



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 Tüyyeş 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 EKER¹, Selim DÜNDAR²

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.

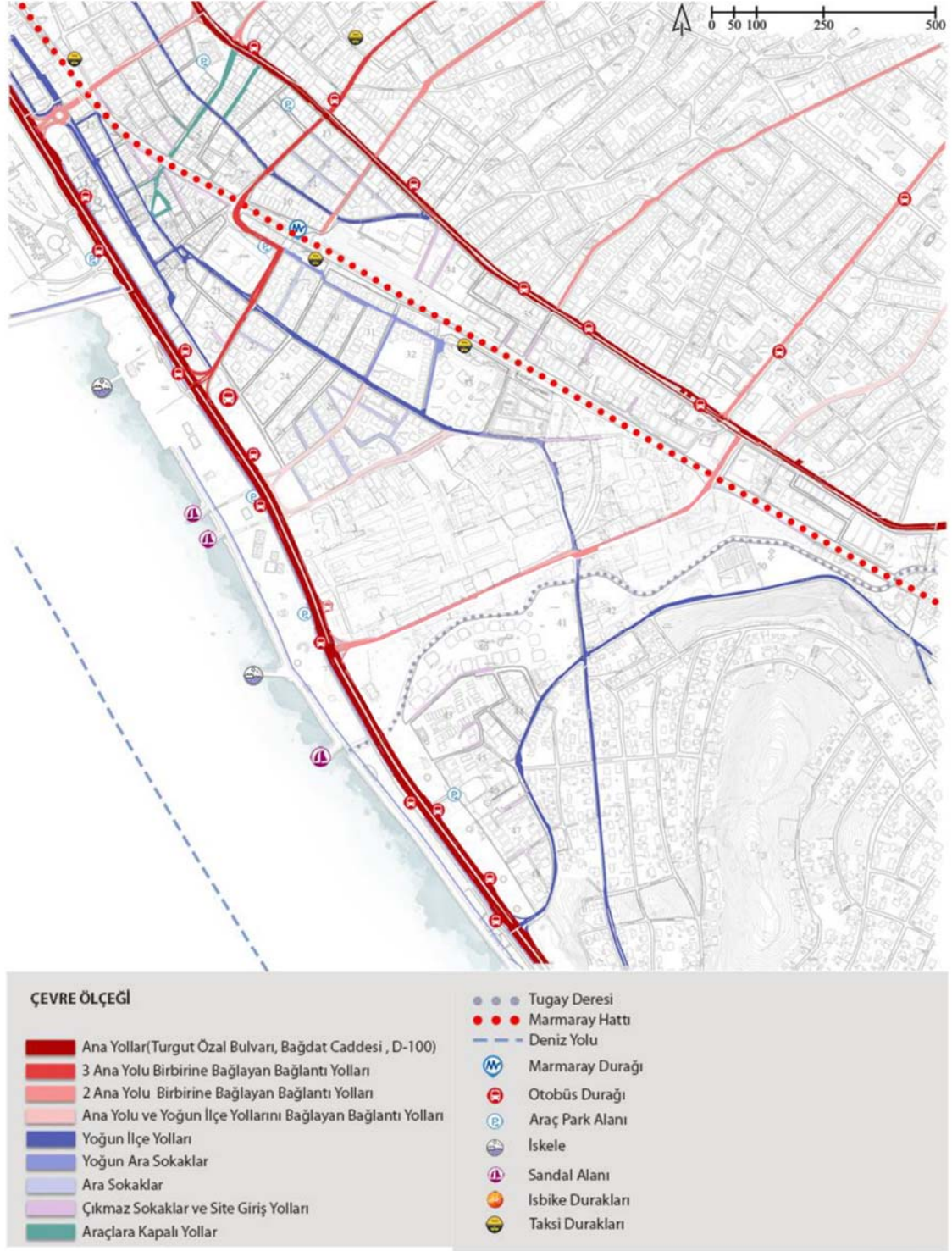
Maltepe İlçesi'nin örnek çalışma bölgesi olarak, yaya ya da mikromobilité sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen yolculukların daha fazla olduğu Turgut Özal Bulvarı ve Bağdat Caddesi çevresinde bulunan kesim seçilmiştir. Her iki cadde de doğu-batı ekseninde uzanmaktadır. Bölgede doğu-batı yönü ana aks özelliği taşıırken, 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.



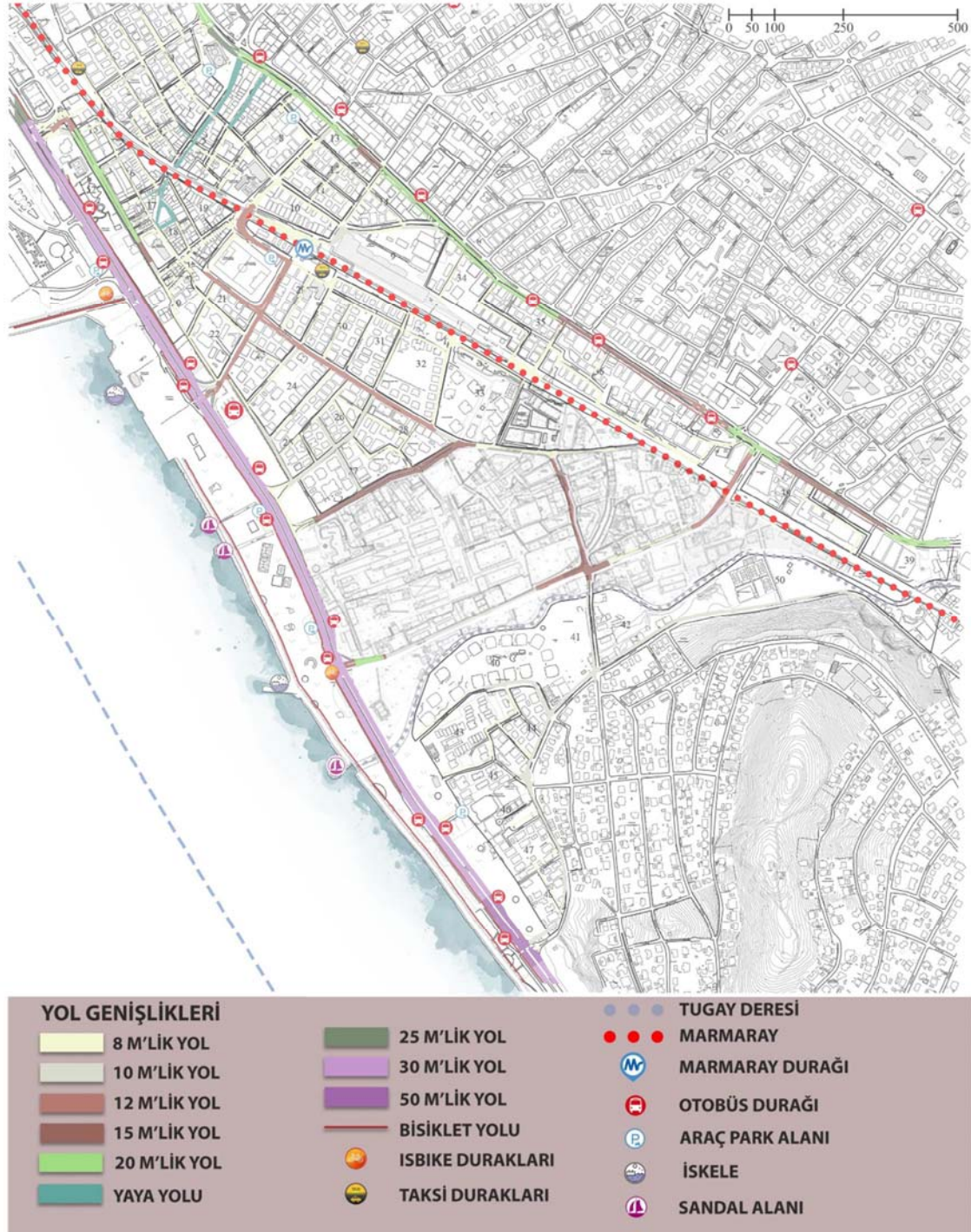
Şekil 1 - Maltepe İlçesi'nin konumu

Veri Toplama ve Değerlendirme

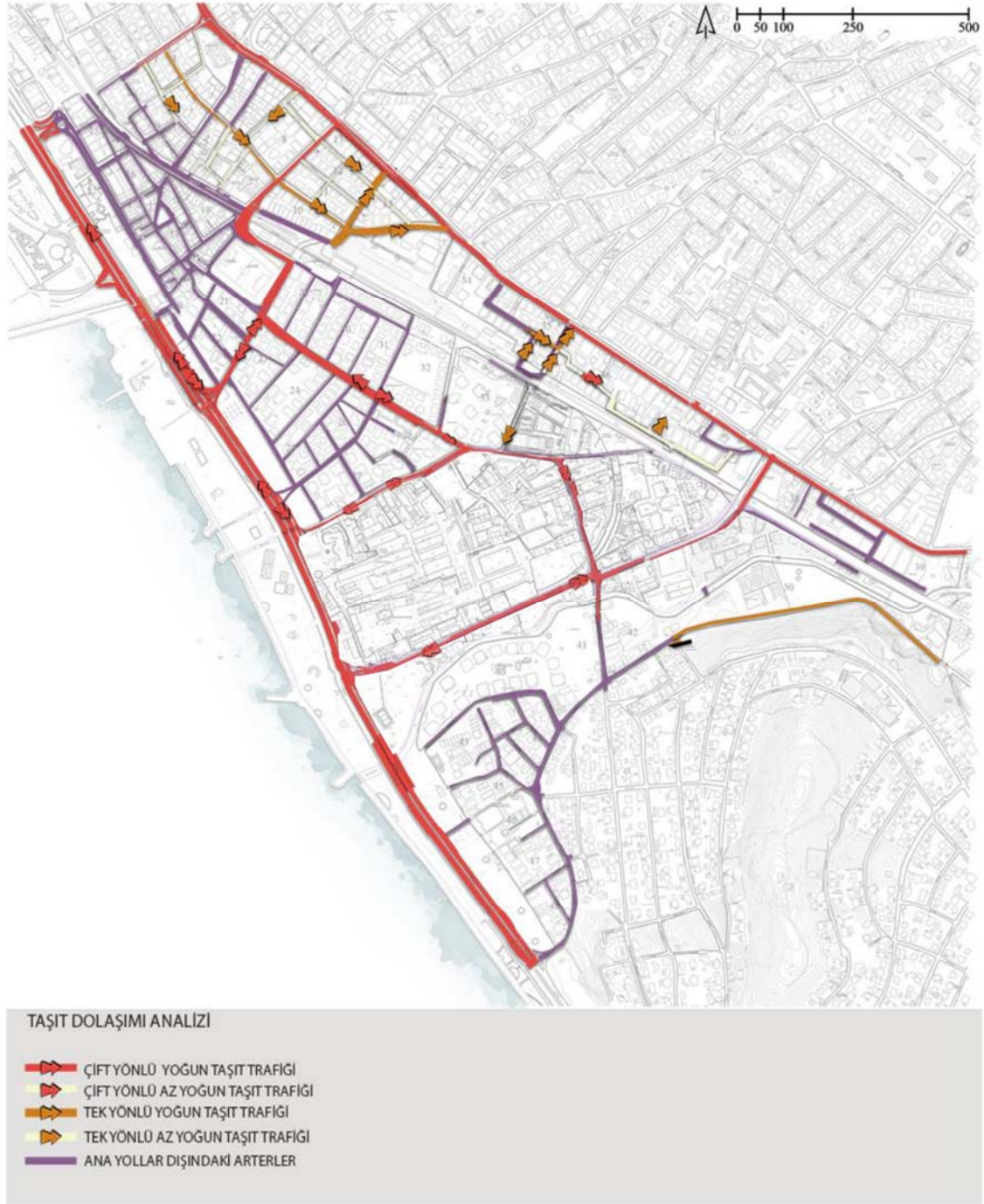
Belirlenen çalışma bölgesinde, 4 Nisan - 24 Nisan 2022 tarihleri arasında; 21 günlük bir analiz sonucunda e-skuterlerin buldukları noktalar, e-skuter paylaşım hizmeti veren firmaların mobil uygulamaları üzerinden incelenmiştir. Bu noktalar belirlenirken öncelikle hafta içi ve hafta sonları ayrı ayrı 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).



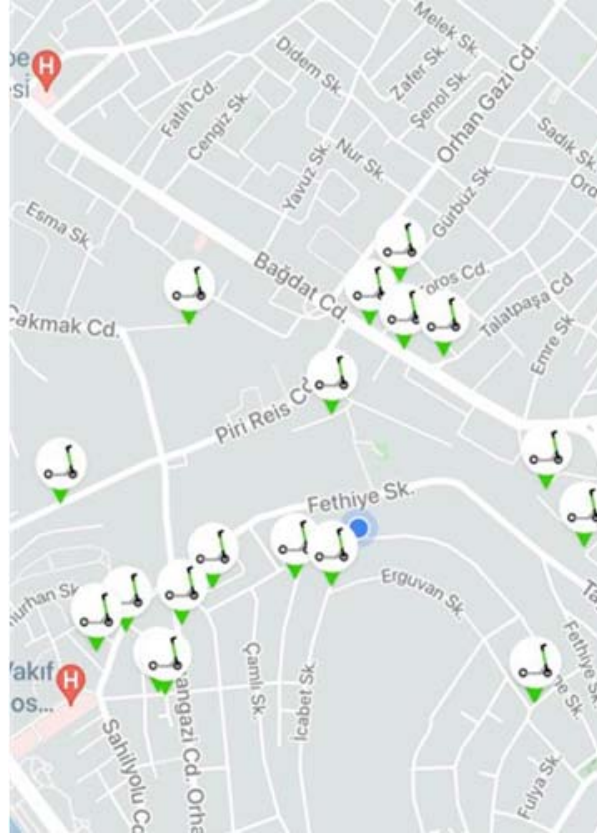
Şekil 2 - Çalışma bölgesinin ulaşım olanakları



Şekil 3 - Çalışma bölgesindeki yol genişlikleri



Şekil 4 - Çalışma bölgesinin taşıt dolaşım analizi

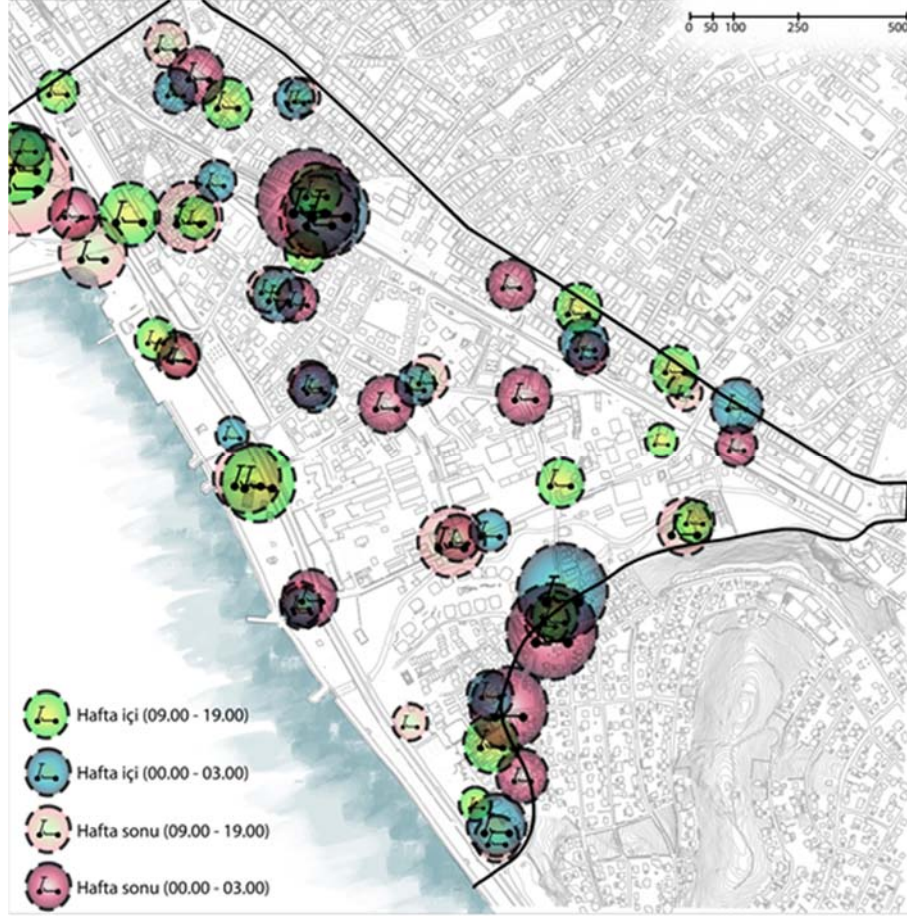


Şekil 5 - Paylaşımlı e-skuter hizmeti veren bir firmanın uygulamasından 11.04.2022 tarih ve 01:36 saatinde alınan ekran görüntüsü



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

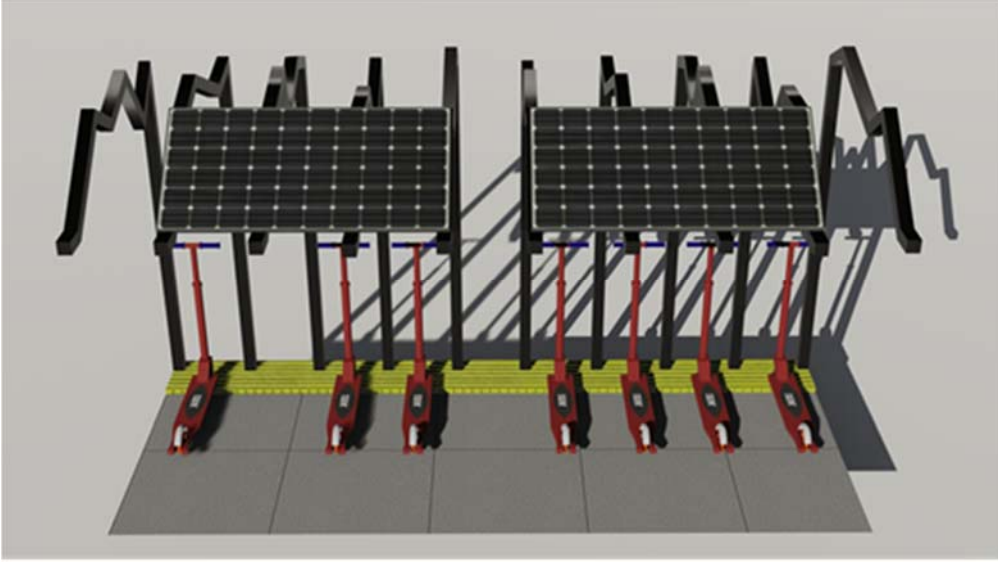
Üçüncü şarj istasyonunun konumu alanın kuzeyinde, yoğun bir aks olan Bağdat Caddesi'nde bir benzin istasyonu önü olarak belirlenmiştir. Bu şarj istasyonunun konumu hem kuzey-güney hem de doğu-batı akslarında, çevresindeki konut bölgelerine ve çevredeki eğitim kuruluşlarına hizmet edeceği düşünülmüş olarak 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 DÜNDAR¹, Ecem ŞENTÜRK BERKTAŞ², Milas Ceren HÖKE³, İrem Merve ULU⁴

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. Mikromobilité 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 mikromobilité taşıt talebi eklendiğinde karşılaşılabilecek farklılıkların incelenmesi faydalı olacaktır.

