

User behavior in urban public transport systems: A reliability-based parametric analysis

Tayfun Özcan ¹, Hüseyin Ceylan ²

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 26.03.2026

Accepted: 14.06.2026

Doi:

10.65206/pajes.1916995

Corresponding author:

Tayfun Özcan

(tayfunozcan@mu.edu.tr)

Author addresses:

¹ Department of Construction Technologies, Yatağan Vocational School, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla 48500, Türkiye
(tayfunozcan@mu.edu.tr)

² Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli 20160, Türkiye
(hceylan@pau.edu.tr)

ABSTRACT

Context—Urban transport policies should be organized with a holistic perspective that covers various benefits, such as preventing traffic congestion, reducing environmental pollution, and ensuring social equity. For this reason, public transport systems, which play key roles in achieving these benefits and ensuring the continuity of transport services, lie at the heart of urban transport planning. In this context, local and central governments are increasingly investing in the physical and operational features of public transport systems. At the same time, research shows that individual daily travel habits have an impact on problems caused by transport mobility. However, the empirical characteristics and dynamics of travel habits are still not fully understood. In this regard, quantifying the effects of users' travel habits across the system to maximize the benefits obtained is critical for designing public transport systems that are better adapted to the daily mobility needs of cities.

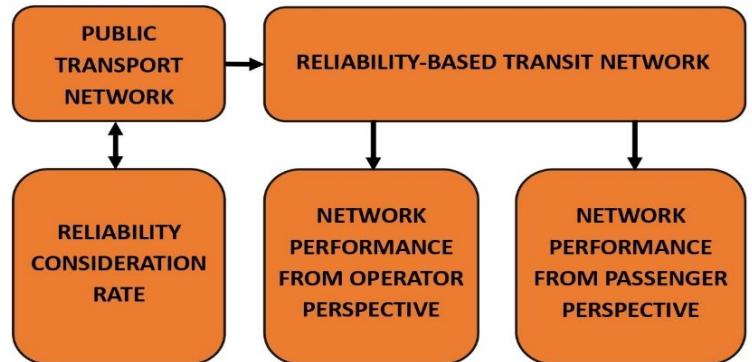
Objective—This study demonstrates the impacts of public transport users' perception errors regarding travel time reliability on the performance outputs of the system. The results aim to provide planners and decision-makers responsible for the planning and operation of urban public transport systems with insight into the potential outcomes of reliability changes that may arise from their network interventions.

Method—Within the proposed framework, an approach is developed for a reliability-based solution to the public transport assignment problem—which represents the distribution of travel demand across lines in the network—using headways determined by vehicle occupancy. In this approach, users' time-based travel costs are treated as the sum of access time to stops, time spent waiting at stops, and in-vehicle time. By also accounting for delays caused by passenger boarding and alighting, high accuracy is achieved in reliability calculations. The developed model can be calibrated to consider different perception rates of reliability during the assignment process, allowing for the investigation of shifts in users' connection choice behavior under varying levels of perception.

Results—Testing the proposed model on a test network tailored to the problem's structure under different reliability perception levels has demonstrated that reliability directly impacts users' connection choices and can lead to significant shifts in operating costs. It was observed that as the reliability perception rate increases across the system, transfer trips decrease, and users tend to avoid unreliable connections by accepting longer initial waiting times at stops. Finally, it was determined that the required fleet size for the projected operating conditions and the total service-kilometers performed on the lines decrease as the level of perception regarding reliability increases.

Conclusion—The results obtained within the scope of this study show that the proposed public transport assignment approach can play an effective role in the design processes of urban bus networks. It has been demonstrated that reliability directly impacts users' connection choices and is a parameter that must be considered in studies addressing the performance of public transport systems. In future studies, it is evaluated that investigating the effects of reliability on network design and headway optimization processes will contribute to literature.

Key Words—Public transport, Reliability, Transit assignment, Headway optimization, Bus transportation.



Kentiçi toplu taşıma sistemlerinde kullanıcı davranışları: Güvenilirlik esaslı parametrik analiz

Tayfun Özcan ¹, Hüseyin Ceylan ²

MAKALE BİLGİLERİ

Tarihler:

Geliş: 26.03.2026

Kabul: 14.06.2026

Doi:

10.65206/pajes.1916995

Sorumlu yazar:

Tayfun Özcan

(tayfunozcan@mu.edu.tr)

Yazar adresleri:

¹ İnşaat Teknolojisi Programı,
Yatağan Meslek Yüksek Okulu,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi,
Muğla, 48500, Türkiye.
(tayfunozcan@mu.edu.tr)

² İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Mühendislik Fakültesi,
Pamukkale Üniversitesi, Denizli,
20160, Türkiye.
(hceylan@pau.edu.tr)

ÖZ

Arka Plan—Kentsel ulaşım politikaları; trafik sıkışıklığının önlenmesi, çevre kirliliğinin azaltılması ve sosyal eşitliğin sağlanması gibi pek çok faydayı kapsayacak bütüncül bir bakış açısı ile organize edilmelidir. Bu nedenle söz konusu faydaların elde edilmesi ve ulaşım hizmetlerinin sürekliliğinin sağlanmasında kilit roller üstlenen toplu taşıma sistemleri, kentsel ulaşım planlamasının merkezinde yer almaktadır. Bu kapsamda yerel ve merkezi yönetimler, toplu taşıma sistemlerinin fiziksel ve işletimsel özelliklerine giderek artan oranlarda yatırımlar yapmaktadır. Aynı zamanda yapılan araştırmalar, bireysel günlük yolculuk alışkanlıklarının ulaşım hareketliliği kaynaklı problemler üzerinde etki sahibi olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak yolculuk alışkanlıklarının ampirik özellikleri ve dinamikleri hâlâ tam olarak anlaşılabilmemiş değildir. Bu bağlamda, elde edilen faydaların maksimize edilmesi için kullanıcıların seyahat alışkanlıklarının sistem genelinde oluşturduğu etkilerin nicelleştirilmesi, kentlerin günlük hareketlilik ihtiyacına daha iyi uyarlanmış toplu taşıma sistemlerinin tasarımı için kritik öneme sahiptir.

Amaç—Bu çalışmada; toplu taşıma kullanıcılarının seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin algılama hatalarının, toplu taşıma sistemine ait performans çıktıları üzerindeki etkileri ortaya konmaktadır. Elde edilen sonuçlar ile kentsel toplu taşıma sistemlerinin planlanması ve işletilmesinden sorumlu olan planlamacı ve karar vericilerin; ağa yapacakları müdahaleler sonucu ortaya çıkabilecek güvenilirlik değişimlerinin olası sonuçları hakkında fikir sahibi olmaları amaçlanmaktadır.

Yöntem—Önerilen çerçevede; ağdaki seyahat talebinin toplu taşıma hatları arasındaki dağılımını temsil eden toplu taşıma ataması probleminin, hatlardaki doluluklara göre belirlenen sefer aralıkları yardımıyla güvenilirlik esaslı çözümüne yönelik bir yaklaşım geliştirilmektedir.

Bu yaklaşımda kullanıcıların zaman bazlı seyahat maliyetleri; duraklara erişim süresi, duraklarda kaybedilen zaman ve araç içerisinde geçirilen sürenin toplamı olarak ele alınmakta; yolcu iniş-binişlerinden kaynaklı gecikmelerin de dikkate alınmasıyla güvenilirlik hesaplarında yüksek doğruluk sağlanmaktadır. Geliştirilen model, atama sürecinde güvenilirliğin kullanıcılar tarafından farklı algılanma oranlarını dikkate alacak şekilde ayarlanabilmekte ve değişen algı düzeyleri altında kullanıcıların bağlantı seçimi davranışlarındaki değişimlerin incelenmesine olanak tanımaktadır.

Bulgular—Önerilen modelin; problemin yapısına uygun olarak geliştirilen bir test ağı üzerinde, farklı güvenilirlik algılama seviyeleri altında sınanması neticesinde; güvenilirliğin, kullanıcıların bağlantı tercihlerine doğrudan etki ettiği ve işletme maliyetlerinde önemli değişimlere yol açabileceği ortaya konmuştur. Sistem genelinde güvenilirlik algılama oranındaki artışa bağlı olarak aktarmalı seyahatlerin azaldığı ve kullanıcıların, daha uzun ilk durak bekleme sürelerini göze alarak güvenilirliği düşük bağlantılardan kaçınma eğilimi gösterdikleri gözlemlenmiştir. Öngörülen işletme koşulları için gerekli filo büyüklüğünün ve hatlarda gerçekleşen toplam servis-km değerinin, güvenilirliğe ilişkin algı seviyesinin artışına bağlı olarak düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç—Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar; önerilen toplu taşıma ataması yaklaşımının, kent içi otobüs ağlarının tasarım süreçlerinde etkin bir rol oynayabileceğini göstermiştir. Güvenilirliğin; kullanıcıların bağlantı tercihlerine doğrudan etki ettiği ve toplu taşıma sistemlerinin performansını ele alan çalışmalarda dikkate alınması gereken bir parametre olduğu ortaya konmuştur. Gelecek çalışmalarda güvenilirliğin; ağ tasarımı ve sefer aralığı optimizasyonu süreçlerine olan etkilerinin araştırılmasının, literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler—Toplu taşıma, Güvenilirlik, Toplu taşıma ataması, Sefer aralığı optimizasyonu, Otobüs taşımacılığı.



I. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şehirleşme, son yüzyılın en büyük ekonomik ve sosyal değişimlerinden biridir. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri kent nüfusu iki kattan fazla artmıştır. Bu eğilimle birlikte, yüzyılın ortasında dünya nüfusunun yaklaşık %70'inin şehirlerde yaşayacağı öngörülmektedir [1]. Ekonomik faaliyetlerin merkezi olan modern kentlerdeki karmaşık arazi kullanımı; mal, hizmet ve yolcu hareketliliği için ulaşım sistemlerini zorunlu kılmaktadır. Şehirlerde artan nüfusa bağlı olarak yolculuk talebi ve motorlu taşıt kullanımı da yoğunlaşmaktadır [2], [3]. Sosyal ve ekonomik gelişmeyle artan bu hareketlilik; trafik sıkışıklığı, kazalar, gürültü, yüksek enerji tüketimi ve hava kirliliği gibi sorunları beraberinde getirerek gelişmiş ve gelişmekte olan kentlerin başlıca problemi haline gelmiştir [4]. Araştırmalar, küresel ulaşım hareketliliğinin yüzyıl ortasında iki katına çıkacağını göstermektedir [5].

Yerel ve merkezi yönetimlerin artan ulaşım talebine başlangıçta yeni yollar ve altyapı projeleriyle cevap verme çabası; çevresel, ekonomik ve toplumsal bazı sorunları da beraberinde getirmiştir [6]. Yaşanan sıkıntılar, karar vericileri toplu taşımayı teşvik eden politika ve stratejilere yöneltmiştir [7], [8]. Ancak sosyoekonomik gelişme ve değişen alışkanlıklar, özel araç kullanımını artırırken toplu taşımanın payını azaltmaktadır [9]. Toplu taşıma sistemlerinin kent içi ulaşımındaki payının artırılabilmesi için; güvenlik, güvenilirlik ve konfor gibi pek çok ölçütte özel araçlarla rekabet edebilecek etkinliğe kavuşturulması gerektiği değerlendirilmektedir. Literatür, günlük yolculuk modellerinin tekrarlayan özellikler gösterdiğine ve bireylerin aynı yolculuk tercihlerini yinelenen bir şekilde takip etme eğiliminde olduğuna işaret etmektedir [10]. Zira yapılan çalışmalar; bireysel yolculuk davranışının yaş, cinsiyet, meslek, demografik özellikler ve sosyoekonomik durum gibi bir dizi faktör tarafından koşullandırıldığını ortaya koymaktadır [11]-[15]. Bu nedenle, toplu taşıma sistemlerini konu alan çalışmalarda kullanıcıların seyahat seçimlerini belirleyen etkenlerin dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar; toplu taşıma altyapılarının seyahat talebine cevap verebilecek kabiliyeti sahip olsa bile tercih edilmeyebildiğini göstermektedir [16]-[18]. Bu durumun nedeninin potansiyel kullanıcıların toplu taşıma sistemlerine karşı duyduğu güvensizlik olduğu; önyargı seviyesi azaldıkça toplu taşıma sistemlerinin kullanıma olasılığının arttığı görülmektedir. Bu güven eksikliği, özellikle gelişmekte olan ülke kentlerindeki planlamacılar ve karar vericiler için ciddi bir zorluk durumundadır [19], [20]. Kullanıcıların duyduğu güvensizliğin temel nedenlerinden biri olan güvenilirlik eksikliği, seyahat türü ve hat seçimini doğrudan etkilemektedir [21].

Tüm bu tespitlerle birlikte; literatürde toplu taşıma sistemlerinin performansını konu alan çalışmalar incelendiğinde, Trafik Analiz Bölgelerinin yoğun bir şekilde doğrudan duraklar üzerinden konumlandığı varsayılmaktadır [22]-[24]. Bu geleneksel yaklaşım; toplu taşıma ağındaki herhangi bir Başlangıç-Varış (B-V) çifti arasında gerçekleşen seyahatin, ilgili trafik analiz bölgesinin ilişkili olduğu tek bir durakta başlayıp hedef Trafik analiz bölgesi ile ilişkili durakta son bulduğu ve dolayısıyla kullanıcıların durak seçimi yapmadığı kabulünü beraberinde getirmektedir. Oysa günlük hayatta yolcular; aktarma sayılarını azaltmak, seyahat sürelerini kısaltmak ya da boş koltuk bulabilmek gibi kendileri için önem arz eden pek çok kriterde avantaj sağlamak adına farklı başlangıç, aktarma ve varış durağı tercihleri yapmakta; böylece birçok dinamik seyahat alternatifi üretebilmektedirler. Bu nedenle; kullanıcıların alternatif arama davranışlarının tasarım süreçlerinde dikkate alınabilmesi ve bu durumun sistem çıktıları üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için klasik yaklaşımlardan farklı olarak fiili saha koşullarını yansıtan, trafik analiz bölgelerinin aynı anda birden fazla durakla ilişkilendirilebildiği bağlayıcı tabanlı ağ yapılarının kullanılması gerektiğini söylemek mümkündür.

Temel olarak toplu taşıma araçlarının belirlenmiş zaman çizelgelerine uygun şekilde çalışma kabiliyeti olarak ifade edilebilecek olan güvenilirlik kavramı, toplu taşıma sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde kullanılan birçok parametre ile doğrudan ilişkilendirilebilmesi nedeniyle bu sistemler için önemli bir etki ölçütü durumundadır. Literatür; toplu taşıma sistemlerinin kent içi ulaşımındaki payının artırılabilmesi için bu sistemlerin güvenilirliğinin yükseltilmesi ve her bir hatta minimum seyahat süresi dalgalanmasının hedeflenmesi gerektiğini göstermektedir [25]. Bu nedenle güvenilirliğin, toplu taşıma sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde kilit bir rol oynadığını değerlendirmek mümkündür [26].

Kent içi otobüs sistemlerinde güvenilirlik; karayolu trafiği, işletmecisi, hat ve yolcu karakteristikleri olmak üzere dört ana faktöre bağlıdır [27]. Yoğun kentsel alanlarda seyahat süreleri değişkendir ve stokastik bir özellik gösterir [28]. Karma trafikte çalışan otobüs sistemlerinin bu koşullardan doğrudan etkilenmesi, ağ tasarımında güvenilirliğin dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle orta ve büyük ölçekli ağlarda, ara duraklardaki yolcu bekleme sürelerinin sefer aralıklarından ziyade güvenilirliğe bağlı olması; güvenilirliği, seyahatlerini aktarmalı olarak gerçekleştirecek yolcuların öncelikli seçim parametrelerinden biri haline getirmektedir [29]. Aynı zamanda sürdürülebilir bir kent hayatı için vazgeçilmez bir unsur olan toplumsal adaletin tesis edilebilmesi için temel şartlardan birinin, güvenilirliği yüksek bir toplu taşıma sistemi olduğu değerlendirilmektedir [30]. Bu bağlamda, toplu taşıma sistemlerinin tasarımında trafik etkisinin ve kullanıcıların riskten kaçınma eğilimlerinin göz ardı edilmesinin, elde edilen çıktılarda kayda değer etkilerinin olacağı ortaya konmuştur [31].

Bu çalışma kapsamında kent içi otobüs ağlarında toplu taşıma ataması probleminin çözümünü seyahat süresi güvenilirliğine bağlı olarak gerçekleştiren bir model geliştirilmiş; söz konusu model yardımıyla kullanıcıların farklı güvenilirlik algılama oranları altındaki bağlantı seçim davranışlarındaki değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen ve bağlayıcı tabanlı toplu taşıma ağlarında çalışabilecek şekilde kurgulanan model dahilinde; kullanıcıların duraklara erişim süreleri, ilk ve varsa aktarma bekleme süreleri ile araç içi süreleri net olarak hesaplanırken, araçların ara duraklarda yolcu iniş-binişleri nedeniyle kaybettikleri zamanın da dikkate alınmasıyla güvenilirlik hesaplarında yüksek doğruluk sağlanmaktadır. Atama sürecinde hatlarda uygulanacak sefer aralıkları, araç içi doluluklara bağlı olarak iteratif bir biçimde belirlenmekte ve sürecin bütünüyle kullanıcı davranışlarıyla şekillenmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen modelin farklı güvenilirlik algılama oranlarını dikkate alacak şekilde kalibre edilebilmesi; değişen güvenilirlik seviyeleri altındaki bağlantı seçimi davranışlarına ilişkin sonuçların, işletmeci ve kullanıcı perspektifinden ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Çalışma kapsamında önerilen model, problemin yapısına uygun bir test ağında sınanmış; elde edilen sonuçlar, kullanıcıların farklı güvenilirlik algılama seviyeleri altında farklı hat seçimi davranışları sergilediğini ve bu durumun işletme maliyetlerinde önemli değişimlere sebep olabileceğini ortaya koymuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ele alınan probleme ilişkin formülasyonlar sunulmuştur. Üçüncü bölümde modelin yapısına, dördüncü bölümde sayısal çıktıları, beşinci ve son bölümde ise elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

II. PROBLEM FORMÜLASYONU (PROBLEM FORMULATION)

Toplu taşıma kullanıcıları, günlük yolculuklarını tamamlamak için genellikle birden fazla seçeneğe sahiptir. Farklı hat kullanımları, farklı başlangıç, bitiş ve aktarma durağı tercihleri ile aktarmalı veya aktarmasız seyahat alternatifleri sayesinde

yolculuklarını birçok farklı şekilde tamamlayabilirler. Kullanıcıların alternatif bağlantılar arasındaki seçimlerinde öncelikli belirleyicilerden biri toplam seyahat süresidir. Bir toplu taşıma kullanıcısının yolculuğuna ilişkin ilk zaman bileşeni, başlangıç durağına yürüme süresidir. Kullanıcının ilk durakta ve varsa aktarma duraklarında geçireceği bekleme süreleri ile araç içinde geçen süre, toplam seyahat süresini oluşturan diğer bileşenlerdir. Araç içi süre; aracın duraklar arasındaki bağlantıları kat etmek için harcadığı zaman ile ara duraklarda iniş-binişler nedeniyle kaybedilen sürenin toplamından oluşmaktadır. Seyahat süresinin son bileşeni ise varış durağı ile nihai varış noktası arasındaki yürüme süresidir.

