli, Uzaktan algılama, HBV, Nash-Sutcliffe.

### ABSTRACT

#### **Calculation of Water Potential for a Watershed without Current Hydrometeorological Measurement Network: Case Study of Georgia**

*One of the most critical points required for effective water resources management is to determine the water potential. For this reason, the importance of hydrological models that can use meteorological data obtained by remote sensing methods as input in watersheds that do not have a current hydrometeorological measurement network has been increasing day by day. Within the scope of this study, the water potential of the dam, which is planned to be constructed for irrigation and energy purposes on the Mashavera River located within the borders of the Kvemo-Kartli region of Georgia, which does not have a current hydrometeorological measurement network, was performed for the period 1991-2021 using the HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) hydrological model. The model parameters were calibrated with the measurements of the streamflow gauging station, which was measured at the dam axis between*

---

1 Tractebel Hidro Dizayn Müh. A.Ş., Ankara - eusta@hidrodizayn.com

2 Tractebel Hidro Dizayn Müh. A.Ş., Ankara - aldonatkoks@hidrodizayn.com

*1981-1993. It was observed that the model, whose performance was evaluated using the Nash-Sutcliffe Efficiency criterion, gave promising results that could be considered successful.*

**Keywords:** *Water potential, Remote sensing, HBV, Nash-Sutcliffe.*

## 1. GİRİŞ

Önümüzdeki yıllarda, dünya genelinde artan nüfus ve her geçen gün etkisini daha da hissettiren iklim değişikliği ile birlikte milyonlarca insanın su stresine maruz kalması beklenmektedir. Bu nedenle, su kaynaklarının etkin yönetimi giderek daha önem kazanmaktadır (1). Özellikle, akarsuların su potansiyeli tahminleri; sulama ve enerji planlaması, taşkın kontrolü, mühendislik yapı tasarımı, su kaynaklarının kullanımı ve ekohidrolojik hizmetler gibi çeşitli alanlarda hayati rol oynamaktadır (2). Geleneksel olarak akarsu su potansiyeli hesabında hidrometeorolojik ölçümler kullanılmaktadır. Bununla birlikte; pratik uygulamalarda, yeterli ve doğru akarsu gözlemleri olmaksızın, çoğu zaman ölçüm yapılmamış veya yetersiz ölçülmüş havzalarda çalışmak gerekmektedir. Bu durumda su potansiyeli tahmini için bir dizi yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlar arasında, ölçümü olan komşu havzalardan ölçümü olmayan havzalara ekstrapolasyon, yersel ölçümler ve/veya uzaktan algılama ile meteorolojik girdilerin belirlendiği proses tabanlı hidrolojik modellerin kullanılması ve meteorolojik girdileri belirtmeye gerek kalmadan kombine meteorolojik-hidrolojik modellerin uygulanması yer almaktadır (3, 4).

Bu çalışma kapsamında akım, yağış, sıcaklık gibi veriler için güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan Gürcistan'ın Kvemo-Kartli bölgesi sınırları içerisinde bulunan Mashavera Nehri üzerinde sulama ve enerji amaçlı olarak yapılması planlanan barajın su potansiyeli; uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilen uydu tabanlı meteorolojik veriler kullanılarak HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) hidrolojik modeli çalıştırılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılan HBV modeli, İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsü (SMHI) tarafından geliştirilmiştir (5). Literatürde geniş bir kullanıma sahip olan HBV modeli, farklı iklim koşullarında ve küçük araştırma havzalarından kıtasal ölçek boyutlarına kadar 90'dan fazla ülkede kullanılmış olup başarılı sonuçlar vermiştir. Bu başarının temeli, HBV'nin hidrolojik süreçleri ve modelleme stratejisini sağlam ve karmaşık olmayan bir kavramsallıkta tanımlamasına dayanmakta olduğu düşünülmektedir (6).

### 1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan Mashavera Nehri havzası için uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilen uydu bazı yağış ve sıcaklık verilerini HBV modeli için girdi olarak kullanarak aynı havza için geçmiş yıllardaki akım ölçümleriyle kalibrasyon ve doğrulama işlemlerinin ardından güncel su potansiyeli tahmini yapmaktır. Son yıllarda, yüksek zamansal ve mekansal çözünürlüğü sahip uydu tabanlı yağış ve sıcaklık verileri küresel olarak su kaynakları yönetimini desteklemek için hidrolojik analizlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (7-10). Bu çalışmada da uydu tabanlı yağış ve sıcaklık verileri hidrolojik modelde kullanılmış olup performansları değerlendirilmiştir.

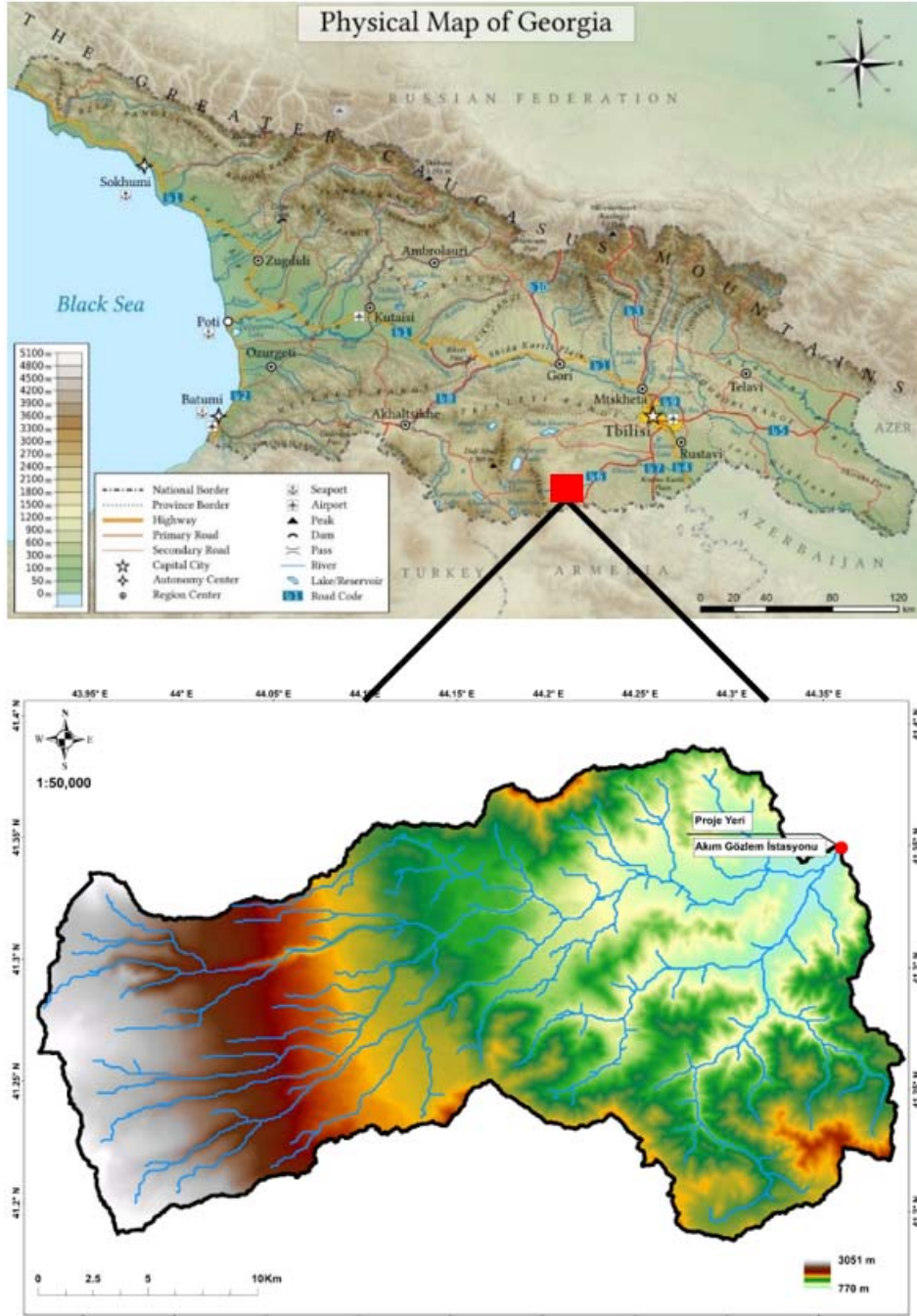
## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak seçilen Mashavera Nehri havzası, Küçük Kafkasya'nın güneydoğu yamacından Kvemo-Kartli bölgesinin ovalarına geçiş bölgesinde yer almaktadır. Proje alanında, orta derecede soğuk kış ve sıcak yaz ile kuru bir subtropikal iklim gözlenir (11). Proje alanı Gürcistan'da tarımın yoğun olarak yapıldığı ve başkent Tiflis'in tarım ürünleri anlamında

ihtiyacının büyük bir bölümünün karşılandığı bir merkezdir (12). Dolayısıyla etkin su yönetimi tarımsal sulama için büyük önem taşımaktadır.

3051 m ile 770 m kotları arasında uzanan çalışma havzasının büyüklüğü 570 km<sup>2</sup>'dir (Şekil-1). Havzanın ortalama kotu 1675 m, ortalama eğimi ise %21 olarak hesaplanmıştır. Mashavera Nehri havzasına ait fiziksel özellikler hesaplanırken Amerikan Jeoloji Araştırma Servisi (USGS) kaynaklı SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) topografik verisi kullanılmıştır. Yaklaşık 30 m hassasiyete sahip SRTM topografik verisinin çözünürlüğü bu boyuttaki çalışmalar için yeterlidir (13).



Şekil 1 - Proje Alanı ve Mashavera Nehri Havzası

## **2.2. Veri Seti**

### **2.2.1. Akım Gözlemleri**

Akım gözlemleri, Mashavera Nehri üzerinde planlanan baraj aks yerinde 1942-1993 periyodunda ölçümleri bulunan akım gözlem istasyonundan toplanmıştır. 1990'lı yılların başlarından itibaren Sovyetler Birliği'nin dağılmasıyla ortaya çıkan ülkelerde olduğu gibi Gürcistan genelinde de hidrometeorolojik ölçüm ağı çalıştırılmamıştır. Dolayısıyla güncel akım gözlemleri mevcut değildir (14). Kalibrasyon ve doğrulama işlemleri için periyot 1981-1993 yılları arası olarak seçilmiş olup bu periyot CHIRPS veri setinden elde edilen yağış ve ERA5 veri setinden elde edilen sıcaklık girdilerinin ortak ölçüm periyodu dikkate alınarak belirlenmiştir.

### **2.2.2. CHIRPS Yağış Verisi**

Hidrolojik modelde yağış verisi olarak 1981'den günümüze kadar ölçümü bulunan 0.05° mekansal çözünürlüğe sahip CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations), yarı küresel (50° G–50° K, 180° Doğu–180° W) veri seti kullanılmıştır (15). ABD Jeolojik Araştırma Dünya Kaynakları Gözlem ve Bilim Merkezi ve California Üniversitesi'ndeki Santa Barbara İklim Tehlikeleri Grubu tarafından geliştirilen CHIRPS, birden fazla veri kaynağına dayanan nispeten yeni bir yağış ürünüdür (16). Bu veri tabanı, küresel klimatolojiler, uydu tahminleri ve yerinde gözlemler dahil olmak üzere üç tür bilgiyi kapsar. CHIRPS verileri, 1981'den günümüze kadar olan yağış zaman serilerini sağlayarak, uzun vadeli hidrolojik analiz ve simülasyon için kullanılmasına izin verir (9). Literatürde dünyanın farklı bölgelerinde CHIRPS veri setinden elde edilen günlük toplam yağış verisinin girdi olarak kullanıldığı hidrolojik modellerde umut vadeden sonuçlara ulaşılmıştır (9, 17-20).

### **2.2.3. ERA5 Sıcaklık Verisi**

Sıcaklık verisi olarak ise 1979'dan günümüze kadar ölçümü bulunan 0.25° mekansal çözünürlüğe sahip Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi'nin (ECMWF) beşinci nesil yeniden analizi ürünü olan ERA5 veri seti içerisinde yüzeyin 2 m üzerindeki günlük ortalama hava sıcaklığı verisi kullanılmıştır (21). ERA5 günlük ortalama sıcaklık verisi de literatürde birçok çalışmada hidrolojik modelde girdi olarak kullanılmış olup iyi sonuçlar vermiştir (10, 19, 22).

## **2.3. Hidrolojik Model**

Çalışmada hidrolojik model olarak kullanılan HBV modeli genel olarak üç ana modülden oluşur. Bunlar kar modülü, toprak nemi modülü ve akım modülüdür. İlk olarak kar fonksiyonu hava sıcaklığını eşik hava sıcaklığı ile karşılaştırarak yağışın yağmur ya da kar olarak düşmesi durumunu belirler. Eğer yağış kar olarak düşmüşse model biriktirme yapar ve erime sıcaklığına göre kar erimesinin başlayıp başlamayacağına karar verir. Daha sonra toprak nemi modülü, yağışı ve/veya kar erimesini girdi olarak alır ve toprakta suyun depolanmasını, gerçek buharlaşma-terlemeyi (evapotranspirasyon) ve net yağış miktarını hesaplar. Akım modülü, toprak nemi modülünde üretilen net yağışı akıma dönüştürür. Bu akım, üst bölge ve alt bölge olmak üzere iki kısımda toplam akışı belirler. Üst bölge direkt akışa geçen yüzey ve ara akışı temsil ederken, alt bölge taban akışını temsil eder (23). HBV modelinin akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

Model girdileri yağış, sıcaklık ve potansiyel evapotranspirasyondur. Çıktı, model çıkışındaki toplam akımdır (24). Bu çalışmada RS Minerve paket programı kullanılarak HBV modeli çalıştırılmıştır (25). Modelin girdi parametrelerinden olan potansiyel evapotranspirasyon değeri program içinde Oudin tarafından önerilen sıcaklığa ve tahmini uzay radyasyonuna dayalı formülle hesaplanmıştır (26).

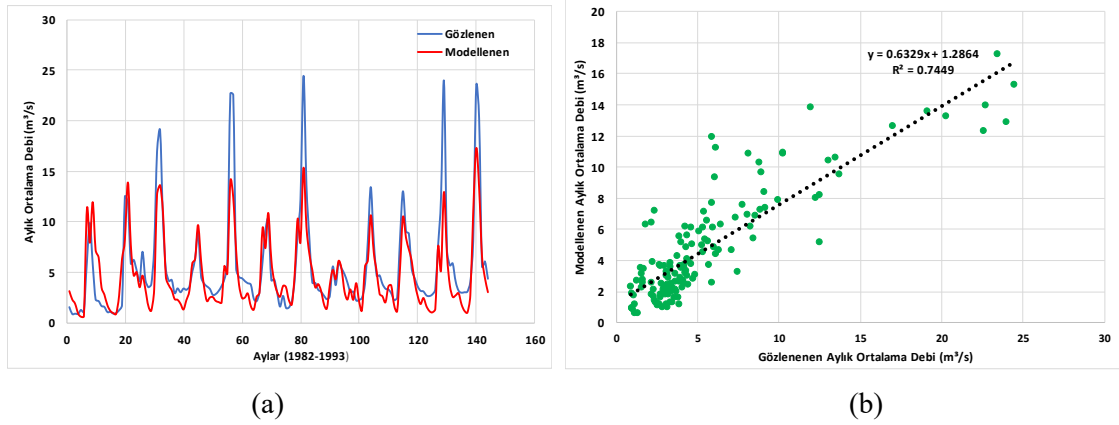




**Tablo 1 - Hidrolojik Model Parametreleri**

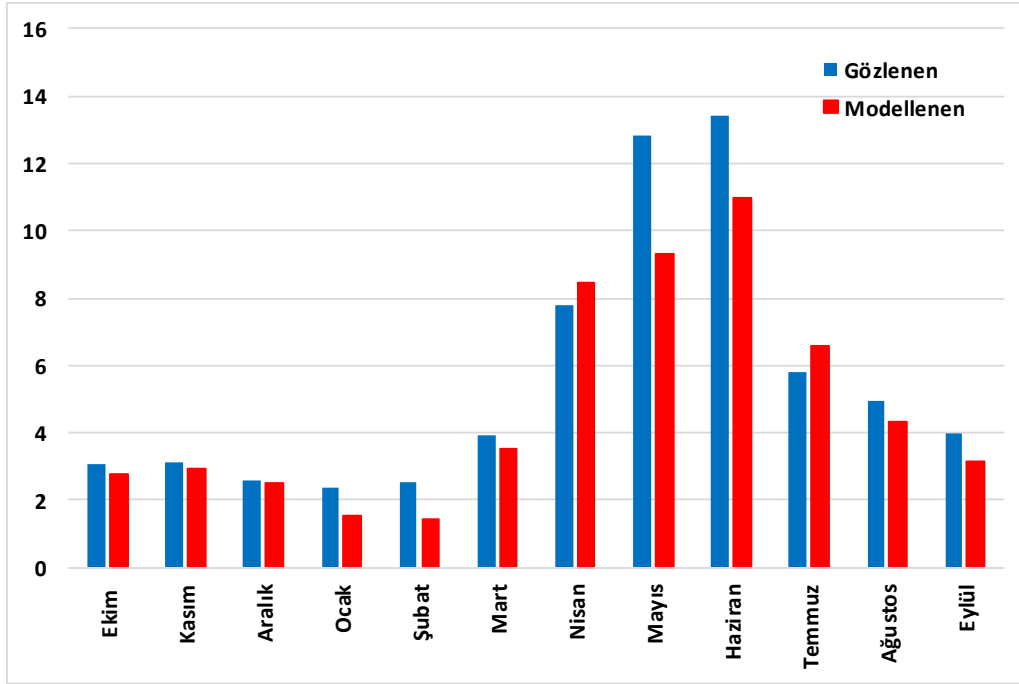
Parametre	Birim	Tanım	Değer
CFMax	mm/°C/gün	Erime faktörü	19.463
CFR	-	Yeniden donma faktörü	0.287
CWH	-	Kar örtüsünün kritik bağlı su içeriği	0.080
TT	°C	Yağmur/kar eşik sıcaklığı	1.727
TTInt	°C	Yağmur/kar karışımı için sıcaklık aralığı	0.727
TTSM	°C	Kar erimesi için eşik sıcaklık	0.175
Beta	-	Model parametresi (şekil katsayısı)	2.653
FC	m	Maksimum toprak depolama kapasitesi	0.241
PWP	-	Toprak kalıcı solma noktası eşiği	0.954
SUMax	m	Üst rezervuar su seviyesi eşiği	0.073
Kr	1/gün	Yüzeğe yakın akış depolama katsayısı	0.296
Ku	1/gün	Torak altı akış depolama katsayısı	0.038
Kl	1/gün	Taban akışı depolama katsayısı	0.002
Kperc	1/gün	Sızma depolama katsayısı	0.014

1982-1993 su yılları arasında gözlenen ve modellenen aylık ortalama debiler karşılaştırmalı olarak Şekil 3 (a)'da verilmiştir. Bazı yıllarda gözlenen pik debilerin modelde tam olarak yakalanamadığı fakat gözlenen ve modellenen aylık ortalama debiler arasında genel anlamda kabul edilebilir iyi bir uyum yakalandığı söylenebilmektedir. Ayrıca NSE katsayıları ve Şekil 3(b)'de verilen regresyon katsayısı modele olan güveni artırmaktadır.



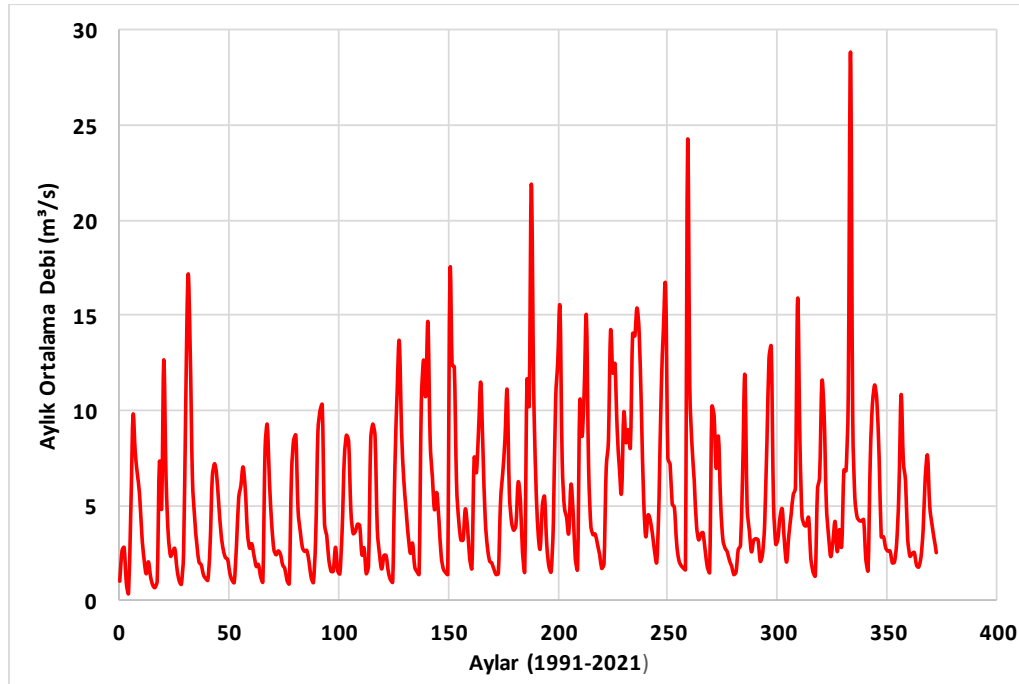
**Şekil 3 - (a) 1982-1993 periyodunda gözlenen ve modellenen aylık ortalama debi grafiği (b) Aylık ortalama gözlenen ve modellenen debilerin regresyon grafiği**

1982-1993 su yılları arasında yıllık ortalama gözlenen debi  $5.55 \text{ m}^3/\text{s}$  iken, yıllık ortalama modellenen debi  $4.80 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak hesaplanmıştır. 1982-1993 periyodunda gözlenen ve modellenen aylık ortalama debilerin karşılaştırması Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'ten de gözleneceği üzere pik akış dönemi olan Mayıs ve Haziran aylarında gözlenen debiler, modellenen debilere kıyasla daha yüksektir. Diğer aylarda ise çok daha iyi bir uyum vardır.