E-skuter hizmetleri, paylaşımlı bisiklet ve paylaşımlı araba gibi uygulamaları olan diğer paylaşımlı mobilité 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

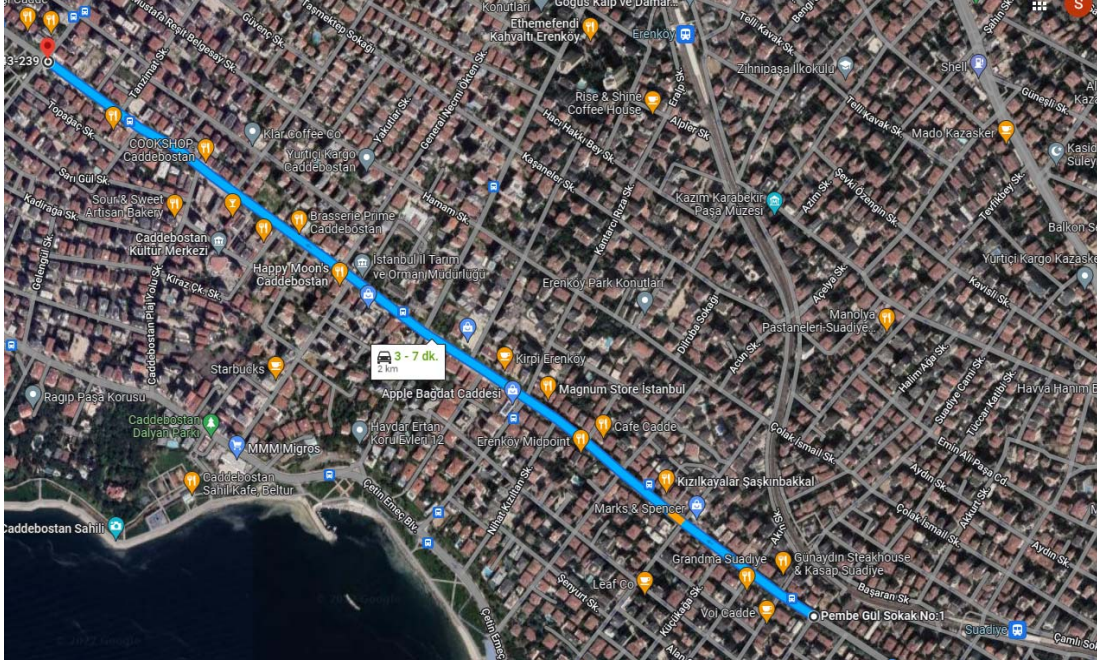
Bu çalışma kapsamında e-skuterlerin kent içi trafiğine ve özellikle de trafik akımının sınır koşullarına olan etkileri PTV VISSIM ince boyutlu benzetim programı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın bulguları kullanılarak, e-skuterlerin trafiğe olan etkilerinin en olumlulanması için önerilerde bulunulmuştur.

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.



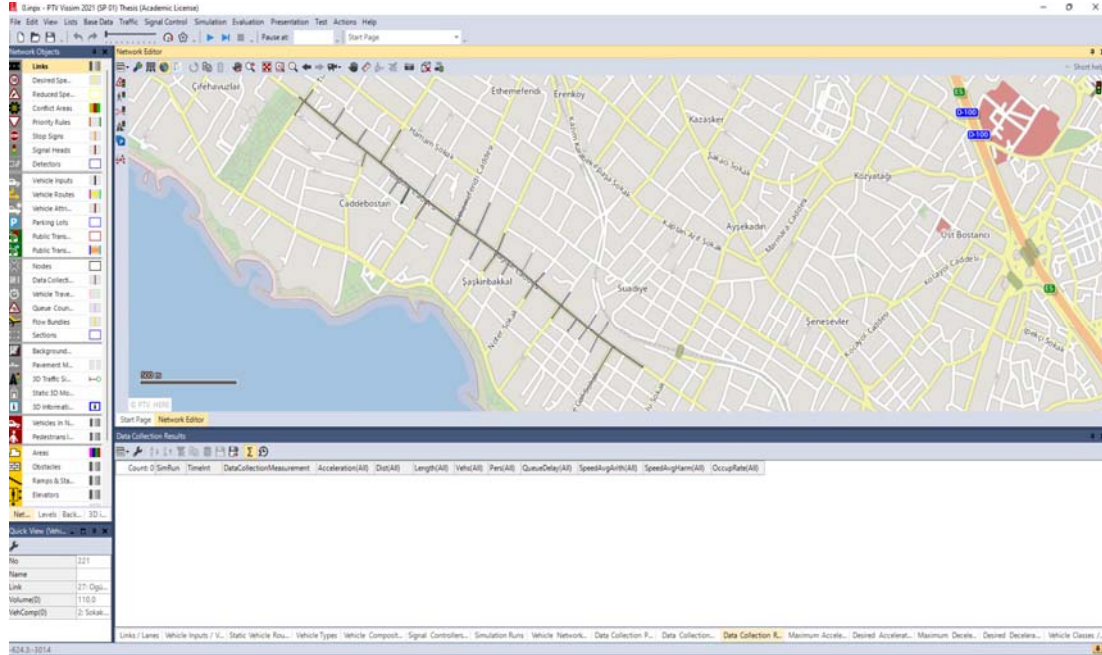
Şekil 1 - Bağdat Caddesi üzerindeki çalışma bölgesi [12]

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

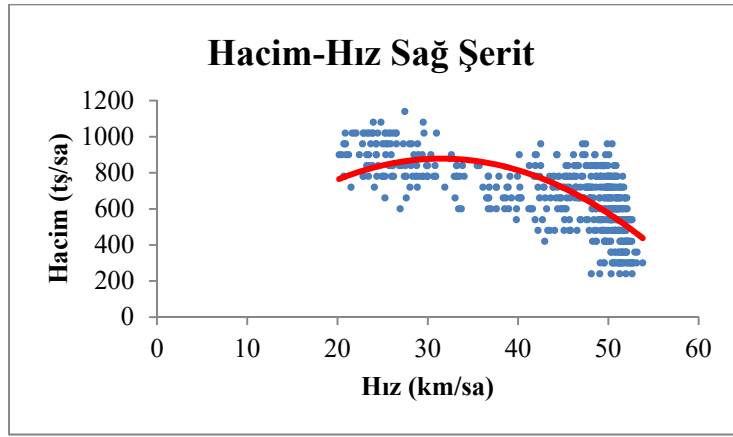
$$hacim = hız \times yoğunluk \quad (1)$$

ilişkisi kullanılarak, yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

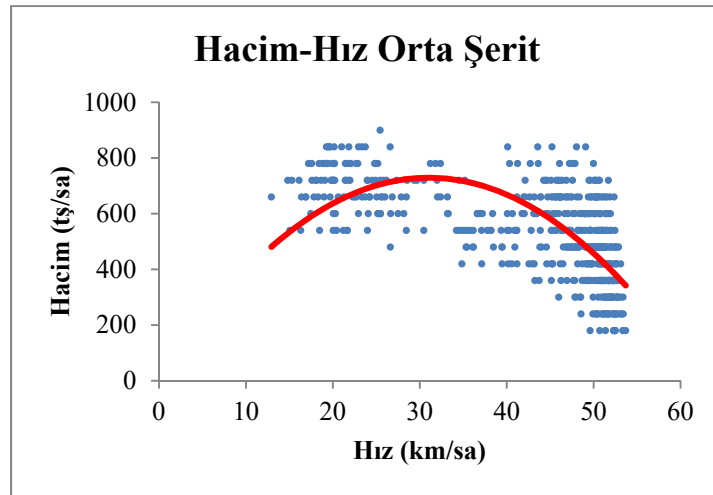
Tablo 2 - PTV VISSIM'de incelenen örnek senaryolara ilişkin katsayılar

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

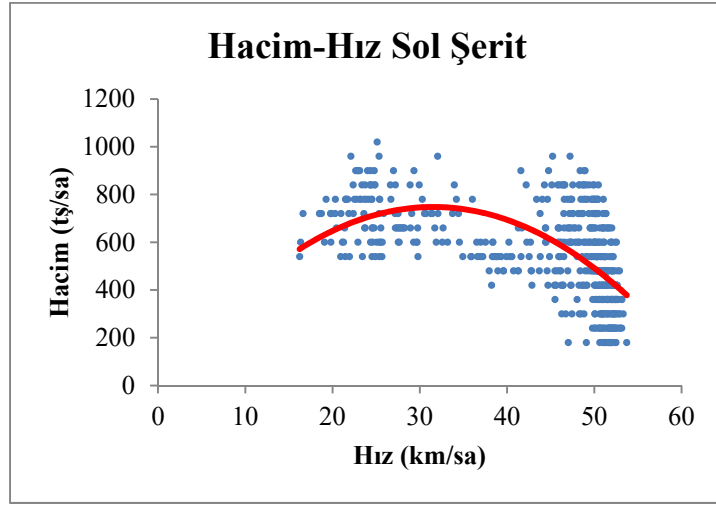
Daha sonra, 9 senaryonun tümünden elde edilmiş 1'er dakikalık hacim, hız ve yoğunluk değerleri kullanılarak, her bir şerit için ayrı ayrı hız-hacim, hacim-yoğunluk ve hız-yoğunluk ilişkileri Microsoft Excel yazılımı kullanılarak çizdirilmiştir. Çizdirilen hız-hacim grafikleri Şekil 3-5, hacim-yoğunluk 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, değerkenler 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.



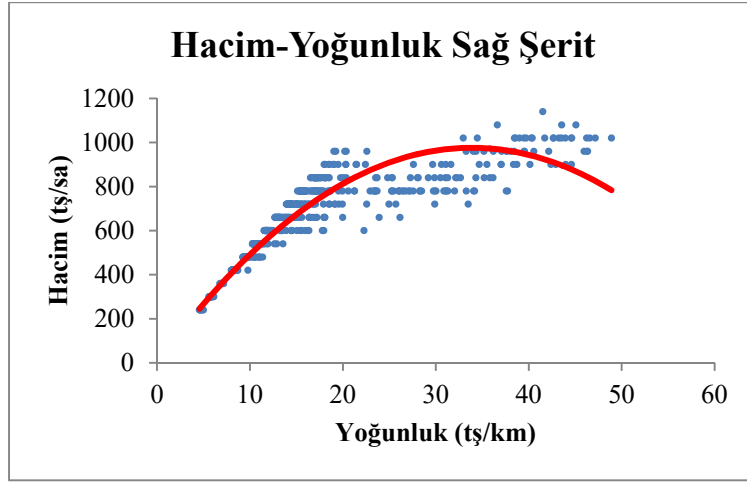
Şekil 3 - Sağ şerit için elde edilen hacim-hız grafiği



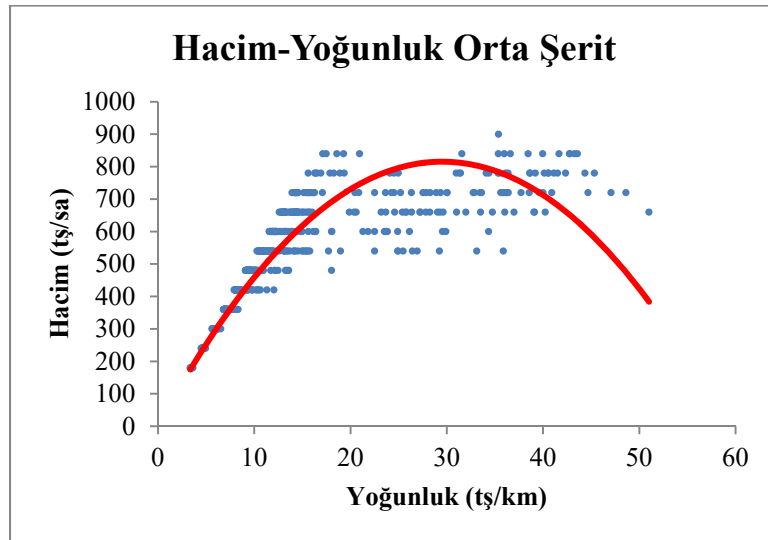
Şekil 4 - Orta şerit için elde edilen hacim-hız grafiği



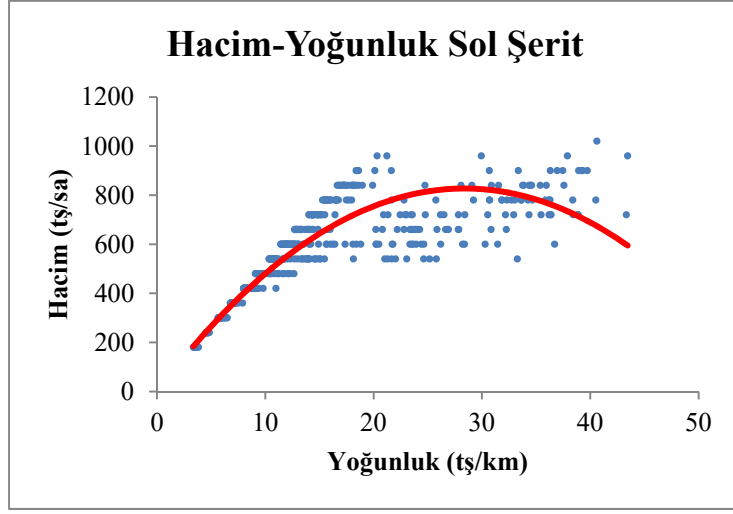
Şekil 5 - Sol şerit için elde edilen hacim-hız grafiği



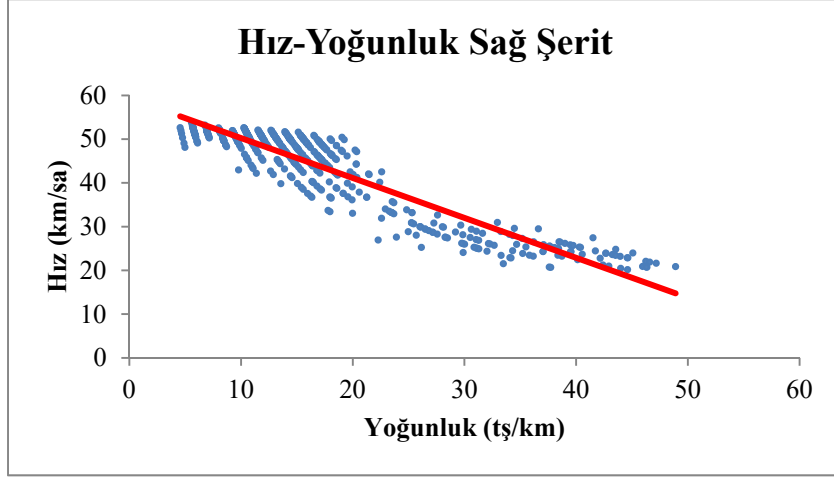
Şekil 6 - Sağ şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



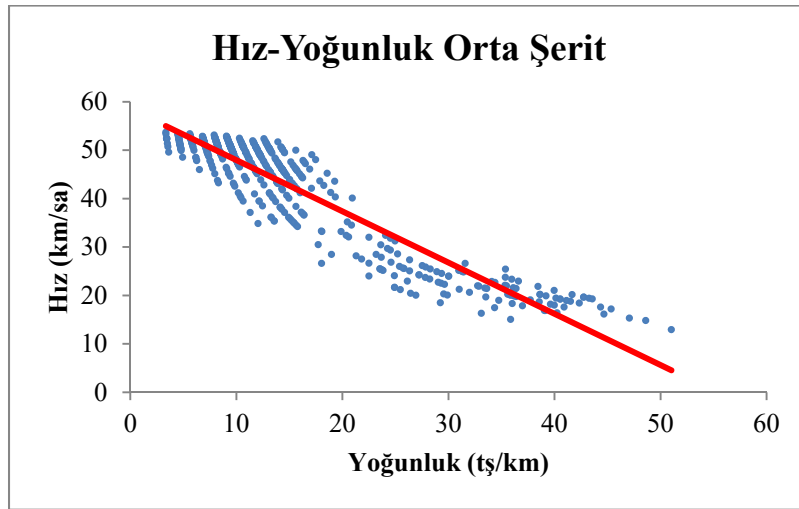
Şekil 7 - Orta şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



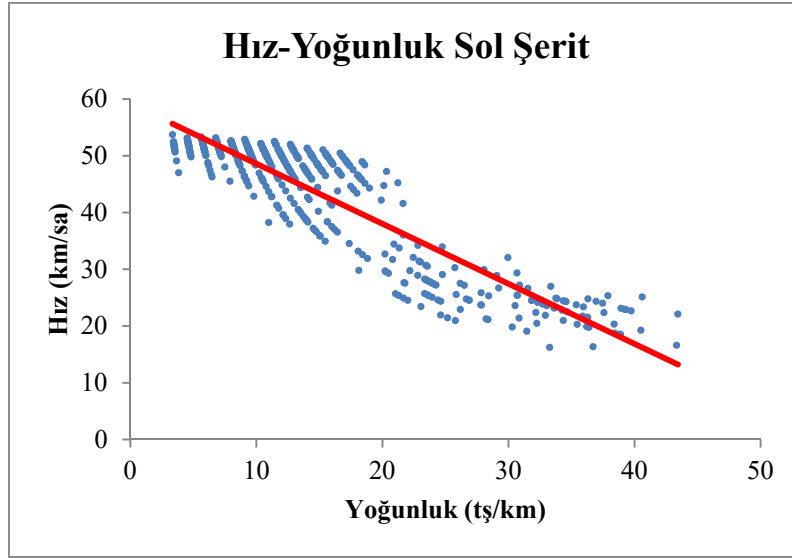
Şekil 8 - Sol Şerit için elde edilen hacim-yoğunluk grafiği



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 m/s^2 , tercih edilen hızlanma ivmeleri 1.4 m/s^2 , en yüksek yavaşlama ivmeleri 9.0 m/s^2 , tercih edilen yavaşlama ivmeleri 7.0 m/s^2 olarak tanımlanmıştır. Taşıtların hız sınırı olarak, yasal hız sınırı olan 25 km/sa değeri tanımlanmıştır. E-skuterlerin trafikte yalnızca sağ şeridi kullanmalarına izin verilmiştir.