Çalışma kapsamında yürütülen güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması yaklaşımında herhangi bir $o-d$, B-V çifti arasında ulaşımı mümkün kulan c bağlantısında gerçekleşen v seferinde bir toplu taşıma kullanıcısının zaman bazlı seyahat maliyeti T_{cv}^{od} , (1) ile hesaplanmaktadır:

$$T_{cv}^{od} = \lambda_i I_{cv}^{od} + \lambda_j J_{cv}^{od} + \lambda_n N_{cv}^{od} + \lambda_g G_{cv}^{od}, \quad (1)$$

burada λ_i , λ_j , λ_n ve λ_g parametreleri sırası ile duraklara yürüme, ilk durak bekleme, araç içi seyahat ve aktarma bekleme sürelerine ilişkin katsayı değerlerini ifade etmektedir. Eşitlik (1)'deki $\lambda_i I_{cv}^{od}$ bileşeni, toplu taşıma kullanıcılarının başlangıç ve bitiş noktaları ile toplu taşıma durakları arasındaki mesafeyi kat etmek için harcadıkları süreyi temsil etmekte ve (2) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$I_{cv}^{od} = (\vartheta_c^o + \vartheta_c^d) / ws, \quad (2)$$

burada ϑ_c^o , başlangıç noktası ile ilk durak arasındaki bağlayıcı uzunluğunu ifade ederken; ϑ_c^d , son durak ile varış noktası arasındaki bağlayıcı uzunluğunu; ws ise toplu taşıma kullanıcıları için belirlenen ortalama yürüme hızını temsil etmektedir.

Toplu taşıma kullanıcılarının araç içi seyahat süreleri, otobüslerin bağları kat etmek için harcadıkları sürelerin ve duraklarda yolcu iniş-binişleri nedeniyle kaybedilen zamanın toplamıdır. Kullanıcıların herhangi bir toplu taşıma bağlantısında geçirecekleri araç içi süre (3) ile hesaplanmaktadır:

$$N_{cv}^{od} = Y_{cv}^{od} + \Lambda_{cv}^{od}. \quad (3)$$

Herhangi bir $o-d$ çifti arasındaki c bağlantısına ait v seferini gerçekleştiren bir otobüsün hareket halinde harcadığı zaman Y_{cv}^{od} (4) ile hesaplanmaktadır:

$$Y_{cv}^{od} = \sum_{l=1}^L e_l \delta_{cl}, \quad (4)$$

burada e_l , l bağı üzerindeki seyahat süresini ifade ederken; δ_{cl} ise c bağlantısının l bağını kullanıp kullanmadığını gösteren bağlantı matrisinin ilgili elemanını temsil etmekte ve bağ ilgili bağlantı tarafından kullanılıyorsa 1, aksi takdirde 0 değerini almaktadır.

$o-d$ çifti arasında ulaşımı mümkün kılan c bağlantısına ait v seferinin iniş ve binişler nedeniyle duraklarda kaybettiği zamanı temsil eden Λ_{cv}^{od} değeri, iniş ve biniş için durulan her durakta inen ve binen yolcu sayısı için ayrı şekilde hesaplanmakta olup; daha büyük olan değerin dikkate alınmasıyla elde edilmektedir. Elde edilen durak bazlı gecikme verileri hat boyunca toplanarak otobüsün her bir durağa varış zamanları net olarak hesaplanmaktadır. Otobüs içindeki kullanıcıların herhangi bir s durağındaki iniş-binişler nedeniyle kaybettikleri zaman $\Lambda_{cv}^{od,s}$, inen ve binen yolcuların sebep oldukları zaman kayıplarını karşılaştıran (5) ile hesaplanırken; toplu taşıma aracının söz konusu s durağında binişler nedeniyle kaybettiği zaman $\Phi_{cv}^{od,s+}$ ile inişler nedeniyle kaybettiği süre $\Phi_{cv}^{od,s-}$, sırasıyla (6) ve (7) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bağlantı boyunca iniş ve binişler nedeniyle kaybedilen toplam zaman Λ_{cv}^{od} ise (8) yardımı ile elde edilmektedir.

$$\Lambda_{cv}^{od,s} = \max(\Phi_{cv}^{od,s+}, \Phi_{cv}^{od,s-}), \quad (5)$$

$$\Phi_{cv}^{od,s+} = \varphi_{cv}^{od,s+} \Delta^+, \quad (6)$$

$$\Phi_{cv}^{od,s-} = \varphi_{cv}^{od,s-} \Delta^-, \quad (7)$$

$$\Lambda_{cv}^{od} = \sum_{s=1}^S \Lambda_{cv}^{od,s} \delta_{cs}, \quad (8)$$

Eşitlik (5)-(7)'deki Δ^+ , binen yolcu başına kaybedilen zamanı; Δ^- , inen yolcu başına kaybedilen zamanı; $\varphi_{cv}^{od,s+}$, s durağında otobüse binen yolcu sayısını; $\varphi_{cv}^{od,s-}$, s durağında otobüsten inen yolcu sayısını; S ise toplu taşıma ağındaki durak kümesini temsil etmektedir. Eşitlik (8)'de yer alan δ_{cs} , c bağlantısının s durağını kullanıp kullanmadığını gösteren durak-bağlantı matrisinin ilgili elemanını temsil etmekte olup; durak, bağlantı tarafından kullanılıyorsa 1 aksi takdirde 0 değerini almaktadır.

$o-d$ çifti arasındaki c bağlantısına ait v seferinden yararlanan bir toplu taşıma kullanıcısının ilk durakta yaşayacağı bekleme süresini ifade eden J_{cv}^{od} değeri (9) kullanılarak belirlenmektedir:

$$J_{cv}^{od} = \rho_{cv,1}^{od,o} - t_0^{od,o}, \quad (9)$$

burada $t_0^{od,o}$, kullanıcının başlangıç durağına erişim zamanını temsil ederken; $\rho_{cv,1}^{od,o}$, c bağlantısına hizmet veren ilk kullanılabilir otobüsün kullanıcının araca biniş gerçekleştirdiği başlangıç durağından ayrılış zamanını ifade etmektedir. Kullanıcının toplu taşıma aracına binmek için kullandığı toplu taşıma durağı otobüs hattının başlangıç durağı ise zaman çizelgesindeki hareket saati bekleme hesabında kullanılmakta, söz konusu durak hattın ara bir durağı ise iniş-binişler nedeniyle kaybedilen zamanın da dikkate alınmasıyla otobüsün durağa varış zamanı net olarak belirlenmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; kullanıcıların toplu taşıma duraklarına düzenli olarak geldiği kabulü ile ilk durağa erişim zamanlamasının her yolcu için ayrı ayrı belirlendiği ve her yolcu için ayrı toplam seyahat süresi hesaplaması yapıldığıdır.

Bir toplu taşıma kullanıcısı için c bağlantısına hizmet veren ilk kullanılabilir toplu taşıma aracının duraktan ayrılış zamanını ifade eden $\rho_{cv,1}^{od,o}$ değerinin hesaplanmasında (10)'dan yararlanılmaktadır:

$$\rho_{cv,1}^{od,o} = \eta_{cv,1}^{od} + Y_{cv,1}^{bo} + \Lambda_{cv,1}^{bo}, \quad (10)$$

burada $\eta_{cv,1}^{od}$, c bağlantısını oluşturan hat ya da hatların ilkinin kullanılabilir olarak belirlenen otobüsünün hattın başlangıç durağından hareket saatini; $Y_{cv,1}^{bo}$ toplu taşıma aracının hattın başlangıç durağı ile kullanıcının araca bindiği durak arasında hareket halinde harcadığı süreyi; $\Lambda_{cv,1}^{bo}$ ise toplu taşıma aracının hattın başlangıç durağı ile bağlantının başlangıç durağı dahil olmak üzere iniş-binişler nedeniyle kaybettiği zamanı ifade etmektedir. Geliştirilen model dahilinde duraklarda iniş-binişler nedeniyle kaybedilen sürenin belirlenmesi ile analiz periyodu içinde her toplu taşıma aracının uğradığı tüm duraklara varış zamanları net olarak belirlenmekte ve dolayısıyla kullanıcıların yaşayacağı ilk durak ve varsa aktarma bekleme süreleri kesin olarak hesaplanmaktadır.