Şekil 4 - Aylık ortalama gözlenen ve modellenen debi grafiği (1982-1993)

Kalibre edilen HBV hidrolojik modeline 1991-2021 periyodunda CHIRPS veri setinden elde edilen yağış ve ERA5 veri setinden elde edilen sıcaklık verisi girilerek model tekrar çalıştırılmış olup bu periyotta su potansiyeli tahmini yapılmıştır. Model sonuçlarına göre 1991-2021 periyodunda modellenen yıllık ortalama debi  $5.26 \text{ m}^3/\text{s}$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5 - 1991-2021 periyodunda modellenen aylık ortalama debi grafiği

#### 4. SONUÇ

Yüzey hidrolojisini doğru bir şekilde yorumlamak için tutarlı ve uzun vadeli akım ölçümlerinin önemi çok büyüktür. Fakat dünyanın birçok yerindeki akarsuların akımları ya ölçülmemiş ya da yetersiz ölçülmektedir. Hatta dünya genelinde mevcut olan ölçüm ağları da gün geçtikçe azalmaktadır. Güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan havzalarda uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilen uydu bazlı yağış ve sıcaklık ürünleri, hidrolojik modellemelerde girdi olarak kullanılarak su potansiyeli tahminlerinde etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip havzalarda su potansiyelini tahmin etmek için uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilen uydu bazlı yağış ve sıcaklık ürünlerinin değerlendirmenin önemli bir yönü, hidrolojik bir model kullanarak yağış-akış modellenmesini geliştirmektir.

Bu çalışma kapsamında güncel hidrometeorolojik ölçüm ağı olmayan Gürcistan'ın Kvemo-Kartli bölgesi sınırları içerisinde bulunan Mashavera Nehri üzerinde sulama ve enerji amaçlı olarak yapılması planlanan barajın su potansiyeli tahmini, uydu bazlı yağış ve sıcaklık veri seti ışığında HBV hidrolojik modeli çalıştırılarak 1991-2021 periyodu için yapılmıştır. Baraj aks yerinde geçmiş yıllarda ölçümleri mevcut olan akım gözlem istasyonunun verileri kullanılarak hidrolojik model parametreleri kalibre edilmiştir. Nash-Sutcliffe Verimlilik ölçütü kullanılarak performansı değerlendirilen modelin başarılı sayılabilecek ve umut vadeden sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

#### Kaynaklar

1. Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., and Davies, P.M., "Global threats to human water security and river biodiversity", *Nature*, **467**(7315): p. 555-561, 2010.
2. Parada, L.M. and Liang, X., "A novel approach to infer streamflow signals for ungauged basins", *Advances in Water Resources*, **33**(4): p. 372-386, 2010.
3. Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., and Zehe, E., "IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences", *Hydrological Sciences Journal*, **48**(6): p. 857-880, 2003.
4. Köksal, A., "*Hydrological parameter estimation of the upper Göksu River Basin by HEC-1*". Middle East Technical University.1995
5. Bergström, S., Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. 1976.
6. Bergström, S. and Lindström, G., "Interpretation of runoff processes in hydrological modelling—experience from the HBV approach", *Hydrological Processes*, **29**(16): p. 3535-3545, 2015.
7. Serrat-Capdevila, A., Valdes, J.B. and Stakhiv, E.Z., "Water Management Applications for Satellite Precipitation Products: Synthesis and Recommendations", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **50**(2): p. 509-525, 2014.
8. Jiang, S., Ren, L., Yong, B., Hong, Y., Yang, X. and Yuan, F., "Evaluation of latest TMPA and CMORPH precipitation products with independent rain gauge observation networks over high-latitude and low-latitude basins in China", *Chinese Geographical Science*, **26**(4): p. 439-455, 2016.

9. Luo, X., Wu, W., He, D., Li, Y. and Ji, X., "Hydrological Simulation Using TRMM and CHIRPS Precipitation Estimates in the Lower Lancang-Mekong River Basin", *Chinese Geographical Science*, **29**(1): p. 13-25, 2019.
10. Tarek, M., Brissette, F.P. and Arsenault, R., "Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **24**(5): p. 2527-2544, 2020.
11. Bondyrev, I.V., Davitashvili, Z.V. and Singh, V.P., The geography of Georgia: problems and perspectives. Springer, 2015.
12. Elizbarashvili, M., Kvirkvelia, B., Elizbarashvili, E., Elizbarashvili, S. and Khuntselia, T., "Dangerous and Adverse Weather Events in Kvemo Kartli (Georgia)", *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Science and Applications (ICESA'21)*, 2021.
13. Jha, R., "Application of 30m resolution SRTM DEM in Nepal", *Journal of the Institute of Engineering*, **14**(1): p. 235-240, 2018.
14. Beldring, S., Kordzakhia, M. and Kristensen, S.E., "Runoff map of Georgia", *Norwegian Water Resources and Energy Directorate*, 2017.
15. Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D. and Husak, G., "A global satellite-assisted precipitation climatology", *Earth Syst. Sci. Data*, **7**(2): p. 275-287, 2015.
16. Paredes Trejo, F.J., Alves Barbosa, H., Peñaloza-Murillo, M.A., Moreno, M.A. and Farias, A., "Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela", *Atmósfera*, **29**(4): p. 323-342, 2016.
17. Usman, M., Ndehedehe, C.E., Ahmad, B., Manzanar, R. and Adeyeri, O.E., "Modeling streamflow using multiple precipitation products in a topographically complex catchment", *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021.
18. Abdelmoneim, H., Soliman, M.R. and Moghazy, H.M., "Evaluation of TRMM 3B42V7 and CHIRPS Satellite Precipitation Products as an Input for Hydrological Model over Eastern Nile Basin", *Earth Systems and Environment*, **4**(4): p. 685-698, 2020.
19. Tarek, M., Brissette, F.P. and Arsenault, R., "Large-Scale Analysis of Global Gridded Precipitation and Temperature Datasets for Climate Change Impact Studies", *Journal of Hydrometeorology*, **21**(11): p. 2623-2640, 2020.
20. Hafizi, H. and Sorman, A.A., "Assessment of 13 Gridded Precipitation Datasets for Hydrological Modeling in a Mountainous Basin", *Atmosphere*, **13**(1), 2022.
21. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N., "The ERA5 global reanalysis", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**(730): p. 1999-2049, 2020.
22. Alfieri, L., Lorini, V., Hirpa, F.A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C. and Salamon, P., "A global streamflow reanalysis for 1980–2018", *Journal of Hydrology X*, **6**: p. 100049, 2020.
23. Uysal, G., Sensoy, A., Şorman, A. and Ertaş, M.C., "Kısa Dönemli Hidrolojik Tahmin Sistemi Uygulaması", *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, **7**(2): p. 338-353, 2021.

24. García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. and Boillat, J.-L., "Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps—implementation of the MINERVE project in the Canton of Valais". p. 87-97-87-97
25. Hernandez, J.G., Foehn, A., Sanmartin, J.F., Roquier, B., Brauchli, T., Arquiola, J.P. and Cesare, G.D., "RS MINERVE - Technical Manual", (v2.25. Ed. CREALP), 2020.
26. Oudin, L., "Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global", 2004.
27. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", Journal of hydrology, **10**(3): p. 282-290, 1970.
28. Kim, K.B., Kwon, H.-H. and Han, D., "Exploration of warm-up period in conceptual hydrological modelling", Journal of hydrology, **556**: p. 194-210, 2018.

## Milas İlçesinde Rusle Yöntemi Kullanılarak Erozyon Riskinin Belirlenmesi

Kutay YILMAZ<sup>1</sup>, Yakup DARAMA<sup>2</sup>

### ÖZET

Erozyon, tarımsal alanların verimliliğini, baraj gölet gibi yapıların dizayn ömürlerini ve olası taşkınların meydana gelişini etkileyen doğal bir olaydır. Bu çalışmada Düzenlenmiş Evrensel Toprak Kaybı Eşitliği (RUSLE) yöntemiyle Muğla ili Milas ilçesi için erozyon hesabı Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre Milas ilçesinde yıllık ortalama 28,15 ton/ha toprak kaybı meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Sonuç olarak Milas ilçesinde erozyon riskinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bu sonuç, Büyük Toprak Grupları (BTG) veri setinde öngörülen erozyon sınıflarıyla karşılaştırılmış mekansal dağılım ve ortalama değerler arasındaki farklar ve bu farkların sebepleri ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** CBS, Erozyon, Milas, RUSLE.

### ABSTRACT

#### *Determination of Erosion Risk by RUSLE in Milas*

Erosion is a natural phenomenon that affects the productivity of agricultural areas, the design life of hydraulic structures such as dams and ponds, and the occurrence of probable floods. In this study, erosion calculation for the Milas district of Muğla was implemented by the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) method based on Geographic Information Systems (GIS). Accordingly, it was determined that an annual average of 28,15 tons/ha of soil loss may occur in Milas district. Moreover, it was determined that there exist high erosion risk in Milas. Furthermore, result of RUSLE was compared with the predicted erosion classes in the Large Soil Groups (BTG) data set, and the differences between the spatial distribution and mean values were determined. The potential causes of the differences between RUSLE and BTG data were examined.

**Keywords:** GIS, Erosion, Milas, RUSLE.

---

1 Alter Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., Ankara - ktyylmz@gmail.com

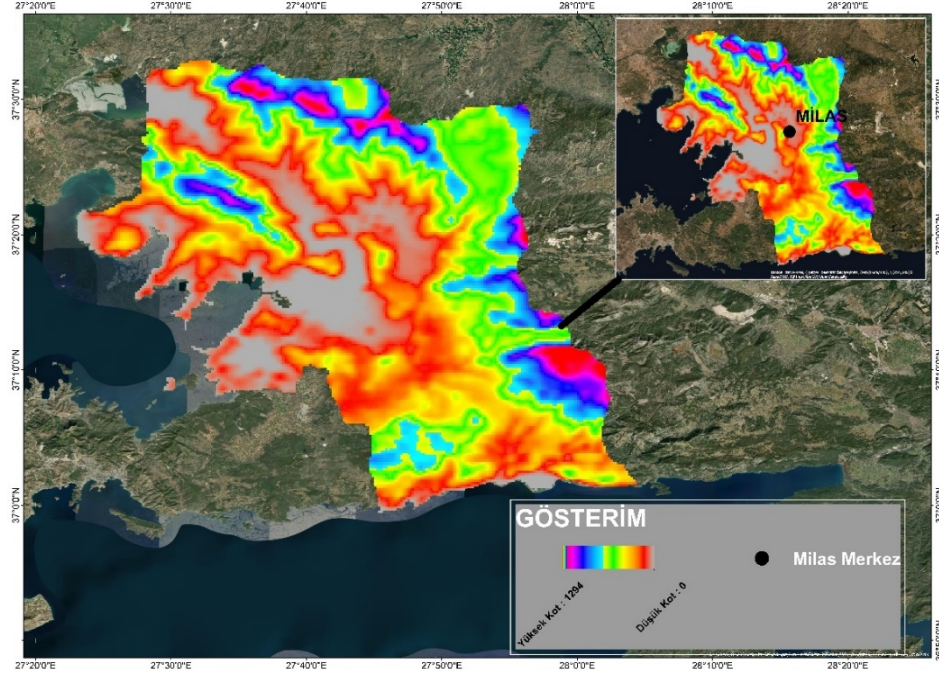
2 Atılım Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - yakup.darama@atilim.edu.tr



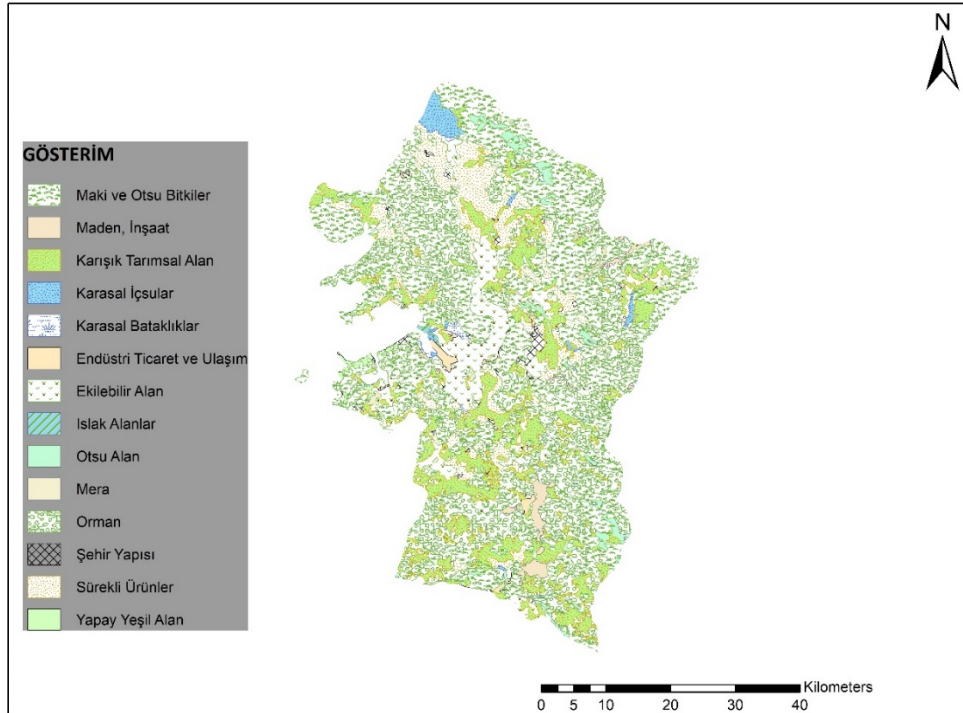


## MATERYAL

RUSLE yöntemi kullanılarak erozyon hesabı yapılabilmesi için toprağın erozyona duyarlılığı, yağmur aşındırma faktörü, eğim gibi verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Yağmur aşındırma faktörünün hesaplanması için literatürde çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte, Borelli vd. [5] tarafından yapılan çalışmada dünya geneli için elde edilen kalibre edilmiş veriler bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.



Şekil 2 - Sayısal Yükseklik Modelinin Gösterimi



Şekil 3 - CORINE 2018 Arazi Kullanım Sınıfları

Toprağın erozyona duyarlılığı faktörü de arazi çalışmalarıyla elde edilebilmektedir. Çalışma kapsamında, Borelli vd. [5] tarafından yapılan çalışmada dünya geneli için üretilmiş ve kalibre edilmiş veriden yararlanılmıştır.

Eğim uzunluğu, eğim dikliği gibi topografik faktörlerin elde edilebilmesi için Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) temin edilen 5 metre çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılmıştır (Şekil 2).

Ayrıca bitki örtüsü yönetimi ve toprak koruma önlemleri faktörlerinin belirlenmesi için CORINE 2018 arazi kullanım sınıfları temin edilerek (Şekil 3) analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen alansal verilere, literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda belirlenmiş [6,7] bitki örtüsü yönetimi ve koruma önlemleri katsayıları atanmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır.

## **YÖNTEM**

Milas özelinde RUSLE yöntemi CBS ortamında uygulanarak oluşabilecek yıllık toprak kaybı değerlendirilmiştir.

RUSLE yöntemi arazi kullanımı, topoğrafya, toprak tipi ve yağışı hesaba katarak erozyonunun hesaplanmasında kullanılan bir metottur.

RUSLE denklemi aşağıda verilmiştir [4].

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Burada;

A yıllık toprak kaybı (t/ha/yr),

R yağmur aşındırma faktörü (MJ mm/ha/h/yr),

K toprağın erozyona duyarlılığı (t h/MJ mm),

L eğim uzunluğu,

S eğim dikliği,

C bitki örtüsü yönetimi faktörü,

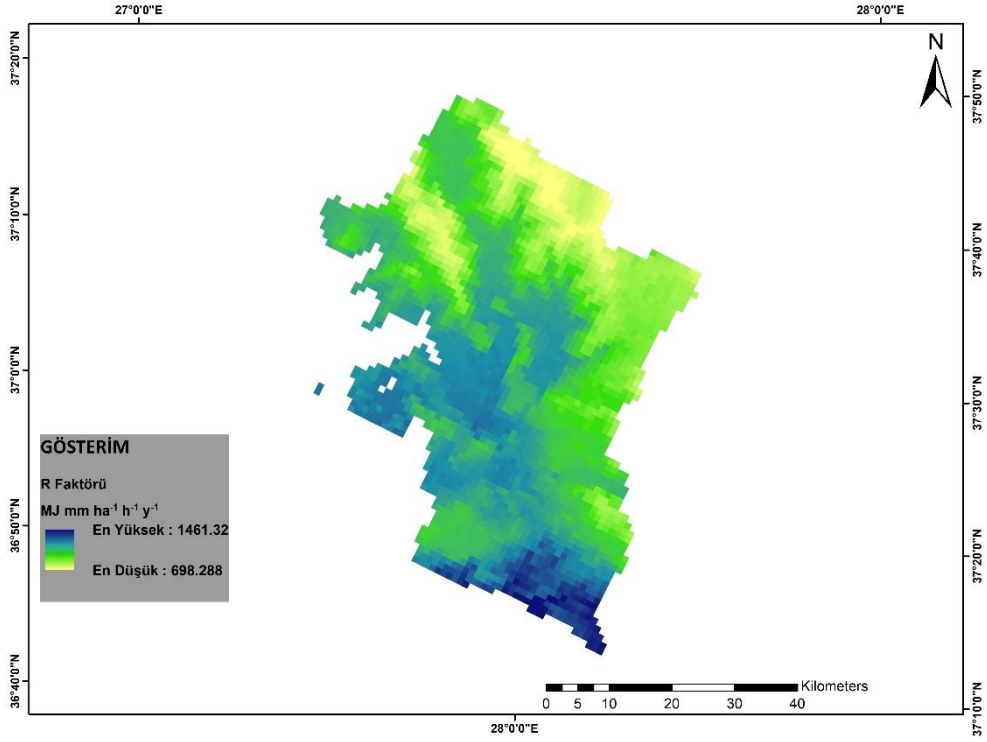
P toprak koruma önlemleri faktörüdür.

Milas ilçesinin tamamı için her bir parametre hesaplanmış ve Şekil 4 - Şekil 8'de sunulmuştur.

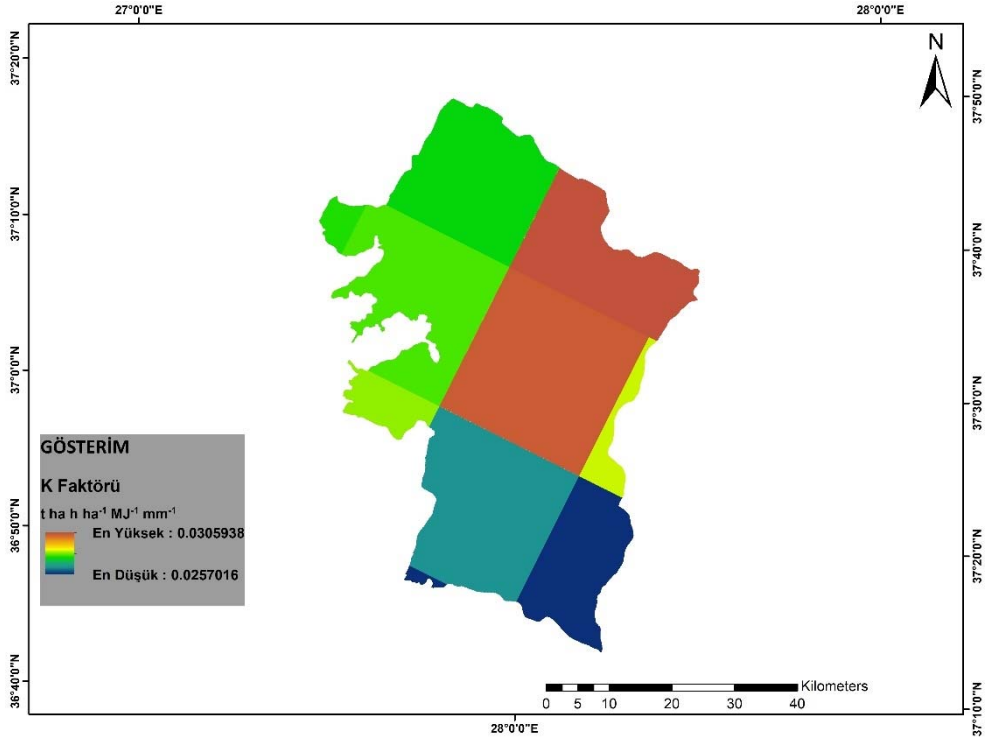
RUSLE yöntemine ait her bir parametrenin ayrı ayrı hesaplanarak mekansal dağılımının belirlenmesi sonucunda, tüm bu parametreler kullanılarak erozyon miktarı ve mekansal dağılımı belirlenmiştir.