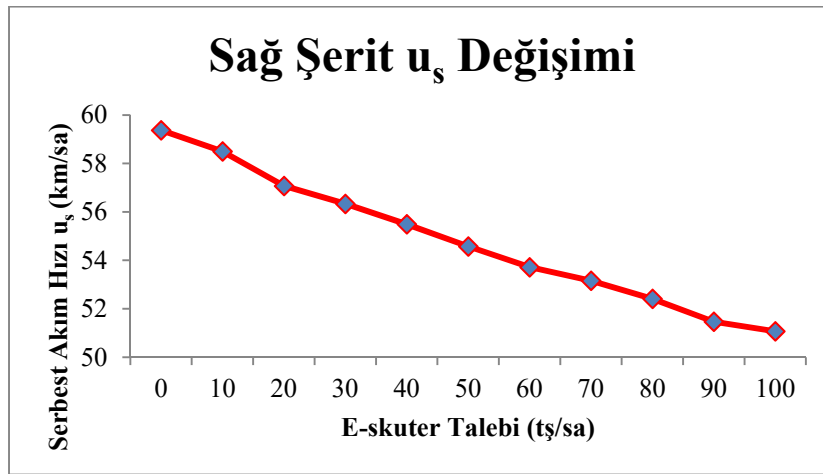
Geliştirilen 9 senaryonun her biri için Bağdat Caddesi, Ethemefendi Caddesi ve Ömerpaşa Sokak’daki trafik talep değerlerine $10'$ ar artışla, 100 tş/sa 'lik değere ulaşıncaya kadar e-skuterler eklenmiş, her bir senaryo 10 alt senaryo için tekrar çalıştırılmış ve her bir senaryo için 10 farklı

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.

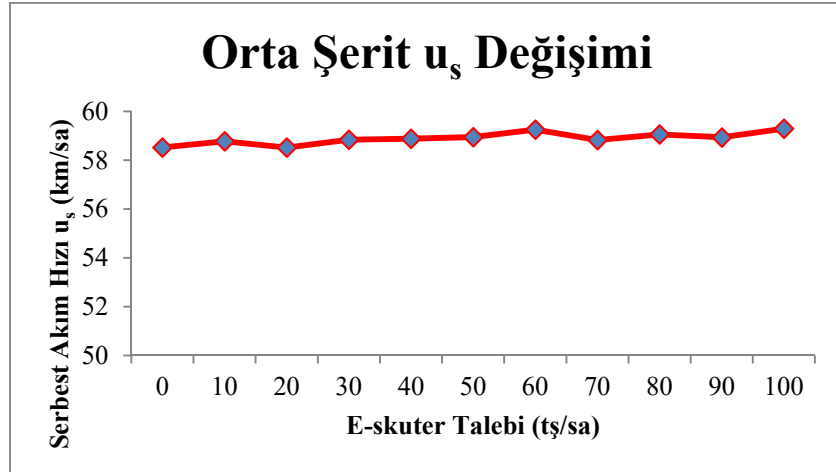
SONUÇ

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.

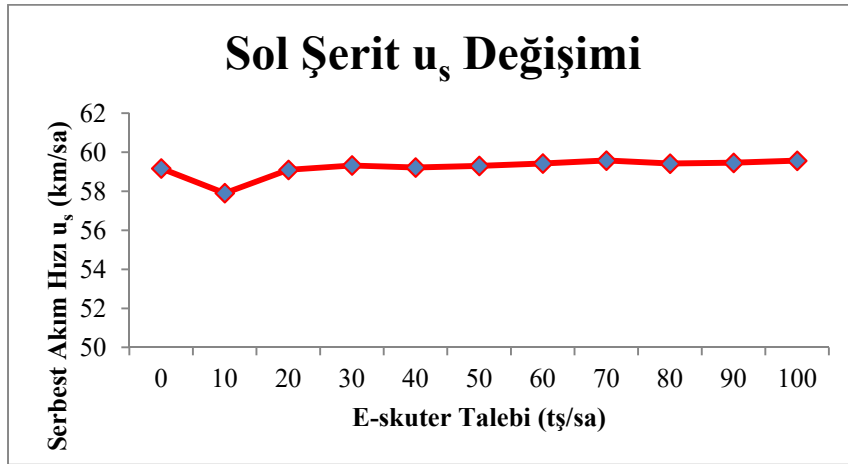
Benzetim sonuçları, e-skuter talebinin artmasının trafik akımını ve trafik akım değişkenlerini genel olarak olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, e-skuterlerin özellikle diğer motorlu taşıtlara kıyasla daha düşük en yüksek hızlara sahip olması ve hızlardaki bu farklılıkların trafik 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.



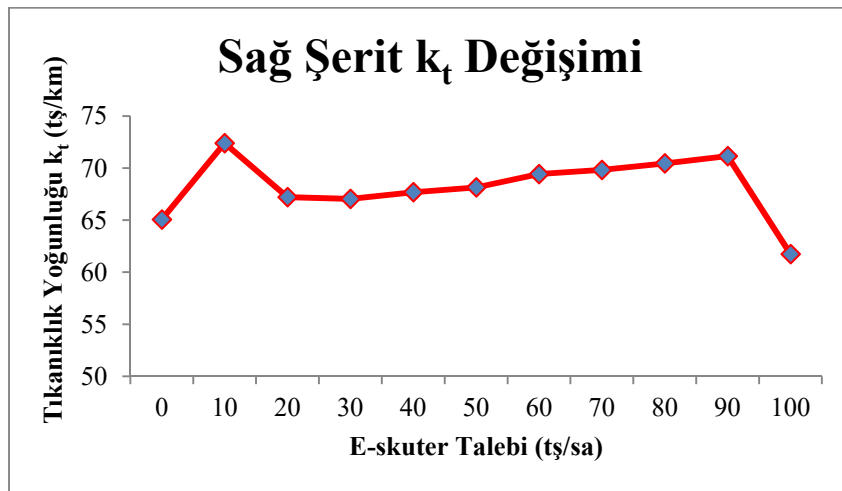
Şekil 12 - Sağ şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



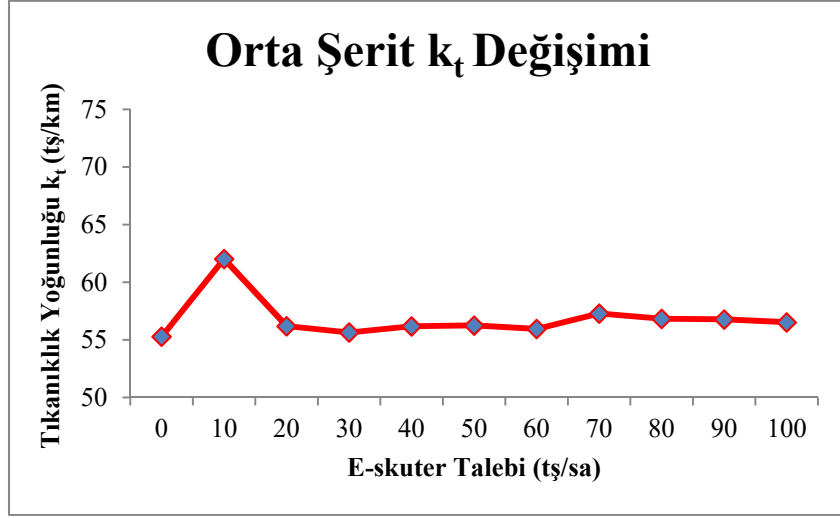
Şekil 13 - Orta şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



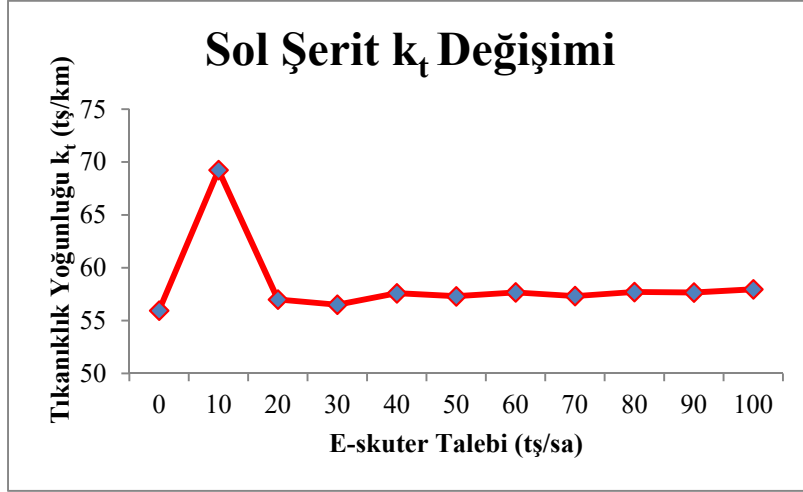
Şekil 14 - Sol şeritte e-skuter talebine bağlı olarak serbest akım hızının değişimi



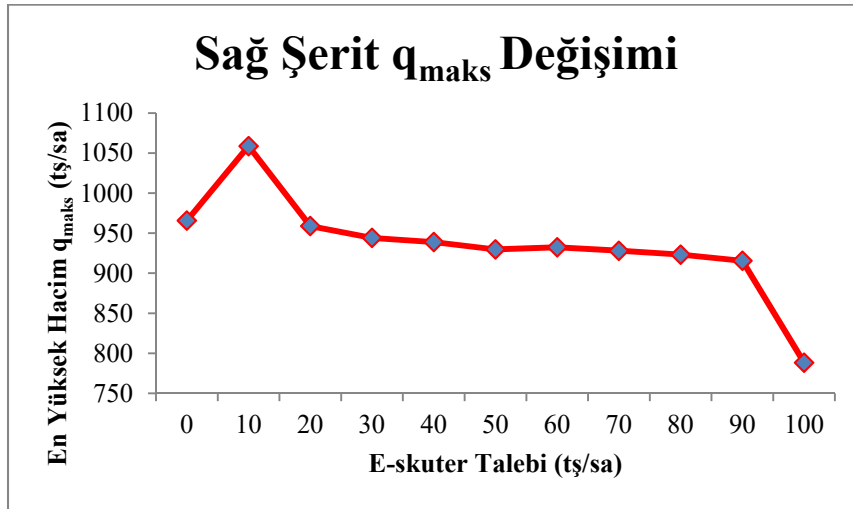
Şekil 15 - Sağ şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



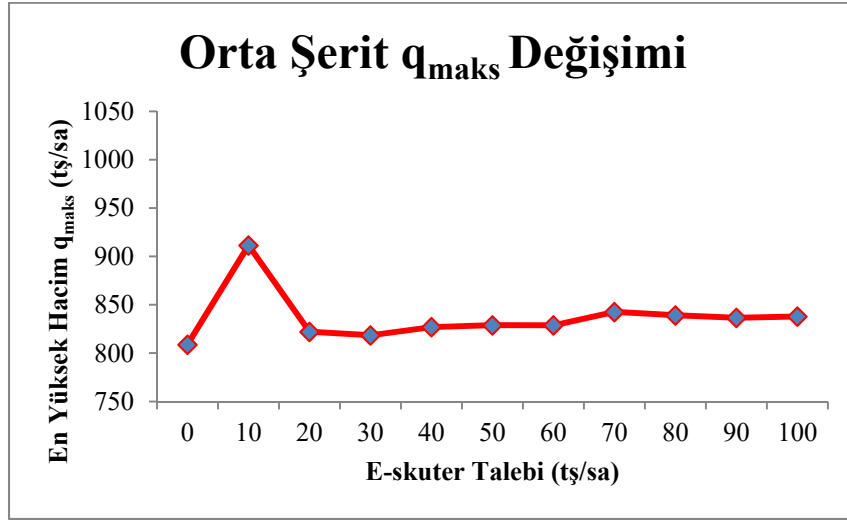
Şekil 16 - Orta şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



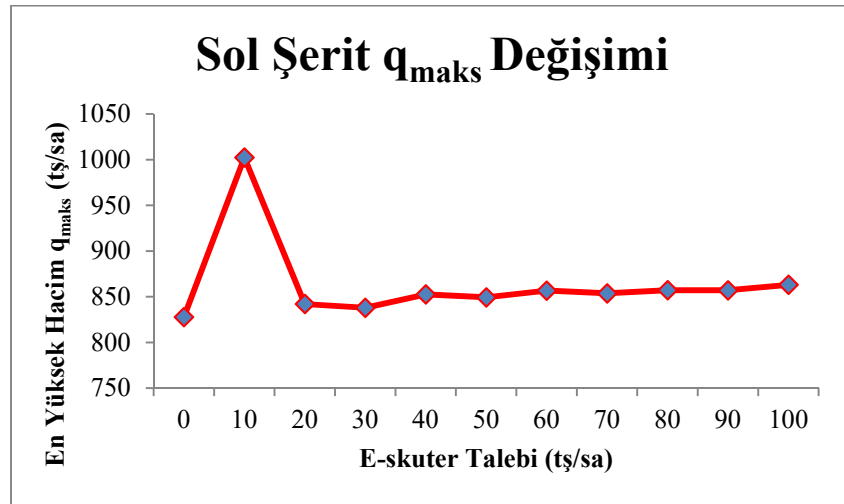
Şekil 17 - Sol şeritte e-skuter talebine bağlı olarak tıkanıklık yoğunluğunun değişimi



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 gerçekliğini 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 yoğunlukla yasal olmamasına rağmen kaldırımdan yolculuk etmeyi tercih ettikleri görülmüştür. Bu koşulların da benzetime katılması kuşkusuz benzetimin gerçekçiliğini arttıracak ancak karmaşıklığını da aynı ölçüde arttıracak bir unsur olacaktır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında gerçekçilik ve basitlik arasındaki ödünleşimde basitlik yönü ağır basan bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda gerçekçilik yönü ağır basan modeller ile çok daha karmaşık koşullarda e-skuterlerin etkilerinin değerlendirilmesi daha faydalı olabilir.

Gerçekleştirilen 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 düşünülmektedir.

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 AYDIN¹, Engin AKTÜRK², Büşra AKTÜRK³

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 etkendir. 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.

AMAC

Bu çalışmanın amacı, sürdürülebilir ulaşırma politikasında çok önemli bir yeri olan bisiklet ulaşımını, Türkiye'deki tarihi kent merkezleri özelinde ve bisiklet yolları yönetmeliğinin uygunluğu / yeterliliği bakımından irdelemektir. Yürürlükte olan bisiklet yolları yönetmeliği [8], tarihi kent merkezlerinde bisiklet ulaşımının yaygınlaştırılması konusunda yetersiz kalmaktadır. Öncelikle, bu yetersizliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada mevcut bisiklet yolları yönetmeliği irdelenmiş, eksikleri tespit edilmiş ve bu eksiklerin giderilmesi için çözüm önerileri getirilmiştir.

Tarihi Kent Merkezlerine motorlu taşıtların etkisi

İnsanlığın mezarındaki taş yığınları ile başlayan yapı yapma süreci, geleceğe iz bırakma içgüdüğü ile heybetli anıtlar, yapılar ve yerleşimler olarak binlerce yıldır süregelmiştir. Mimarlık ve planlama süreci insan ölçeğine dayalı olarak başlamıştır. Ancak 20. Yüzyılda motorlu taşıtların yaygınlaşması ile bu ölçek insan ölçeğinden çıkarak motorlu taşıtlar düzeyine doğru büyümüştür [9]. Yaya ve at arabasına göre inşa edilmiş olan eski kent merkezleri günümüzde motorlu taşıtların işgali altındadır. Türkiye'de birçok kentte kent içi ulaşım ağırlıklı olarak otomobil ile sürdürülmektedir. Tarihi kent merkezlerinde motorlu taşıtlar birçok sorun yaratmaktadır. Gürültü, hava ve görüntü kirlilikleri bu sorunların en başında gelmektedir. Diğer taraftan, motorlu taşıt trafiği ve düzensiz araç parklanmaları tarihi dokunun algılanmasını zorlaştıran, tarihi dokuyu bozan etkenlerdendir (Şekil 1 (b)). Kentsel sit alanlarının koruma koşullarında tarihi dokunun bütünlüğünü ve silüetini bozacak yapılaşma kısıtlarından bahsedilirken, bu alanların sürdürülebilir ulaşım modellerine doğru yönlendirilmesine dair bir karar bulunmamaktadır. Diğer taraftan özellikle uzun, geniş ve ağır araçların kent merkezlerindeki manevraları sırasında birçok tarihi yapı zarar görebilmektedir (Şekil 1(a)).