Kullanıcıların herhangi bir s aktarma durağında yaşadıkları ilk aktarma bekleme süresini ifade eden G_{cv}^{od} değeri, (11) ile hesaplanmaktadır. Söz konusu zaman kaybı, s aktarma durağına erişim için kullanılan otobüsün (12) ile hesaplanan aktarma durağına varış zamanı $\rho_{cv,1}^{od,s}$ ile aktarma yapılan otobüsün (13) ile hesaplanan aktarma durağından ayrılış zamanı $\rho_{cv,2}^{od,s}$ arasındaki farkın hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Her iki otobüsün de s aktarma durağına erişim zamanlamalarının belirlenmesi sırasında (10) ile verilen yaklaşımdan yararlanılmaktadır.

$$G_{c_v}^{od} = \rho_{c_v,2}^{od,s} - \rho_{c_v,1}^{od,s} \quad (11)$$

$$\rho_{c_v,1}^{od,s} = \eta_{c_v,1}^{od} + Y_{c_v,1}^{bs} + \Lambda_{c_v,1}^{bs} \quad (12)$$

$$\rho_{c_v,2}^{od,s} = \eta_{c_v,2}^{od} + Y_{c_v,2}^{bs} + \Lambda_{c_v,2}^{bs} \quad (13)$$

Kullanıcıların zaman bazlı seyahat maliyetlerinin ilk bileşeni olan toplu taşıma duraklarına yürüme sürelerinin sabit ve zaman çizelgelerinden bağımsız olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle çalışmada gerçekleştirilen güvenilirlik hesaplarında kullanıcıların duraklar ile başlangıç ve varış noktaları arasındaki yürüme süreleri dikkate alınmamaktadır. Bu bağlamda; herhangi bir $o-d$ çifti arasındaki c bağlantısının, analiz periyodu içerisinde gerçekleşecek seferlerinde kullanıcıların yaşayacağı ilk durak beklemesi, araç içi seyahat süresi ve varsa aktarma beklemesi bileşenlerinin toplamının zaman çizelgelerine bağlı ortalaması μT_c^{od} , (14) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\mu T_c^{od} = (1/V_c) \sum_{v=1}^{V_c} (J_{c_v}^{od} + N_{c_v}^{od} + G_{c_v}^{od}). \quad (14)$$

c bağlantısına ait güvenilirlik değeri $Var(T_c^{od})$, ilgili zaman bileşenlerinin varyansı olarak değerlendirilmekte ve söz konusu değer (15) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$Var(T_c^{od}) = (1/V_c) \sum_{v=1}^{V_c} (\mu T_c^{od} - (J_{c_v}^{od} + N_{c_v}^{od} + G_{c_v}^{od}))^2. \quad (15)$$

Bir $o-d$ çifti arasında seyahati mümkün kılan c bağlantısına ait v seferinin algılanan seyahat maliyetini temsil eden $pT_{c_v}^{od}$ değeri, (16)'da verildiği gibi sefere ait toplam seyahat süresi ile bağlantıya ait güvenilirlik değerini toplayarak elde edilmektedir:

$$pT_{c_v}^{od} = T_{c_v}^{od} + \alpha Var(T_c^{od}), \quad (16)$$

burada α değeri, toplu taşıma kullanıcılarının seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin algılama hatalarını temsil etmekte olup, 0 ile 1 arasında değişen değerler almaktadır.

Çalışma kapsamında önerilen güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması sürecinde seyahatini tamamlamak için herhangi bir toplu taşıma durağına erişen her kullanıcı için kullanılabilir olarak işaretlenen tüm bağlantıların algılanan seyahat maliyetleri belirlenmektedir. Hangi bağlantıların "Potansiyel Bağlantılar Kümesine"ne dahil edileceği hususunda temel kıstas kullanıcının başlangıç durağına varış saatidir. Gerekli kontrol (17) ile gerçekleştirilmekte olup, kullanıcının durağa varışından önce duraktan ayrılan otobüslere ait olduğu seferler kümeye dahil edilmemektedir.

$$E^{od}(t_0^{od,o}) = \{(c, v) \mid c \in C^{od}, v \in V^c, \rho_{c_v,1}^{od,o} \geq t_0^{od,o}\} \quad (17)$$

Güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması sürecinde yolcuların seyahat sürelerini kısaltma eğilimleri dikkate alınarak "Potansiyel Bağlantılar Kümesi" içinde bir eleme süreci gerçekleştirilmektedir. Eleme süreci sonunda "Kullanılabilir Bağlantılar Kümesi" $M_a^{od}(t_0^{od,o})$ elde edilmekte olup; hangi bağlantının yeni kümeye dahil edileceği hususundaki temel kıstas ilgili bağlantıya ait algılanan seyahat maliyetinin, "Potansiyel Bağlantılar Kümesi" içinde yer alan en düşük seyahat maliyeti ile kıyaslanmasıdır. "Potansiyel Bağlantılar Kümesi" içinde yer alan en düşük algılanan seyahat maliyetine sahip bağlantı (18) ile tespit edilmektedir. "Kullanılabilir Bağlantılar Kümesini" belirlemek için kullanılan (19)'daki θ_{min} toplu taşıma atamasında kullanılacak maliyet üst sınırını belirlemeye yarayan katsayıdır.

$$pT_{min}^{od}(t_0^{od,o}) = \min_{(c \in C^{ij}) \in E^{od}(t_0^{od,o})} \{pT_c^{od}\} \quad (18)$$

$$M_a^{od}(t_0^{od,o}) = \{(c, v) \in E^{od}(t_0^{od,o}) \mid pT_{c_v}^{od} \leq \theta_{min} pT_{min}^{od}(t_0^{od,o})\}. \quad (19)$$

Elde edilen "Kullanılabilir Bağlantılar Kümesi" içinde yer alan her bir bağlantının toplu taşıma atamasına esas teşkil edecek fayda değerleri (20) ile hesaplanmakta olup; her bir bağlantının fayda değerine bağlı olarak elde edilen seçilme olasılığı (21) ile belirlenmektedir. Fayda değerini belirleme sürecinin duyarlılığı β katsayısı ile kontrol edilmektedir.

$$U_m^{od} = e^{-\beta \cdot pT_m^{od}}, \quad (20)$$

$$P_m^{od} = U_m^{od} / \sum_{m=1}^{M^{od}} U_m^{od}. \quad (21)$$

O adet başlangıç ve D adet varış bölgesi arasındaki toplam seyahat talebinin, toplu taşıma hatları arasındaki dağılımını temsil eden güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması sonucunda herhangi bir r hattını kullanan yolcu sayısı (22) ile elde edilmektedir:

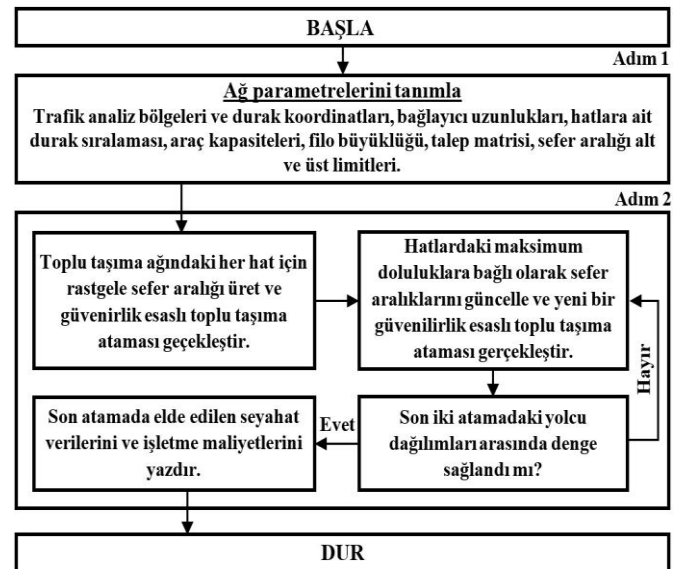
$$q_r = \sum_{o=1}^O \sum_{d=1}^D \sum_{m=1}^{M^{ij}} Dmd^{od} P_m^{od} \delta_{rm}, \quad (22)$$

burada q_r , r hattına atanan yolcu sayısını; Dmd^{od} , $o-d$ çifti arasındaki seyahat talebini; δ_{rm} ise r hattının m bağlantısının bir parçası olup olmadığını gösteren hat-bağlantı matrisinin ilgili elemanını temsil etmektedir. Bu eleman; hat bağlantının parçası ise 1, aksi takdirde 0 değerini almaktadır.

III. MODEL YAPISI (MODEL STRUCTURE)

Bu çalışmada toplu taşıma kullanıcılarının, seyahat süresi güvenilirliğine dair farklı algılama oranları altında bağlantı seçimi davranışlarındaki değişimlerin kullanıcı ve işletmeci perspektifinden doğurduğu etkilerin incelenmesi için Şekil-1'de sunulan çözüm modeli geliştirilmiştir.