## **BULGULAR VE TARTIŞMA**

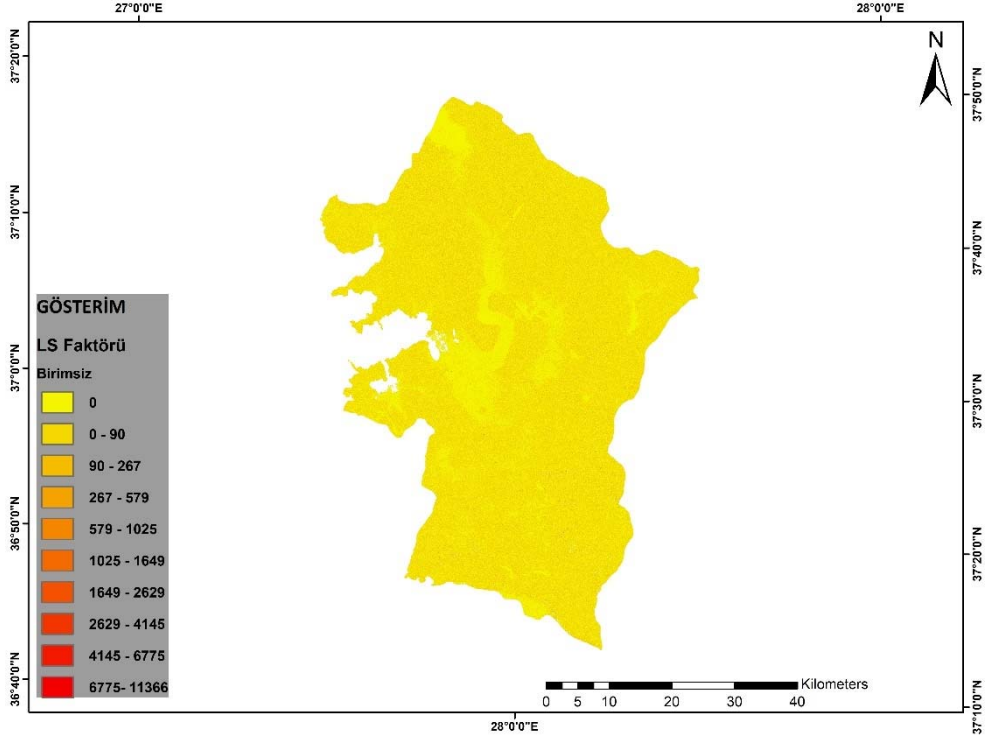
Açık kaynaklardan temin edilen verilerin analiz edilmesi, düzenlenmesi ve hesaplamaların yapılması neticesinde, RUSLE yöntemi CBS ortamında uygulanarak Milas ilçesi özelinde su kaynaklı erozyonun mekansal dağılımı ve miktarları elde edilmiş ve Şekil 9'da sunulmuştur.



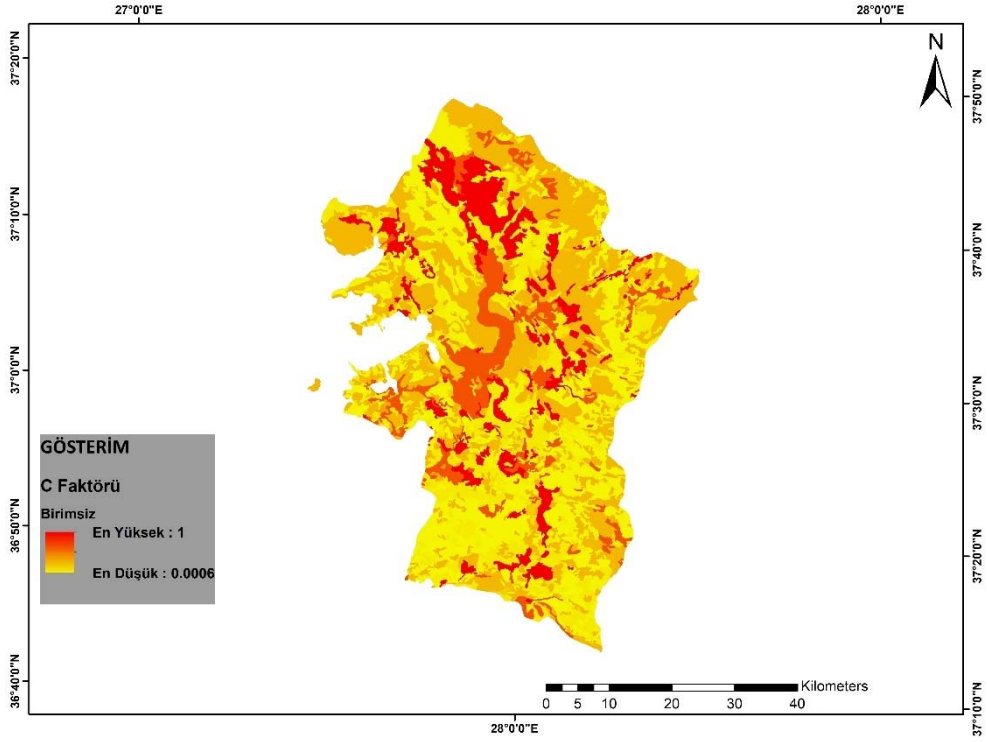
Şekil 4 - Yağmur Aşındırma Faktörünün Mekansal Dağılımı



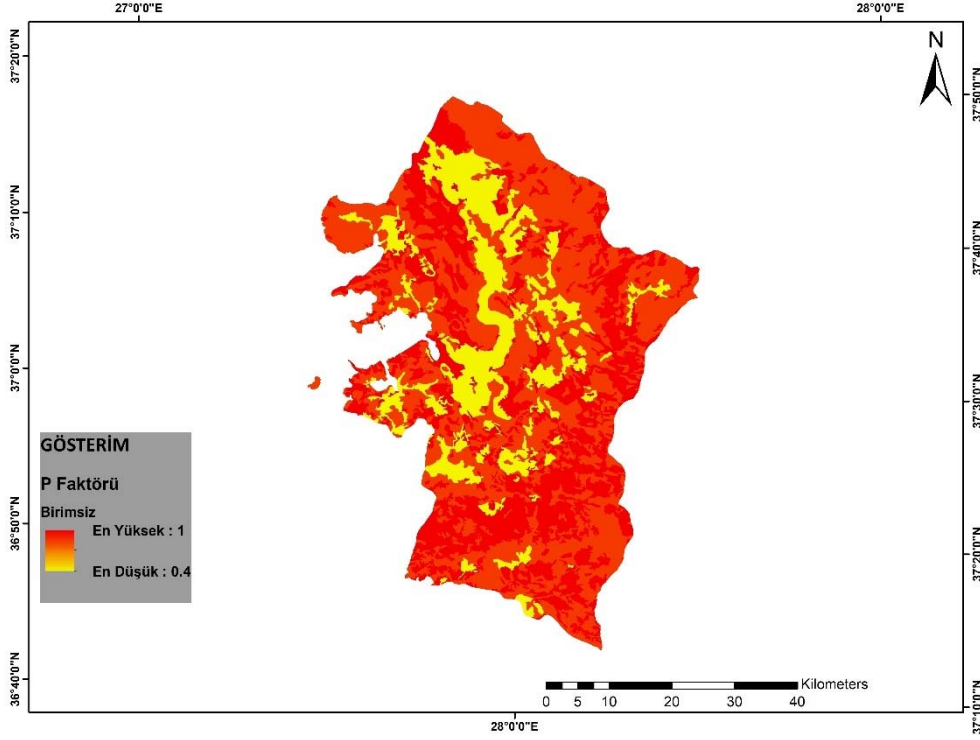
Şekil 5 - Toprağın Erozyona Duyarlılığı Faktörünün Mekansal Dağılımı



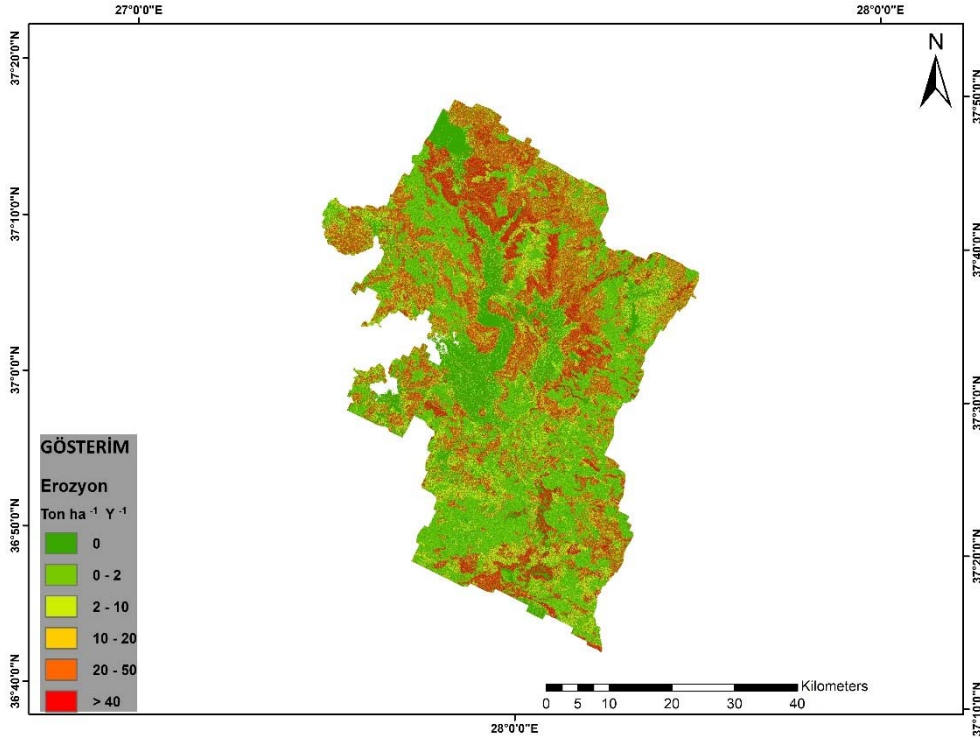
Şekil 6 - Eğim Uzunluk Faktörünün Mekansal Dağılımı



Şekil 7 - Bitki Örtüsü Yönetimi Faktörünün Mekansal Dağılımı



Şekil 8 - Toprak Koruma Önlemleri Faktörünün Mekansal Dağılımı



Şekil 9 - Milas İlçesi Özelinde Yıllık Ortalama Erozyon Miktarının Mekansal Dağılımı

Buna göre Milas ilçesinde yıllık ortalama 28,15 ton/ha miktarında bir toprak kaybı oluşabileceği ortaya konmuştur. Bu değer Tablo 1’de verilen erozyon sınıfları değerlendirildiğinde şiddetli erozyon varlığına işaret etmektedir.

**Tablo 1 - Erozyon Sınıfları**

Erozyon (ton/ha/yıl)	Erozyon Sınıfı
0-2	Çok Hafif
2-10	Hafif
10-20	Orta
20-40	Şiddetli
>40	Çok Şiddetli

Ayrıca, çok şiddetli erozyon varlığının yer aldığı bölgeler genel olarak dik eğime sahip yamaçlardır. Tarım uygulamalarının yoğun olduğu verimli ovalarda ise erozyon sınıfı ise genel olarak hafif şeklinde tanımlanabilir.

Elde edilen erozyonun mekansal dağılımı, Büyük Toprak Grupları (BTG) veri setinde yer alan su erozyonu sınıfları ile karşılaştırılmıştır. BTG veri setinde tanımlanan erozyon sınıflarını Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2 - BTG Veri Setinde Tanımlanan Erozyon Sınıfları**

Su Erozyonu	
1	Hiç veya çok az
2	Orta
3	Şiddetli
4	Çok Şiddetli

BTG veri setinde yer alan erozyon sınıflarının Milas ilçesi içerisinde ortalaması alındığında, Milas ilçesinde şiddetli – çok şiddetli erozyon sınıfı varlığı görülmektedir.

Ayrıca, BTG veri setinde yer alan erozyon sınıflarının mekansal dağılımı incelendiğinde ise RUSLE yöntemi ile elde edilen sonuçlarda genel olarak uyuşma görülmekte fakat ilçe sınırları içerisinde yer yer sapmalar da yer almaktadır.

## SONUÇ

Yapılan çalışma neticesinde RUSLE metodunun erozyon hesabında CBS tabanlı olarak uygulaması gerçekleştirilmiş ve Milas için yıllık ortalama 28,15 ton/ha erozyonun su kaynaklı olarak meydana gelebileceği tespit edilmiştir. Elde edilen erozyon sınıfları, BTG veri setinde yer alan erozyon sınıflarıyla karşılaştırılmış benzerlik ve farklar irdelenmiştir. Buna göre, açık kaynaklardan elde edilen yağmur aşındırma faktörü, toprağın erozyona duyarlılığı faktörü verilerinin, RUSLE yönteminde CBS tabanlı olarak uygulanması, ilçe içi ortalamalarına

bakıldığında gerçekçi sonuçlar vermektedir. BTG veri setine göre, özellikle mekansal dağılımda çeşitli farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıkların temel sebebi, temin edilen yağmur aşındırma faktörü, toprağın erozyona duyarlılığı faktörü verilerinin çözünürlüğünün görece düşük olmasıdır. Hesaplamalarda veri çözünürlüğü interpolasyon yapılarak arttırılmış fakat veri hassasiyeti sabit kalmıştır. Ayrıca, bitki örtüsü yönetimi faktörü ve toprak koruma önlemleri faktörünün hesaplanmasında altlık oluşturan arazi kullanım sınıfları verisi, 2018 yılına üretilen 100 m çözünürlüğe sahip CORINE verisinden üretilmiştir. Daha yüksek çözünürlüğe sahip Sentinel gibi uydulara ait verilerin kullanımı, daha hassas veri üretilmesini sağlayacaktır. Buna ek olarak arazi kullanım sınıflarında bitki örtüsü yönetimi ve toprak koruma önlemleri faktörüne atanan değerler literatürde yer alan çalışmalardan derlenerek elde edilmiştir. Çalışılan alan üzerinde yapılacak saha çalışmaları üzerinden bölge özelinde elde edilecek veriler daha hassas sonuç elde edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca BTG verisinin üretiminin uzun yıllar önce gerçekleştirildiği ve güncel durumu yansıtmada yetersiz kalabileceği hesaba katılmalıdır. Çalışma, özellikle baraj, gölet gibi hidrolik yapıların tasarımında önem arz eden erozyon ve sediment hesabında, açık kaynaklardan elde edilen verilerle uygulanacak RUSLE yönteminin doğru sonuçlar verebileceğini ve yapılacak daha hassas erozyon hesabı çalışmasıyla bu tip yapıların, öngörülen dizayn ömürleri boyunca oluşabilecek ölü hacim ve işletme sorunlarının önüne geçilebileceğini göstermiştir. Milas ilçesinde yer alan Sarıçay Nehri ve Akgedik Barajı göz önüne alındığında, baraj üst havzasında erozyon sonucu oluşabilecek ölü hacmin, dizayn sürecinde planlanandan daha önce meydana gelebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Sarıçay nehir yatağı üzerinde erozyon kaynaklı oluşabilecek sediment birikimi de, sedde taşıma kapasitesinde azalmaya sebep olabilecektir. Bu nedenle erozyon ve sediment hesaplarında RUSLE yönteminden faydalanılması ve hassas veri üretimi/temini önem arz etmektedir.

### Kaynaklar

1. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning, U.S. Dept. Of Agriculture, Agric. Handbook No. 537, 1978, 58 p.
2. Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A., "Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97, 2003, pp 295–308.
3. Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Tarımsal Politikalar ve Yapısal Düzenlemeler Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2001, 67 Sayfa.
4. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Mccool, D.K., Yoder, D.C., Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE), U.S. Dept. Of Agriculture, Agric. Handbook No. 703, 1997, 404 p.
5. Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schutt, B. Ferro, V. Bagarello, V. Van Oost, K., Montanarella, L., Panagos P.. "An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion," *Nature Communications*, 8 (1): art. no. 2013, 2017.
6. Naqvi, H.R., Mallick, J., Devi, L.M., et al., "Multi-temporal annual soil loss risk mapping employing Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in Nun Nadi Watershed," *Uttrakhand (India). Arab J Geosci* 6, 2013, pp 4045–4056.
7. Pelacani, S., Märker, M., Rodolfi, G., "Simulation of soil erosion and deposition in a changing land use: A modelling approach to implement the support practice factor", *Geomorphology*, Volume 99, Issues 1–4, 2008, pp 329-340.





## Termal Deşarjın Kıyı Bölgesinde Seyrelme Sürecinin Nümerik Modelleme Yöntemiyle İncelenmesi

Murat AKSEL<sup>1</sup>, Fatih Buğrahan YORĞUN<sup>2</sup>, Mehmet Yusuf ERBİŞİM<sup>3</sup>, Şevket ÇOKGÖR<sup>4</sup>, Oral YAĞCI<sup>5</sup>

### ÖZET

Türkiye'deki enerji arzında termik santraller önemli bir rol oynamaktadır. Termik santrallerdeki buhar kazanının soğutma sürecinde iki farklı akışkan kullanılmaktadır. Hava ve/veya su ile yapılan soğutma sonucunda akışkanın temin edildiği ortama soğutmada kullanılan akışkanın sıcaklığı artırılarak deşarj edilir. Bu çalışmada deniz kıyısında bulunan bir termik santralin soğutmasında kullanılan deniz suyunun tekrar deniz ortamına deşarjından sonraki seyrelme süreci nümerik modelleme yöntemiyle incelenmiştir. Sahada farklı konum ve zamanlarda yapılan ölçümlerle nümerik modelleme sonuçları karşılaştırılarak nümerik modelleme metodunun seyrelme sürecinin temsilindeki başarı oranı hesaplanmıştır. Saha ölçümleriyle karşılaştırmalı yapılan analiz sonuçlarında bağıl hata değeri %0.7-%2.5 aralığında hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Termal Deşarj, Nümerik Analiz.

### ABSTRACT

**Investigation of the Dilution Process of Thermal Discharge in the Coastal Region by Numerical Modeling Method**

Thermal power plants play an important role in the energy supply in Turkey. Two different fluids are used in the cooling process of the steam boiler in thermal power plants. As a result of cooling with air and/or water, the temperature of the fluid used in cooling is discharged to the environment where the fluid is supplied. In this study, the dilution process of seawater, which is used for the cooling of a thermal power plant located on the seashore, after being discharged back to the sea environment, was investigated by numerical modeling method. By comparing the numerical modeling results with the measurements made in the field at different locations and times, the success rate of the numerical modeling method in representing the dilution process was

---

1 Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya - murat.aksel@alanya.edu.tr

2 HEC Mühendislik, İstanbul - fatih@hec-engineering.com

3 HEC Mühendislik, İstanbul - mehmet@hec-engineering.com

4 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - cokgor@itu.edu.tr

5 İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul - yagciora@itu.edu.tr

*calculated. The relative error value was calculated in the range of 0.7-2.5% in the results of the analysis made compared with the field measurements.*

**Keywords:** *Thermal Discharge, Numerical Modelling.*

## **GİRİŞ**

Termik santraller veya yüksek ısı ihtiyacı duyan tesislerde (eritme fırınları, yakma tesisleri vb.) ısının çalışma limitlerinin üzerine çıkmasının engellenmesi için soğutma üniteleri inşa edilir. Bu soğutma üniteleri hava veya su ile soğutmaya sağlayan sistemlerdir. Tesisin fazla ısısı soğutma prosesinde kullanılan akışkana transfer edilerek soğutma sağlanırken fazla ısıyı bünyesine almış akışkan alıcı ortama deşarj edilir. Burada alıcı ortam hava için atmosfer, su için ise su kaynağı olarak kullanılan su kütesidir. Bu su kütlesi tesisin bulunduğu konuma göre göl, akarsu veya deniz olabilir.

Nümerik analiz yöntemleri ile daha önceden yapılmış alıcı ortamda seyrelme modelleri ile alakalı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan birkaçı şu şekildedir; 2019 yılında yapılmış bir çalışmada, Güney İtalya'da bir tesis için TELEMAR-MASCARET ile termal deşarj bulutunun uzak alan seyrelmesi modellenmiştir [1]. Laguna-Zarate vd. (2021) Meksika Körfezi kıyısında bulunan Laguna Verde nükleer santralının termal deşarjını modellemiştir. Santralin su alma yapısının girişine doğru yöneldiği senaryoyu farklı türbülans modelleriyle Delft3D-FLOW yazılımı kullanılarak hesaplamışlardır [2]. Bir başka çalışmada Ulken şehri yakınlarındaki Balkaş Gölü'nde yapılması planlanan bir nükleer santralin termal deşarjının gölde yaratacağı termal etkinin değerlendirilmesi bilgisayar modellemesi yardımı ile hesaplamışlardır [3]. 2016 yılında yapılmış bir çalışmada Meksika Körfezi kıyısında, Veracruz'da bulunan Presidente Adolfo López Mateos Santrali'nin denize termal deşarjı üzerine yapmışlardır [4]. Bir başka çalışmada Hollanda'da farklı sucul ekosistemlerde bulunan çeşitli enerji santrallerinin soğutma suları üzerinde THREETOX yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır [5]. Tang vd. (2008), prizmatik bir kanalda ve doğal bir nehirde hem tek portlu hem de çok portlu difüzörlerden yapılan termal deşarjların türbülanslı ilk karışımını simüle etmişlerdir [6]. Başka bir makalede, çift yönlü modda eğrisel iç içe ızgara yoluyla bir yüzey nehir bulutunu modellemek için nümerik analiz yöntemleri kullanılmıştır [7]. 2020 yılında yapılmış bir çalışmada, düşük akış koşullarında termal atık kaynaklarının ana su kalitesi parametreleri üzerindeki çevresel etkisi hesaplanmıştır [8]. Son olarak, Çin'deki Douhe rezervuarında rüzgar altında akış ve ısı aktarımı iki boyutlu bir matematiksel modelle simüle edilmiştir [9].