Şekil 1 - (a) 1995 yılında Topkapı Sarayına giren bir otobüs [6], (b) 2022 yılında İstanbul Tarihi Yarımada'da Fuat Paşa Cd.

Yağmur, sis, rüzgâr gibi atmosferik etkilerle birlikte motorlu taşıtların neden olduğu zararlı gazlardan dolayı oluşan hava kirliliği, tarihi binaların yüzeylerinde bozulmalara neden olmaktadır. Normal değerlerin üzerinde nitratlar ve nem ile birlikte SO_2 , SO_3 , CO_2 ve Cl_2 , tarihi yapı malzemelerinin yüzeyini bozmakta aktif rol oynamaktadır [10]. Ayrıca ağır taşıtların tarihi

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 yapıyorsa, 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.

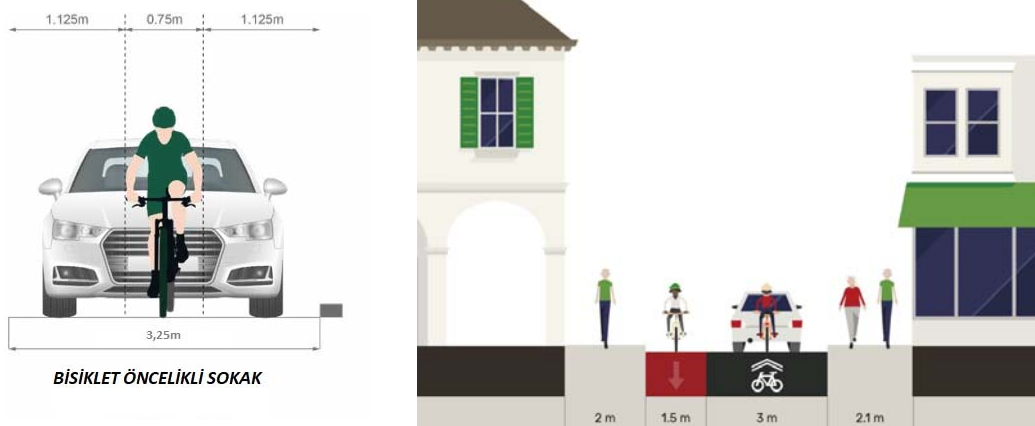
2022 yılında İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Dairesi Başkanlığı tarafından düzenlenen *Tarihi Yarımada Laleli Keşif ve İnfografik Atölyesi’nde* araştırmacıların yaptığı alan çalışmalarında, bölgenin araç trafiğine katılmasıyla beraber mikromobilite araçlarının kullanımın arttığı gözlemlenmiştir. 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 kullanımı 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.

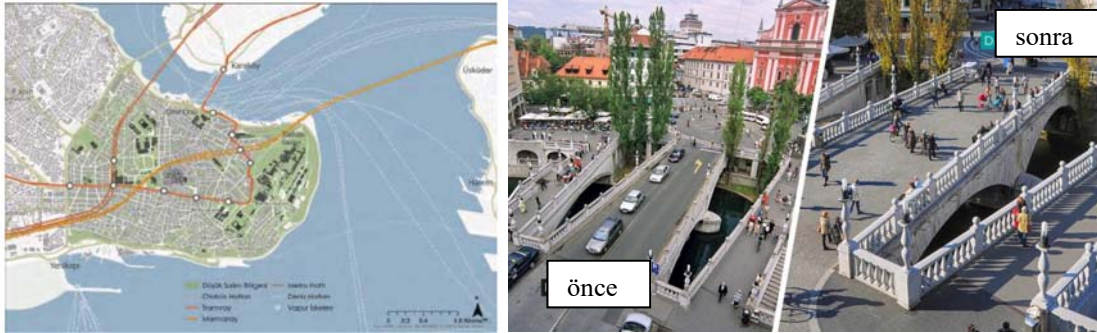
- Özellikle enkesit genişliğinin dar olduğu tarihi kentsel alanlarda “bisiklet ve yaya öncelikli sokak” tanımı getirilebilir. Bu sokaklarda hız sınırı 30 km/sa'e düşürülebilir, motorlu taşıt sürücülerinin bisikletli ve yayalara her zaman öncelik vermesini sağlayacak kurallar ve gerekli altyapı şartları 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 Ljubliana 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]. Ljubliana 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 Ljubliana’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, yapıları 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
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, AKSOY¹, Mehmet Metin, MUTLU², Yalçın, ALVER³

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-tamsayılı program geliştirilmiştir. Geliştirilen karma-tamsayılı 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

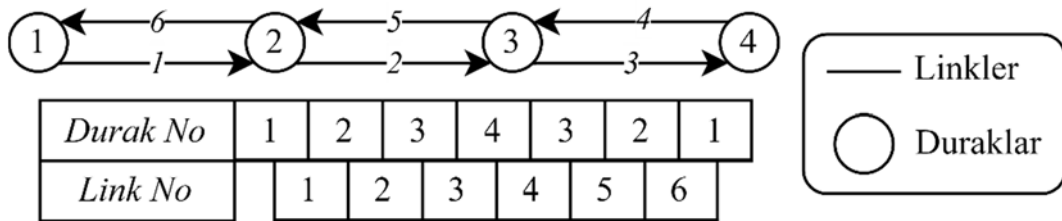
Otobüslerin gün boyu enerji durumlarının oluşturulabilmesi için, linkler üzerinde harcanan enerji miktarlarının ve kablosuz şarj cihazı ile donatılmış duraklara geldiklerinde tedarik edilen enerji miktarlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, otobüslerin linklerdeki enerji tüketimi, 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)
δ^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 değillerdir, (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;

$$Z = \sum_{s \in S} \delta^s \times C^s \quad \forall s \in S \quad (1)$$

$$t_c^{r,b,k,i} \leq \delta^s \times \max\{\hat{n}^{r,b,k,i}, \check{n}^{r,b,k,i}\} \times \tilde{t} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (2)$$

$$t_c^{r,b,k,i} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (3)$$

$$E^{r,b,k,i+1} = E^{r,b,k,i} - e^{r,b,k,i} + t_c^{r,b,k,i+1} \times CP \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (4)$$

$$E^{r,b,k,i} \geq e^{r,b,k,i} + BC \times SOC_{min} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (5)$$

$$e^{r,b,k,i} = d^{r,i} \times c_1 + t^{r,b,k,i} \times c_2 \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (6)$$

$$E^{r,b,k,i} \leq BC \times SOC_{max} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r, \forall k \in K^{r,b}, \forall i \in I^r \quad (7)$$

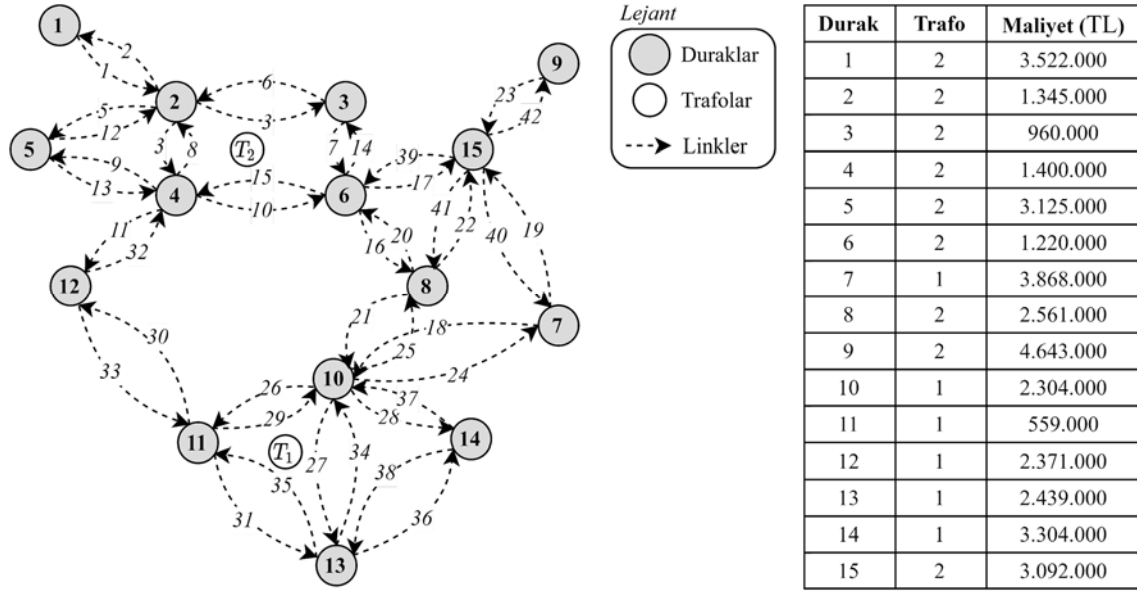
$$E^{r,b,1,1} = BC \times SOC_{max} \quad \forall r \in R, \forall b \in B^r \quad (8)$$

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

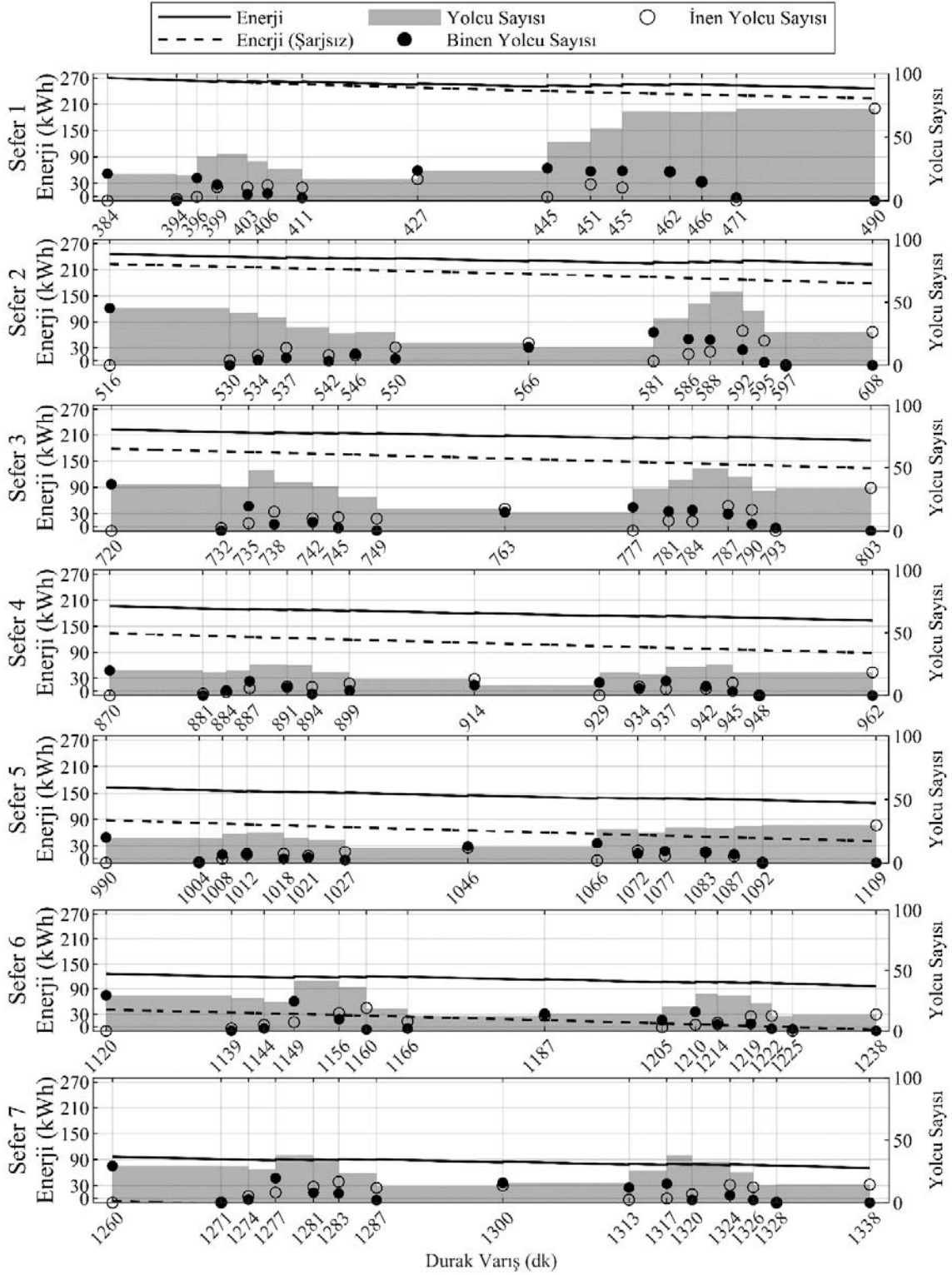
	Hatlar									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gerekli otobüs sayısı	28	22	10	19	20	12	25	19	16	12
Sefer sayısı	118	93	76	97	110	78	127	104	71	81

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., Göhlich, 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 Göhlich, 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 ÖZER¹, Hediye TÜYDEŞ YAMAN²

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.

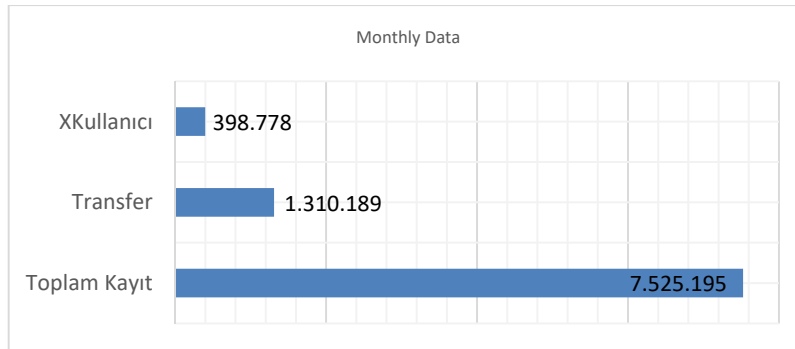
Yolculuk/Etap numarası ve transfer iniş durağı tespitinin ardından, yapılan bir başka analiz ise XKullanıcı tespitidir. Bu bildiriye, XKullanıcı terimi, bir yolcunun beraber seyahat ettiği kişiler için kendi akıllı kartı ile ödeme yapması durumunda, kendi ulaşım kayıtları dışında sisteme fazladan eklenen 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

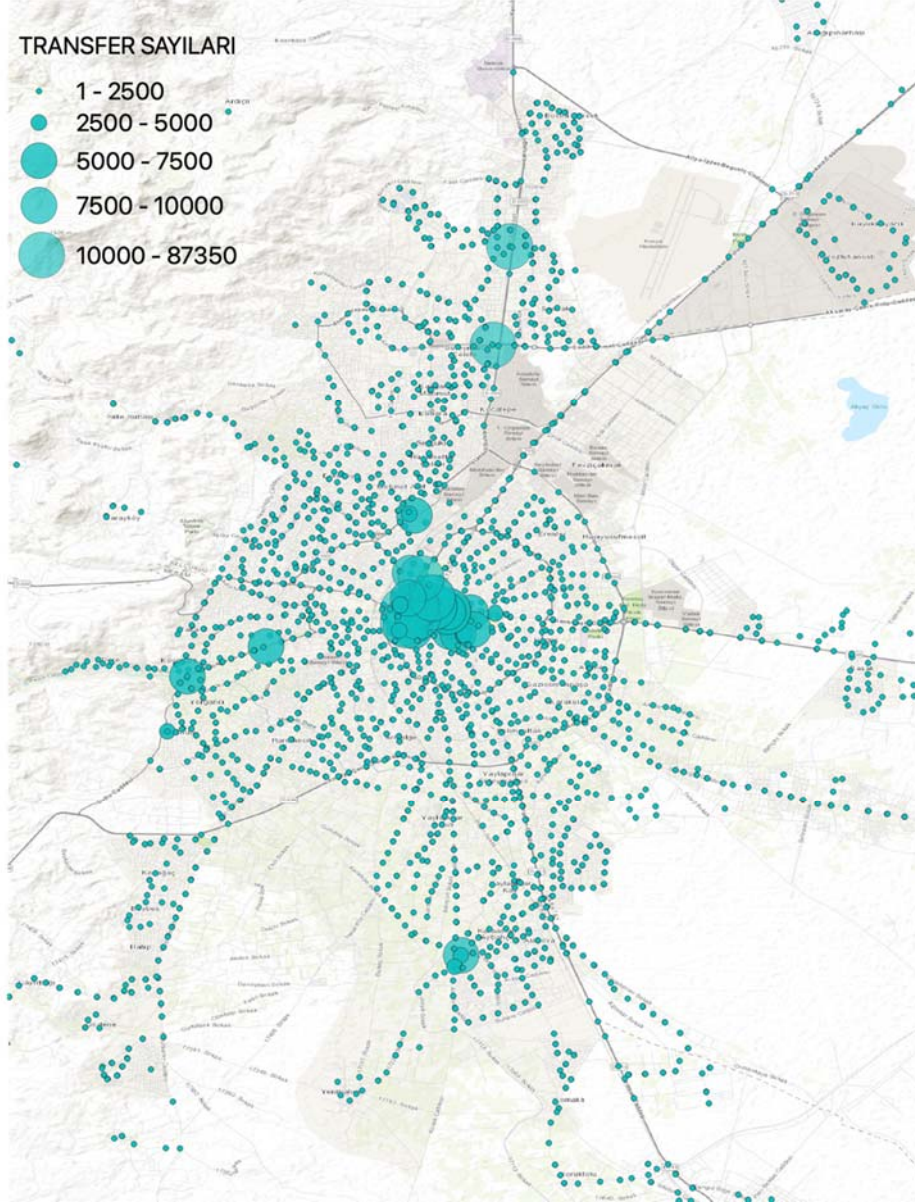
Kart No	Hat No	Ayın Günü	Zaman	Zaman Farkı (dk)	BDurak No	İDurak No	Trmesafe (m)	Yolculuk No	Etap No	XKullanıcı
266868	870	4	07:13:18	-	2414a	2414a	0.0	1	1	Yanlış
266868	870	4	07:13:31	0.22	2414a	2414a	0.0	1	2	Doğru
266868	870	4	07:13:33	0.03	2414a	2414a	0.0	1	3	Doğru
266868	870	4	07:13:38	0.08	2414a	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 TANYEL¹, İlgin GÖKAŞAR², Selim DÜNDAR³, Ali TOPAL⁴, Burak ŞENGÖZ⁵

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, CO₂ salınımının ve yakıt tüketiminin azaldığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Işıksız kavşaklar, Sürücüsüz taşıtlar, Ağır taşıtlar, CO₂ 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, CO₂ emissions, and fuel consumption.