Önerilen modelin ilk adımında toplu taşıma ağını tanımlayan değişkenler, işletmecinin operasyonel kabiliyetine ilişkin veriler ve talep matrisi ile birlikte toplu taşıma hatlarında uygulanabilecek sefer aralığının alt ve üst limitleri tanımlanmaktadır. Modelin ikinci adımında, ilk adımda verilen alt ve üst limitler dikkate alınarak rastgele sefer aralığı değerleri üretilmekte ve hatlara ait zaman çizelgeleri elde edilmektedir. Elde edilen zaman çizelgeleri yardımıyla toplu taşıma duraklarında yaşanacak beklemler, toplu taşıma araçlarının duraklara varış zamanları ve araç içi seyahat süreleri belirlenmektedir. Üretilen zaman çizelgelerine bağlı olarak gerçekleştirilen güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması sonucunda ağdaki seyahat talebinin yönü ve yoğunluğu ile ilgili değerler elde edilmekte ve otobüslerin iniş-binişler nedeniyle



Şekil 1. Çözüm yaklaşımı.

Figure 1. Solution approach.

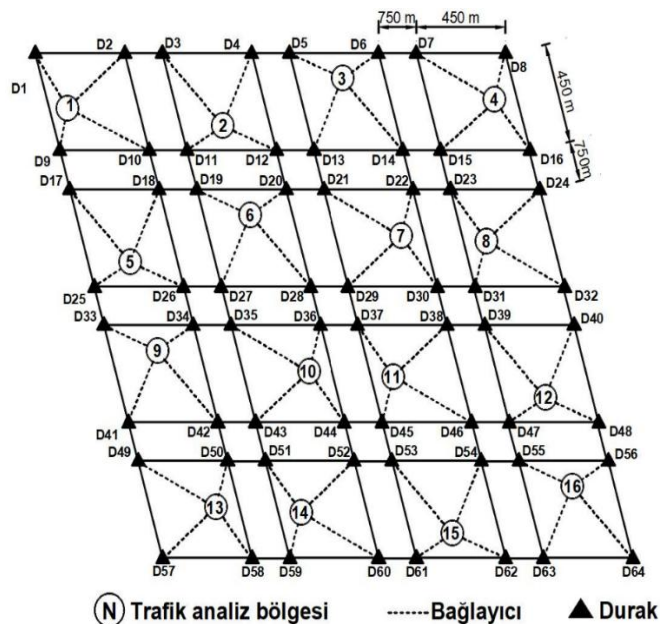
duraklarda yaşadığı gecikmeler hesaplanmaktadır. Çözüm vektörü için gerçekleştirilen ilk atamada, ağdaki seyahat talebinin söz konusu çözüm vektörüne bağlı yönü ve yoğunluğu hakkında herhangi bir veri olmadığı için iniş-biniş kaynaklı zaman kayıpları bu atamada göz önünde bulundurulmamaktadır.

İlk atama neticesinde iniş-binişlerden kaynaklı zaman kayıpları, duraklarda yaşanan bekleme süreleri ve toplu taşıma araçları içerisindeki yoğunluk değerleri kesin olarak hesaplanmakta ve yeni bir toplu taşıma atamasına esas alınmaktadır. Araç içi doluluklara bağlı olarak güncellenen zaman çizelgeleri kullanılarak birbirini takip eden iki toplu taşıma ataması arasında yeterli benzerlik yakalanıncaya kadar bir önceki atamada elde edilen gecikme verilerinin kullanıldığı yeni toplu taşıma atamalarının gerçekleştirilmesine devam edilmekte ve ağda denge durumu yakalanmaya çalışılmaktadır. Denge koşulunun sağlanmasının ardından son atamada elde edilen seyahat verileri ve işletme maliyetini oluşturan bileşenler çıktı olarak üretilmekte ve modelin çalışması sonlandırılmaktadır.

IV. SAYISAL UYGULAMA (NUMERICAL APPLICATION)

Çalışma kapsamında önerilen modelin sayısal uygulaması; problemin yapısına uygun olarak geliştirilen ve Şekil 2'de sunulan test ağında gerçekleştirilmiştir. Toplu taşıma ağına 2 saatlik analiz periyodu için 2680 yolculuk talebi tanımlanmıştır. Talebin trafik analiz bölgeleri arasındaki dağılımı Tablo 1'de gösterilmiştir. 64 durak, 224 bağ ve 16 trafik analiz bölgesinden oluşan toplu taşıma ağına hizmet verecek 20'si 50, 20'si ise 100 yolcu kapasiteli toplam 40 otobüslük bir filo büyüklüğü tanımlanmıştır. Araçlar için ortalama işletme hızı 25 km/saat olarak belirlenmiştir. Toplu taşıma ağına aynı durakları takip ederek karşılıklı gidiş ve dönüş seferlerine sahip 5 otobüs hattı tanımlanmıştır [32]. İlgili otobüs hatları Tablo 2'de sunulmuştur. Toplu taşıma hatlarında uygulanabilecek en kısa sefer aralığı 5 dakika, en uzun sefer aralığı ise 30 dakika olarak sınırlandırılmıştır.

Analiz sürecinde toplu taşıma araçlarının duraklarda kaybettiği zaman inişler için 1 sn/yolcu, binişler için ise 4.23 sn/yolcu olarak kabul edilmiştir [33]. Toplu taşıma kullanıcılarının trafik analiz bölgeleri ve duraklar arasındaki yürüme hızı 75 m/dk olarak dikkate alınmıştır [34]. Çalışma kapsamında Eşitlik (16)'da yer alan ve toplu taşıma kullanıcılarının seyahat süresi güvenilirliğinin farklı algılanma oranlarını temsil eden α



Şekil 2. Test ağı.

Figure 2. Test network.

Tablo 1. Talep matrisi.

Table 1. Demand matrix.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	50	20	0	0	90	20	30	50	10	0	30	20	50	20
2	0	0	0	50	0	0	0	20	30	50	10	10	10	0	0	30
3	30	0	0	0	20	0	0	0	20	10	0	20	0	0	0	20
4	10	50	0	0	0	30	0	0	10	0	20	0	20	10	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	30	0	0	10	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	30	20	50	10
7	10	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	20	20	0	10
8	0	10	0	0	20	0	0	0	0	70	0	0	20	10	30	0
9	10	20	20	10	0	0	30	20	0	0	0	20	0	0	0	0
10	60	30	0	30	0	0	0	150	0	0	0	10	0	0	0	10
11	10	30	20	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	20	10	30	0	0	50	0	0	20	50	0	0	30	10	0	0
13	30	50	20	10	0	20	0	20	0	0	0	10	0	0	0	0
14	30	10	10	30	0	20	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
15	50	10	30	20	10	0	20	20	10	0	0	0	0	0	0	0
16	20	50	10	10	0	10	20	20	10	10	0	0	10	0	0	0

Tablo 2. Otobüs hatlarına ait durak sıralaması.

Table 2. Sequence of stops for bus routes.

Hat Numarası	Durak sıralaması
1	16-24-32-31-30-29-37-45-44-43-42-50-51
2	9-17-18-19-27-35-43-51-52-53-54-55-47
3	10-11-12-13-21-22-23-31-39-47-48-56
4	10-11-19-20-28-36-37-38-46-54-55
5	15-14-13-12-11-10-18-26-34-35-36-28
6	51-50-42-43-44-45-37-29-30-31-32-24-16
7	47-55-54-53-52-51-43-35-27-19-18-17-9
8	56-48-47-39-31-23-22-21-13-12-11-10
9	55-54-46-38-37-36-28-20-19-11-10
10	28-36-35-34-26-18-10-11-12-13-14-15

parametresinin 0 ile 1 arasındaki 11 farklı değeri için iteratif olarak belirlenen sefer aralıklarına bağlı olarak toplu taşıma ataması gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar işletmeciler ve kullanıcı perspektiflerinden değerlendirilmiştir. Atama süreçleri sonucunda elde edilen sefer aralıkları ve öngörülen işletme koşulları için ihtiyaç duyulan filo büyüklükleri Tablo 3'te sunulmaktadır. Tablo 3'e göre, araç içi doluluklara bağlı olarak belirlenen sefer aralıkları, güvenilirlik algılama hatalarından doğrudan etkilenmektedir. Modelin, güvenilirliğini farklı algılanma seviyelerine bağlı olarak güzergâhlarda uygulanan sefer aralıklarında ve filo kullanımında belirgin ayarlamalar yapıldığı görülmektedir. Buradaki en önemli bulgu; kullanıcıların risk algısını temsil eden α değeri arttıkça, gerekli filo büyüklüğünün azalma eğilimi göstermesidir. Bu durum; kullanıcıların güvenilirliği düşük bağlantılardan uzak durduklarının ve bazı otobüs güzergâhlarının daha yüksek doluluk oranları ile çalışmak zorunda kaldığının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ancak güvenilirliği yüksek bağlantıların yoğun şekilde tercih edilmesinin, araç içi doluluklardaki artışla birlikte konfor algısında düşüşe sebep olabileceği, işletmeciler ve planlamacılar tarafından göz ardı edilmemesi gereken bir husustur. Gerçekleştirilen atama süreçlerinde, α değerinin tüm aralığı boyunca ihtiyaç duyulan

Tablo 3. Sefer aralıkları ve filo gereksinimi.