## **AMAÇ**

Çalışmada denize sıcak su deşarj eden bir tesisin, alıcı ortamda yarattığı sıcaklık değişimi bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği yazılımı olan Delft-3D ile hesaplanmıştır. Bu sonuçlar sahada yapılan ölçüm verileri ile karşılaştırılarak yazılımın termal deşarj modelleme uygulamalarındaki hassasiyeti incelenmiştir

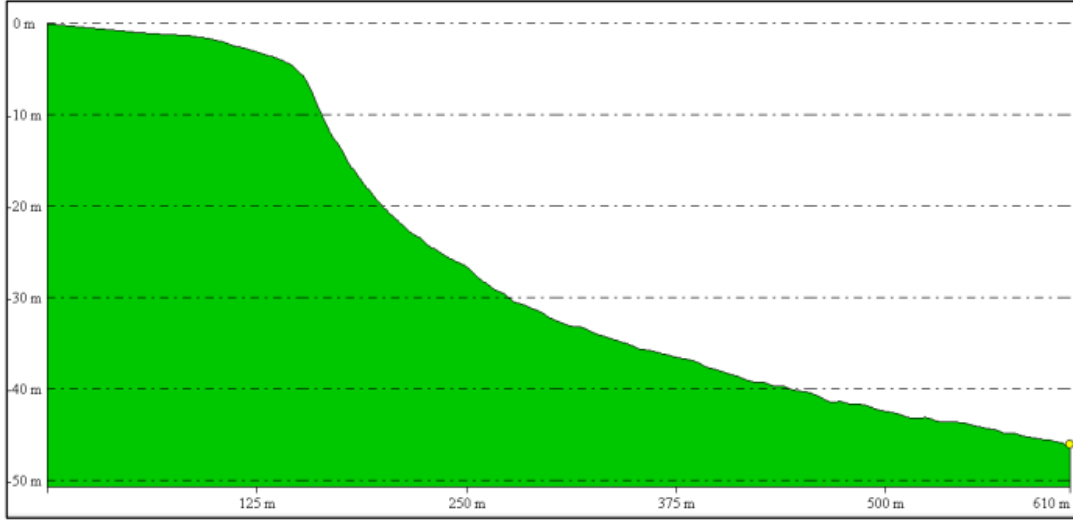
## **YÖNTEM**

Çalışmaya konu olan tesis ve çalışma alanı Türkiye'nin güneybatısında yer almaktadır. Ölçüm şamandıraları deşarj noktasına 50 m, 75 m, 100 m ve 500 m uzaklıklarda konumlandırılmış bir şekilde sıcaklık ölçmektedir. İzleme sistemlerinin kurulduğu günden 2021 yılı sonuna kadar tüm sıcaklık ölçümleri, bölgede yapılan mevsimsel ve dönemsel bazlı akıntı, sıcaklık, yoğunluk ve tuzluluk ölçümleri, izleme sistemlerinin faaliyette olduğu periyodu kapsayacak şekilde farklı dönemsel durumu içeren batimetri ölçümleri, uydu görüntüleri, bölgeye ait farklı uydu ve

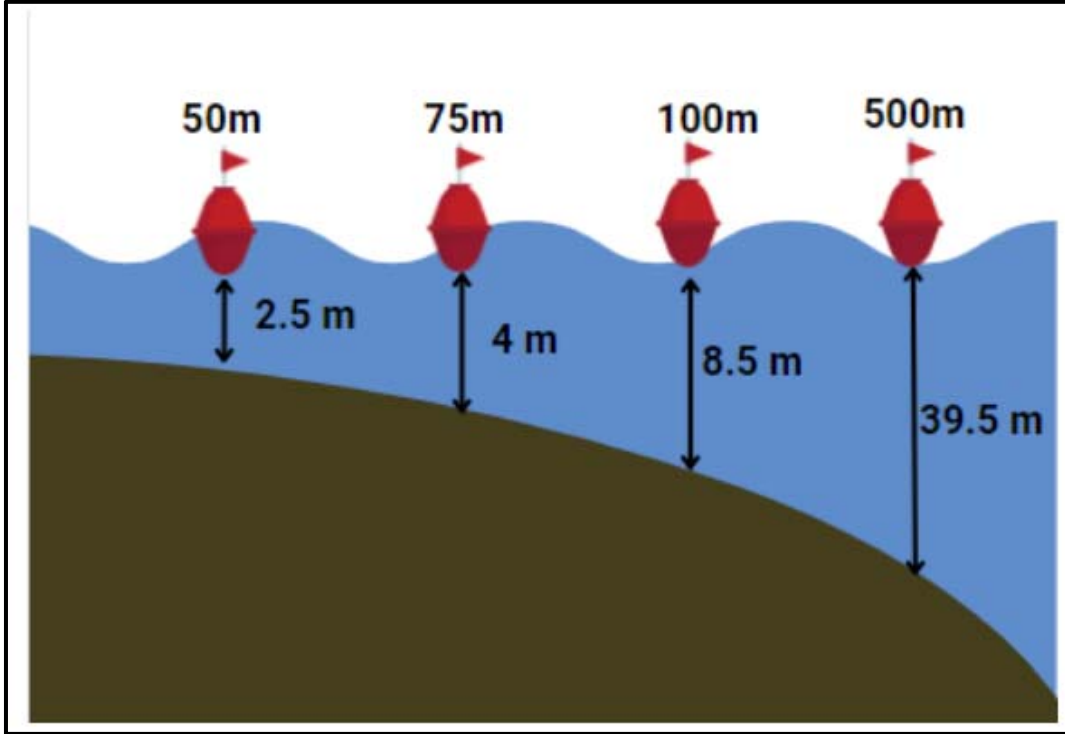
meteorolojik veri tabanlarındaki (ECMWF, NOAA, DMI, Copernicus) veri setleri kullanılarak hidrodinamik modelleme yazılımları vasıtasıyla rapordaki hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

### Çalışma Alanına Ait Çevresel Koşullar

Deşarj noktasındaki taban morfolojisi incelenecek olursa taban eğiminin deşarj noktasına göre Doğu-Batı doğrultularında değişmediği, tabanın oldukça homojen bir eğimde olduğu ve eğimin kıydan ilk 150 m’de %1-2 arasında olduğu sonrasında ise dikleşerek %14’e çıktığı görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1 - Deşarj noktasından açık denize doğru derinliğin uzaklığa bağlı olarak değişimi



Şekil 2 - Şamandıra konumlarındaki deniz derinliği

Batimetrik eğimin daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla deşarj noktasından açık denize doğru olacak şekilde alınan boy kesit Şekil 1’de verilmektedir. Şamandıraların altında bulunan su derinlikleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Bölgedeki oşinografik koşulları temsil edebilecek ayrıca sayısal modele de baz olabilecek 5 noktada yaz, bahar ve kış durumlarını da temsil etmesi amacıyla 2019 yılı Eylül, Ekim ve Kasım aylarından oşinografik ölçüm (sıcaklık, tuzluluk, yoğunluk ve akıntı ölçümleri) çalışmaları yapılmıştır. Bu ölçümler şamandıralar ile aynı konumda yapılmış olup konumları Şekil 4’te 0m- 50m- 75m- 100m ve 500m olarak görülmektedir.

Noktalardan elde edilen akıntı bilgileri şu şekildedir;

- Eylül ayı ölçümlerinde akıntının Batı-Doğu doğrultusunda 0.14 – 0.17 m/s aralığında,
- Ekim ayı ölçümlerinde akıntının Batı-Doğu doğrultusunda 0.13 – 0.14 m/s aralığında,
- Kasım ayı ölçümlerinde akıntının Batı-Doğu doğrultusunda 0.12 – 0.13 m/s aralığında olduğu ölçülmüştür.

16,17 ve 18 Aralık 2021 tarihinde yapılan ölçümler incelendiğinde bölgedeki suyun fiziksel özellikleri hakkında aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

1. Farklı tarih ve zamanlarda yapılan sıcaklık ölçümleri incelendiğinde CTD 1 ve CTD 2 noktaları öğlen ölçümlerinde derinliğe bağlı sıcaklık değişiminin fazla olduğu ve bu kısımda su derinliğinin az olması (1- 1,5 m kadar) ile güneş radyasyonunun etkin olması sebebiyle günün diğer saatlerine (özellikle akşam) göre bu iki noktanın içinde olduğu su hacminin daha fazla ısındığı/yeterli soğumanın sağlanmadığı görülmektedir.

2. CTD 3, CTD 4 ve CTD 5 ölçüm noktalarında termal deşarjın etkileri dikkate alınacak kadar hissedilmemektedir.

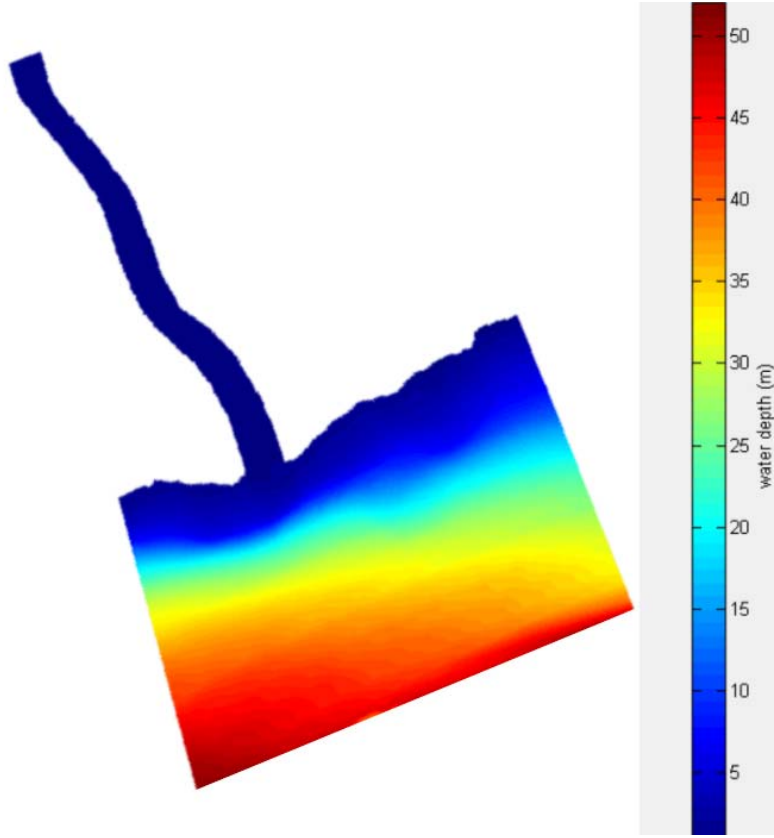
3. CTD 3, CTD 4 ve CTD 5 ölçüm noktalarındaki sıcaklık değerleri incelendiğinde su kolunun - 2 ila -35 m arası günlük değişimlerden etkilenmemekte ve bu ölçüm noktalarının çizeceği sınırları içeren hacme de dışarıdan önemli bir ısı girişi görülmemektedir.

Bu bölgede yoğunluk sıcaklığın etkisiyle değişmektedir. Tuzluluk genelde tekdüze bir yapıdadır ve ~39 psu (pratik tuzluluk ünitesi) değerindedir. Tatlı su girdilerinin olduğu koylarda tatlı su 23 etkisiyle yüzey suyu tuzluluğundaki ~2 psu’luk düşüş dikkati çekmektedir. Mevsimsel ısı farklılıklarından etkilenmeyen alt tabaka suyu sıcaklığı ~17 °C’dir. Yüzey suyu ise mevsimsel farklılıklar görülmesine karşın bahar aylarında 24- 25 °C civarındadır. İç körfezlerdeki istasyonlarda yüzey suyu sıcaklıkları 1- 3 °C daha sıcaktır. Bölge genelde dinamik bir yapıya sahiptir.

### **Modellemede Süreci**

Delft3D çeşitli modüller kullanarak dalga, akıntı, sediment ve kıyı morfolojisi değişimlerinin birlikte modellenilebildiği bir sayısal modelleme yazılımıdır. Yazılım Deltares tarafından geliştirilmektedir. Delft3D’nin en önemli modellerinden biri olan FLOW modülü eğrisel, sınıra uygun bir ızgara veya küresel koordinatlar üzerindeki gelgit ve meteorolojik zorlamalardan kaynaklanan durağan olmayan akış ve taşıma olaylarını hesaplayan çok boyutlu (2B veya 3B) bir hidrodinamik (ve taşıma) modelleme programıdır. Bu çalışma kapsamında FLOW modülü kullanılarak termal seyrelme analizleri yapılmıştır.

Bölgede 2019 yılında yapılmış olan batimetri çalışmasından elde edilen sayısal derinlik ve koordinat bilgileri kullanılarak modelleme için gerekli olan batimetrik altlık oluşturulmuş ve Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3 - Modelleme alanı batimetrisi

Modelleme çalışmasının yapıldığı bilgisayar 32 GB RAM, 20 çekirdek Intel Xeon İşlemcili iş bilgisayarıdır. Hesaplamaların sonuçları Delf3D'nin modüllerinden biri olan Quickplot üzerinde işlenmiştir.

Su sıcaklığı dışardan gelen ısı yayılımı akıntı-dalga etkisi ya da deşarjlardan etkilenir. Bu parametrelerin değişiminin incelenebilmesi için aşağıda verilen temel deniz içi sıcaklık transfer denkleminin çözülmesi gereklidir. Su içerisinde sıcaklık transfer denklemi kartezyen koordinatlarda;

$$\frac{\partial(HT)}{\partial t} + \frac{\partial(HuT)}{\partial x} + \frac{\partial(HvT)}{\partial y} + \frac{\partial(HwT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{A_b}{H} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial l}{\partial z} + Q_T \quad (1)$$

şeklindedir. Burada  $x$  ve  $y$ ; kartezyen koordinatlarda yatay.  $z$ ; düşey doğrultular.  $H$ ; su derinliği.  $A_b$ ; düşey doğrultudaki türbülans karışım katsayısı.  $l$ ; güneş radyasyonu. ve  $Q_T$ ; düşey türbülans difüzyonu ve dışardan gelen deşarjlardır [10].

Bu ifadede hidrodinamik transfer (hız) değerleri  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ve  $A_b$  hidrodinamik modelden transfer edilirler. Türbülanslı ortamda hız değerleri zamana bağlı olarak değişir. Hızın ortalama değeri yanında türbülans çalkantı bileşeni de mevcuttur. Türbülansın özellikle düşey doğrultudaki çalkantı bileşeni derinlik boyunca yayılım üzerinde etkilidir çünkü görece olarak sıcak olan suyun özgül ağırlığı aşağı tabakalardakinden düşüktür. Dolayısı ile termal karışım için düşey hız dolayısı bu doğrultuda türbülans çalkantı bileşenine ve bunun yeter derecede büyük olmasına ihtiyaç vardır. Karışımın etkisinin büyük olabilmesi için; düşey doğrultuda hızın çalkantı bileşeninin yanı sıra, su derinliği de ( $H$ ) direk olarak etkilidir. Dolayısı ile düşey doğrultudaki hız ( $w$ ) ve su derinliğinin artması karışım ve bunun sonucu istenilen seyrelmenin sağlanması için

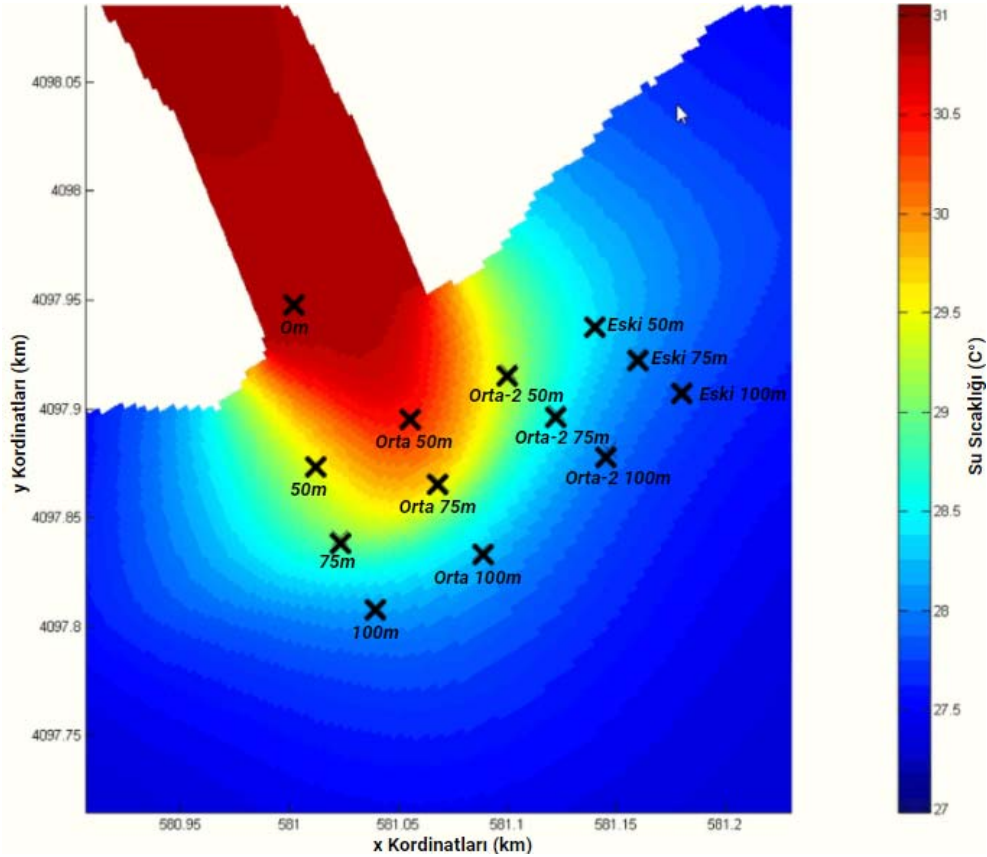
önemlidir. Bu denklem doğrusal olmayan bir denklem takımı olduğundan kesin analitik çözümü yoktur. Hidrodinamik model ile yapılan çalışmalar yeterli veri tabanı ve saha ölçümleri ile desteklendiği çalışmalarda gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada da tesisin deşarj kanalı çıkışında yapılacak taramanın miktarı ve alanının tespit edilmesi amacıyla hidrodinamik modelleme çalışması yapılmıştır.

Navier-Stokes hareket denklemlerinin özelleştirilmiş hali 2'de verilmektedir [11].

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \\ \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + R v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (2)$$

Modelleme çalışmasında çevresel koşullar ve tesise ait deşarj karakteristikleri hidrodinamik koşulları oluşturan girdiler olarak kullanılmıştır.

Modelleme çalışmalarında Şekil 4'te işaretlenmiş noktalarda sıcaklık değeri hesaplatılmıştır (Tablo 2).



Şekil 4 - Sürekli izleme noktaları

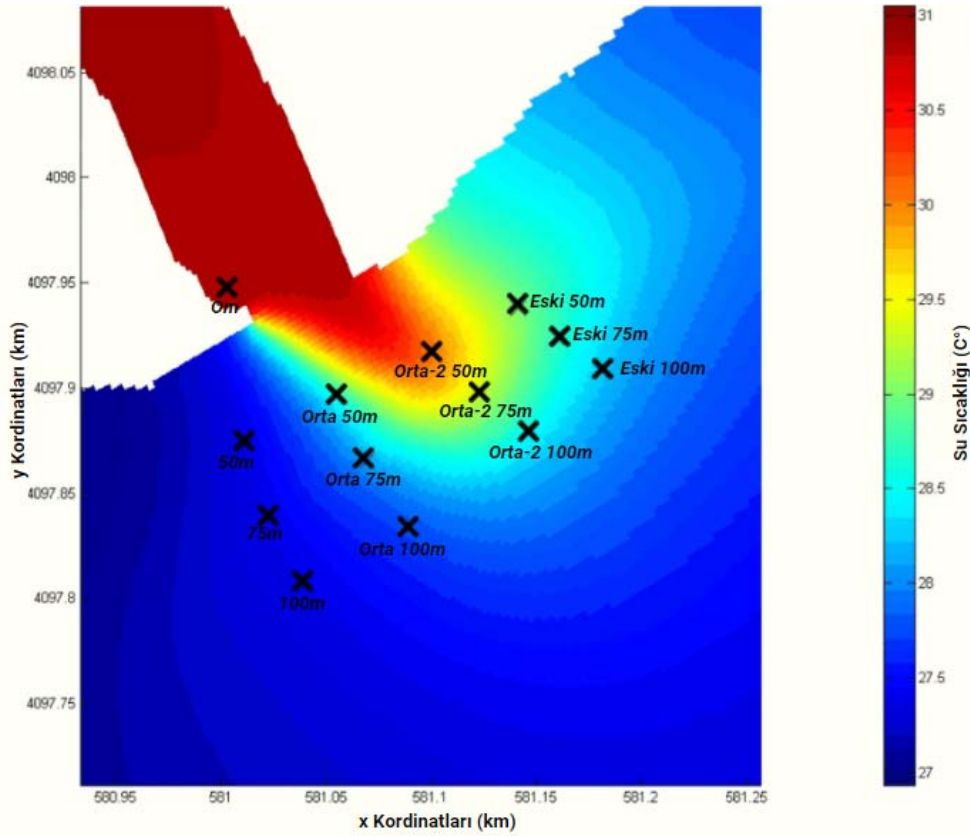
Tablo 1 - Senaryoda kullanılan sıcaklık koşulları

Koşulların Ait Olduğu Tarih	SAİS (Sürekli Atıksu İzleme Sistemi) Sıcaklığı (°C)	Alıcı Ortam Sıcaklığı (500 m Referans Şamandıra Sıcaklık Ortalaması) (°C)
01/07/2020 12:00	31.05	27.03