Keywords: Unsignalized intersections, Driverless vehicles, Heavy vehicles, CO₂ 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.

$$T_k = t_a + t_{LV} + t_d \quad (1)$$

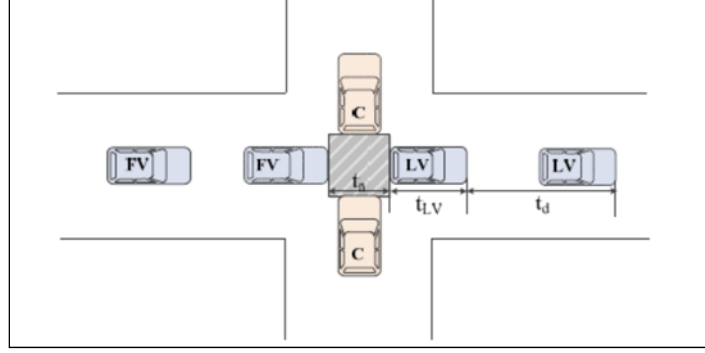
T_k : C aracının kritik aralığı

$t_a = a/V_m$: 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

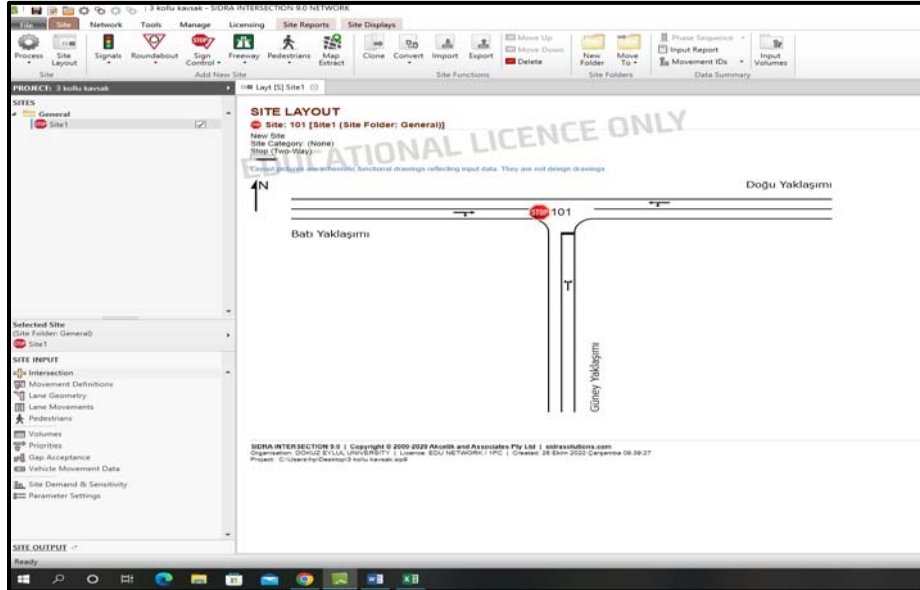
Denklemler kullanılarak kritik aralık kabul değeri hesaplanmaktadır. Bağıntılarda bulunan V_M değeri ana yolda ilerleyen araçların hızını (km/saat) belirtmektedir. V_1 ise C aracının ulaşabildiği maksimum hızı (km/saat) belirtir. L_{LV} LV aracının uzunluğu(m); L_{VC} ise yan yoldaki C aracının uzunluğudur (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 gözlemlemek 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)

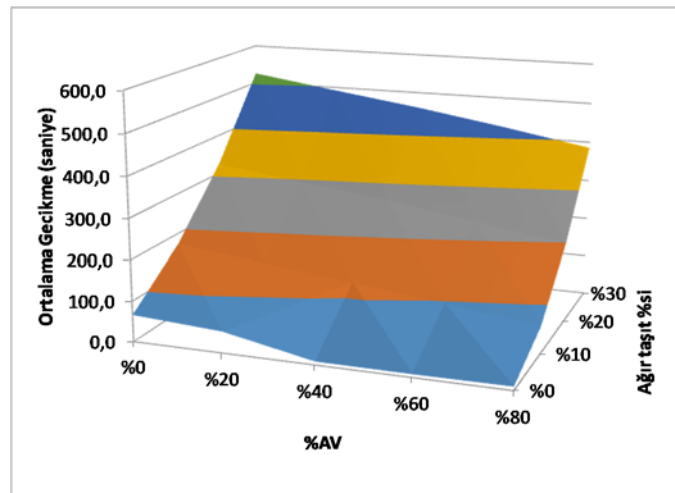
Yaklaşım Kolu	Güney	Doğu	Batı	Toplam
Güney		300	200	500
Doğu	150		500	650
Batı	150	500		650
Toplam	300	800	700	1800

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.

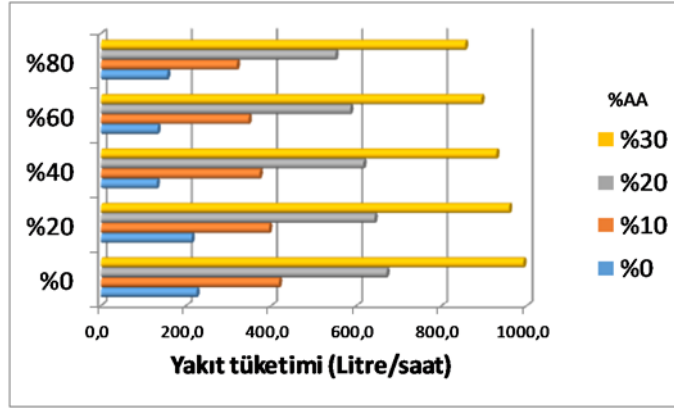
Çalışmada ağır taşıt oranının %0-30 aralığında, otomobil ya da hafif taşıtlar içindeki sürücüsüz araç oranının ise %0 ile %80 aralığında değiştiği kabul edilmiş ve analizler bu kabuller doğrultusunda yapılmıştır. sında değiştiği gözlemlenmiştir.

4. BULGULAR

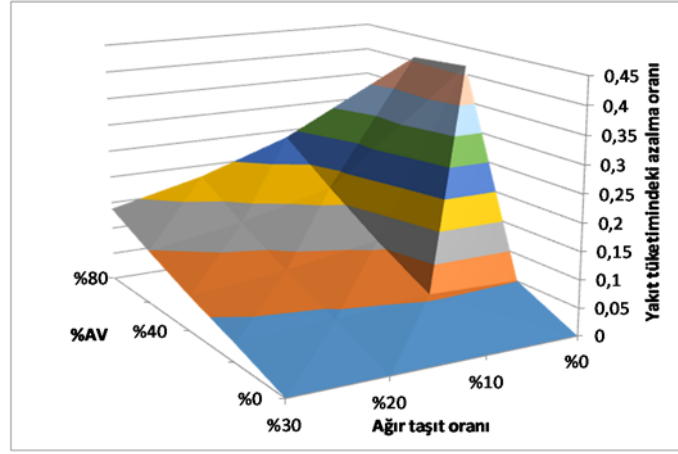
Aşağıdaki Şekil 3'te farklı ağır taşıt ve sürücüsüz yüzdeleri temelinde kavşaktaki araç başı ortalama gecikme değerlerine yer verilmiştir. Sürücüsüz taşıt oranı ile gecikme arasında ters orantı olduğu görülmektedir.



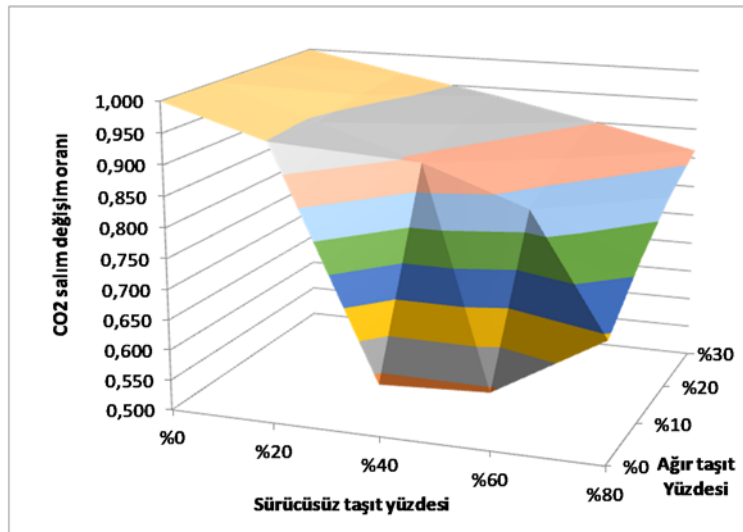
Şekil 3 - Taşıtların Ortalama Gecikme Değerleri



Şekil 4 - Yakıt tüketimi değerleri



Şekil 5 - Yakıt tüketimindeki değişme oranları



Şekil 6 - CO₂ 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 CO₂ salımının arttığı görülmektedir. Bu da, aslında trafik kompozisyonun 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 CO₂ 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 GÖKAŞAR¹, Kaan AYTEKİN²

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.

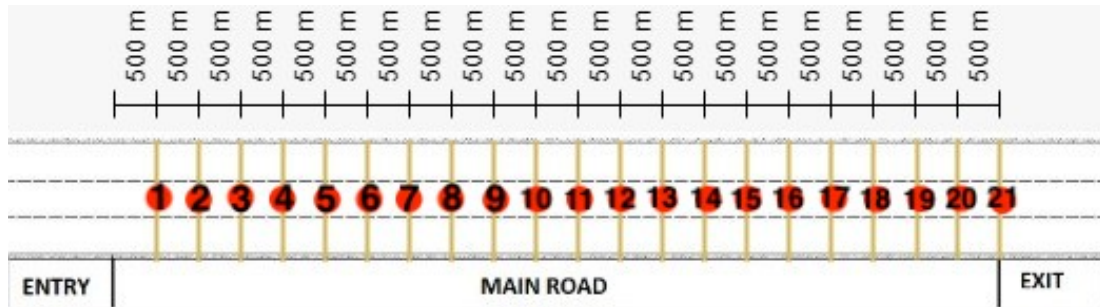
Bağlantılı otonom araçların (BOA) trafik akımında sürücülü araçlar ile birlikte kullanılması ve oluşturulan karma trafiğin sürdürülmesi, trafik gecikmesi tahmininde ve azaltılması konusunda büyük faydalar sağlama potansiyeline sahiptir. Literatürde BOA'ların trafik gecikmesi üzerindeki etkileri ile ilgili 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 ²	2,7 m/s ²
Azami yavaşlama	4,5 m/s ²	4,5 m/s ²
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.

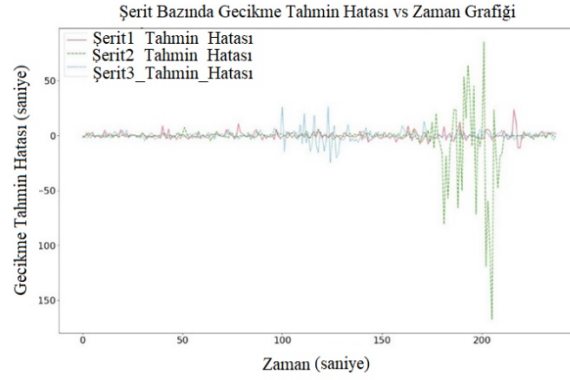
3.4. Çapraz Geçerlilik, Hiperparametre Ayarlama ve Model Seçimi

Makine öğrenmesi modellerinin eğitiminde, ayarlanmasında ve performanslarının değerlendirilmesinde 5 tekrarlı 5 katlı çapraz geçerlilik metodolojisi kullanılmaktadır. Her model

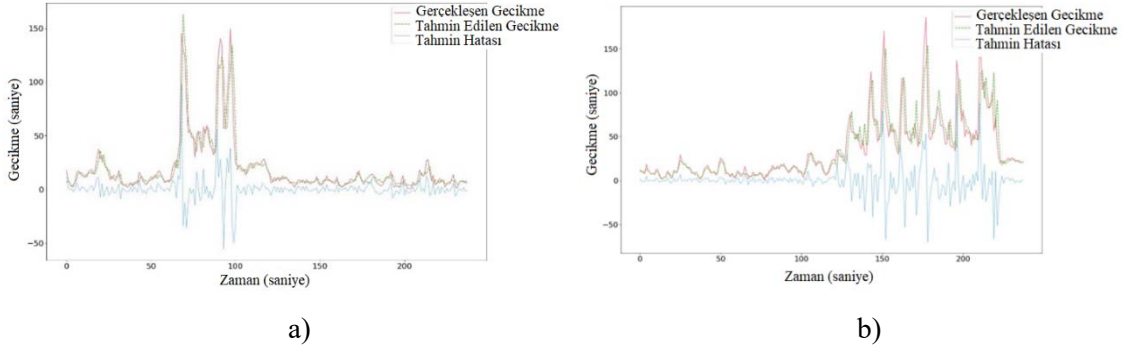
için önemli hiperparametreler belirlenir ve bu parametrelerin her biri için oldukça geniş bir arama alanı tanımlanır. Her model için en iyi sonucu veren hiperparametre değerleri saptandıktan sonra modeller bu hiperparametreler kullanılarak çalıştırılır. Her bir tekrarda her model için hataların karelerinin 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 GÖKAŞAR¹, Sarp Semih ÖZKAN², Alperen TİMURÖĞULLARI³

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,

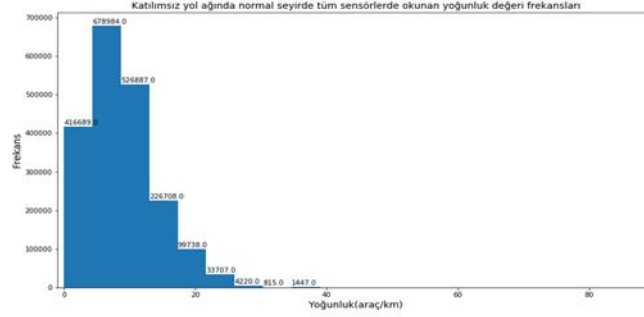
$\bar{x}(j, t)$: t anındaki ve j konumunda trafik kontrol değişkeninin ortalama değeri,

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

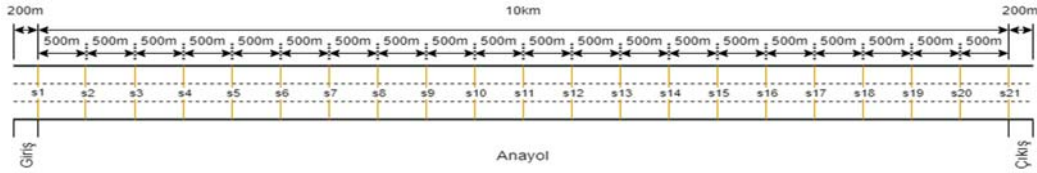
Yol ağının ortalama yoğunluk değerleri belirlendikten sonra eşik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Trafik ağında meydana gelen her problem yoğunlukta belirli bir artışa neden olacağından dolayı T_{SNS} değerindeki istatistiksel değişiklikler tek yönlü testler ile incelenmiştir. Eşik değeri belirlenirken 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

	DR	FAR	MTTD
SNS	%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

		DR	FAR	FAR Değişimi (%)	MTTD	MTTD Değişimi (%)
SNS	Kısa Süreli Kaza	%152,79	%20,58		149,99	
	Orta Süreli Kaza	%142,79	%25,22	%22,52	183,73	%22,49
	Uzun Süreli Kaza	%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

		DR	FAR	FAR Değişimi (%)	MTTD	MTTD Değişimi (%)
SNS	Sağ Şerit Kazası	%120,78	%13,18		117,20	
	Orta Şerit Kazası	%204,76	%42,81	%224,84	204,18	%74,22
	Sol Şerit Kazası	%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 GÖKAŞAR¹, Mehmet AKINCILAR²

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, paylaşımlı araçlar.

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 alarak 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 hibrid 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 Olanakları: 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
4. 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 SİNMEZ¹

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

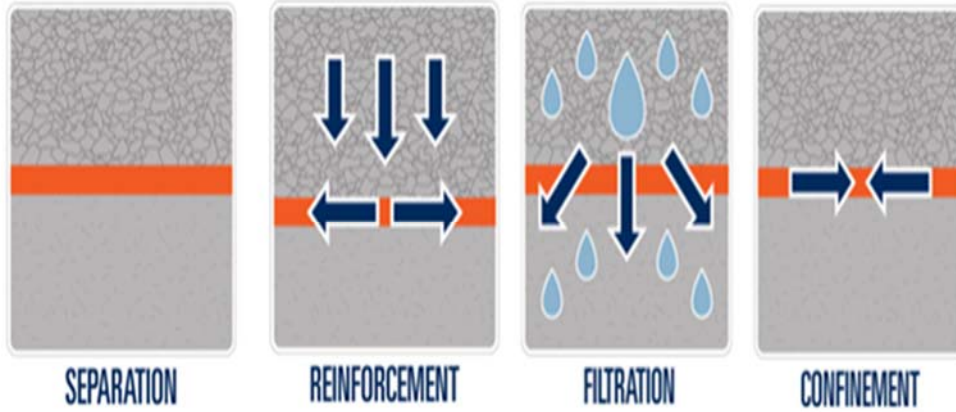
As a countermeasure to railway soil problems, geosynthetic reinforcements in the soil layer can strengthen structures. The goal of this study is therefore to investigate how a geogrid reinforcement layer can alter the essential characteristics of a structure, focusing on the geogrid material form and 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

¹ 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.



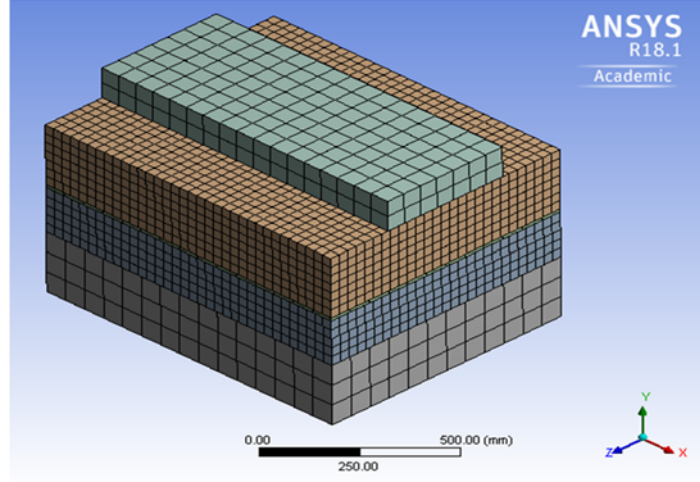
Şekil 1 - Geosentetiklerin Bazı Fonksiyonlarının Gösterimi (Tencate 2019) [9]

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/m³ ve 1800 kg/m³ 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 ³)	600	800	1100
Elastisite Modülü (MPa)	7	12	30
Poisson's Oranı	0.300	0.300	0.316

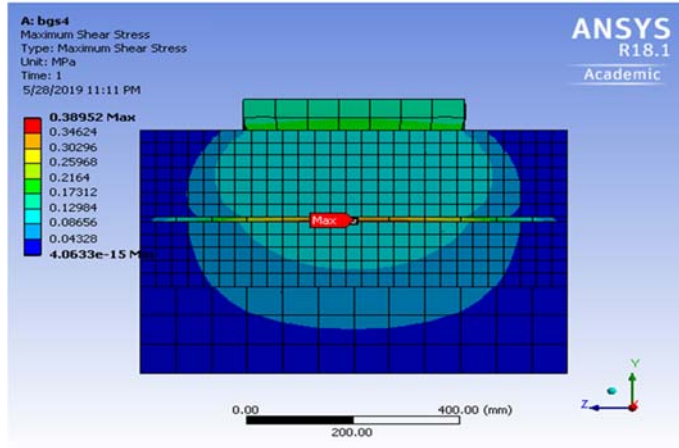
3. GEOGRİD TAKVİYELİ YAPININ RAKAMSAL ANALİZLERİ

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.

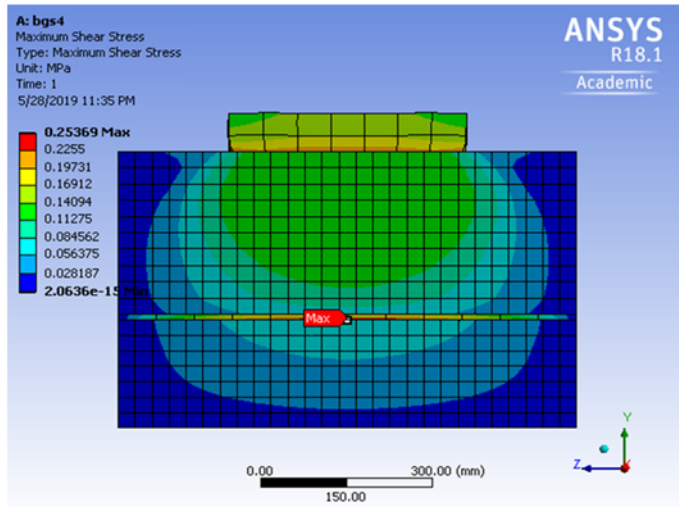
4. GEOGRİD TAKVİYELİ YAPILARDA KAYMA GERİLMESİ, ŞEKİL DEĞİŞTİRME VE DİKEY SAPMA ANALİZLERİ

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;

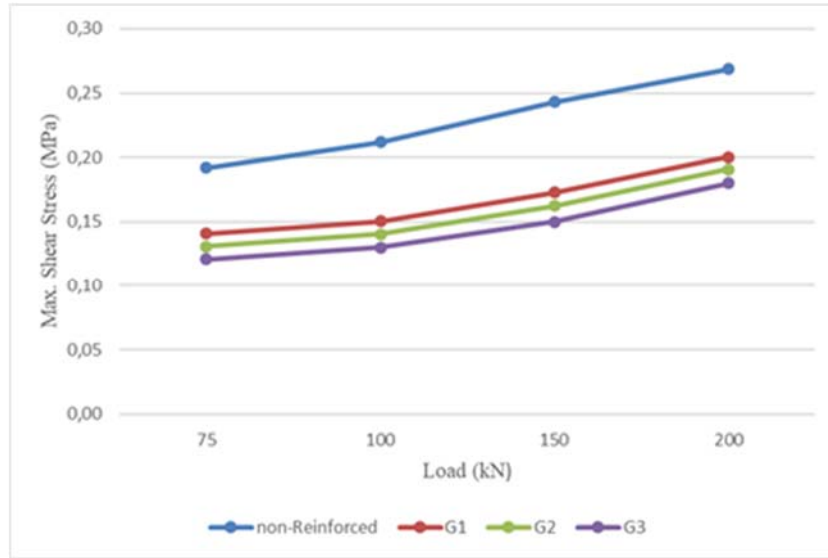


a)



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

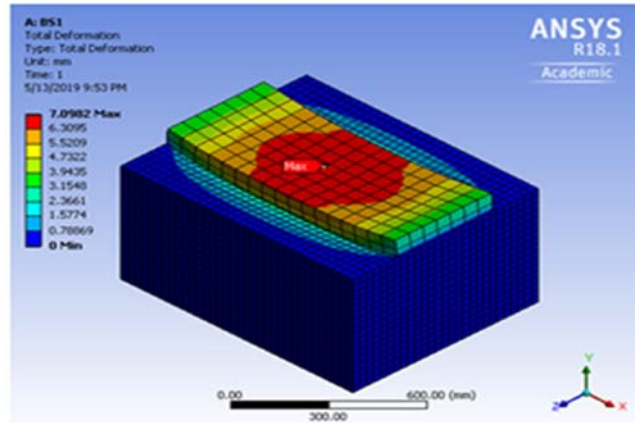
uygulanan kesme kuvvetinin birim alana etkisine ise kayma (kesme) gerilmesi denir ($\tau = F/A$). Zeminin iyi ve uzun ömürlü çalışabilmesi için kayma gerilmesi parametresi önem arz etmektedir. Balastlı yapı modelimizin tepe noktasından 10 cm altına yerleştirilen geogrid malzemesi için maksimum kayma 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 Sehim Analizi (Deformasyon)

Belirli yük veya yükler altında uygulanan, yapıya 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 bütününe 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.

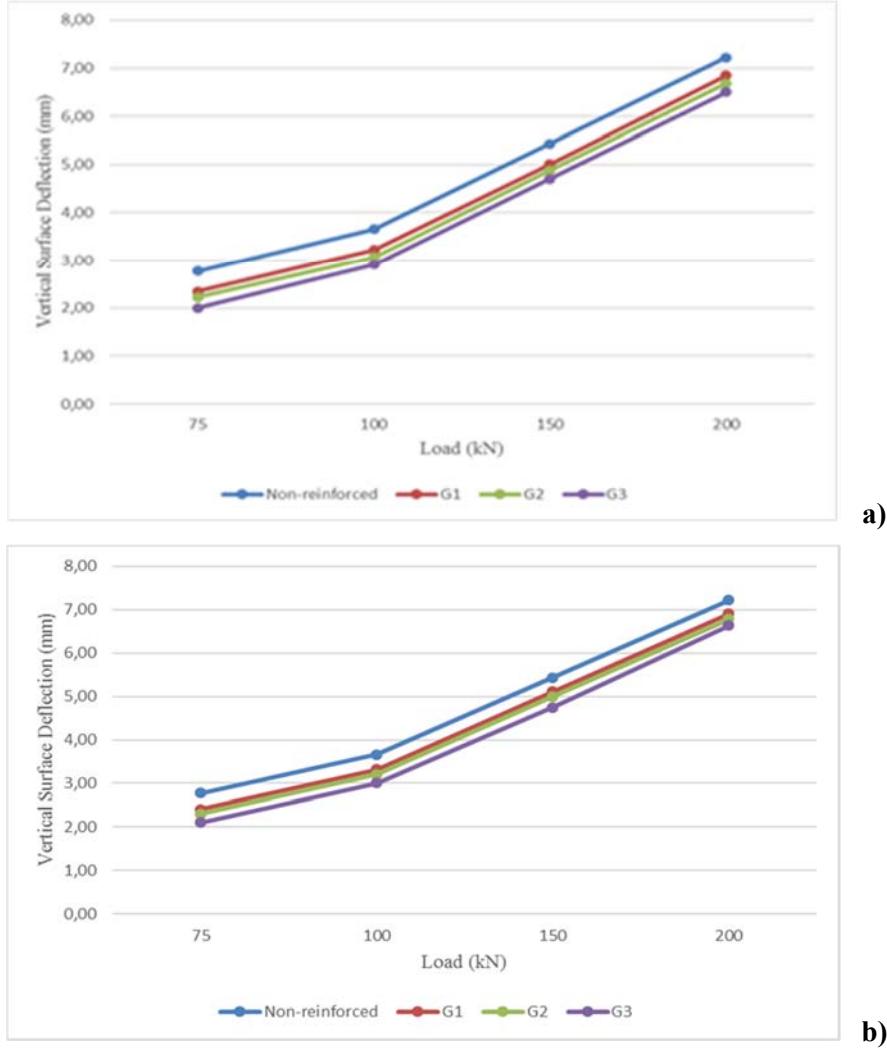


Şekil 5 - Maksimum Deformasyon (ANSYS 2018) [12]

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 indirgemıştır. 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.



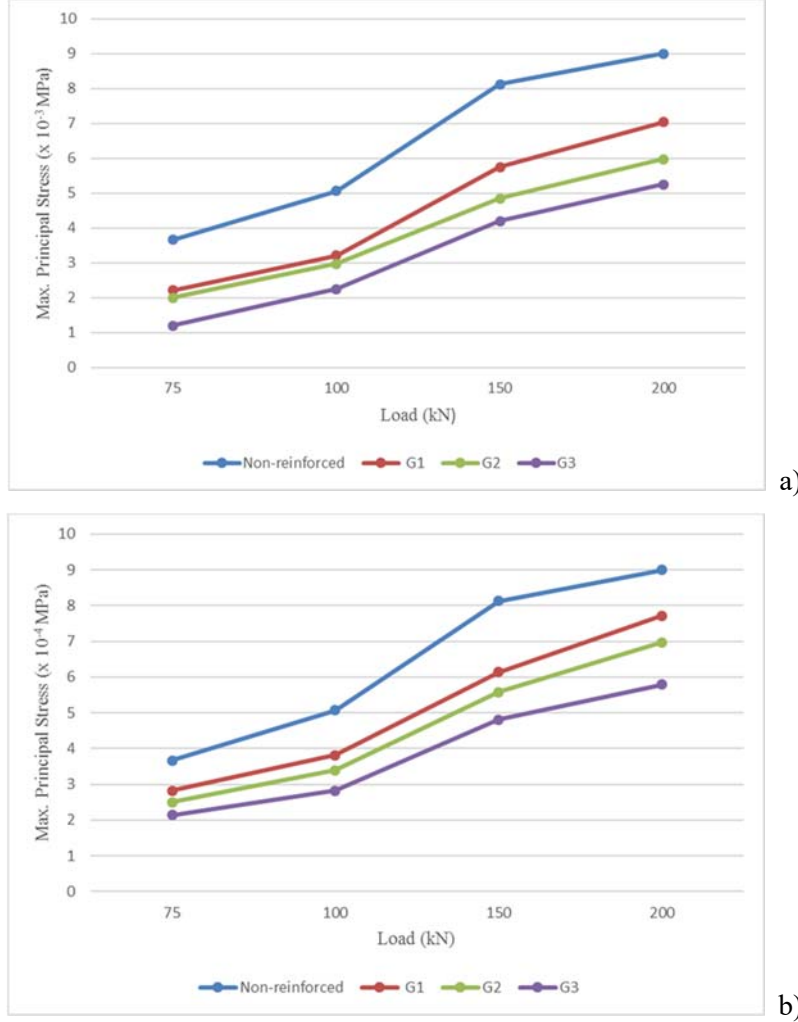
Şekil 6 - Farklı Yükler Altında Farklı Geogrid Takviyeli ve Takviyesiz Yapılarda Düşey Yüzey Sapma. Balast İçindeki Model (a), Balast ve Alt Balast Arasındaki Model (b)

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 9×10^{-3} MPa iken balast arasında kullanılan en düşük maksimum asal gerilmeye sahip G3 modeli 5.1×10^{-3} MPa' a sahiptir. Diğer uygulama yeri olan balast ve alt balast arasında ki modelde ise en düşük maksimum asal gerilme 5.9×10^{-3} MPa'dır. Elde edilen bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere geogrid takviyesi maksimum stresi azaltmaktadır ve uygulama

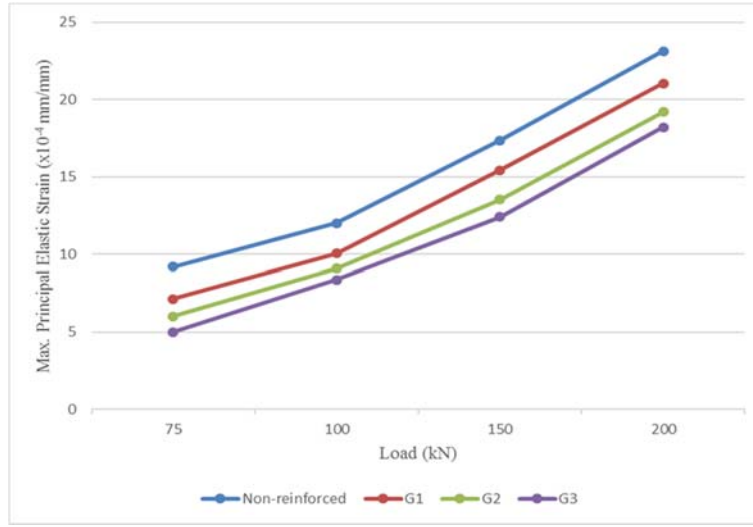
yeri olan balast arasında ise en iyi sonucu vermektedir. Geogrid takviyesini balast içinde kullanımı, balast ve alt balastta kullanımda %13,09 daha gerilmeyi azalttığı sonuçlardan görülmektedir. Geogrid takviyesi uygulamak ise takviyesiz modele göre %45,01 daha gerilmeyi azalttığı tespit edilmiştir.



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

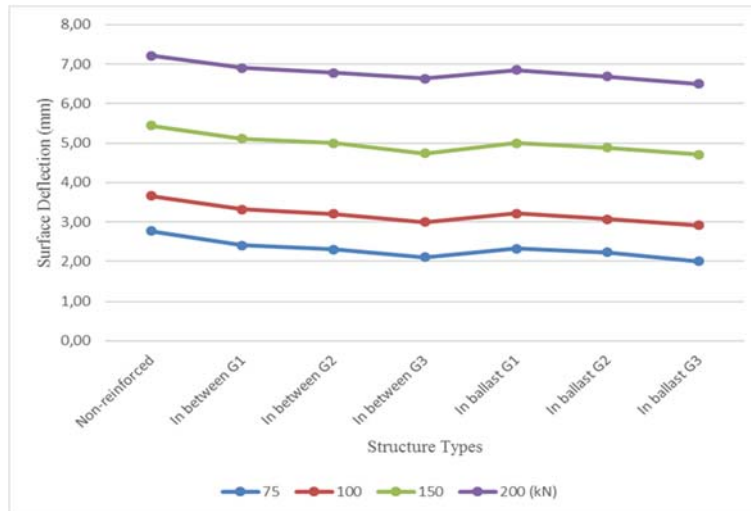
Elastik gerilme, yükün kaldırılması üzerine nesnenin geri tepeceği ve orijinal şekle geri döneceği gerilme değerleri için sınır olarak tanımlanır [11]. Yapılar nesnelere harici bir yüke maruz kaldığında, deformasyona uğrar. Yük, hesaplanan nesne yükünün elastik sınırına karşılık gelen yükü aşarsa, yükün 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 24×10^{-4} mm/mm iken G3 Geogrid kullanılan modelde maksimum elastik gerilme 17×10^{-4} mm/mm dir. Bu durumda uygulama yapılan yapılara geogrid takviyesinin kullanılması zorlanma özelliklerini geliştirdiğini gösterir.