Table 3. Headways and fleet requirements.

α	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	Filo (yolcu)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0	10	20	30	14	30	10	20	30	14	30	14	30	14	30	14	30	8
0.1	9	30	30	10	30	9	30	30	10	30	15	30	15	30	15	30	11
0.2	9	30	30	10	30	9	30	30	10	30	15	30	15	30	15	30	10
0.3	10	30	30	11	30	10	30	30	11	30	15	30	15	30	15	30	12
0.4	10	30	30	11	30	10	30	30	11	30	15	30	15	30	15	30	11
0.5	10	30	30	11	30	10	30	30	11	30	15	30	15	30	15	30	11
0.6	10	20	30	17	30	10	20	30	17	30	14	30	14	30	14	30	8
0.7	10	20	30	17	30	10	20	30	17	30	14	30	14	30	14	30	9
0.8	11	20	30	17	30	11	20	30	17	30	13	30	13	30	13	30	12
0.9	12	24	24	20	30	12	24	24	20	30	12	30	12	30	12	30	3
1.0	12	24	24	20	30	12	24	24	20	30	12	30	12	30	12	30	3

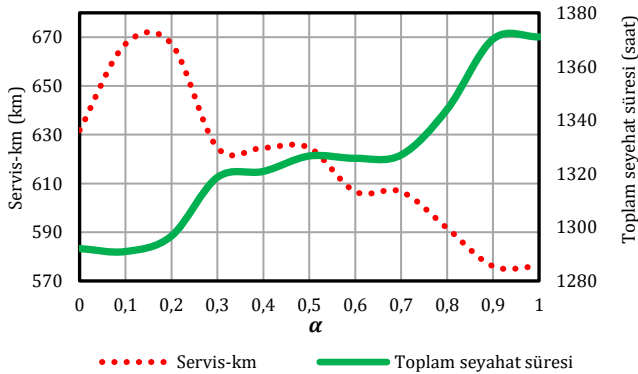
otobüs sayısı hiçbir zaman filo büyüklüğünü aşmamaktadır. Elde edilen tüm çözümlerde sefer aralıkları öngörülen sınırlar içinde kalmakta olup bu durum modelin operasyonel gerçekliği koruma yeteneğini göstermektedir. α değerinin değişimine karşı gösterilen duyarlılık; modelin sefer aralıklarına dinamik olarak müdahale ettiğini, değişen hedefler altında kullanılabilirliğini ispatladığını ve öngörülen politikalara duyarlı çözümler üretme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Tablo 4'te; atama süreçleri sonucunda kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinde yaşanan değişimler özetlenmektedir.

Tablo 4'te sunulan veriler değerlendirildiğinde kullanıcıların seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin risk algılarını temsil eden α değerinin artışına bağlı olarak işletmeci maliyetini temsil eden servis-km değerinin azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. $\alpha = 0$ değeri için 631.83 km olan toplam hizmet-km değerinin $\alpha = 1$ değeri için 576.02 km olarak gerçekleşmiştir. Ancak aynı tabloda kullanıcı perspektifini yansıtan parametrelerden biri olan toplam seyahat süresi değerinin artış eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu durum daha önce belirtildiği gibi kullanıcıların seyahat sürelerini uzatmayı göze alarak güvenilirliği düşük bağlantılardan uzak durduklarına işaret etmektedir. α değerinin 0 ile 1 arasındaki değişimine bağlı olarak işletme maliyetlerinde %8.83 oranında bir iyileşme sağlanırken, kullanıcıların deneyimlediği toplam seyahat süresi %5.76 oranında artmaktadır. Bu eğilim, Tablo 3'te sunulan filo kullanım oranlarında da açıkça görülmektedir. Elde edilen bulgular, kullanıcıların yolculuklarını en kısa sürede tamamlama isteklerine dayalı operasyonel verimlilik değerlendirmelerinin, yeterli güvenilirliğe sahip olmayan sistemlerde güvenilirlikten bağımsız olarak ele alındığında tek başına yanıtı olabileceğini göstermektedir. Şekil 3'te; değişen α değerlerine bağlı olarak toplam seyahat süresi ve servis-km arasındaki denge gösterilmektedir. Tablo 5'te atama süreçleri sonucunda her bir α değeri için ağdaki seyahat talebinin aktarmalı ve aktarmasız seyahatler arasındaki dağılımı ile karşılanamayan ve kapasiteyi aşan talep değerleri birlikte sunulmaktadır.

Tablo 4. Toplam seyahat süresi ve servis-km değerleri.

Table 4. Total travel time and service-kilometers.

α	Toplam seyahat süresi (saat)	Toplam seyahat süresi değişimi (%)	Servis-km (km)	Servis-km değişimi (%)
0	1292.09	-	631.83	-
0.1	1290.97	-0.1	667.23	5.6%
0.2	1296.76	0.4	667.23	0.0%
0.3	1318.66	1.7	624.63	-6.4%
0.4	1320.85	0.2	624.63	0.0%
0.5	1326.61	0.4	624.63	0.0%
0.6	1325.74	-0.1	606.63	-2.9%
0.7	1326.98	0.1	606.63	0.0%
0.8	1343.98	1.3	591.63	-2.5%
0.9	1370.20	2.0	576.02	-2.6%
1.0	1371.05	0.1	576.02	0.0%



Şekil 3. Kullanıcı ve işletmeci perspektifinden değişimler.

Figure 3. Changes from user and operator perspectives.

Tablo 5. Yolculuk verileri.

Table 5. Travel data.

α	D_0	D_1	D_2	D_u	D_c
0	1441	1012	227	0	0
0.1	1542	977	161	0	0
0.2	1597	932	151	0	0
0.3	1697	869	114	0	0
0.4	1741	824	115	0	0
0.5	1760	804	116	0	0
0.6	1935	691	54	0	0
0.7	1955	671	54	0	0
0.8	2010	593	77	0	0
0.9	2084	544	52	0	0
1.0	2091	537	52	0	0

D_0 : Aktarmasız seyahat sayısı, D_1 : Bir aktarmalı seyahat sayısı, D_2 : İki aktarmalı seyahat sayısı, D_u : Karşılanamayan talep, D_c : Kapasiteyi aşan talep.

Tablo 5'te sunulan seyahat dağılım verileri incelendiğinde, atama süreçleri ile üretilen tüm çözümlerin ağdaki seyahat talebine cevap verdiği ve karşılanamayan talebin bulunmadığı görülmektedir. Kullanıcıların değişen risk algılarına bağlı olarak farklılık gösteren bağlantı tercihleri sonucunda herhangi bir hatta kapasite aşımı yaşanmamıştır. $\alpha=0$ değeri için 1.441 adet olarak gerçekleşen aktarmasız seyahat adedi, $\alpha=1$ değeri için 2.091 adede yükselmiştir. Bir aktarmalı seyahatlerin sayısı 1.012'den 537'ye gerilerken, iki aktarmalı seyahatlerde sayı 227'den 52'ye düşmüştür. Doğrudan seyahat sayısındaki bu artış, kullanıcıların güvenilirliği düşük aktarmalı bağlantılardan kaçındığını göstermektedir. Aynı zamanda toplu taşıma kullanıcılarının α katsayısının artışına bağlı olarak göstermiş olduğu bağlantı tercihi değişiklikleri, kullanıcıların güvenilirlik algılarının ağdaki seyahat eğilimine ve operasyonel koşullara doğrudan etki ettiğinin önemli bir göstergesidir. Atama süreçleri sonunda kullanıcıların seyahat maliyetlerini oluşturan bileşenler Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6'da sunulan toplam seyahat süresi bileşenleri incelendiğinde atama süreçleri sonunda elde edilen zaman verilerin, α değerlerinin artışına paralel olarak artan doğrudan sefer sayısı ile tutarlı bir eğilim sergilediği görülmektedir. Toplu taşıma kullanıcılarının, α değerinin artışına bağlı olarak seyahatlerini aktarmasız şekilde gerçekleştirme eğilimlerinin ilk araç içinde geçirilen sürenin artışına sebep olduğu görülmekte; aktarmalı seyahatlerin toplam seyahat süresi içindeki ağırlığının ise azaldığı dikkat çekmektedir. Aktarma sayısındaki düşüşe bağlı olarak; birinci ve ikinci aktarma durağında yaşanan beklemler ve aktarma araçları içinde geçirilen süre azalmıştır. İlk durak beklemesinin %30'un üzerinde artmış olması, kullanıcıların daha uzun bir ilk durak beklemesini göze alarak güvenilirliği düşük aktarmalı bağlantılardan uzak durduklarına işaret etmektedir. Nitekim bu eğilim, kullanıcıların belirsizliği azaltmak adına seyahat sürelerinden ödün vermeye hazır olduklarını göstermektedir. Söz konusu değişimin; güvenilirliğin, kullanıcıların başlangıç ve bitiş durağı tercihlerini, dolayısıyla güzergâh seçimlerini doğrudan etkilediği şeklinde değerlendirilmesi mümkündür.

V. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Literatürdeki çalışmalar toplu taşıma sistemlerinde güvenilirliğin kullanıcıların bağlantı ve ulaşım türü seçimlerinde öncelikli parametrelerden biri olduğunu göstermektedir. Toplu taşıma sistemlerinin performansına odaklanan birçok çalışma kent içi toplu taşıma sistemlerinin sürdürülebilirliğini sağlamak için güvenilirliği yüksek sistemlerin kurgulanmasının zorunlu olduğuna işaret etmektedir. Bu çalışma; toplu taşıma kullanıcılarının seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin farklı algılama oranlarının hat seçimi üzerindeki etkileri ve bu tercihlerin kullanıcı maliyetlerine ve operasyonel verimliliğe yansımaları incelenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen model; trafik analiz bölgeleri ile duraklar arasındaki yürüme süreleri, dinamik ilk durak ve aktarma bekleme, yolcu iniş-binişleri

Tablo 6. Toplam seyahat süresi bileşenleri (saat).

Table 6. Total travel time components (hours).

α	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
0	201.82	332.11	323.04	111.66	18.63	97.17	11.31	193.58	2.77
0.1	207.11	315.86	343.40	100.53	18.52	91.95	8.72	200.69	4.18
0.2	206.35	326.37	347.65	95.78	18.85	87.99	8.17	201.50	4.11
0.3	205.67	363.45	352.42	88.56	14.93	81.59	6.54	201.59	3.91
0.4	206.07	367.13	356.10	83.94	15.36	79.76	6.68	201.94	3.87
0.5	205.69	371.98	356.97	82.16	16.06	80.86	6.86	202.19	3.84
0.6	201.09	408.15	369.22	69.38	5.41	67.98	3.44	197.52	3.56
0.7	200.99	411.34	369.72	68.16	5.29	66.77	3.57	197.61	3.53
0.8	202.34	424.09	369.62	62.32	9.17	66.20	7.47	199.25	3.51
0.9	204.70	453.70	370.07	62.83	4.34	67.40	4.74	200.17	2.25
1.0	204.77	454.41	370.15	62.22	4.41	67.71	4.95	200.18	2.25

T_1 : İlk durağa yürüme süresi, T_2 : İlk durakta bekleme süresi, T_3 : Birinci araç içi süre, T_4 : İkinci araç içi süre, T_5 : Üçüncü araç içi süre, T_6 : Birinci aktarma durağı bekleme süresi, T_7 : İkinci aktarma durağı bekleme süresi, T_8 : Varış durağı sonrası yürüme süresi, T_9 : İniş ve binış kaybı.

nedeniyle oluşan zaman kayıpları gibi gerçekçi operasyonel özellikleri yansıtırken, kullanıcıların stokastik seçim davranışlarını dikkate almasıyla literatüre katkı sağlamaktadır. Sıklık paylaşımı ve sabit aktarma bekleme süreleri gibi geleneksel varsayımların ötesine geçilmesi, modeli gerçek saha senaryolarında gözlemlenen yolcu davranışlarıyla uyumlu hale getirmektedir. Aynı zamanda; çalışma kapsamında geliştirilen ve bağlayıcı tabanlı toplu taşıma ağları üzerinde çalışabilme kabiliyetine sahip olan model, kullanıcıların alternatif bağlantı arama davranışlarının dikkate alınarak, geleneksel ağ yapılarına kıyasla gerçek yolcu davranışlarının modeldeki temsil kabiliyetini ve doğruluk oranını artırmıştır.

Çalışma kapsamında; kullanıcıların sistemin güvenilirlik seviyesini algılama düzeylerini temsil eden α parametresinin 0 ile 1 arasında değişen değerleri için güvenilirlik esaslı toplu taşıma ataması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm çözümlerde toplu taşıma araçları içi kapasite aşımı yaşanmamış, öngörülen işletme koşulları için ihtiyaç duyulan otobüs sayısı filo büyüklüğünü aşmamış ve karşılanamayan talep olmamıştır. Tüm çözümlerde sefer aralıkları belirlenen limitler içerisinde gerçekleşmiş olup; model elde edilen sonuçlar ile operasyonel gerçekliği koruma kapasitesini ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen sayısal analizler; toplu taşıma kullanıcılarının seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin risk algılarının artışına bağlı olarak aktarmasız seyahat sayısının yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, kullanıcıların aktarma koordinasyonu nedeniyle güvenilirliği düşen aktarmalı seyahat alternatiflerinden kaçınarak, güvenilirliği yüksek aktarmasız seyahatleri tercih ettiklerine işaret etmektedir. Bu eğilimin, özellikle orta ve büyük ölçekli ağlarda kullanıcı memnuniyeti üzerinde kritik sonuçlar doğurabileceğini değerlendirmek mümkündür. Analizler sonucunda dikkat çeken bir diğer önemli husus α parametresinin artışına bağlı olarak toplam seyahat süresinin de yükselmesidir. Kullanıcıların seyahat süresi güvenilirliğine ilişkin risk algılarının güzergâh seçim davranışlarını doğrudan etkilemesi, işletmecilerin çizelgeleme problemlerine yaklaşımlarında dikkate alınması gereken önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Analizler sonucunda, kullanıcıların güvenilirlik algısına ilişkin değişimlerin, işletme koşullarında da önemli farklılıklar doğurduğu tespit edilmiştir. Kullanıcıların güvenilirliğe ilişkin duyarlılıklarının yükselmesi test aşında öngörülen işletme koşulları için ihtiyaç duyulan filo büyüklüğünün azalmasına sebep olurken, hizmet verilen toplam servis-km değerinde de düşüş yaşanmasına yol açmıştır. Sonuçlar, kullanıcıların riskten kaçınma davranışlarının, sistemin genel verimliliğine katkı sağlayabileceğine işaret etmektedir. Ancak bu durumun; çalışma kapsamında kullanılan ağ topolojisi dahilindeki durak yoğunluğu nedeniyle kullanıcıların daha dar bir alanda daha fazla durağa erişebiliyor olması ve geliştirilen model kapsamında farklı kapasitelere sahip otobüslerin öngörülen işletme koşullarında kullanılabilmesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Söz konusu dinamiklerin model çıktıları üzerindeki etkilerinin, ilerleyen çalışmalarda farklı ağ yapıları ve topolojileri üzerinde

de araştırılması planlanmaktadır. Bu projeksiyon çerçevesinde, sistem güvenilirliğinin kullanıcılar açısından seyahat verimliliğini artırabileceği, ancak yalnızca işletmeciler maliyetlerine odaklanan değerlendirmelerde, düşük güvenilirliğe sahip sistemlerin avantajlıymış gibi algılanmasının planlamacılar için yanıltıcı olabileceği değerlendirilmektedir. Çalışma, toplu taşıma planlamasında yalnızca fiziksel kapasitenin değil, kullanıcıların güvenilirlik algısının da sürece dahil edilmesinin stratejik bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır. α değerine duyarlı bu model, karar vericilere operasyonel gerçeklikten kopmadan kullanıcı memnuniyeti ile işletme maliyetleri arasında sürdürülebilir bir denge kurmaya yönelik bir çerçeve sunmaktadır. Bu noktada vurgulanması gereken kritik bir husus; α parametresindeki değişimlerin yolcu davranışları üzerindeki net etkilerinin saptanabilmesi için, ağ topolojisinin kullanıcıların alternatif rota arama davranışlarına imkân tanıyacak uygun durak ve bağlantı yoğunluğuna sahip olması gerekliliğidir. Özellikle bağlantı alternatiflerinin kısıtlı olduğu küçük ölçekli ağlarda ya da trafik analiz bölgelerinin doğrudan duraklarla eşleştirildiği geleneksel modellerde, bu parametrik değişimin model çıktılarına olan yansımalarının oldukça sınırlı kalabileceği değerlendirilmektedir. Buna karşın; hatlar arası aktarma koordinasyonunun ve çoklu durak erişilebilirliğinin kritik önem arz ettiği orta ve büyük ölçekli ağlarda, α parametresindeki değişimlerin ağ tasarımı ve çizelgeleme sonuçları üzerinde ve ciddi etkiler yaratacağı öngörülmektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bir diğer önemli kabul, toplu taşıma kullanıcılarının yürüme hızlarının sabit olarak değerlendirilmesidir. Buna göre elde edilen analiz sonuçları; yolcuların, yürüme mesafelerini artırmayı göze alarak seyahat süresi güvenilirliği daha yüksek olan bağlantılara yönelme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ancak yürüme hızı düşük belirli yolcu gruplarında, uzun yürüme sürelerinin getireceği ekstra zamansal ve fiziksel yükün, alternatif durak/bağlantı arama davranışını baskılayabileceğini ve kullanıcıların tercih setlerini daraltabileceğini söylemek mümkündür. Bu nedenle yaş, cinsiyet veya yük taşıma durumu gibi yürüme hızını doğrudan etkileyen demografik ve durumsal değişkenler, toplam seyahat süresi üzerindeki nihai ağırlıkları nedeniyle büyük önem arz etmektedir. Söz konusu dinamikler ışığında; gelecek çalışmalarda yürüme hızının heterojen ve stokastik bir yapı altında modellenmesinin, model sonuçları ile gerçek saha koşulları arasındaki etkileşimi artıracakları öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda; bağlardaki seyahat sürelerinin trafik koşulları altındaki değişiminin dinamik olarak dikkate alınması, kullanıcıların yürüme hızlarının ve araçlara iniş-biniş sürelerinin yaş, cinsiyet veya yük taşıma gibi demografik/durumsal değişkenlere bağlı heterojen yapısının modele entegre edilmesi ile geliştirilen metodolojinin gerçek toplu taşıma ağları üzerinde de uygulanabilecek şekilde genişletilmesi planlanmaktadır. Aynı zamanda, kullanılmayan kapasitenin dikkate alınmasının ilerleyen çalışmalarda daha kapsamlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

YAZAR BEYANI (AUTHOR STATEMENT)

İntihal Kontrolü (Plagiarism Check)—Makale iThenticate programı ile taranmış ve derginin intihal politikası ile uyumlu bulunmuştur.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)—Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Onayı Onayı (Ethics Committee Approval)—Makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Yapay Zeka Araçlarının Kullanımı (Use of Artificial Intelligence Tools)—Bu çalışmada, makale yazımında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanılmamıştır. Tüm içerik yazarların özgün katkısı yansıtmaktadır.

Finansman ve Proje Desteği (Funding)—Yazarlar, sunulan bu çalışma için herhangi bir kuruluştan destek almamıştır.

Veri Paylaşım (Data availability)—Bu çalışma sırasında üretilen veya analiz edilen tüm veriler makalede yer almaktadır.

Yazar Katkısı (CRediT Author Contribution)—Kavramsallaştırma, Yöntem, Yazılım, Biçimsel Analiz, Araştırma, Veri Düzenleme, Yazma – ilk taslak, Yazma – inceleme ve düzeltme, Görselleştirme (Tayfun Özcan); Kavramsallaştırma, Doğrulama, Danışmanlık (Hüseyin Ceylan).

VI. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. -P. Rodrigue, *The Geography of Transport Systems*, 5th edition, London, England, Routledge, 2020. <https://doi.org/10.4324/9780429346323>.
- [2] S. J. Redding, M. A. Turner, "Chapter 20 - Transportation costs and the spatial organization of economic activity", *Handbook of Regional and Urban Economics*, 5, 1339-1398, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59531-7.00020-X>.
- [3] R. Tolley, B. J. Turton, *Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach*, 1st edition, London, England, Routledge, 1995. <https://doi.org/10.4324/9781315846828>.
- [4] G. R. Timilsina, H. B. Dulal, "Urban road transportation externalities: Costs and choice of policy instruments", *World Bank Research Observer*, 26(1), 162-191, 2011. <https://doi.org/10.1093/wbro/lkq005>.
- [5] International Energy Agency (IEA), "Transport, Energy and CO2: moving toward sustainability", Paris, France, OECD Publishing, 2009. <https://doi.org/10.1787/9789264073173-en>.
- [6] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, "International Migration Report 2015: Highlights", New York, USA, (ST/ESA/SER.A/384), 2016, https://digitallibrary.un.org/record/3921645/files/MigrationReport2015_Highlights.pdf. (24.05.2026).
- [7] T. Ercan, N. C. Onat, O. Tatari, J. D. Mathias, "Public transportation adoption requires a paradigm shift in urban development structure", *Journal of Cleaner Production*, 142, 1789-1799, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.109>.
- [8] P. L. Schiller, J. Kenworthy, *An Introduction to Sustainable Transportation: Policy, Planning and Implementation*, 2nd edition, London, England, Routledge, 2017. <https://doi.org/10.4324/9781315644486>.
- [9] Transportation Research Board, *Making Transit Work: Insight from Western Europe, Canada, and the United States - Special Report 257*, Washington, DC, USA, The National Academies Press, 2001. <https://doi.org/10.17226/10110>.
- [10] T. Gärling, K. W. Axhausen, "Introduction: Habitual travel choice", *Transportation*, 30(1), 1-11, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1021230223001>.
- [11] P. Gordon, A. Kumar, H. W. Richardson, "Gender differences in metropolitan travel behaviour", *Regional Studies*, 23(6), 499-510, 1989. <https://doi.org/10.1080/00343408912331345672>.
- [12] A. M. Chudyk, M. Winters, M. Moniruzzaman, M. C. Ashe, J. S. Gould, H. McKay, "Destinations matter: The association between where older adults live and their travel behavior", *Journal of Transport & Health*, 2(1), 50-57, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2014.09.008>.
- [13] S. Rasouli, H. Timmermans, P. van der Waerden, "Employment status transitions and shifts in daily activity-travel behavior with special focus on shopping duration", *Transportation*, 42(6), 919-931, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9655-5>.
- [14] F. M. Dieleman, M. Dijst, G. Burghouwt, "Urban form and travel behaviour: Micro-level household attributes and residential context", *Urban Studies*, 39(3), 507-527, 2002. <https://doi.org/10.1080/00420980220112801>.
- [15] Z. Kotval-K, I. Vojnovic, "The socio-economics of travel behavior and environmental burdens: A Detroit, Michigan regional context", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 477-491, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.017>.
- [16] J. Göransson, H. Andersson, "Factors that make public transport systems attractive: A review of travel preferences and travel mode choices", *European Transport Research Review*, 15(1), 32, 2023. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00609-x>.
- [17] M. Thondoo, O. Marquet, S. Márquez, M. J. Nieuwenhuijsen, "Small cities, big needs: Urban transport planning in cities of developing countries", *Journal of Transport & Health*, 19, 100944, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100944>.
- [18] P. R. White, "Inadequacies of Urban public transport systems", *Transport Planning for Third World Cities (Routledge Revivals)*, 1st edition, H. T. Dimitriou, Eds., London, Routledge, 1990, Ch. 3. <https://doi.org/10.4324/9780203768921>.
- [19] R. Arroyo, T. Ruiz, L. Mars, S. Rasouli, H. Timmermans, "Influence of values, attitudes towards transport modes and companions on travel behavior", *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*, 71, 8-22, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.04.002>.
- [20] R. Devika, M. Harikrishna, M. V. L. R. Anjaneyulu, "Influence of psychological factors in mode choice decision making: A structural equation modeling approach", *Transportation Research Procedia*, 48, 2821-2830, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.236>.
- [21] M. A. Turnquist, L. A. Bowman, "The effects of network structure on reliability of transit service", *Transportation Research Part B-Methodological*, 14(1-2), 79-86, 1980. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(80\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0191-2615(80)90034-X).
- [22] S. B. Jha, J. K. Jha, M. K. Tiwari, "A multi-objective meta-heuristic approach for transit network design and frequency setting problem in a bus transit system", *Computers & Industrial Engineering*, 130, 166-186, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.025>.
- [23] T. Vlachopanagiotis, K. Grizos, G. Georgiadis, I. Politis, "Public transportation network design and frequency setting: Pareto optimality through alternating-objective genetic algorithms", *Future Transportation*, 1(2), 248-267, 2021. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020015>.
- [24] S. Yoo, J. B. Lee, H. Han, "A reinforcement learning approach for bus network design and frequency setting optimization", *Public Transport*, 15(2), 503-534, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12469-022-00319-y>.
- [25] X. M. Chen, L. Yu, Y. S. Zhang, J. F. Guo, "Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels", *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, 43(8), 722-734, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.07.006>.
- [26] B. Z. Yao, P. Hu, X. H. Lu, J. J. Gao, M. H. Zhang, "Transit network design based on travel time reliability", *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, 43, 233-248, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.005>.
- [27] A. Ceder, *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior*, 2nd edition, Boca Raton, USA, CRC Press, 2016. <https://doi.org/10.1201/b18689>.
- [28] X. Fu, W. H. K. Lam, B. Y. Chen, "A reliability-based traffic assignment model for multi-modal transport network under demand uncertainty", *Journal of Advanced Transportation*, 48(1), 66-85, 2014. <https://doi.org/10.1002/atr.202>.
- [29] R. Liu, S. Sinha, "Modelling urban bus service and passenger reliability", *The Third International Symposium on Transportation Network Reliability*, The Hague, Netherlands, 19-20 July 2007, <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/3686> (24.05.2026).
- [30] Y. Jiang, "Reliability-based equitable transit frequency design", *Transportmetrica A-Transport Science*, 18(3), 879-909, 2022. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1902420>.
- [31] W. Y. Szeto, M. Solayappan, Y. Jiang, "Reliability-based transit assignment for congested stochastic transit networks", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(4), 311-326, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00680.x>.
- [32] T. Ozcan, H. Ceylan, "Bağlayıcı Sayısındaki Değişimlerin Kentiçi Toplu Taşıma Ağlarının Tasarım Süreci Üzerindeki Etkileri," *14. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Ekim 2023, 282-296, <https://14ulastirma.org/uploads/history/14-ulasirma-kongresi-bildiriler-kitabi-20240319140522.pdf>. (25.05.2026).
- [33] M. Özuysal, S. P. Çalışkanelli, S. Tanyel, "Otobüs duraklarındaki yolcu iniş-biniş zamanları üzerine bir tartışma," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 460-467, 2016. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.17894>.
- [34] M. Burke, A. L. Brown, "Distances people walk for transport," *Road & Transport Research*, 16(3), 16-29, 2007.