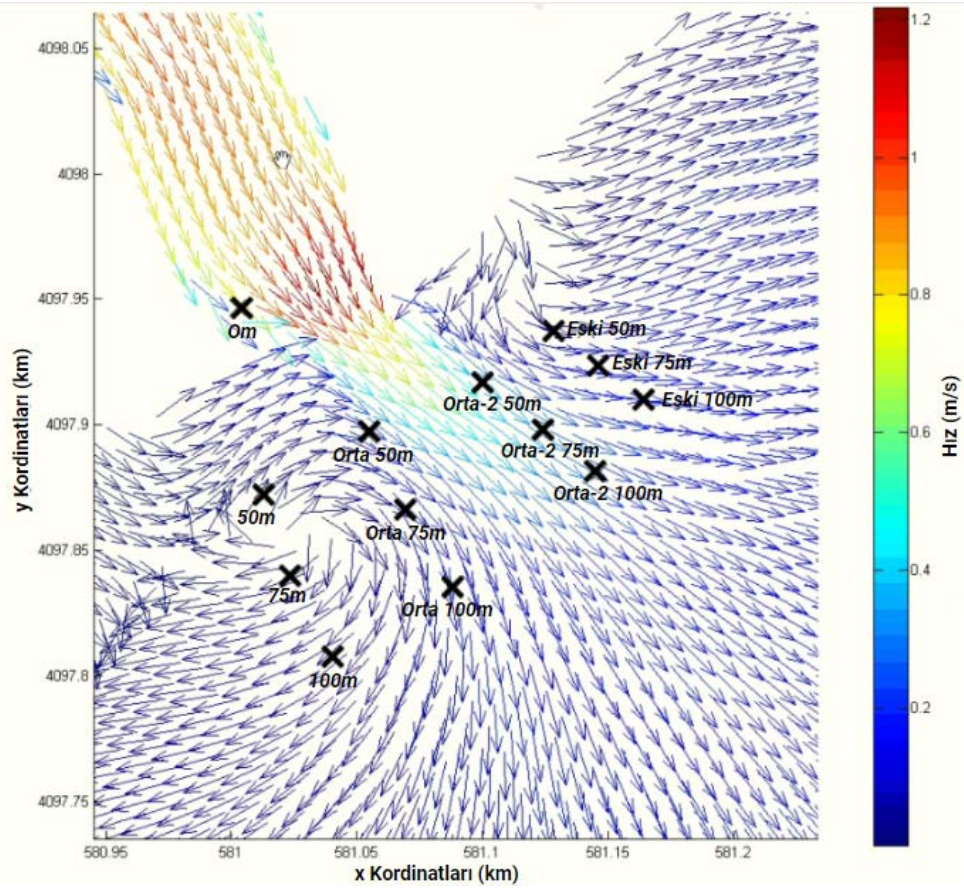
## SONUÇLAR

Modelleme çalışmalarının sonuçlarının işlenmesinde Deltares firması tarafından geliştirilmiş Quickplot kullanılmıştır. Sahadaki 50 – 75 - 100 m izleme noktalarına denk gelecek şekilde yapılan hesaplama sonuçları kendi içinde değerlendirilmek üzere işlenmiştir. Bölgesel akım karakterinin de etkisinin anlaşılabilmesi için lokal akım paterni verilmiştir Hesaplama sonuçları her bir izleme/ölçüm noktasına denk gelen koordinat için analiz edilerek Tablo 2’de karşılaştırma amacıyla sunulmuştur. Tablo 2’de görülen sıcaklık verileri ile senaryo sonuçları incelendiğinde modelleme koşullarının doğru seçildiği ve model sonuçlarının şamandıra ölçümleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Tablo 3’de bu sonuçların şamandıra ölçümlerine göre bağlı hataları hesaplanmıştır. Dere çıkış ağzına konumlanacak izleme noktalarında ise en yüksek değerlerin elde edildiği görülmektedir. 2019 yılında yapılan ölçümlerde CTD 1 ve 2 numara ile isimlendirilen ölçüm noktalarında ölçülen hızlarla hesaplanan akım hızları uyumludur.

Batı sahiline yerleştirilen şamandıra noktalarında yapılan akım hızları ve yönleri batı sahil tarafındaki izleme noktalarının içinde bulunduğu alanda kıyıya dik ve kıyı doğrultusunda hesaplanan akım doğrultularında uyumlu olduğu görülmektedir



Şekil 5 - Sıcaklık dağılımı



Şekil 6 - Akım şiddeti ve yönü

Tablo 2 - Şamandıra konumlarının modelleme sonuçlarının karşılaştırması (07/01/2020 tarihli değerlere göre)

Eski Lokasyon	SAİS (Sürekli Atıksu İzleme Sistemleri) Ortalama	50 Metre (C°)	75 Metre (C°)	100 Metre (C°)	500 Metre (C°)
Şamandıra verisi	31.05	29.08	Veri Yok	27.73	27.03
Eski Lokasyon	31.05	29.01	28.72	28.28	27.12
Yeni Lokasyon	31.05	27.38	27.4	27.39	27.17
Orta Sol Lokasyonu	31.05	28.6	28.1	27.77	27.15
Orta Sağ Lokasyonu	31.05	30.05	29.31	28.56	27.15



**Tablo 3 - Bağlı hata oranları (07/01/2020 Tarihli değerlere göre)**

Eski Lokasyon	50 Metrede Bağlı Hata	75 Metrede Bağlı Hata	100 Metrede Bağlı Hata	500 Metrede Bağlı Hata
Şamandıra verisi	29.08	Veri Yok	27.73	27.03
Eski Lokasyon	%0.240	Veri Yok	-%4,62	-%0,33
Yeni Lokasyon	%5.84	Veri Yok	-%1,33	-%0,51
Orta Sol Lokasyonu	%1,65	Veri Yok	-%2,73	-%0,44
Orta Sağ Lokasyonu	-%3,33	Veri Yok	-%5,66	-%0,44

### Kaynaklar

1. M. G. Gaeta ve A. Renata, «Numerical investigation of thermal discharge to coastal areas: A case study in South Italy,» Environmental Modelling & Software, p. 124, 2020.
2. L. Laguna-Zarate, H. Barrios-Piña, H. Ramírez-León, R. García-Díaz ve R. Becerril-Piña, «Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling,» cilt 9, no. 1437, 2021.
3. A. M. A. Issakhov, «Numerical simulation of the thermal pollution zones formation from the power plant for different weather conditions.,» 2022.
4. H. B.-P. a. H. R.-L. Azucena Durán-Colmenares, «Numerical Modeling of Water Thermal Plumes Emitted by Thermal Power Plant,» cilt no. 11 , 2016.
5. V. & H. R. & B. R. & B. I. & J. H. & K. V. & K. A. & T. K. Maderich, « Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters,» 2008.
6. H. & P. J. & S. F. & K. T. Tang, «Three-Dimensional Numerical Modeling of Initial Mixing of Thermal Discharges at Real-Life Configurations,» 2008.
7. J. G. H.-C. J. & C. T. R. Rueda-Bayona, «Modelling of surface river plume using set-up and input data files of Delft-3D mod,» 2020.
8. A. M. N. & N. E. Mahmoud, «Determination of Thermal Pollution Effect on End Part of Stream,» cilt 9(3), no. 3311-3319, 2020.
9. B. H. T. A. A. & A. B. Chen, «Modelling the influence of thermal discharge under wind on algae,» 2015.
10. H. B. Fischer, E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger ve N. H. Brooks, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, 1979.
11. FlowScience, Flow-3D User Manual, 2018.





# GEOTEKNİK

Temiz Kumlar İçerisinde Yer Alan Tünellerin Kazıklar Üzerinde Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması <i>Cansu Günday Uras, Berna Unutmaz</i> .....	931
Çok Geniş Alanlardaki Saha Beton Kaplamalarında Taşınabilecek Yük Üzerine Bir Çalışma <i>Pınar Ateş, Ali Gerçek, Gürkan Özden</i> .....	945



# Temiz Kumlar İçerisinde Yer Alan Tünellerin Kazıklar Üzerinde Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması

Cansu GÜNDAY URAS<sup>1</sup>, Berna UNUTMAZ<sup>2</sup>

## ÖZET

Kentsel nüfus artışıyla beraber yeraltı yapıları gün geçtikçe daha popüler olmakta ve ulaşım, elektrik hatları gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Bu sebeple günümüzde yüzeysel veya derin temellere oturan mevcut yapıların altına tünel inşa edilmesi ve tünel yapılarının temeller üzerindeki etkilerini önemli bir konu haline getirmektedir. Bu çalışma kapsamında analitik yöntemlerle, literatür çalışmaları ve mühendislik hükümleri hesaba katılarak TBM tekniği kullanılarak yapıldığı varsayılan i) tünelin temele olan  $x$ -aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı ( $x/D$ ), ii) tünel derinliğinin tünel çapına oranı ( $z/D$ ), ve iii) temiz kum zeminin deformasyon modülü vb. parametrelerin bu etkilere katkıları araştırılmıştır. Analizler sonucunda tünel kaynaklı oturmaların,  $x/D$  v  $z/D$  oranlarının artmasıyla ve temelin merkez aksından uzaklaşması ile azaldığı, tünel inşası sonrasında kazıklarda ekstra momentlerin oluştuğu ve deformasyon modülünün artışının tünel inşasından kaynaklı oturmaları azalttığından kazıklarda oluşan ekstra moment değerini düşürdüğü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tünel inşası kaynaklı oturma, Oturma, Tünel inşası, Kazıklı temel.

## ABSTRACT

### **Effects of Tunneling on Piled Foundations in Clean Sands using Finite Element Method**

Construction of underground structures is increasing proportional to increase in population of cities, so effects of tunneling on a foundation become an important topic for civil engineers. The aim of this paper is to investigate the effect of underground TBM tunnels on settlements of piled foundations. Within the scope of this study, the contributions of the parameters that i) the ratio of location of the tunnel in  $x$ -direction to tunnel diameter ( $x/D$ ), ii) depth of the tunnel-to-tunnel diameter ( $z/D$ ), and iii) deformation modulus of the clean sand layer, etc. were investigated. As a result, additional settlements of the foundation due to tunneling are decreased while tunnel is located further than the center axis, and with increasing ' $x/D$ ' and ' $z/D$ ', and deformation

---

1 Hacettepe Üniversitesi, Ankara - cansu.gunday@gmail.com

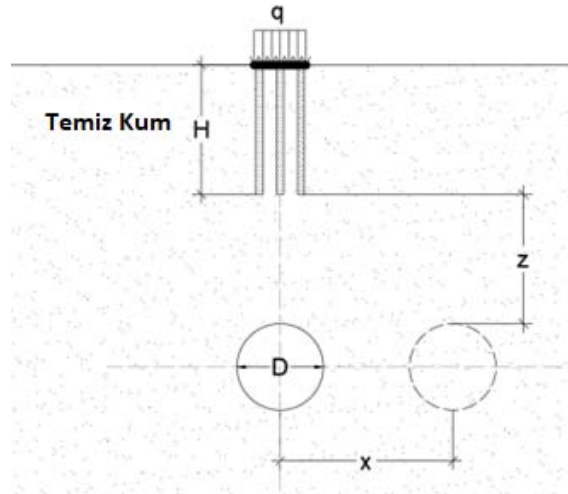
2 Hacettepe Üniversitesi, Ankara - berna.unutmaz@hacettepe.edu.tr

modulus. Tunneling has put extra moments on piles, especially on the further piles, and increasing deformation modulus has a decreasing effect on extra pile moment.

**Keywords:** settlement due to tunneling, settlement, tunneling, piled foundation.

## 1. GİRİŞ

Son yıllardaki nüfus artışı, yer altı yapılarını gerekli kılmaktadır. Özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda, yeraltı yapılarının gerekliliği kaçınılmaz hale gelmiştir. Metro tünelleri, şehir merkezlerinde yer altı yapılarının en yaygın örneklerinden biridir. Tüneller birbirine çok yakın ve genellikle çok sığ derinliklerde inşa edilmektedir. Türkiye’de ve çoğu gelişmiş ülkede olduğu gibi, yüksek katlı yapıların ve uygun olmayan zemin koşullarında imal edilen yapı temellerinin genellikle kazıklı olarak imal edildiği düşünüldüğünde tünellerin bu tip temellere olan etkileri mutlaka araştırılmalı ve bu yapıların mevcut üstyapılar üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Genel olarak, bitişik yapıların bulunması ve alan sınırlamalarından ötürü şehir merkezlerinde aç-kapa (CC) sistemleri ve Yeni Avustralya Tünel Yapım Yöntemi (NATM) tercih edilmemektedir. Aynı zamanda, bir CC tipi tüneli yapmak için, çalışılacak tüm alanın insan, araç vb. ulaşımına kapalı olması gerekmektedir ki bu durum şehir merkezlerinde neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, şehir merkezlerindeki tüneller genellikle TBM (Tunnel Boring Machine) adı verilen makineler kullanılarak kazılmaktadır. Tünel kazısından sonra kazıklı temellerin davranışını etkileyebilecek çeşitli parametreler vardır. Bu çalışmada tüm faktörler dikkate alınarak en önemlileri; i) tünelin temele olan x-aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı ( $x/D$ ), ii) tünel derinliğinin tünel çapına oranı ( $z/D$ ), ve iii) temiz kum zeminin deformasyon modülü olarak belirlenmiştir.



Şekil 1-1 - Sayısal modele ait parametrelerin şematik görüntüsü

burada,

H: kazık boyu (bu çalışmada sabit  $H=15\text{m}$  olarak alınmıştır.)

D: tünel çapı (bu çalışmada sabit  $D=10\text{m}$  olarak alınmıştır.)

z: kazık ucu ile tünel yüzeyinin arasındaki temiz açıklık

x: tünel merkez aksı ile kazık grubu merkez aksı arasındaki uzaklık

olarak gösterilmektedir.

Aşağıdaki paragrafta ele alınacak ve tüneller ile yapılar arasındaki etkileşimi bulmayı amaçlayan birçok çalışma olmasına rağmen, konunun daha fazla araştırılması gerekmektedir.

Tünel kazılarının zemin yüzeyindeki yerleşimler üzerindeki etkileri çeşitli araştırmacılar tarafından sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır (örneğin, Selemetas (2006), Kaalberg vd. (2006), Cham (2016), Grant vd. (2000), Jacobsz vd. (2005), Ng vd. (2012) vb.). Selemetas vd. (2006), Birleşik Krallık'ta Channel Tunnel Rail Link (CTRL) inşaatı sayesinde tam ölçekli kazıkların tünel inşası kaynaklı hareketlere tepkisini incelemiş ve oluşan deplasmanları kullanarak genel etki bölgeleri belirlemiştir. Grant vd. (2000) bir santrifüj modeli tasarlamış ve test sonuçlarını ampirik yaklaşımlarla karşılaştırmıştır. Yapılan testler sonucunda Gauss dağılımının, tünel tepesinin yaklaşık 0.5D'si dışındaki yüzey ve de yüzey altı oturmayı temsil ettiği sonucuna varmıştır. Benzer şekilde Ng vd. (2012) birkaç santrifüj testi yapmış ve sonuç olarak, ikiz tünel tekniğinin neden olduğu kazık oturmasının, bir tünelin kazığa göreli konumu ve tünellerin yüzey ve tünel arası temiz açıklık-çap oranları (C/D) ile yakından ilişkili olduğu belirtilmektedir. Chen vd. (1999) kazık deformasyonlarını, yanal ve eksenel yükleri ve momentleri tahmin etmek için etkili ve pratik iki aşamalı prosedür sunmuştur. Bu çalışmada tünel inşası kaynaklı hareketleri etkileyen faktörlerin zemin mukavemeti tünel geometrisi, kazık çapı, kazık uzunluğunun tünel dış yüzey derinliğine oranı ve zemin kayıp oranı vb. olduğunu söylemektedir. Mroueh vd. (2002), PECPLAS yazılımını kullanarak elasto-plastik 3D analizler yapmıştır. Analizler sonucu önemli kesit tesirlerinin ve sapmaların tünel inşası tarafından tetiklendiği görülmektedir. Çalışma sonucu yapılan sayısal analizlere göre tünelin kazık ucuna göre yatay ekseninin çok önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır.

## 2. AMAÇ

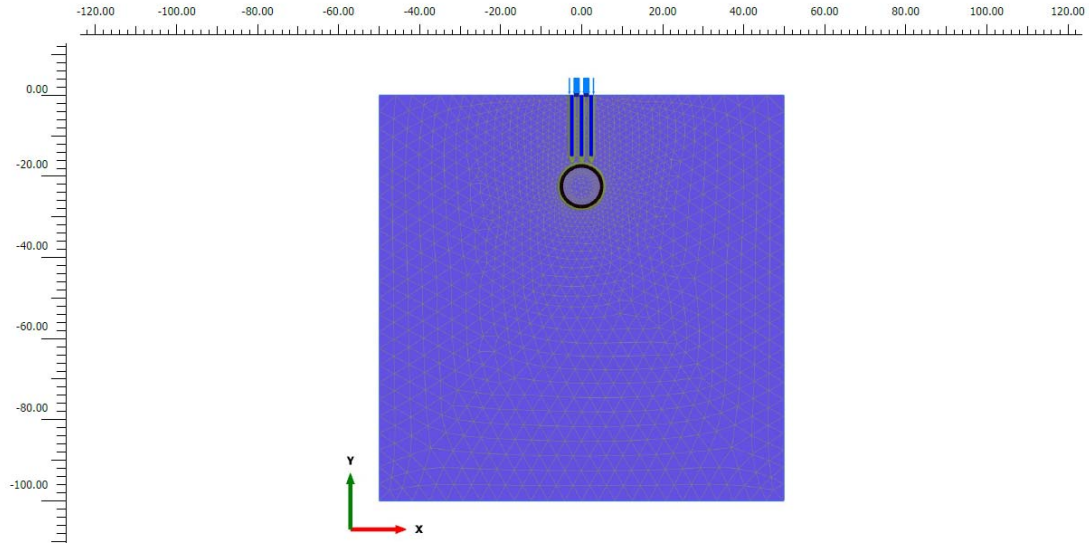
Bu çalışmanın temel amacı tünelin temele olan x-aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı (x/D), tünel derinliğinin tünel çapına oranı (z/D), ve temiz kum zeminin deformasyon modülü gibi belli başlı parametreler ışığında kazıklı temeller ile tünellerin etkileşimini araştırmaktır. Bu amaçla, değişken zemin, tünel ve geometri koşullarında birtakım iki boyutlu (2D) sonlu elemanlar analizleri yapılmış olup sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

## 3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Çalışma kapsamında, tünel kazısı sonrası bir kazıklı temelin tepkisini inceleyebilmek için PLAXIS 2D (V20) yazılımı kullanılarak iki boyutlu bir dizi sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Bu analizler 3 farklı rijitliğe sahip kohezyonsuz temiz kum (deformasyon modülü 15MPa, 25MPa ve 35MPa), 5 farklı tünel derinliğinin tünel çapına oranı; z/D (0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00), 5 farklı tünelin temele olan x-aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı; x/D (0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00) değerleri dikkate alınarak yürütülmüştür. Kazık uzunluğu (H) ve tünel çapının (D) çalışma kapsamında sabit olmasına karar verilmiş ve bu araştırma için H=15.0m ve D=10.0m olarak seçilmiştir. Bir hesap katı için tipik değer 15kPa olarak alınmış ve çalışma kapsamında kazıklı temeller ile zemine oturan yapının 10 katlı olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle, analizlerde sabit bir yapısal yük olarak q=150kPa yükü temel seviyesine etkilmiştir.

Analizlerde ilk adım olarak Plaxis tarafından otomatik olarak başlangıç gerilmelerinin otomatik olarak hesaplandığı başlangıç fazı tanımlanmıştır. Birinci aşamada kazık imalatı tanımlanmış olup takip eden ikinci aşamada ise yapı imalatı modellenmiştir. Son aşama olarak ise belirlenmiş olan parametreler ışığında tünel imalatı tamamlanmıştır.

Analizlerde zemin modeli olarak pekleşen zemin modeli (hardening soil model) seçilmiş olup zemin parametreleri aşağıdaki tabloda sunulmaktadır.



Şekil 3-1 - Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan tipik ağlar

Tablo 3-1 - Zemin Parametreleri

Zemin Tipi / Parametre	Kum I	Kum II	Kum III	Birim
Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{unsat}$	18.50	18.50	18.50	kN/m <sup>3</sup>
Doygun Durumdaki Birim Hacim Ağırlık, $\gamma_{sat}$	19.00	19.00	19.00	kN/m <sup>3</sup>
$E_{50}^{ref}$	9650	16000	22500	kN/m <sup>2</sup>
$E_{oed}^{ref}$	9650	16000	22500	kN/m <sup>2</sup>
$E_{ur}^{ref}$	28950	48000	67500	kN/m <sup>2</sup>
c	5	5	5	kN/m <sup>2</sup>
$\phi$	25	25	25	° (derece)

Kazıklı temele ait boyutlar teorik olup Ø80cm çaplı L=15.0m uzunluğundaki 3x3 kazık grubu modellemesi için temel boyutu 6.0x6.0m<sup>2</sup> olarak seçilmiş olup temel kalınlığı ise 1.0m olarak alınmıştır. Kazık aralıkları ise grup etkisini ortadan kaldırmak adına s=2.40m ( $s \geq 3D$ ) olarak seçilmiştir. Tüm yapısal elemanların C30 sınıfı olduğu ve 28. gün elastisite modülünün  $E=3.025 \times 10^7$  kPa değerinde olduğu kabul edilmiştir.