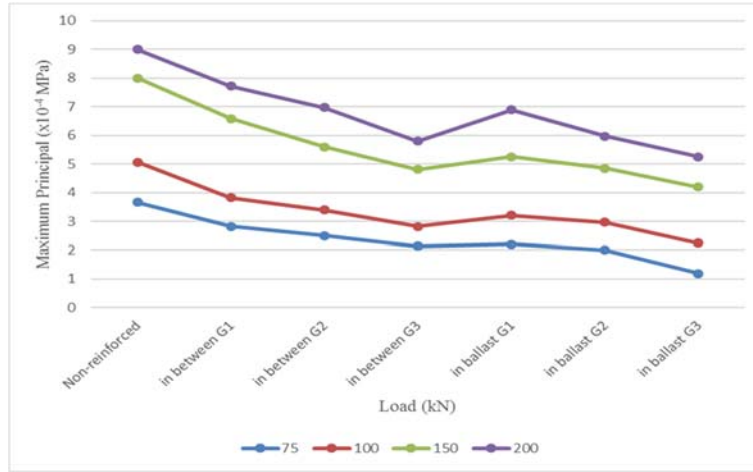
Şekil 8 - Farklı Yükler Altında Farklı Geogrid Türü Yapılarda Maksimum Elastik Gerilme

5. FARKLI YERLERDE KULLANILAN GEOGRİD TAKVİYELİ MODELLERİ KARŞILAŞTIRILMASI

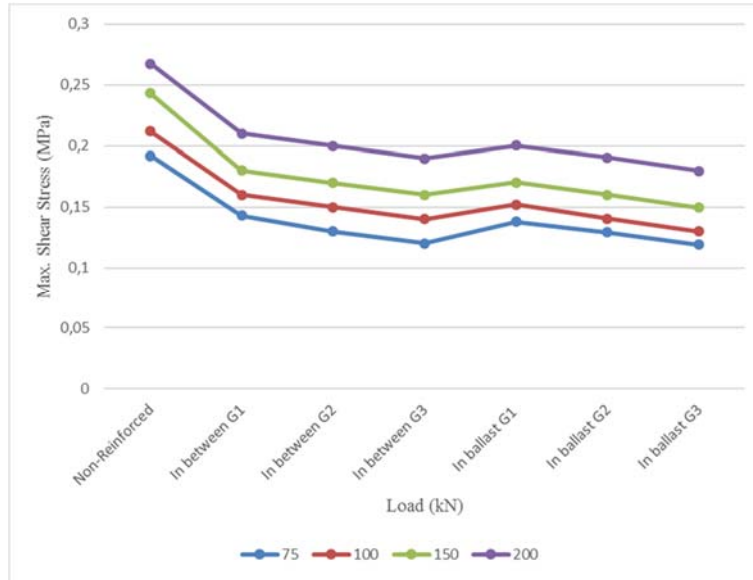
Analizlerimizde kullanılan farklı özellikteki geogrid takviyeli ve takviyesiz modelin, balast içinde ve balast ve alt balast arasında iki farklı yerde uygulamayı karşılaştırmak. Karşılaştırmalar yukarıdaki analiz sonuçlarının tek grafik halinde gösterilmesi şeklinde oluşturulmuştur. Şekil 9’da da görüldüğü 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 sönmlediğini 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 ARTAN¹, İsmail ŞAHİN²

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 ağı modeliyle karşılaştırılmıştır. 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 gösterilmiştir. 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):

$$E_i = Q_0 \times P \quad (6)$$

$$E_i = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_K] \quad (7)$$

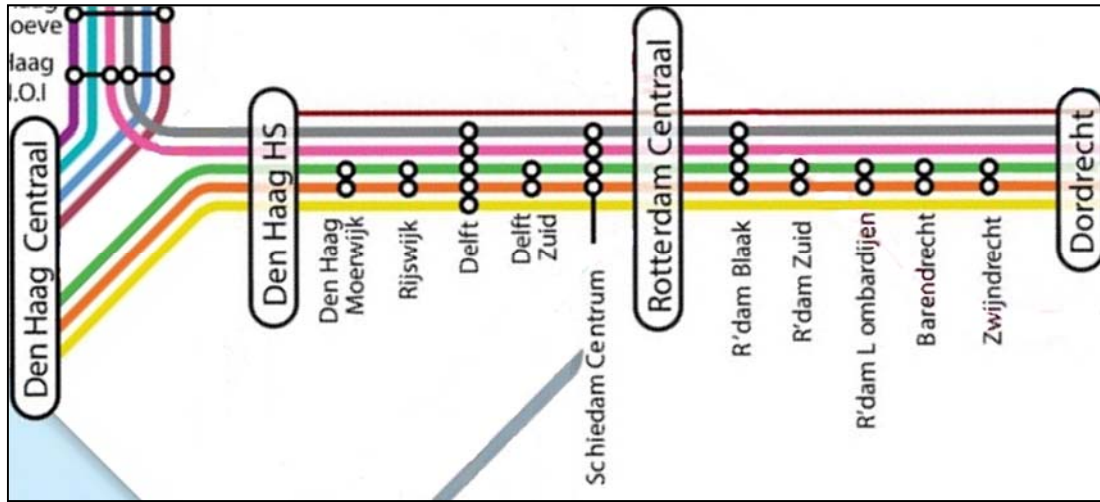
Bu çalışmada modellenen değişken (gecikme) sürekli bir değişkendir. Ancak gecikme, kesikli durumlu Markov zincirleri ile modellenmiştir. Bu nedenle, gecikme değerleri, belirli aralıklarda bulunması durumuna göre gruplandırılmıştır (gecikme durumu). Tanımlanan gecikme durumları (aralıkları) için gözlenen 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.

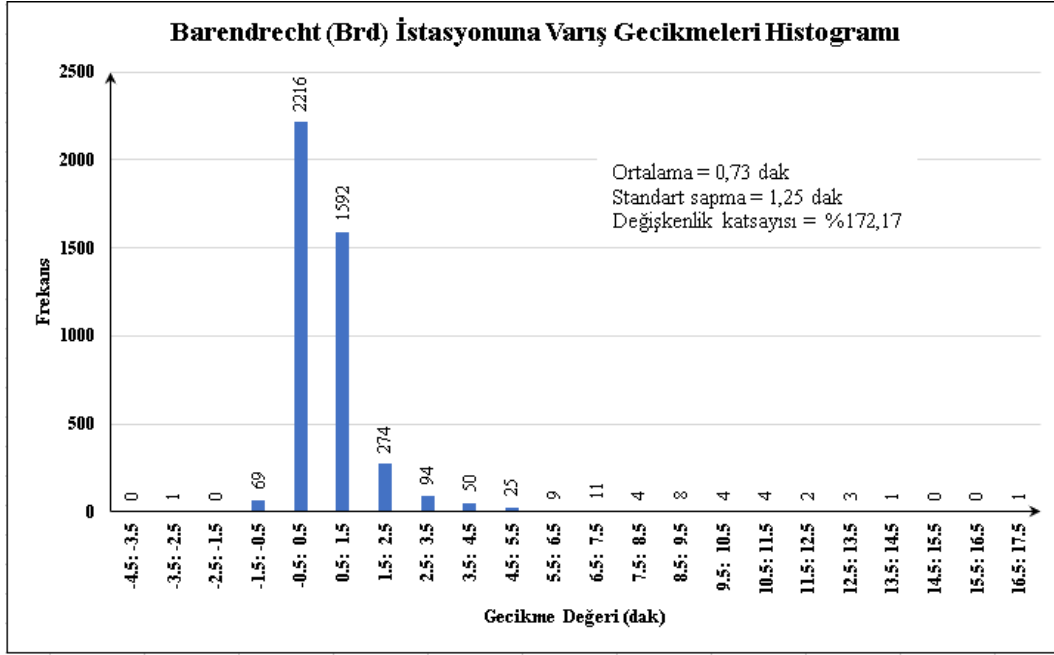


Şekil 1 - İncelenen demiryolu ağı parçası

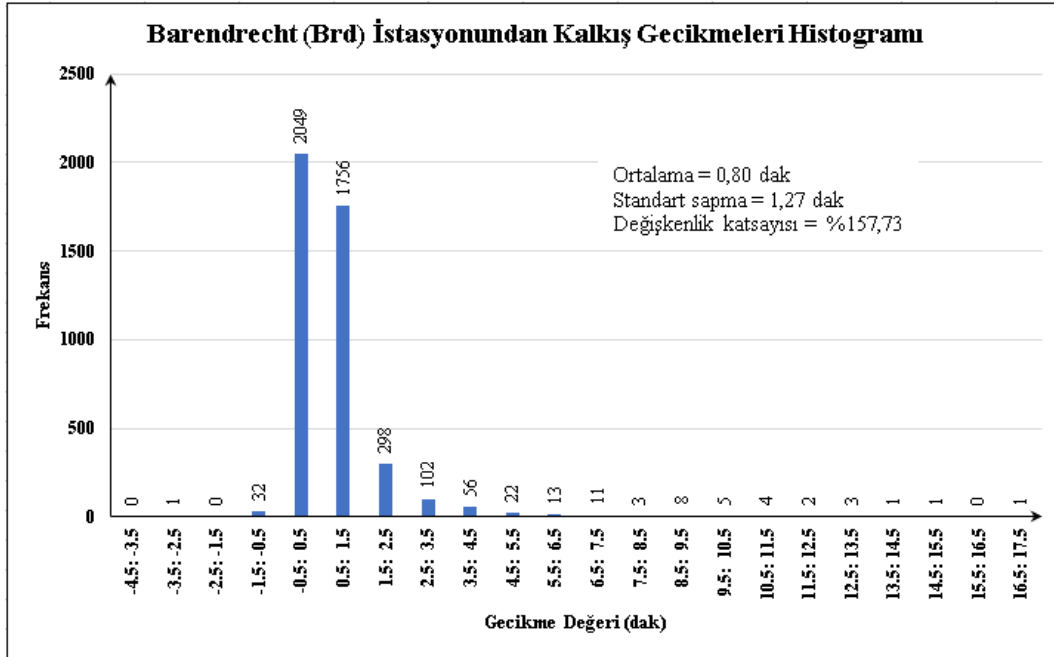
Veri Temini

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.

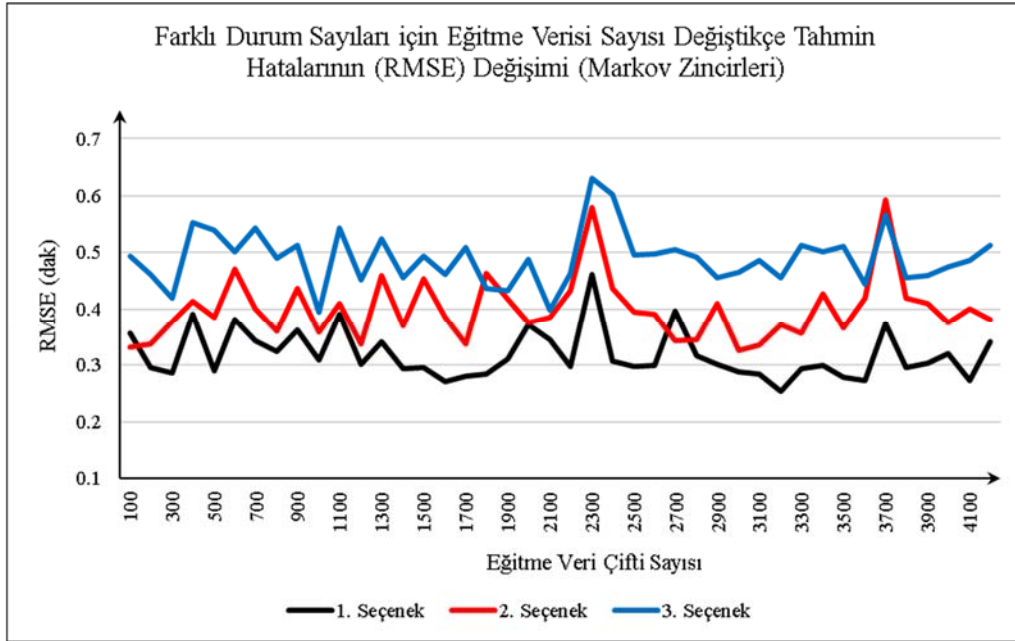
Tablo 1 - Gecikme durumları ve temsili değerler

	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)
Gecikme durumu 1	-1,5 ile -0,5 arası	-0,66	-1,5 ile 0,5 arası	0,14	-1,5 ile 1,5 arası	0,46
Gecikme durumu 2	-0,5 ile 0,5 arası	0,16	0,5 ile 2,5 arası	1,00	1,5 ile 4,5 arası	2,36
Gecikme durumu 3	0,5 ile 1,5 arası	0,84	2,5 ile 4,5 arası	3,28		
Gecikme durumu 4	1,5 ile 2,5 arası	1,88				
Gecikme durumu 5	2,5 ile 3,5 arası	2,98				
Gecikme durumu 6	3,5 ile 4,5 arası	3,86				

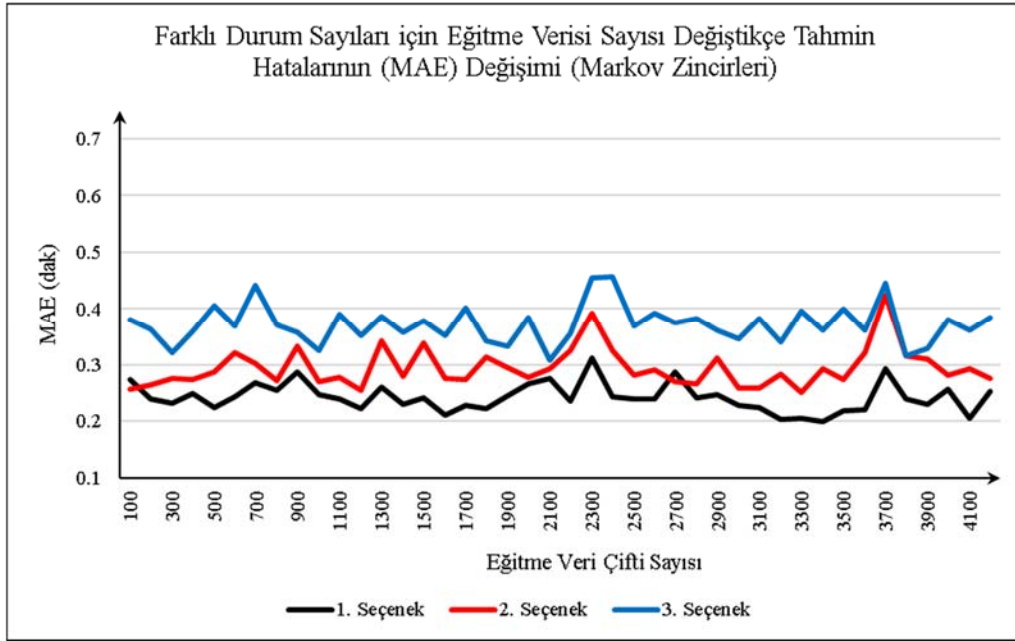
Genel olarak veriye dayalı yöntemlerde daha çok sayıda eğitim verisinin kullanılması durumunda tahmin hatalarının azalacağı beklenir. Gerçek hayatta her zaman çok sayıda veri mevcut

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 ₁)	Durum 2 (x ₂)	Durum 3 (x ₃)	Durum 4 (x ₄)	Durum 5 (x ₅)	Durum 6 (x ₆)	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

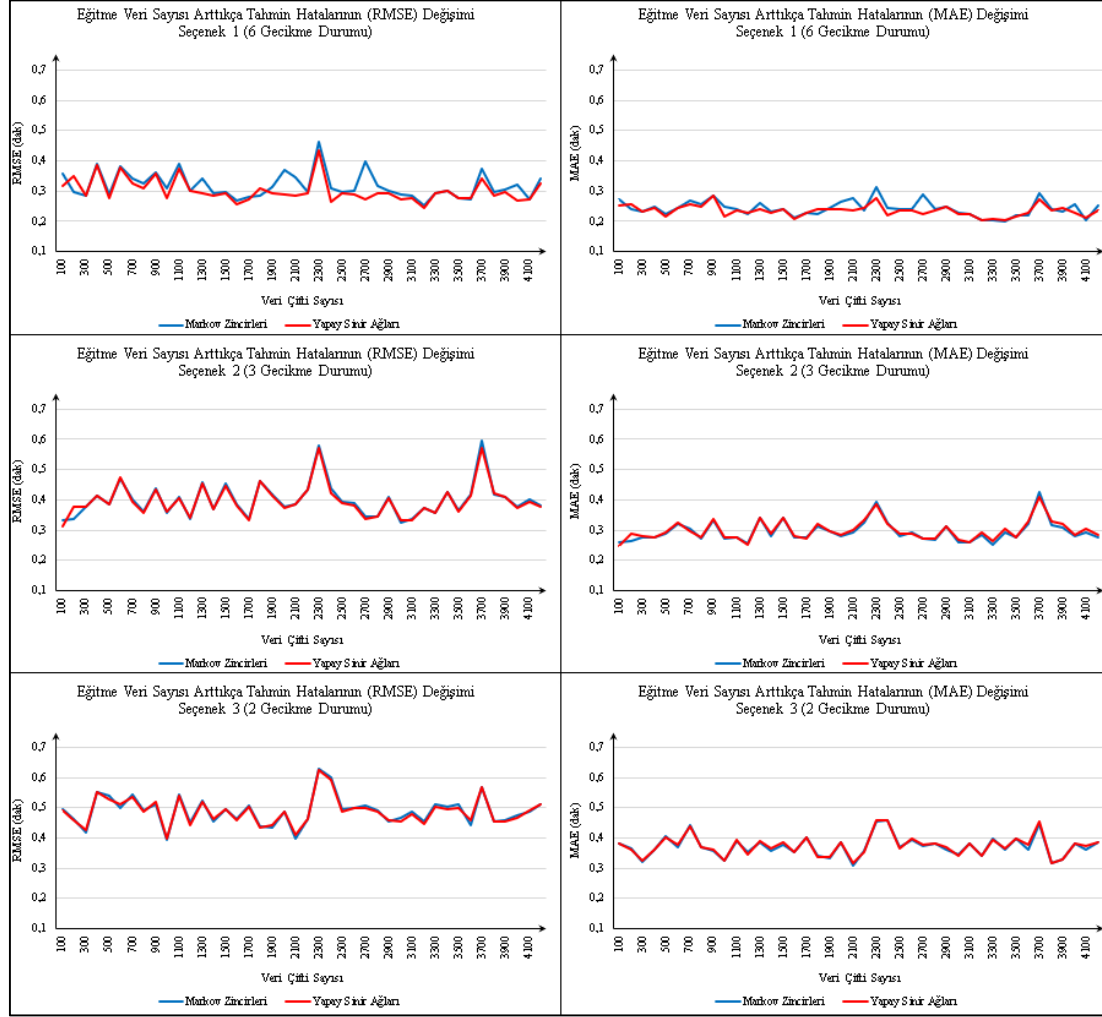
Tablo 3 - Yapay sinir ağları modellerinde optimize edilen parametreler

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 ŞAHİN¹

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.

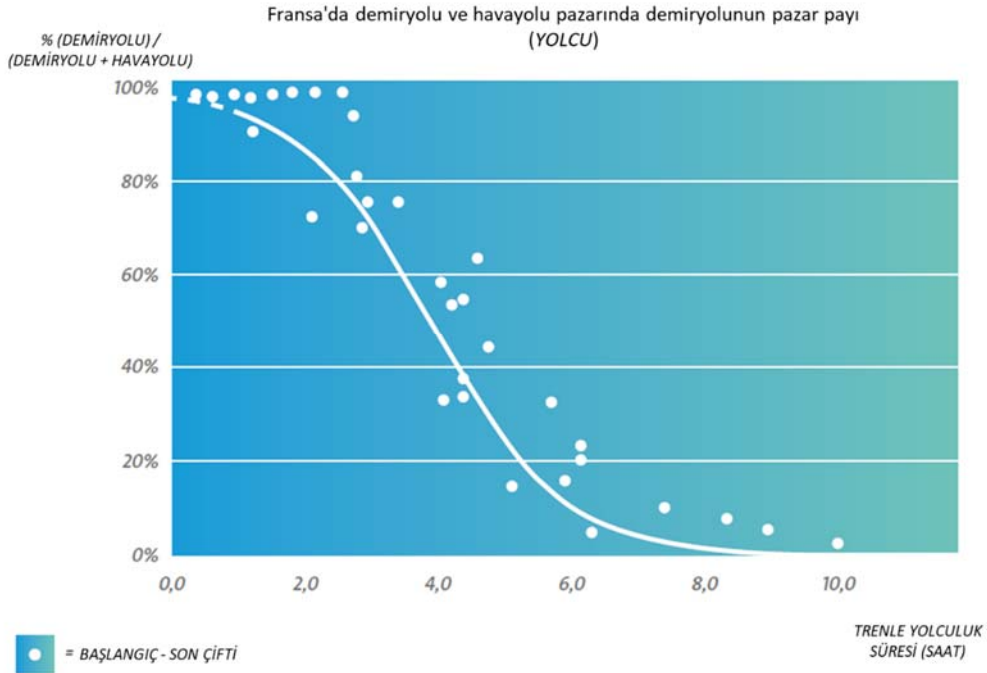
¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul - sahin@yildiz.edu.tr

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

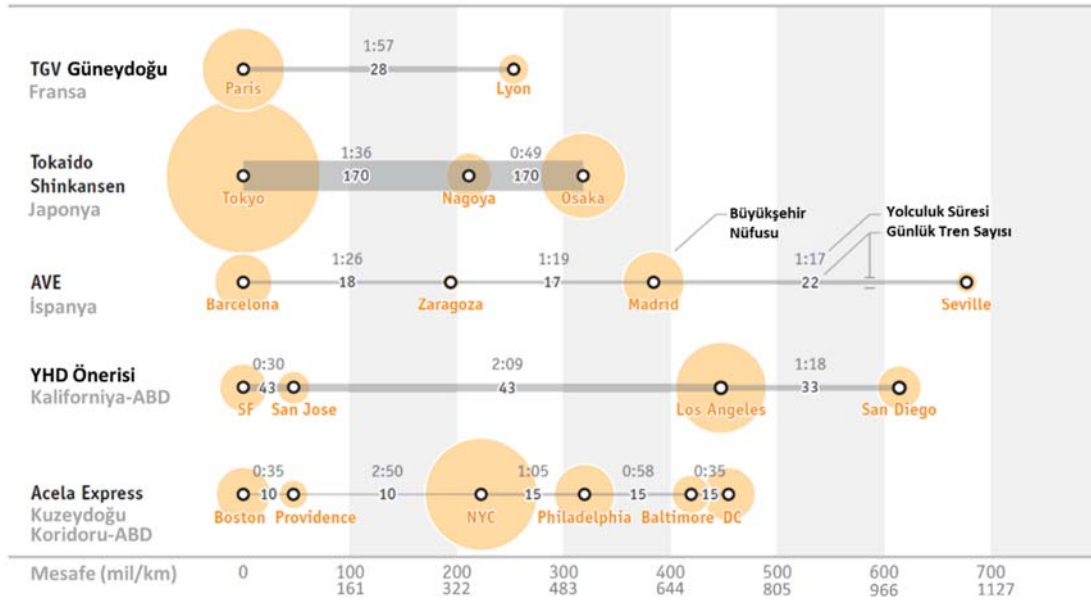
Yüksek hızlı demiryolu ile diğer ulaştırma türleri arasındaki rekabette iki ölçüt öne çıkmaktadır: Kapıdan kapıya toplam yolculuk süresi ve toplam yolculuk ücreti. Hizmetlerin sık ve zamanında yapılması da gelecekteki yüksek hızlı demiryolu işletmeciliğinin güçlenmesine katkı yapacaktır. Şekil 1’de Fransa’da kapıdan kapıya yolculuk süresinin havayolu ile karşılaştırıldığında YHD pazar payına etkisi görölmektedir. Buna göre, 2 saat 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 koridorlarını 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].

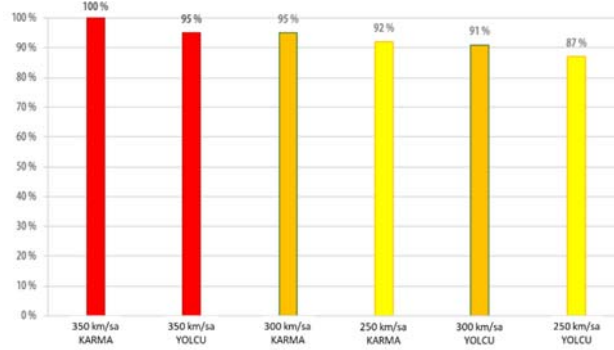


Şekil 2 - Bazı YHD koridorlarının karşılaştırılması

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 dağınık 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 ayırmıştı. 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
Dünya (toplamı)	56.129	22.562	51.786	200-350

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.

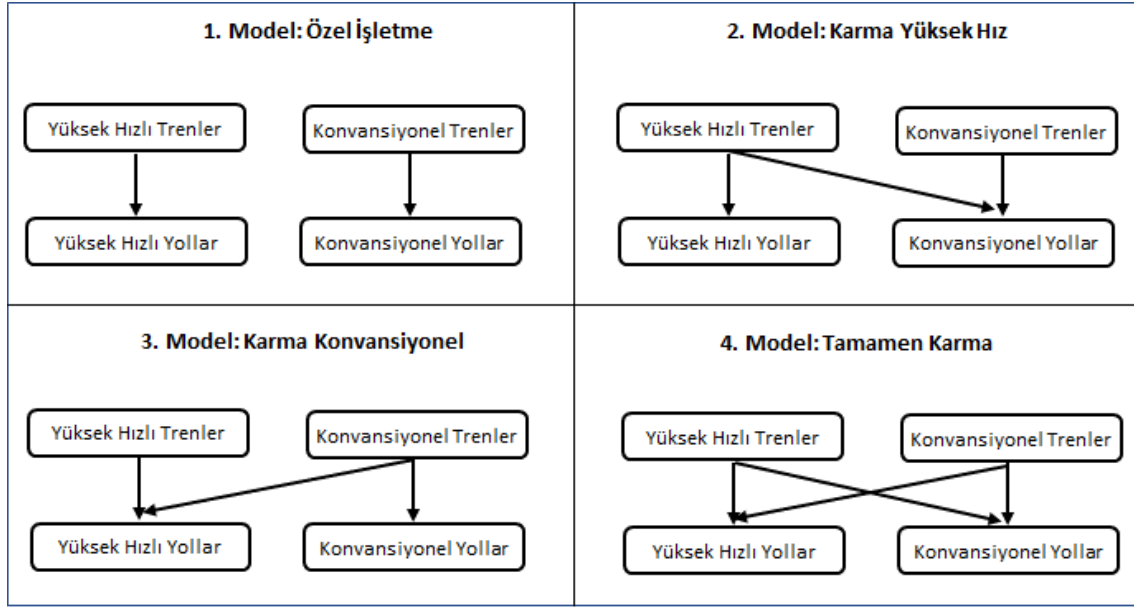
AB'deki YHD yatırımlarının genel görünümü şöyledir: Maliyet verimliliği düşük seviyede olabilmektedir, çünkü her yerde yüksek hızlı hatlara gereksinim yoktur; tamamlanan yedi hattan üçü beklenenin altında yolcu çekmekte, yani 2,7 milyar avro değerindeki AB ortaklık desteğini verimsiz harcanma riskiyle 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.

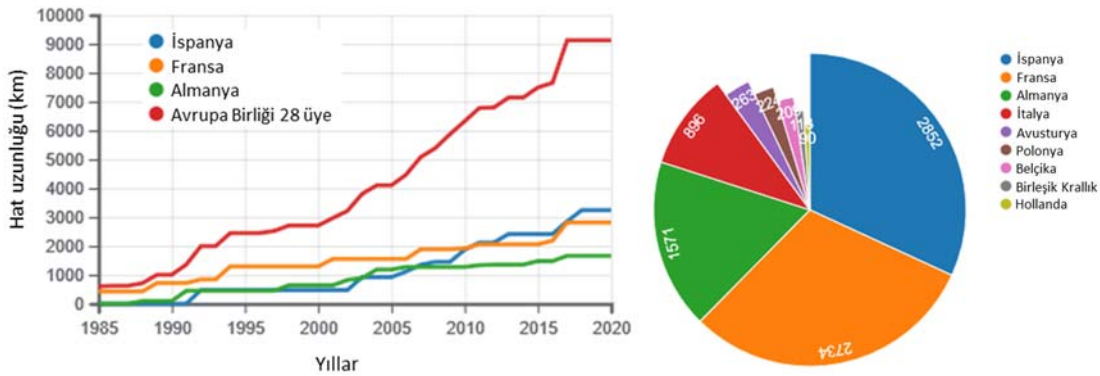
Günümüzde tek tip bir Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağı yoktur. Bunun yerine, farklı üye ülkelerde farklı işletim modelleri bulunmaktadır (Şekil 6). Örneğin, tren türlerine göre tanımlanan özel işletme modelleri, yüksek hızlı trenlerin konvansiyonel hatlarda işletildiği model (Fransa, İspanya ve İtalya'da), 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



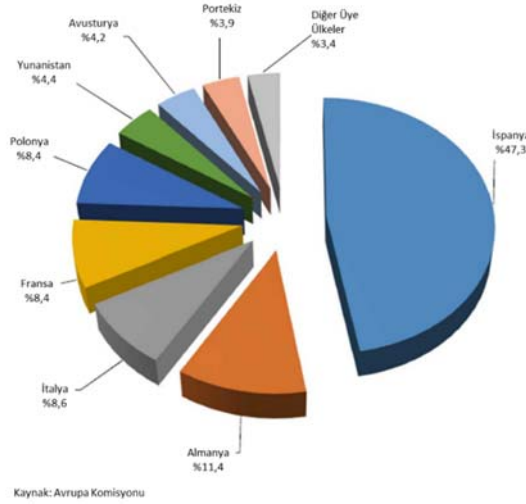
Şekil 7 - AB'deki üye ülkelerin YHD ağlarının büyümesi (250 km/sa ve üzeri)
(https://en.wikipedia.org/wiki/High-speed_rail_in_Europe)

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
Toplam/ortalama	4.618**	109.084	1.207	117,04

* 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

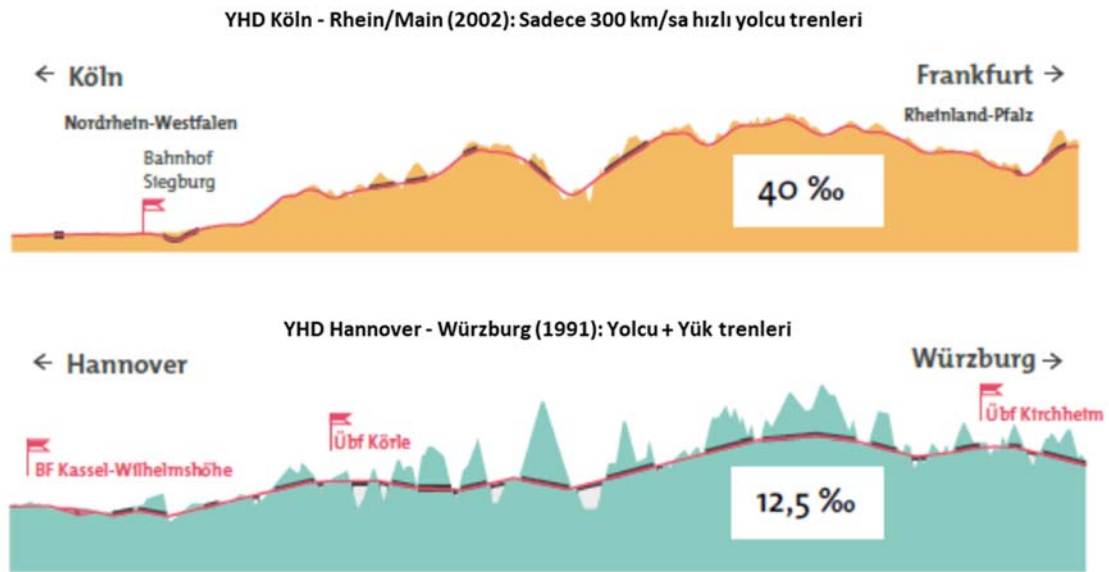
planlanmakta; 11.590 km uzunluğundaki konvansiyonel demiryolu hattının ise 12.018 km'ye yükseltilmesi, böylece 2023 yılında toplam 17.527 km demiryolu uzunluğuna ulaşılması planlanmaktadır. Demiryollarının karasal sistemler içindeki yolcu taşımacılığı payının da %1,3'ten %3,8'e çıkartılması hedeflenmektedir.

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].



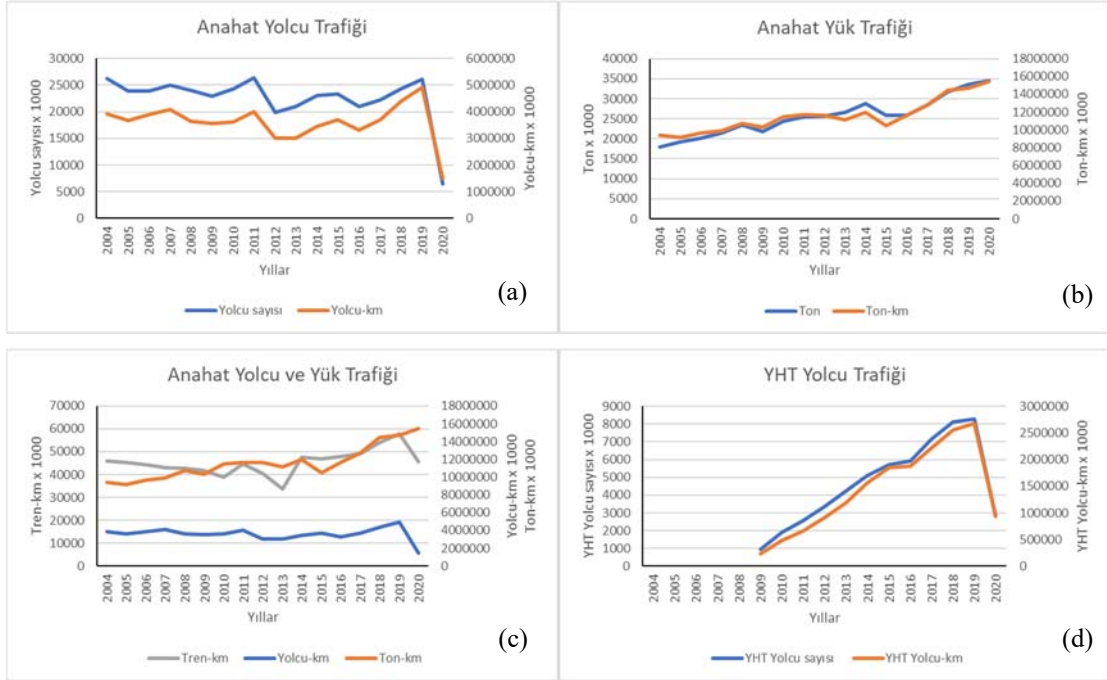
Şekil 10 - Sadece yüksek hızlı yolcu trenleri ve karma trafik işletilen hatlarda boyuna eğimler [1]

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>.