#### 4. SAYISAL MODELLEMELERDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

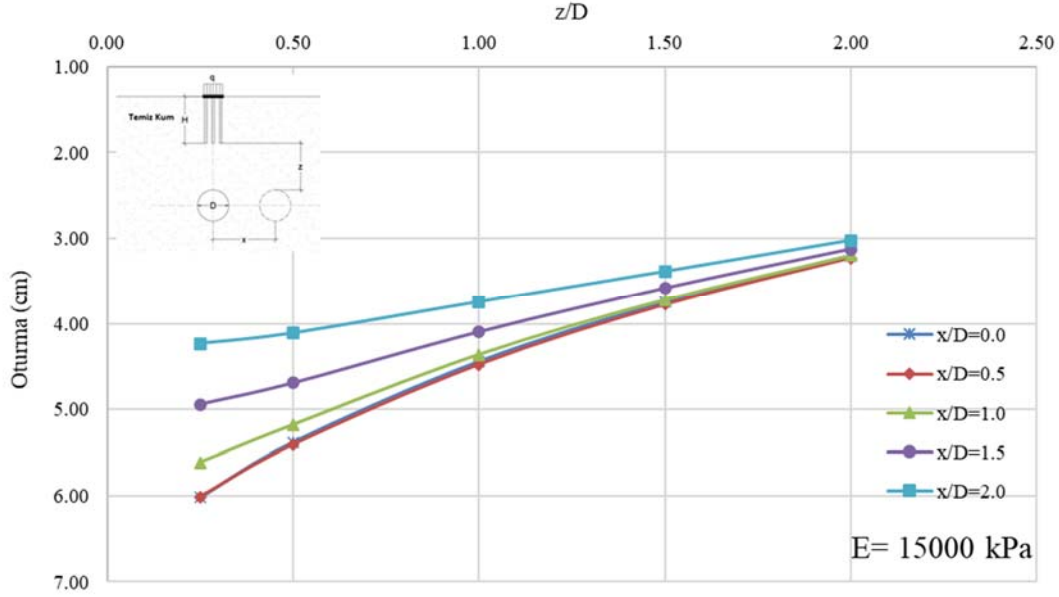
Bu çalışma kapsamında farklı durumlara ait araştırmalar yapılmıştır. Yapılan analizler için seçilen en önemli parametreler i) tünelin temele olan x-aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı ( $x/D$ ), ii) tünel derinliğinin tünel çapına oranı ( $z/D$ ), ve iii) temiz kum zeminin deformasyon modülüdür. Bu çalışma kapsamında ilgili bölümde verilen farklı parametreleri kapsayan 75 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki bölümde özetlenmektedir.



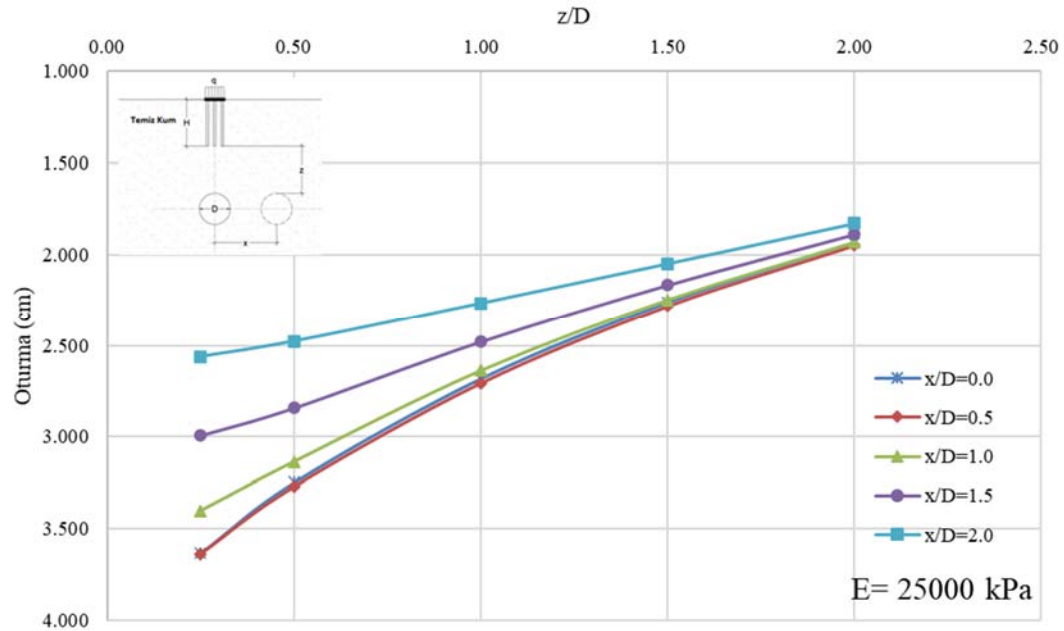
#### 4.1. Temel Oturması ve z/D Oranı İlişkisi

Temel oturmasına etkisi incelenen ilk parametre tünel ile kazık arasındaki net mesafenin (z) kazık çapına (D) oranıdır. Farklı zemin rijitlikleri (E) ve kazıkların yatay konumları (x/D) için, karşılaştırmalı grafikler aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır.

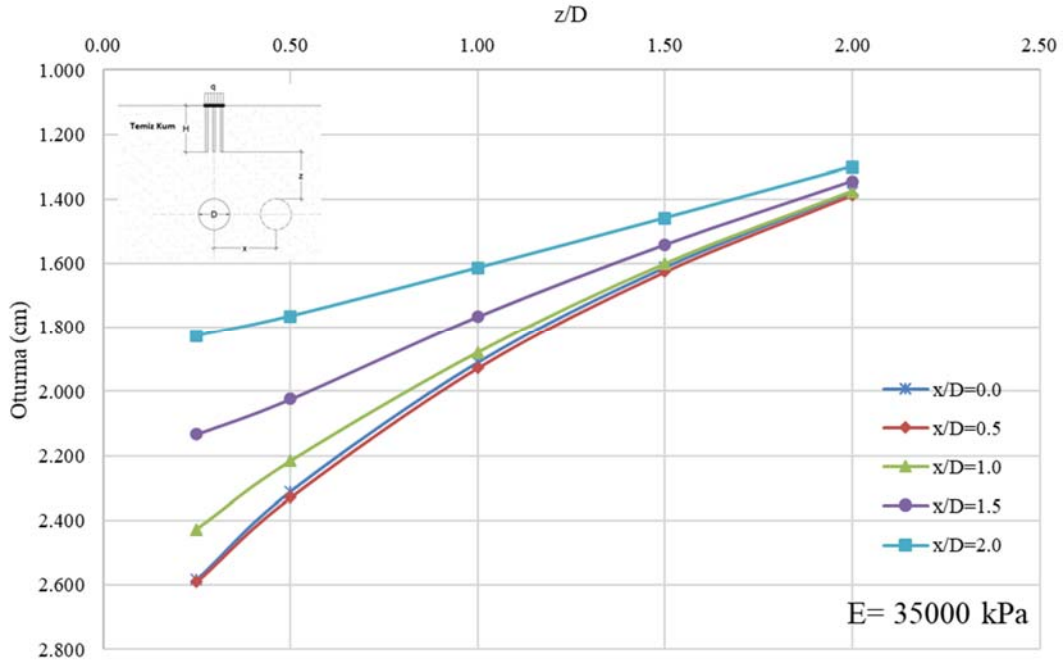
Aşağıdaki şekillerde temel oturması, tünel inşasından kaynaklanan oturma değeridir, yani temellerde tünel inşasından sonra elde edilen ek oturmalar. Tünel, temel merkez ekseninden daha uzağa yerleştirildiğinde temelin ek oturmasının azaldığı söylenebilir. Artan 'x/D' ve 'z/D' ile oturma azalmaktadır.



Şekil 4-1 - Temel Oturması ve z/D Oranı Grafiği (E=15MPa)

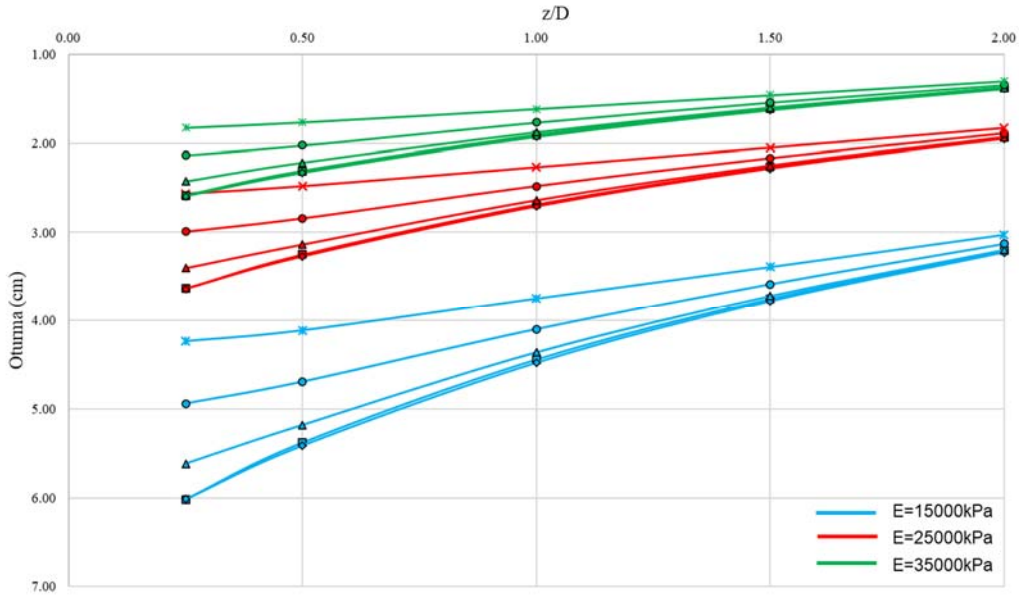


Şekil 4-2 - Temel Oturması ve z/D Oranı Grafiği (E=25MPa)



Şekil 4-3 - Temel Oturması ve z/D Oranı Grafiği (E=35MPa)

Yukarıdaki grafikler aynı zamanda deformasyon modülünün de temel oturmasında benzer bir eğilim gösterdiğini göstermektedir. Artan deformasyon modülü ile oturma azalmaktadır. Bahsedilen bu davranışı anlamak için Şekil 4-4 çizilmiştir.

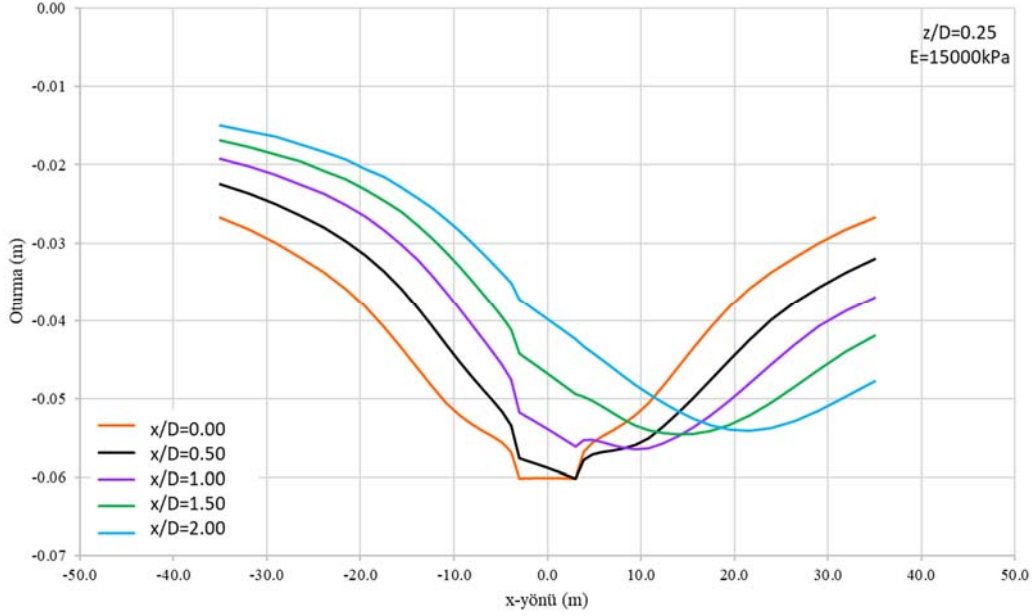


Şekil 4-4 - Farklı Deformasyon Modülü Değerlerinde Temel Oturması ve z/D Oranı Grafiği

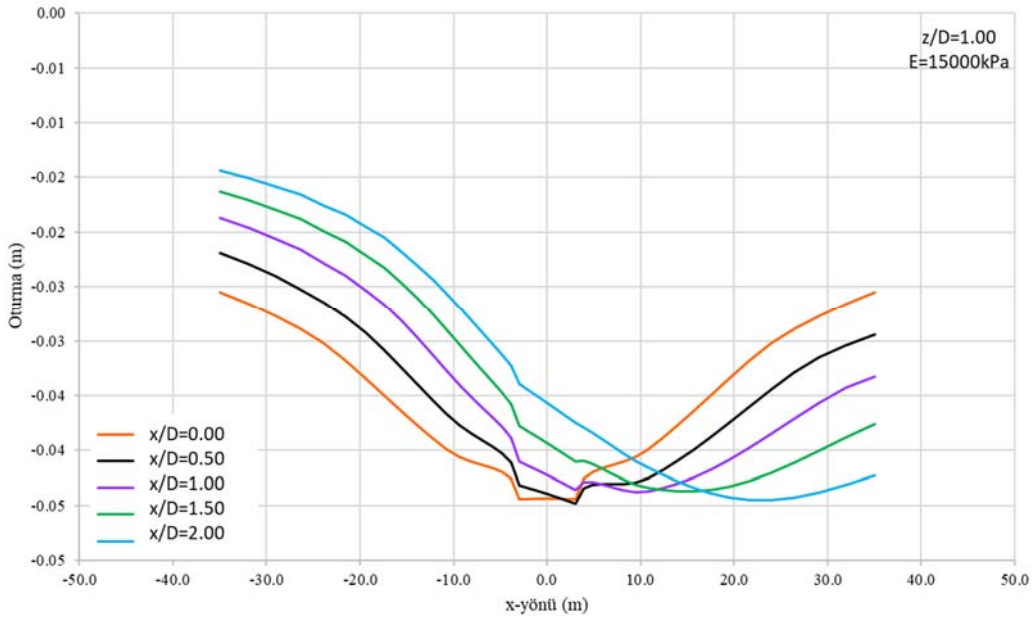
Şekil 4-4, deformasyon modülü değerinin, x/D ve z/D parametreleri gibi çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

## 4.2. Yüzey Oturma Grafikleri

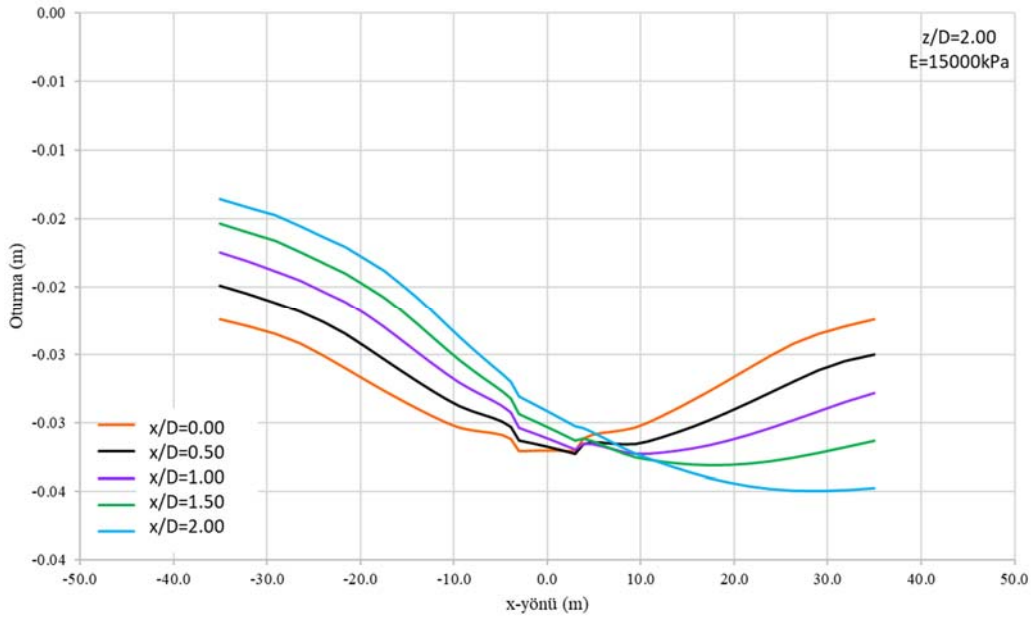
Yüzey oturmalarının değişiminde önemli olduğu düşünülen bir diğer parametre de tünelin 'x/D' ile gösterilen kazık merkezine göre yatay konumudur. Bu amaçla, yatay konumdaki değişim ile yüzey oturmasının değişimini gösteren grafikler Şekil 4-5, 4-6, 4-7'de  $z/D=0.25$ , 1.00 ve 2.00 ile  $E=15\text{MPa}$  için gösterilmiştir.



Şekil 4-5 - Yüzey oturmasının x/D Oranına Göre Değişimi ( $z/D=0.25$  &  $E=15\text{MPa}$ )

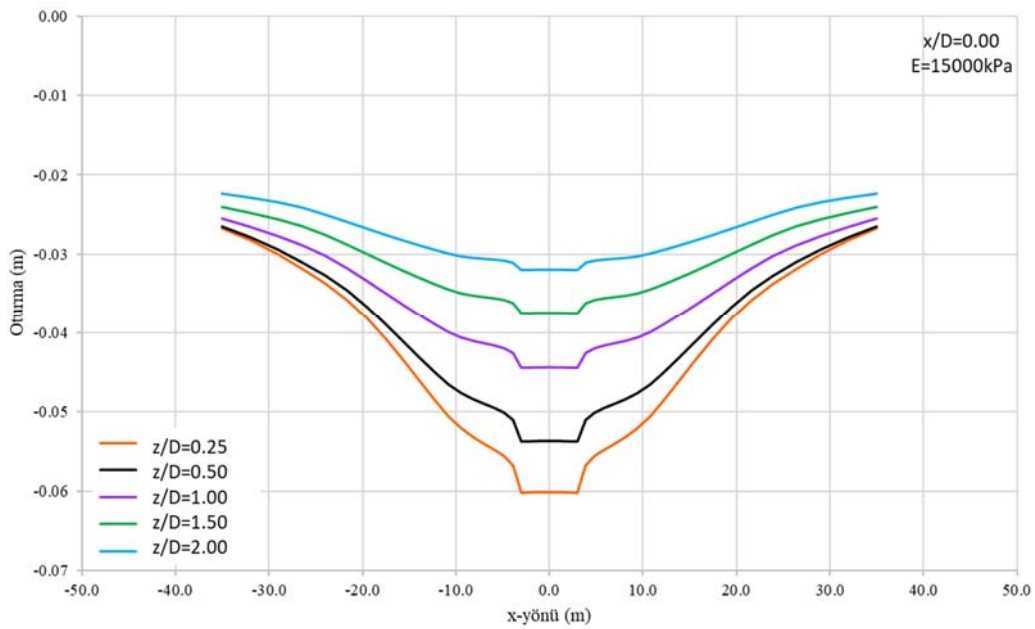


Şekil 4-6 - Yüzey oturmasının x/D Oranına Göre Değişimi ( $z/D=1.00$  &  $E=15\text{MPa}$ )

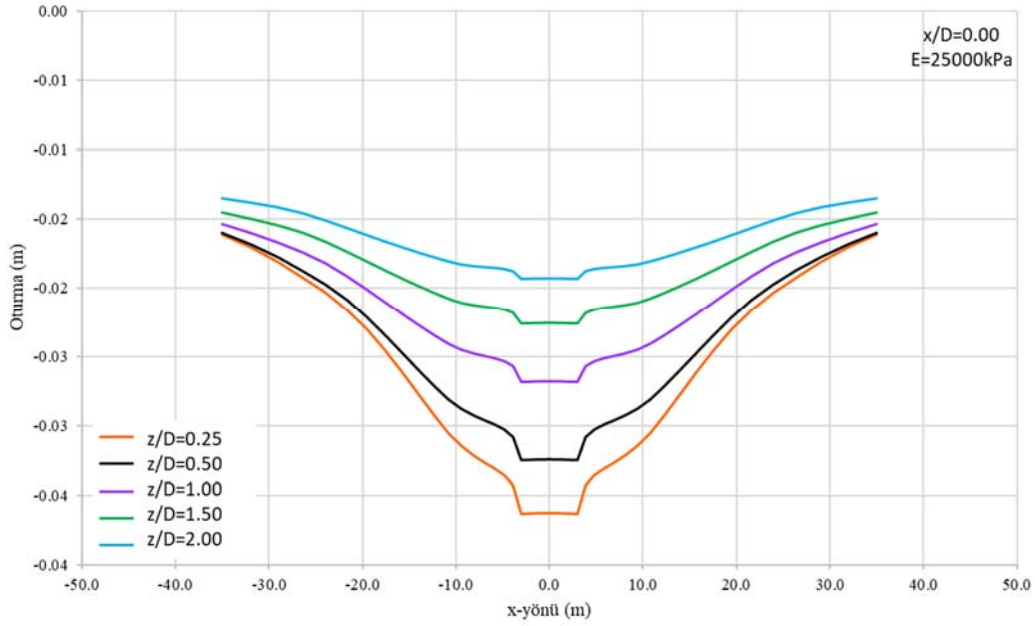


Şekil 4-7 - Yüzey oturmalarının x/D Oranına Göre Değişimi (z/D=2.00 & E=15MPa)

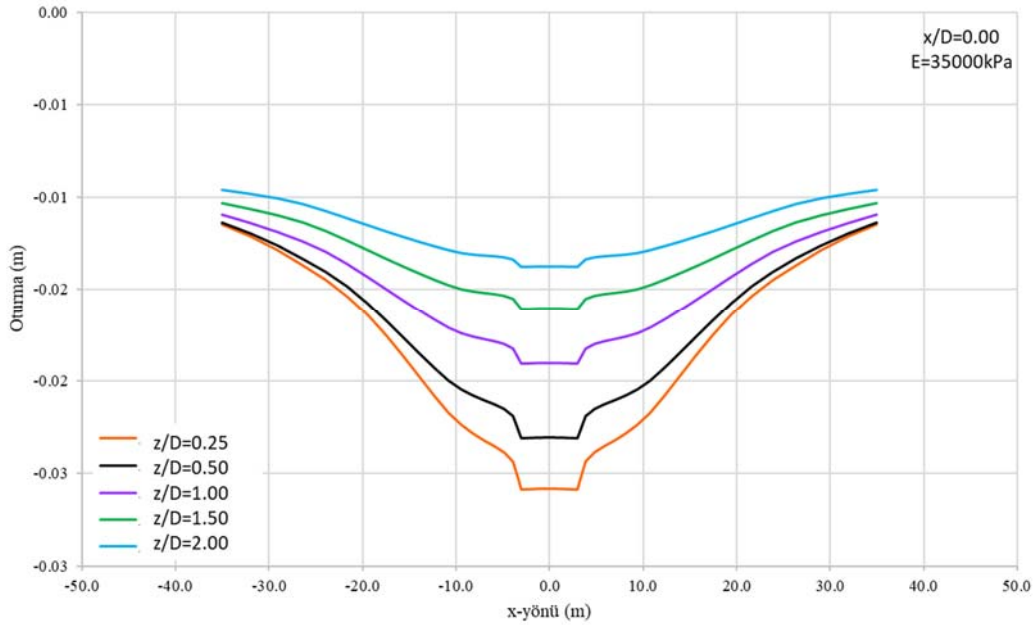
Ayrıca tünel derinliğindeki değişime göre yüzeydeki oturma değerlerindeki değişim karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, diğerleri birbirine benzer bir eğilim gösterdiğinden x/D=0 olan durum seçilmiştir (Şekil 4-8, 4-9 ve 4-10).



Şekil 4-8 - Yüzey oturmalarının z/D Oranına Göre Değişimi (x/D=0.00 & E=15MPa)



Şekil 4-9 - Yüzey oturmalarının  $z/D$  Oranına Göre Değişimi ( $x/D=0.00$  &  $E=25\text{MPa}$ )

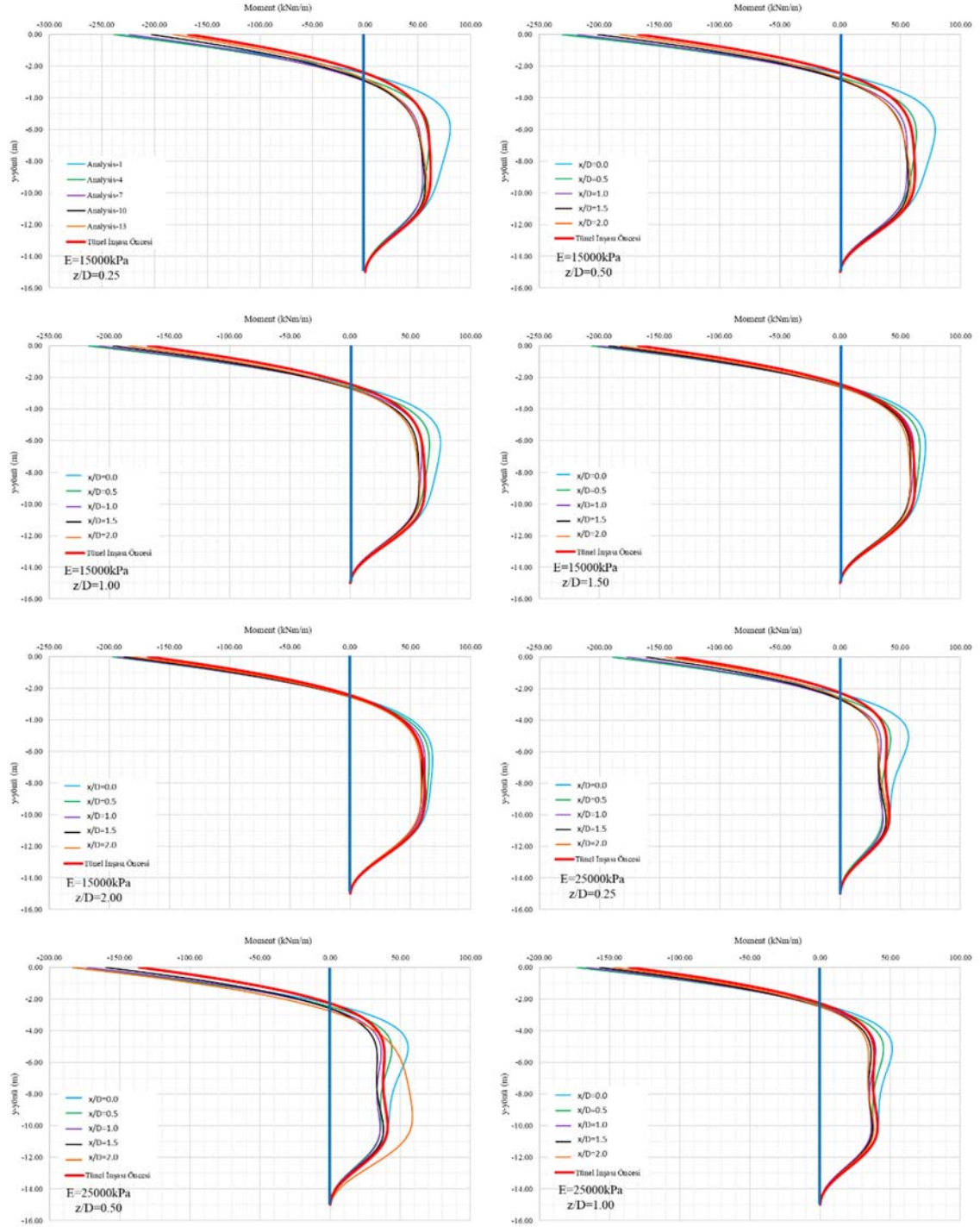


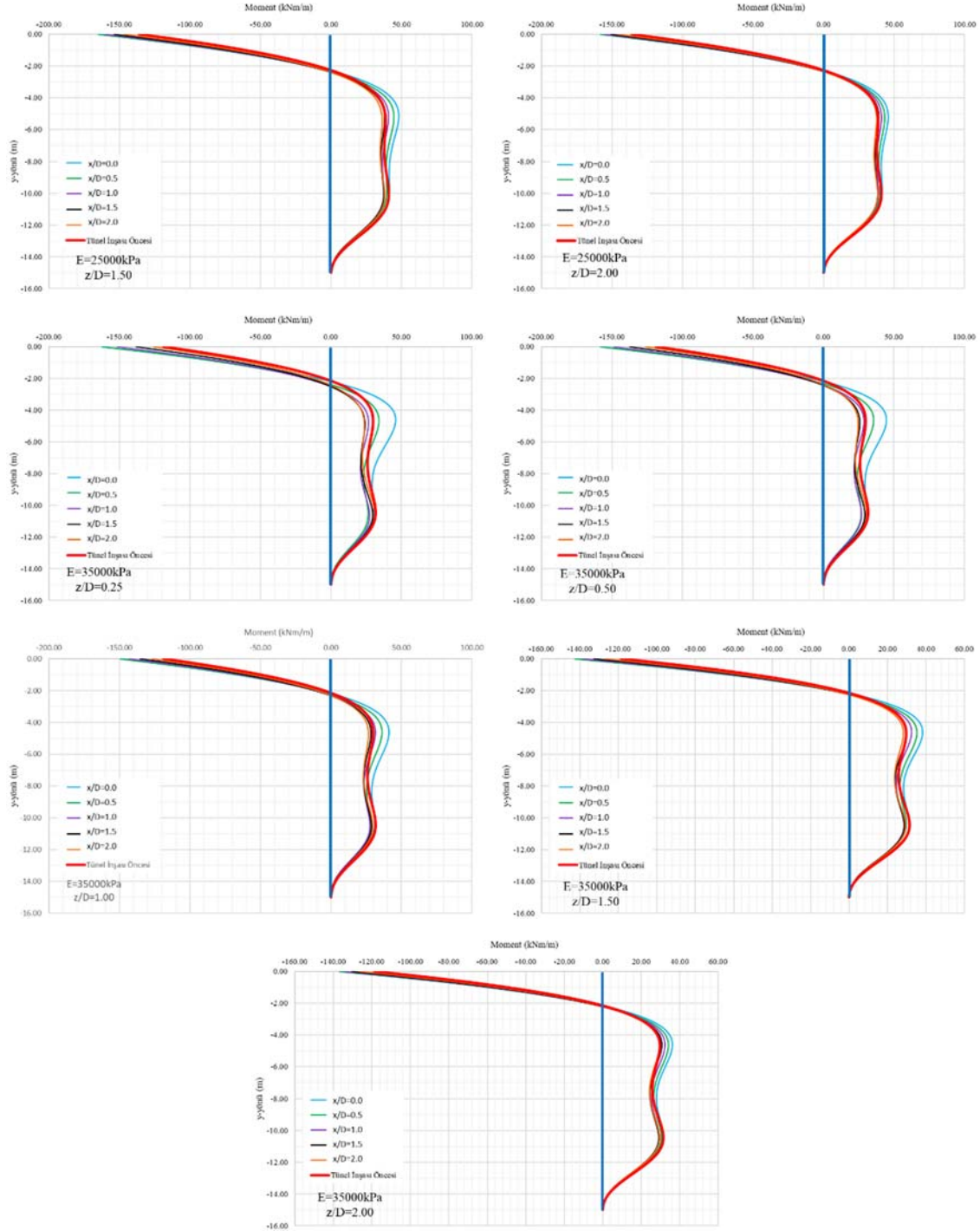
Şekil 4-10 - Yüzey oturmalarının  $z/D$  Oranına Göre Değişimi ( $x/D=0.00$  &  $E=35\text{MPa}$ )

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi tünel daha derinde imal edilince artan  $z/D$  değeri ile oturma değerleri azalmaktadır.

### 4.3. Moment Grafikleri

Tünel imalatı öncesi ve sonrası kazıklarda oluşan momentler, aşağıdaki şekillerde sunulan kazık uzunluğu boyunca moment grafikleri yardımıyla detaylı olarak incelenmiştir. Bu şekillerde, moment duyarlılığına göre diğerinden daha kritik durumda olan sol kazıkta oluşan momentler verilmiştir.





Şekil 4-11 - Farklı Analiz Durumlarında Sol Kazıkta Oluşan Eğilme Momenti Grafikleri

Yukarıdaki grafiklerden, tünel imalatının, tünelin konumu veya derinliği ne olursa olsun, kazık başlığında meydana gelen maksimum eğilme momentini arttırdığı söylenebilir. Ancak, momentin kazık uzunluğu boyunca dağılımına bakarsak, kazıkların hemen altında yer alan tünel için kazık üzerindeki moment artar. Ancak tünel yatay konumda kazıktan uzaklaştığında ( $x/D > 1.0$  durumları için), eğilme momentinde hafif bir azalma olur. Bu, farklı rijitlik değerlerine sahip tüm zeminler için aynıdır. Tünel konumu +x yönünde (sağa doğru) değiştiği için en çok etkilenen

kazık soldakidir. Bunun nedeni etki bölgeleri olabilir. Tünel etki alanı içine yerleştirildiğinde kazık üzerindeki etkisi daha önemli hale gelir. Tünel, etki bölgesi dışına doğru ilerledikçe, kazıklar üzerindeki etkisi daha az hale gelir.

Artan deformasyon modülü, zeminin artan deformasyon modülü ile yer değiştirmenin azalması nedeniyle ekstra kazık momentini azaltıcı bir etkiye sahiptir. Beklendiği gibi, tünel derinliği arttıkça kazıklardaki momentler azalmaktadır. Bunun nedeni, tünel etki bölgelerinde daha derine yerleştirildiğinde hem oturma hem de kazık kuvvetleri üzerindeki etkilerinin azalmasıdır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında tünel kazılarının kazıklı temel davranışına etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla farklı parametreler ile 2D sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler yapılmıştır. Çalışma kapsamında belirlenen ana parametreler tünelin temele olan x-aksı yönündeki yerleşiminin tünel çapına oranı ( $x/D$ ), tünel derinliğinin tünel çapına oranı ( $z/D$ ), ve temiz kum zeminin deformasyon modülü olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar kullanılarak kazıklı temellerde gözlenmesi beklenen oturma mertebeleri düşünüldüğünde, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Tünel, temelin merkez ekseninden daha uzağa yerleştirildiğinde temelde oluşan ek oturmalar azalır, yani artan " $x/D$ " ve " $z/D$ " ile oturma azalır.
- Artan deformasyon modülü (E) ile oturma beklendiği gibi azalmaktadır.
- Tünel x-doğrultusunda temel merkez ekseninden daha ileride yer alırken, toplam oturma değerleri de düşmektedir. Ancak, bu durumda da farklı oturma durumu daha önemli bir hale gelebilir. Bu nedenle tasarımda her zaman farklı oturma kriteri kontrol edilmelidir.
- Tünel imalatı, özellikle tünele en uzak konumlanmış kazıklarda ek momentler oluşturur. Bu çalışmada tünel konumu +x yönünde (sağa doğru) değiştiği için en çok etkilenen kazık soldakidir.
- Artan deformasyon modülü, zeminin artan deformasyon modülü ile yer değiştirmenin azalması nedeniyle ilave kazık momentini azaltıcı bir etkiye sahiptir.

## Kaynaklar

1. Al-Omari, R. R., Al-Soud, M. S., Al-Zuhairi, O. I., Effect of Tunnel Progress on the Settlement of Existing Piled Foundation, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41(2); 102–113, 2019.
2. Basile, F., Effects of tunneling on pile foundations, *Soils and Foundations*, The Japanese Geotechnical Society, 54(3), 280-295, 2014.
3. Cham W.M., Singapore Case Histories on Performance of Piles Subjected to Tunnelling-Induced Soil Movement, *International Journal of Geoengineering Case histories*, <http://casehistories.geoengineer.org>, Vol.3, Issue 3, p.128-148, 2016.
4. Chen, L. T., Poulos, H.G., Loganathan, N., Pile Responses Caused by Tunneling, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), 580-581, 1999.
5. Cheng, C .Y., Dasari, G. R., Leung C. F., Chow, Y. K., & Rosser, H. B., 3D Numerical Study of Tunnel-Soil-Pile Interaction, *Tunneling and Underground Space Technology*, 19(4-5), 381-382, 2004.



6. Clayton, C.R.I., The standard penetration test (SPT): methods and use Construction Industry Research and Information Association, 129pp, 1995
7. Dias, T. G. S., Bezuijen, A., Data Analysis of Pile Tunnel Interaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(12), 2015
8. Franza, A., Tunneling and its effects on piles and piled structures, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, 2016
9. Grant, R. J., Taylor, R. N., Tunneling-induced ground movements in clay, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 143(1), 43-55, 2000
10. Huang, M., Zhang, C., Li, Z., A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles, Tunneling and Underground Space Technology, 24(4), 410-422, 2009
11. Jacobsz, S. W., Standing, J. S., Mair, R. J., The influence of tunneling on piled foundations, 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, 2015
12. Kaalberg, F. J., Teunissen, E. A. H., Van Tol, A. F., Bosch, J. W., Dutch research on the impact of shield tunneling on pile foundation, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment, 2005
13. Kitiyodom, P., Matsumoto, T., Kawaguchi, K., A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29(15), 2005
14. Kulhawy, F. H., Mayne, P. W., Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, 1990
15. Loganathan, N. P., Ground and Pile-Group Responses due to Tunneling, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 41(1), 57-67, 2001
16. Mair, R. J., Williamson, M. G., The influence of tunneling and deep excavation on piled foundations, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Korean Geotechnical Society, Korea, 2014
17. Marshall, A. M., Tunnel-Pile Interaction Analysis Using Cavity Expansion Methods, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(10), 1237-1246, 2012
18. Marshall, A. M., Haji, T., An analytical study of tunnel-pile interaction, Tunneling and Underground Space Technology, 43-51, 2015
19. Mroueh, H., Shahrour, T., Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundation, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 217-230, 2002
20. Ng, C. W. W., Lu, H., Peng, S. Y., Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunneling on an existing pile, Tunneling and Underground Space Technology, 2013
21. Piech, C., Sahami, M., 11. Parameter Estimation, <https://web.stanford.edu/class/cs109/reader/11%20Parameter%20Estimation.pdf>, May, 2017 (date accessed: December 1, 2020)
22. PLAXIS CONNECT Edition 20.04, PLAXIS 2D-Reference Manual, 2020 <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/46137/manuals---plaxis> (date accessed: November, 2020)

23. PLAXIS CONNECT Edition 20.04, General Information Manual, 2020  
<https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/46137/manuals---plaxis> (date accessed: November, 2020)
24. PLAXIS CONNECT Edition 20.04, Material Models Manual, 2020  
<https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/46137/manuals---plaxis> (date accessed: November, 2020)
25. Selemetas, D., Standing, J. R., Mair, R. J., The response of full-scale piles to tunneling, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2006
26. Son, M., Cording, E. J., Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(2), 162-177, 2005

## Çok Geniş Alanlardaki Saha Beton Kaplamalarında Taşınabilecek Yük Üzerine Bir Çalışma

Pınar ATEŞ<sup>1</sup>, Ali GERÇEK<sup>2</sup>, Gürkan ÖZDEN<sup>3</sup>

### ÖZET

Geniş alanlarda yapılan beton kaplamalar üzerinde istifleme yapılırken özel mekanik ekipmanlar kullanılmakta, bunların hareketi sırasında anoların izin verilen sınırlar dışında deplasmanlar arz etmemesi istenmektedir. Anolar maqsallı imal edildiği ve birbirlerine maqsallı bağlandığı için bağımsız davrandıkları kabul edilebilir. Bunların taşıma gücü analizleri ayrı yapılabilir de anoları yataklayan zemin içinde gerilme soğanları girişim yapmaktadır. Her bir ano komşu olduğu diğer anoya sürşarj desteği yaparak genel göçme sınırına yaklaşmasını önleyebildiği için anoların bağımsız analizi gerçekçi bir yaklaşım değildir. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile elde edilen bulgulara göre, anolarla imal edilen temel sisteminin taşıma gücü, tekil bir anonun taşıma gücü ile bütün olarak yüklenen sahanın taşıma gücü arasında kalmaktadır. Sahadaki yükleme paterni bu açıdan belirleyici olup en kritik durum sahanın küçük bir bölümü yüklenirken, kalanının boş bırakılması halinde ortaya çıkmaktadır. Temel taşıma gücü açısından yapılan bu irdelemeye ilave olarak beton kaplamanın elastik eğrisine bağlı oluşan iç kuvvetlerin uygulanabilecek maksimum istifleme yükü üzerinde daha belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Bu açıdan ele alındığında, beton kaplamanın şekil değiştirme davranışı ve bu davranışı yöneten alt temel dolgu parametreleri belirleyici unsur olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Taşıma kapasitesi, genel göçme, beton saha kaplamaları.

### ABSTRACT

#### **A Study On Loads That Can Be Carried On Field Concrete Coatings In Very Large Areas**

When stacking on large-area concrete pavements, special mechanical equipment is used, and it is requested that the slabs do not displace beyond the allowable limits. It can be assumed that they act independently, as the slabs are manufactured with joints and are hinged to each other. Stress bulbs interfere in the soil bearing the slabs, despite the fact that their bearing capacity analyses can be performed separately. Independent slab analysis is not a realistic approach because each slab can prevent adjacent slab from approaching the general failure limit by

---

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - p.ates@ogr.deu.edu.tr

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - gercek.ali@ogr.deu.edu.tr

3 Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir - gurkan.ozden@deu.edu.tr

*providing a surcharge effect. In this regard, the loading pattern in the field is critical, and the most critical situation occurs when only a small portion of the field is loaded while the rest is left empty. In addition to the foundation bearing capacity analysis, it was determined that the internal forces caused by the elastic curve of the concrete pavement are more prominent on the maximum stacking load. The determining factors, in this case, are the deformation behavior of the concrete pavement and the parameters of the sub-base fill.*

**Keywords:** *Bearing capacity, general failure, concrete pavements.*

## **AMAÇ**

Zeminlerin taşıma kapasitesi, üstüne gelen yükleri zeminde kayma göçmesine yol açmadan taşıyabileceği yük kapasitesi olarak tanımlanır. Sığ temel taşıma gücü formülü ilk olarak Terzaghi (1943) tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra Meyerhof (1963), Hansen (1970) ve Vesic (1973) tarafından taşıma gücü formülleri geliştirilmiştir. Taşıma gücünü etkileyen başlıca faktörler, zeminin mukavemet parametreleri, temelin boyutları, şekli ve gömülü derinliği olmaktadır. Burada en önemli faktörlerden biri sürşarj terimi olarak nitelendirilen ve temel tabanı ile zemin yüzeyi arasında kalan tabakanın temelin taşıma gücüne yaptığı katkıdır.

Kargo konteyner depolama alanları benzeri istifleme yapılan çok geniş sahalarda temeller anolar halinde teşkil edilmektedir. Anolar birbirlerine mafsallı bağlandığı için bağımsız davrandıkları kabul edilebilir. Birbirinden bağımsız çalışan bu anoların taşıma gücü tekil temel olarak ele alınabilir. Bunların taşıma gücü analizleri ayrı yapılabilir de anoları yataklayan zemin içinde gerilme soğanları girişim yapmaktadır. Yükleme koşullarına bağlı olarak her bir anonun komşu olduğu diğer anoya sürşarj desteği sağlayarak onun genel göçme sınırına yaklaşmasını önlemesi mümkündür. Dolayısıyla bu anoların tekil olarak taşıma gücünün ele alınması ve ano dışında sürşarj katkısının sadece temel derinliği ile sınırlandırılması aşırı güvenli tarafta kalan bir yaklaşım olmaktadır.

Beton saha kaplamalarının (anolar) yapısal tasarımında genellikle kaplamanın alt kısmında oluşan çekme gerilmesi ve bunun yanı sıra kesme gerilmelerinin karşılanması hedeflenmektedir. Bu çekme ve kesme gerilmelerinin karşılanması için betonun yeterli eğilme ve kesme dayanımına sahip olması gerekir. Bu durumda kaplamanın kalınlığının yanı sıra donatı detayı önem arz eder [1].

Betonarme kaplamaları ilgilendiren şartnamelerde tasarımı kontrol eden parametreler tekerlek yükü ve değme alanına göre Şekil 1'de gösterilmiştir. Kaplamalarda genellikle etkili olan parametre anoda oluşan çekme gerilmesi olmaktadır. Ancak noktasal yükler gibi küçük bir alana yoğunlaşan yükler için betonun zımbalama dayanımı ön plana çıkar. Büyük anolarda çekme ve kesme kuvvetlerinin yanında açıklık momentleri de önemlidir. Benzer bir bulguyu Rollings ve Chou [2] yaptıkları bir çalışmada küçük alana sahip kaplamaların daha düşük çekme gerilmesine sebep olduğu ve fazla sehim yaptığını belirtirken, büyük alana sahip kaplamalarda ise negatif momentlerden kaynaklı gerilmelerin geliştiğini ve daha az sehim yaptığını bildirmektedir.

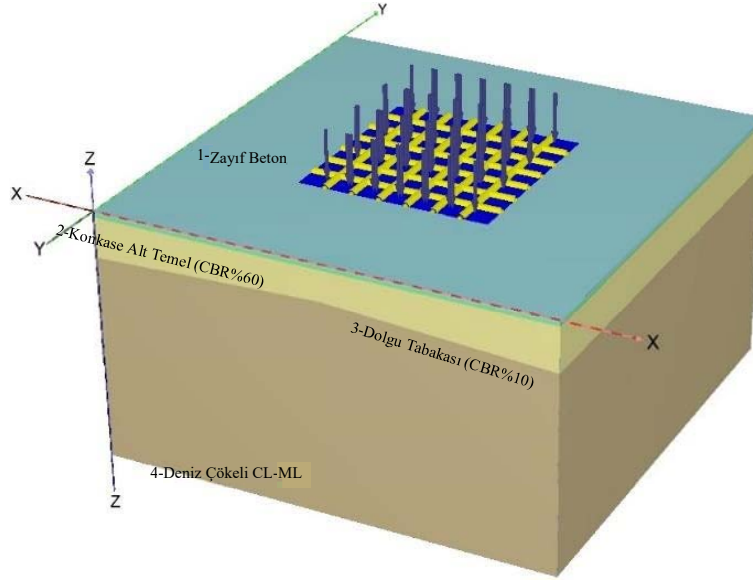
Bu çalışmada anolar halinde imal edilen beton kaplamaların taşıma gücü koşulları irdelenmiştir. Komşu anolar farklı yükleme koşullarında mafsallı, mafsalsız ve tam ankastre olarak ayrı ayrı üç boyutlu sonlu elemanlar analiziyle ele alınmıştır. Maksimum istifleme yükünü belirlemek amacıyla temel taşıma kapasitesi, anoların oturması ve kaplamada oluşan iç kuvvetler birlikte değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında farklı yükleme geometrileri ve kombinasyonlarını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemine müracaat edilmiş, analizler bir vaka özelinde gerçekleştirilerek ulaşılan sonuçlar sahadaki durumla kıyaslanmıştır.

YÜK TİPİ	
TEKİL YÜK	
Konteyner Ayağı	
Taban Plakası yok	Taban Plakası var
Araç Yükleri	
Sert Tekerlek	Basıncılı Tekerlek
Özel Tekerlek	
YAYILI YÜK	
Özel Yükler	
Örn; rulo veya silindirik yükler	
Depolama Alanları	
TASARIMI KONTROL EDEN PARAMETRELER	
Beton Dayanımı	Negatif Moment
Zımbalama	Deplasman
Cekme Gerilmesi	
1 2 4 10 20 40 100 200 400 (mm <sup>2</sup> x10 <sup>4</sup> )	1 2 4 10 20 40 (m <sup>2</sup> )
YÜK DEĞME ALANI (Her tekerlek, ayak veya tekil yük için)	

Şekil 1 - Yükleme türü ve değme alanına göre tasarımı kontrol eden parametreler [1]

## MODEL ÖZELLİKLERİ VE PARAMETRELER

Sahaya ait analiz modeli üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde xx adet noktasal eleman ve 189811 adet hacimsel eleman bulunmaktadır. Oluşturulan eleman sayıları ve boyutları, iteratif çözüm yönteminin doğruluğu açısından oldukça yeterlidir.



Şekil 2 - Sonlu Elemanlar Model Geometrisi

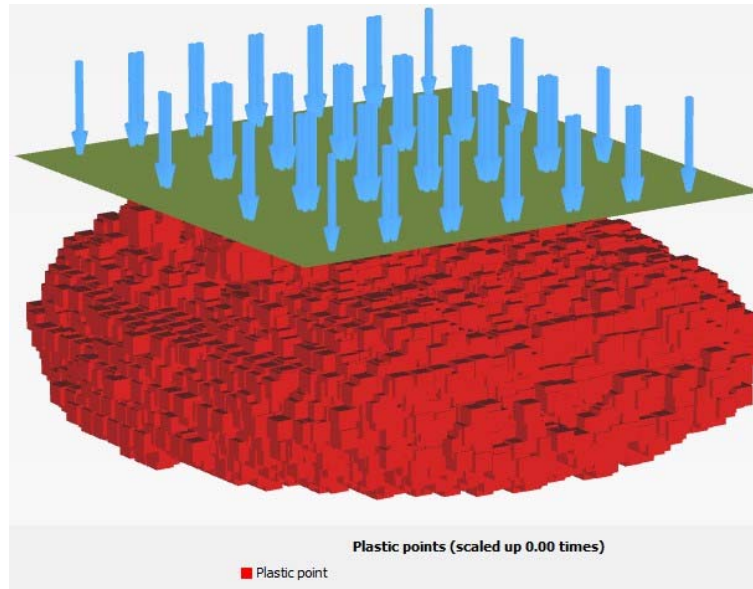
Şekil 2’de yer alan zemin profilinde ayrışmış kaya üzerinde imal edilen dolgu iki tabaka halinde yapılmış ve bu tabakalar sırasıyla aşağıdan yukarıya %10 ve %60 CBR değerlerinde sıkıştırılmış, böylece alt-temel zemini oluşturulmuştur. Dolgu tabakaları sahanın doğal zemini olan deniz çökeli tabakasının üzerinde bulunmaktadır. Her ne kadar dolgu kalınlığı oldukça fazla olsa da ( $H \approx 5$  m) yükleme alanının genişliğinden dolayı genel göçme dairesi deniz çökeli

tabakasını kapsamaktadır. Deniz çökeli tabakasının yüksek boşluk oranı ve düşük mukavemeti nedeniyle yüklemeler altında dolgunun bu tabakayı zımbaladığı görülmüştür. Bu nedenle dolgu tabakasının altındaki zeminlerde taşıma gücü bakımından önem arz etmektedir. Şekil 3'te daha sonradan bahsi geçecek bütün alan yüklemesi altında plastikleşen zemin görseli verilmektedir. Bunu önlemek için sahada 2 m aralıklarla 50 cm çapında 8 m boyunca darbeli kırmataş kolon tekniği ile deniz çökeli tabakasında zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Yapılan bu zemin iyileştirilmesi analiz ve hesap kolaylığı açısından alansal iyileştirme olarak kabul edilmiş, hesaplarda deniz çökeli için iyileştirilmiş zemin parametreleri kullanılmıştır.

Dolgunun üzerinde 35 cm kalınlığında bir betonarme saha kaplaması bulunmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinde betonarme döşeme plak eleman olarak modellenmiştir.

Betonarme kaplamanın altındaki donatısız beton ise 25 cm kalınlıkta olup modelde zayıf beton olarak isimlendirilmiştir. Model planda 50mx50m olup toplam derinlik 27.5 m'dir.

Plak elemanlar modelin ortasında 21mx21m büyüklüğünde bir alan kaplamaktadır. Her bir ano 3mx3m modellenmiş ve sahada bu şekilde imal edilmiştir. Analiz profiline atanan parametreler Çizelge 1'de gösterilmiştir.



Şekil 3 - Alan Yüklemesi (21mx21m) Altında İyileştirilmemiş Zeminin Plastikleşmesi

Çizelge 1 - Sonlu Elemanlar Modeline Atanan Parametreler

Identification	Konkase Alt Temel (CBR%60)		Dolgu Tabakası (CBR%10)	Deniz Çökeli CL- ML	İyileştirilmiş Deniz Çökeli CL- ML	Beton
	Material Model	HS Small	HS Small	HS Small	HS Small	Linear Elastic
Drainage Type	D	D	UD-A	UD-A	Non-porous	
yunsat	kN/m <sup>3</sup> 18	17	16	16	24	
ysat	kN/m <sup>3</sup> 20	19	17	17	-	

Çizelge 1 - Sonlu Elemanlar Modeline Atanan Parametreler (devam)

Identification		Konkase Alt Temel (CBR%60)	Dolgu Tabakası (CBR%10)	Deniz Çökeli CL- ML	İyileştirilmiş Deniz Çökeli CL- ML	Beton
einit		0.5	0.7	1	1	-
E	kN/m <sup>2</sup>	-	-	-	-	3.20E+07
v		-	-	-	-	0.2
E50,ref	kN/m <sup>2</sup>	1.50E+05	5.00E+04	1.50E+04	3.80E+04	-
Eoed,ref	kN/m <sup>2</sup>	1.50E+05	5.00E+04	1.50E+04	3.80E+04	-
Eur,ref	kN/m <sup>2</sup>	4.50E+05	1.50E+05	4.50E+04	1.14E+05	-
power (m)		0.5	0.5	0.5	0.5	-
c'ref	kN/m <sup>2</sup>	2	1	0	0	-
Ø' (fi)	°	40	35	21	24	-
Ψ (psi)	°	10	5	0	0	-
γ0.7		0.012	0.012	0.02	0.02	-
G0,ref	kN/m <sup>2</sup>	2.88E+05	1.62E+05	4.05E+04	7.50E+04	-
ko,x = ko,z		0.357	0.426	0.642	0.593	0.5

## SONLU ELEMANLAR MODELİ VE ANALİZ SONUÇLARI

### Yükleme Koşulları

Şekil 2'de verilen model üzerinde farklı yüklemeye koşulları için üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Çözümlemeler 3mx3m plan boyutunda ve birbirlerine mafsallı ve mafsalsız anolar için yapıldığı gibi 21mx21m ebatlarında tek bir plak için de gerçekleştirilmiştir. Yüklemeye senaryoları ele alınırken, konteynerlerin ortada tek bölgede 6 adet üst üste yüklenmesi, sadece köşede 6 adet yüklenmesi, tüm sahayı kaplayacak şekilde 6 adet yüklenmesi, ortada 6 adet kenarlarda 4 adet yüklemeye yapılması, bir kenardan

6 tane olmak üzere azalan şekilde istifleme yapılması ve sahanın yalnızca bir kenarında 6'şar adet yüklemeye yapılması durumları irdelenmiştir. Yüklemeye koşulları sırasıyla yüklemeye numarası olarak bahsedilecektir. Bu senaryolar Şekil 4'te gösterilmektedir.

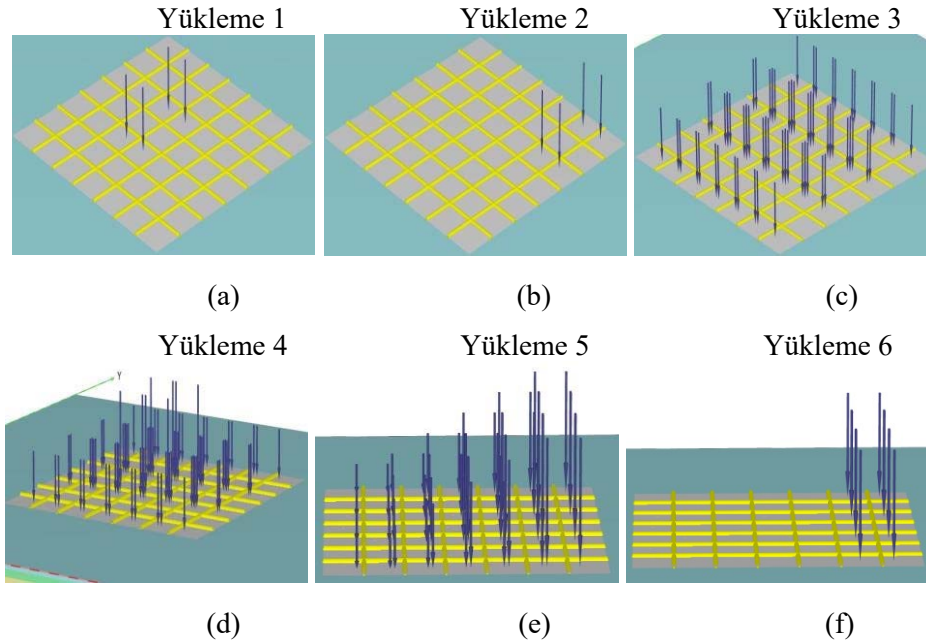
Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde, 20' (606cm) tip konteyner ele alınmıştır. Konteyner 235 kN ağırlığında ve 15cmx15 cm boyutlarında dört adet ayağa sahiptir. Bir adet konteyner için ayak değme basıncı ~2600 kN/m<sup>2</sup> olmaktadır.

### Analiz Sonuçları

Temel anolarının taşıma gücü hesapları genel taşıma kapasitesi yaklaşımına göre yapılmıştır. Yaklaşımına ilişkin formül Denklem 1'de verilmiştir.

$$q_k = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + qN_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B'N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (1)$$

Burada hesaplanan değer zeminin maksimum taşıma kapasitesidir. Taşıma gücü genel olarak zeminin kohezyonuna, içsel sürtünme açısına ve temel taban seviyesinin üzerindeki sürşarj yüküne bağlıdır. Anolar zemin yüzeyinde imal edildikleri için sürşarj etkisi normalde ihmal edilebilir mertebededir. Ancak her bir anoya yüklenen yük, diğer ano için sürşarj yükü kabul edilebilir.



**Şekil 4** - Yayılı yük kabulleri: (a) alanın ortasında tek bölgede 6 adet yüklemeye, (b) köşede tek bölgede 6 adet yüklemeye, (c) tüm alanda 6 adet yüklemeye, (d) ortada 6x kenarlarda 4x yüklemeye, (e) artan şekilde yüklemeye ve (f) bir kenar boyunca yüklemeye

Denklem 1 kullanılarak %10 CBR durumundaki zemin için hesaplanan taşıma güçlerine göre 3mx3 m boyutunda mafsallı bir anonun taşıyabileceği maksimum değme basıncı 2604 kPa, 21mx21m yekpare döküm saha kaplaması için ise 9260 kPa olmaktadır. 6 adet konteynerin üst üste istiflenmesi ile her bir konteyner ayağına gelecek yük 353 kN olmaktadır. Bu yük yanında bulunduğu diğer anolar için sürşarj katkısı olarak kabul edilirse 3mx3m boyutunda bir anonun taşıma kapasitesi 5230 kPa olmaktadır.

Üç boyutlu sonlu elemanlar programı ile yapılan analizler sonucunda ilgili yüklemeye koşulları altında 35 cm kalınlığındaki kaplama için hesaplanmış kesme, moment ve düşey deplasman değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2** - Model Analiz Sonuçları

Yüklemeye No	3x3 Tam Dilatasyonlu Ano			3x3 Mafsallı Ano			21x21 Yekpare Döküm		
	Kesme Kuvveti kN	Moment kNm	$\delta v$ mm	Kesme Kuvveti kN	Moment kNm	$\delta v$ mm	Kesme Kuvveti kN	Moment kNm	$\delta v$ mm
1	81.7	26.5	2.6	78	28	2.5	84.5	29.5	2.5
2	75	28.5	2.3	80	29	2.2	80.5	29.5	2.2
3	200	100	13.2	210	106	13.2	203.5	113	13.1
4	170	78	9.8	177	82	9.7	169	87	9.7
5	175	68.5	8.9	178	83	8.8	185	87	8.8
6	114	50	4.2	115	52	4.1	120	53	4
Kesme Dayanımı		$0.8 \cdot V_{cr} = 199.7$ kN							
Moment Kapasitesi		$M_{d,max} = 149$ kNm							



Analiz sonuçlarına bakıldığında saha kaplamasının döküm koşulları kaplamada oluşacak maksimum iç kuvvetlerde belirgin bir fark oluşturmamıştır. Ancak her ne kadar değişimlerin küçük olduğu görülse de, yekpare dökümde diğer imal şekillerine göre iç kuvvetler artmış ve deplasmanlar azalmıştır. İç kuvvetleri ve deplasmanları etkileyen asıl unsurun yükleme koşulları olduğu görülmüştür.

Yükleme 1 ve 2’de kaplamanın ortasında ve köşesinde 6 adet konteynerin üst üste istiflenmesi durumu incelenmiştir. Sonuçlara göre 1 numaralı yükleme kaplamanın kendi ağırlığından oluşan bohçalanma şeklindeki deformasyon profilinde maksimum deplasmanı arttırdığı görülmüştür. 2 numaralı kombinasyonda, yükleme kaplamanın kenar kısmında yapıldığından maksimum deformasyon oluşan orta kısma göre daha az etki yaratmıştır.

Kaplamanın köşesinde 6 adet istifleme yapılması durumunda (Yükleme 2) ve daha sonra bu yüklemenin yanına aynı kenar boyunca 3 sıra yükleme yapılması (Yükleme 6) durumu kesme kuvvetinde artışa sebep olmuştur. Bunun nedeni konteyner ayaklarından etki eden yüklerin girişim yapmasıdır. Yükleme oldukça artsa da yan yana istiflenen bu konteynerler birbirlerine sürşarj katkısı sağlayarak taşıma gücü bakımından birbirlerini destekleyici niteliktedir.

Tüm alan yüklenmesi durumunda her anoya gelen yük diğer ano için taşıma gücü katkısı sağlamaktadır. Bunun nedeni yüklenen alanın genişlemesi ile kayma dairesinde büyümesidir. Bu durumda çok geniş alanda yüklemeler için kayma daireleri oldukça büyük olacağı için genel göçme oluşma ihtimali düşüktür. Ancak yapısal açıdan 3 numaralı yüklemelerde kaplamada kesme kuvvetinin aşılmasından dolayı her ne kadar geoteknik açıdan kaplamaya etkiyen yükler güvenli olsa da yapısal olarak bu yükler taşınmamaktadır.

## SONUÇLAR

Ege bölgesi sahil kesimlerinden birisinde yer alan bir konteyner depolama sahasında farklı yüklemeler altında kaplamada oluşacak kesme, moment ve oturma değerleri üç boyutlu sonlu elemanlar yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, farklı türde yüklemeler sonucu kaplamada oluşan iç kuvvetler ve kaplama anolarının mesnetlenme şekline göre ortaya çıkan farklılıklar ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Anoların mesnetlenme koşullarının kaplamaya etki eden kesme, moment ve düşey deplasman değerlerinde belirgin bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Ancak yükleme kombinasyonları bilhassa kesme kuvvetinde belirgin bir farka neden olmaktadır.
- Yüklemelerin daha dengeli bir şekilde yapıldığı 4 numaralı yükleme paterni ve sahanın bir kenarı daha fazla yüklenirken diğer kısmında oldukça az yükleme yapılan 5 numaralı yükleme paterni karşılaştırıldığında neredeyse eşit kesme ve moment değerlerinin hesaplandığı görülmüştür. 5 numaralı yüklemelerde sahada daha az konteyner bulunmasına rağmen yüksek iç kuvvetlerin oluşması ilgi çekicidir. No 5 paterni içindeki yükler arasındaki kontrastların buna neden olduğu ileri sürülebilir.
- Bu tür geniş alanlarda teşkil edilecek saha kaplamaları için taşıma kapasitesi analizi yapılırken muhtemel yükleme paternlerinin ve bunların ano taşıma kapasitesine getireceği sürşarj katkısının dikkate alınmasının optimum tasarım açısından yararlı olacağı düşünülmektedir. Anoların yapısal analizi açısından bakıldığında beton kesme ve zımbalama kapasitesinin belirleyici olduğu görülmektedir.

### **Semboller**

$c$	: Zeminin kohezyon dayanımı [kPa]
$N_c, N_q, N_\gamma$	: Taşıma gücü katsayıları
$s_c, s_q, s_\gamma$	: Temel şekli düzeltme katsayıları
$d_c, d_q, d_\gamma$	: Temel derinliği düzeltme katsayıları
$i_c, i_q, i_\gamma$	: Yükleme eğikliği düzeltme katsayıları
$g_c, g_q, g_\gamma$	: Zemin eğimi düzeltme katsayıları
$b_c, b_q, b_\gamma$	: Temel taban eğimi düzeltme katsayıları
$q$	: Ek yük (sürşarj) [kN/m <sup>2</sup> ]
$\gamma$	: Zeminin tabii birim hacim ağırlığı [kN/m <sup>3</sup> ]
$B'$	: Etkin temel genişliği

### **Kaynaklar**

1. Cement And Concrete Association Of Australia. (1997). Industrial pavements: guidelines for design, construction and specification. Retrieved April 10, 2022
2. Rollings, R. S., & Chou, Y. T. (1981). Precast concrete pavements. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.





**TMMOB**

**İnşaat Mühendisleri Odası**

Necatibey Cad. No: No: 57, Kızılay / Ankara

Tel: 0.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88

E-posta: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr