



**KENTİÇİ TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİ İÇİN DİJİTAL
İKİZ TASARIMI**

Melike BAYINDIR

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet ATALAY
Yüksek Lisans Tezi
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KENTİÇİ TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİ İÇİN DİJİTAL İKİZ TASARIMI
(Digital Twin Design For Urban Public Transportation Systems)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike BAYINDIR

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Erzurum
Ocak, 2024



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

KENTİÇİ TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİ İÇİN DİJİTAL İKİZ TASARIMI

Doç. Dr. Burak ERKAYMAN danışmanlığında, Melike BAYINDIR tarafından hazırlanan bu çalışma, 10/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. M. Emre KESKİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Burak ERKAYMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Nadide ÇAĞLAYAN Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Şeyma EMEÇ Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Doç. Dr. Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yükse Lisans Tezi olarak *Doç. Dr. Burak ERKAYMAN* danışmanlığında sunulan “Kentiçi Toplu Taşıma Sistemleri İçin Dijital İkiz Tasarımı” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	17	30
Materyal ve Metot	0	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Melike BAYINDIR	Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
15.1.2024	15.1.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tezimi hazırlama sürecinde bana aktarmış olduğu bilgisi, tecrübesi ve yönlendirmeleriyle çalışmam boyunca beni sabırla dinleyen ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Burak ERKAYMAN'a ve Doç. Dr. Ahmet ATALAY'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatım boyunca destekleri ile benim bu seviyelere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini her daim gösteren sevgili aileme teşekkür ederim.

Melike BAYINDIR



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ KENTİÇİ TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİ İÇİN DİJİTAL İKİZ TASARIMI Melike BAYINDIR

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet ATALAY

Amaç: Bu çalışmada kentiçi toplu taşıma sistemi için dijital ikiz tasarımı yapılarak modellenen simülasyonda darboğazlar için çözüm önerileri sunmak amaçlanmıştır.

Yöntem: Duraklardaki darboğazları, yolcu geliş süreleri, yolcu bekleme süreleri gibi verileri analiz etmek için Anylogic 8.8.3 programında üç ayrı hat ve toplam 14 durak dağılımsal verilerle incelenmiştir.

Bulgular: Uygulama sonucunda önerilen model ile darboğazlar tespit edilip belirlenen çözüm önerileri ile bekleme sürelerinin ve yolcu geliş sıklıklarının azaltılmasını ve dijital ikiz teknolojileri ile desteklenirse kentiçi toplu taşıma sistemleri için sorunların erkenden tespit edilmesini sağladığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç: Modelin çalıştırılması ile alınan veriler ve çözüm önerileri doğrultusunda gerekli yorum ve çıkarımlarda bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kentiçi Toplu Taşıma, Anylogic, Dijital İkiz, Akıllı Toplu Ulaşım Sistemleri.

Ocak 2024, 80 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

DIGITAL TWIN DESIGN FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS

Melike BAYINDIR

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ATALAY

Purpose: The aim of this study is to design a digital twin for the urban public transport system and to provide solutions for bottlenecks in the modelled simulation.

Method: Three separate lines and a total of 14 stops were analysed with distributional data in Anylogic 8.8.3 to analyse bottlenecks at stops, passenger arrival times, passenger waiting times.

Findings: As a result of the application, it was concluded that the bottlenecks were identified with the proposed model and the solution suggestions were determined to reduce waiting times and passenger arrival frequencies, and if supported by digital twin technologies, it provides early detection of problems for urban public transport systems.

Results: Necessary comments and inferences were made in line with the data and solution suggestions obtained by running the model.

Keywords: Urban Public Transport, Anylogic, Digital Twin, Intelligent Public Transport Systems.

January 2024, 80 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Literatür Araştırması	3
Akıllı Şehir.....	6
Akıllı şehirlerde kullanılan teknolojiler	7
Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Tarihi	9
Akıllı Toplu Ulaşım Sistemleri	12
Dünya’da ve Türkiye’de akıllı toplu ulaşım sistemleri politikaları	14
Yolcu bilgi sistemleri	16
ATUS haberleşme alanında kullanılan teknolojiler	18
Akıllı kart ve ödeme sistemi ve kullanılan teknolojiler	21
Toplu taşımada akıllı yaklaşımlar	22
Dijital İkiz	23
İkizler prensipleri	25
Dijital ikiz mimarisi	25
Dijital ikiz faydaları ve kullanım alanları	27
Etmen Tabanlı Modelleme.....	34
MATERYAL VE METOT	36
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
Simülasyon Modelinin Oluşturulması.....	37
Senaryo 1.....	41
Senaryo 2.....	54
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63

KAYNAKÇA	65
ÖZGEÇMİŞ.....	68



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi	11
Tablo 2. AUS Kullanıcı Hizmetleri ve Hizmet Gurupları	13
Tablo 3. Duraklar İçin Yolcu Üretim Dağılımları	38
Tablo 4. Duraklardaki Bekleme Süreleri	42
Tablo 5. İkinci Hat Dördüncü Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi.....	43
Tablo 6. İkinci Hat Dördüncü Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi.....	45
Tablo 7. İkinci Hat Üçüncü Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi	47
Tablo 8. İkinci Hat Üçüncü Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi	49
Tablo 9. İkinci Hat Beşinci Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi	51
Tablo 10. İkinci Hat Beşinci Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi.....	53
Tablo 11. Darboğazın Daha Fazla Olduğu Duraklardaki Bekleme Süresindeki Değişimler ..	55
Tablo 12. Darboğazın Daha Fazla Olduğu Duraklardaki Bekleme Süresindeki Değişimler ..	56
Tablo 13. 1000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri.....	58
Tablo 14. 10000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri.....	59
Tablo 15. 100000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Akıllı ulaşım sistemleri aşamaları.....	9
Şekil 2. Otobüslerde Wi-Fi teknolojisi.....	20
Şekil 3. Dijital ikiz	24
Şekil 4. Dijital ikiz mimarisi	27
Şekil 5. Dijital ikizin kullanıldığı sektörler	28
Şekil 6. Dijital ikiz kullanım alanları	29
Şekil 7. BIM'in dijital ikizlere evrimi.....	30
Şekil 8. Toplu ulaşım sistemlerinde artırılmış gerçeklik.....	34
Şekil 9. Anylogic güzergah örneği	37
Şekil 10. Otobüs üretim bloku.....	38
Şekil 11. İndi-Bindi model örneği	39
Şekil 12. İndirme bloku (dropoff)	39
Şekil 13. Bindirme bloku (pickup).....	40
Şekil 14. Yolcunun indiği nokta.....	40
Şekil 15. Anylogic hat ayrımı örneği	40
Şekil 16. Model tasarımı genel görüntü	41
Şekil 17. Bloklarda kullanılan yol, durak ve yolcunun geldiği yollar.....	41
Şekil 18. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı	44
Şekil 19. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı.	46
Şekil 20. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı	48
Şekil 21. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı	50
Şekil 22. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı	52
Şekil 23. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı	54
Şekil 24. Güncellenmiş hat ayrımı bloğ	55
Şekil 25. 1. ve 2. senaryoya göre duraklardaki bekleme süreleri.....	57
Şekil 26. Senaryo 1 ve 2'ye göre otobüslerin duraklara dağılımı.....	58
Şekil 27. Otobüslerin max ve min bekleme süreleri	61
Şekil 28. Anlamlılık testi.....	62

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AI	: Yapay Zeka
AR	: Artırılmış Gerçeklik
ATUS	: Akıllı Toplu Ulaşım Sistemleri
GLONASS	: Global Navigation Satellite System (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi)
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi
GSM	: Global System for Mobile Communication (Mobil İletişim için Küresel Sistem)
IoT	: Nesnelerin İnterneti
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
ITS America	: Intelligent Transportation Society of America (Amerika Akıllı Ulaşım Topluluğu)
ITU	: Uluslararası Telekomünikasyon Birliği
LTE	: Long Term Evaluation (Uzun Vadeli Değerlendirme)
NFC	: Near Field Communication (Yakın Alan İletişimi)
RFID	: Radio Frequency Identification (Radyo Frekansı ile Tanımlama)
TOPIS	: Transport Operation and Information Service (Ulaştırma Operasyon ve Bilgi Servisi)
UNEP	: UN Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
VERTIS	: Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society (Araç, Yol ve Trafik İstihbarat Topluluğu)
VR	: Sanal Gerçeklik

GİRİŞ

Bu Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin nüfus artışlarından kaynaklı başlıca sorunlarından biri de ulaşım problemleridir. Büyük şehirlerde kentsel altyapı değişikçe ulaşım ağı da sürekli değişmektedir. Bu nedenle toplu taşıma hatlarının daha çok gözden geçirilmesi gerekmektedir. Ulaşım sistemlerindeki değişiklikleri anlık, hızlı bir şekilde yansıtan etkili modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Anlık verilere ulaşma gereksinimi kent içi akıllı dönüşümlerin, akıllı şehirlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Akıllı şehir verilen hizmetleri ve talepleri göz önünde bulundurabilen, ulaşım altyapısını takip edebilen, önleyici bakım çalışmalarını planlayan ve güvenlik durumlarını takip edebilen şehirdir. Akıllı Şehir; tüm verilerin beraber incelenerek sınırlı kaynakların verimli ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasını ve analiz edilen verilerin şehir faaliyetlerine olan katkısının daha iyi ölçülmesini ifade etmektedir (Cosgrove M *et al.* 2011). Akıllı Şehirler, artan nüfus ile fiziki altyapı, ulaşım, çevre ve dijital teknolojilerin şehirleri daha yaşanabilir hale getirerek, karşılaşılan sorunlara daha anlaşılabilir cevaplar verdiği bir süreci ifade etmektedir (BIS 2013).

Akıllı şehirlerin oluşmasında nesnelerin interneti (IoT), bulut bilişim, yapay zeka (AI) ve çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Bu araçlar bilgi işlem teknolojilerini kullanarak verileri depolamaktadır. Akıllı şehir sistemlerinden toplanan verileri kullanarak fiziksel ve sanal dünyayı birbirine bağlayan dijital ikizler, akıllı şehirlerden aldıkları çift yönlü veri ile sistemi güncel tutabilmektedir. Bu anlamda dijital ikizler birden fazla kaynak ile sistemi güncel tutmaktadırlar. Şehirde yerleştirilen kameralar ve çeşitli sensörler sürekli güncellenen ve üretilen bir veri yığını meydana getirir, bu veri yığınları dijital ikiz için veri temellerini oluşturur. Teknik temelleri ise IoT, yapay zekan, bilişim gibi teknolojiler oluşturmaktadır.

Dijital ikizler fiziksel ortamın sanal ortama bağlanması gerçek zamanlı verilerde öngörülebilecek değişiklikleri de test etmek için olanak sağlamaktadır. Bu sayede sanal ortamda olası durumlar göz önüne alınıp testler yapılarak gerçek hayattaki fiziksel ortamda iyileştirmeler ve sorunlara çözümler uygulanabilir hale gelmektedir.

Kentiçi toplu taşıma sistemlerinde optimum sefer sıklıklarının, sefer sayılarının, araçların kapasitelerinin, bekleme sürelerinin vb. verilerin incelenilmesi ve verisel anlamda depolanıp işlenebilmesi için simülasyonlardan ve anlık veri kaydeden çeşitli araçlardan

yararlanılması gerekmektedir. Bu anlık veriler akıllı şehir sistemlerinden elde edilebilmektedir. Dijital ikiz modellemesi yapılarak bu sistemlerden alınan veriler işlenebilmektedir.

Modeller geliştirilip kaynaklar doğru kullanılır ise gün içinde talep edilen seyahat istekleri göz önüne alınarak sefer aralıkları belirlenebilmektedir. Sefer aralıkları belirlenemeyen başarısız modellerde toplu taşıma sistemlerinin doluluk oranının yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra doğru sefer aralıkları belirlenirken yolcuların bekleme süreleri dikkate alınmalıdır. Yapılan araştırmalar, yüksek bekleme sürelerinin kullanıcıların güzergah ve ulaşım türü tercihlerini değiştirebilecek bir etken olduğunu göstermektedir (Doğan ve Özuysal 2017). Opsiyonların belirlenmesinde duraklara geliş zamanının bilinmesi önemli bir yer tutmaktadır. Simülasyon ile yaya davranışlarının da modellenebiliyor oluşu model çıktıları ile fiziki çıktılar arasındaki hata payını azaltmaktadır.

Bu çalışma artan nüfusa bağlı olarak otobüs duraklarında yolcu sayılarının artması, ulaşım alt yapılarının yetersiz olması, otobüslerin yayalara oranlanınca sefer sayılarının yetmemesi, yayaların zaman ve maliyet kaybı yaşamaları, otobüs duraklarında bekleme sürelerinin artması gibi kentiçi toplu taşıma sistemlerindeki problemlere çözüm üretmek için yapılmıştır. Çalışmada meydana gelen sefer sıklığı problemleri, otobüs kapasiteleri, yolcuların duraklardaki bekleme süreleri gibi kentiçi toplu taşıma problemleri akıllı şehir sistemleri ve dijital ikiz yaklaşımı ile incelenmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Literatür Araştırması

Bu Kentiçi toplu taşıma sistemleri, akıllı şehirler ve dijital ikizlerle ilgili birçok araştırma yapılmıştır.

Szeto ve Wu bütünsel çözüm önerisi yaptıkları çalışmalarında toplu taşıma güzergahlarındaki aktarmaları ve toplam yolculuk süresini birlikte azaltmak için ağ modellemesi ve sefer sıklığı optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları, çözüm yönteminin güzergah modellemesi ve sıklık optimizasyonunda verimli bir şekilde kullanılabileceğini, güzergahlardaki aktarma sayısı ve toplam seyahat süresinde önemli iyileşmeler sağlayabileceğini ortaya koymuştur (PTV 2011).

Rosen ve arkadaşları dijital ikizde saklanması amacıyla yaptıkları çalışmada sensörler tarafından algılanan, toplanan ve üretim yürütme sistemi tarafından veriler üretmişlerdir. Bu sayede herhangi bir zamanda dijital ikiz, ortamı ve süreci ifade edebilecektir. Çalışmada anlık bir durumun etkisi ile ilgili ileriye yönelik simülasyonlar yapılmıştır (Rosen *et al.* 2015).

Carrese ve Gori sezgisel bir yaklaşım önerdikleri çalışmalarında ağ tasarımı ve sıklık optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Önerilen model Roma (İtalya) şehrinin toplu taşıma güzergahının tasarımına uygulanmıştır (Chakroborty ve Dwivedi 2002).

Qi ve arkadaşları siber-fizik sistemlerin ve dijital ikizlerin siber-fiziksel entegrasyonu anlamını açıklamak için kullanımından bahsetmişlerdir. Farklı alanlarda kullanım nedenlerini araştırmışlardır. Aralarındaki farkları ve benzerlikleri, siber fiziksel haritalamaları, hiyerarşik süreçleri ve çekirdek unsurları birden fazla özelliği inceleyerek analiz etmişlerdir. Çalışmasında imalat servisleri ile dijital ikizin birleştirilme yöntemlerine odaklanılmış, üreticilerin dijital ikizin farklı bileşenlerini hangi hizmet biçimlerinde kullandığı açıklanmıştır. (Qi *et al.* 2018).

Ceder ve Wilson çalışmalarına hesap sürecine ağ tasarım problemini ve sefer sıklığı optimizasyonunu da dahil ederek kullanıcı ile işletmeci maliyetlerini ele almışlardır (Ceder ve Wilson 1986).

Negri ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışma, 2012-2016 yılları arasında yayınlanan eserleri tarayarak ve inceleyerek dijital ikiz kavramını ele almıştır. Bu tarama, eserlerin başlık, özet ve anahtar kelimelerinde "dijital ikiz" ifadesini içeren yayınları içermektedir. Elde bilgiler ile dijital ikiz kavramı ele alınarak tarihsel gelişimi detaylı bir şekilde

incelenmiştir. Dijital ikizlerin mevcut durumunu değerlendirerek, gerçek zamanlı optimizasyonlarla karar verme ve öngörü yeteneklerine vurgu yapılmıştır. Ayrıca, Endüstri 4.0 ile dijital ikiz kavramının etkileşimlerine bu çalışmada değinilmiştir (Negri *et al.* 2017).

Semeraro ve diğerleri, dijital ikiz teknolojisinin temel bileşenlerini, özelliklerini ve etkileşim sorunlarına dair güncel veri sunmayı hedefleyerek bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu araştırma, dijital ikizlerin tasarımı ve inşasıyla ilgili devam eden teknik zorlukları ve araştırmaları izlemektedir. Liu ve ekibi ise endüstriyel uygulamalar, teknolojiler ve kavramlar perspektifinden dijital ikizi derinlemesine inceleyen kapsamlı bir literatür araştırması yapmıştır. Dijital ikizle ilgili gözlemler ve gelecek çalışmalar için öneriler, farklı yaşam döngüsü aşamaları üzerinden sunulmuştur. He ve Bai tarafından gerçekleştirilen analizde, akıllı üretimin sürdürülebilirlik ve teknoloji açısından incelenmiştir. Akıllı üretimin içeriğini oluşturan ekipman, sistem ve hizmetler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, dijital ikiz teknolojisinin kullanıldığı akıllı üretimin geliştirilmesi ve uygulanması tanıtılmıştır. Şu anki durumla birlikte, akıllı üretimin gelecekteki gelişmeleri belirlenmiştir (Özgüner ve Ovalı 2023).

Köz'e göre devlet, Akıllı Toplu Taşıma Sistemleri için önemli yatırımlar yapmış olsa da, özel sektörün bu alandaki katkıları daha çok araç ve kargo izleme sistemleriyle sınırlı kalmıştır. Bu bağlamda, özellikle zaman ve ücret entegrasyonunun sağlanması, kent içi ulaşımın büyük bir kısmının otobüs, minibüs, metro ve raylı sistemlerle gerçekleştiği düşünüldüğünde, Akıllı Toplu Taşıma Uygulamalarına daha fazla önem verilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur (Köz 2011).

Özcan tarafından yapılan bir araştırmaya göre, Akıllı Toplu Taşıma Uygulamaları, şehir yaşamını kolaylaştırma, zaman tasarrufu sağlama, seyahat ederken ulaşım planları yapma olanağı sunma, toplu ulaşım ile ilgili doğru ve güncel bilgilere erişme, bilinmeyen alternatif güzergahları öğrenme ve istenilen yere ulaşma konularında insanlara yardımcı olmaktadır. Bu uygulamalar aynı zamanda hizmeti sağlayan kamu kurumlarının prestijini artırabilir (Özcan 2013).

Gerçek Zamanlı Yolcu Bilgilendirme Sistemleri'nin toplu ulaşım kullanıcılarının bekleme süreleri üzerindeki etkisi, Doğan tarafından yapılan bir çalışma ile araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, bu tür sistemlerin yolcuların bekleme sürelerini etkilediği ve yolcuların, internet üzerinden, bilgisayarlar ve akıllı telefonlar için geliştirilen uygulamalardan yararlanarak ulaşımında bekleme sürelerini azalttığı sonucuna varılmıştır (Doğan 2015).

Pehlivan GPS ve CBS teknolojilerinin ulaşım sektöründe birçok fayda sağlayabileceğini ve geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu ifade etmiştir (Pehlivan 2005). Ayrıca, uygulama

maliyetlerini azaltmak ve sistemlerin etkisini artırmak için GPS teknolojisinin diğer teknolojilerle (mobil telefonlar, kameralar gibi) entegre edilmesi gerektiği üzerinde durmuştur.

Tüm bu tasarımlar ve optimizasyon incelemeleri farklı yazılım araçları ile modellenenilmektedir. Çalışmada Anylogic ile dijital ikiz tasarlayarak kentiçi optimizasyon problemleri için çözüm sunmak hedeflenmektedir.

Andersen ve Sutcliffe , Şehirlerde ulaşımında ortaya çıkan sorunların en iyi şekilde analiz edilmesi için akıllı ulaşım sistemlerinin kullanılmasını ve bundan elde edilecek sonuçlara ulaşabilmek için ise çeşitli politikalar ve stratejiler geliştirilmesi gerektiğini çalışmalarında sunmuştur (Andersen ve Sutcliffe 2000) .

Bodur, akıllı ulaşım sistemleri alanında ulusal standartların ve stratejilerinin belirlenmesi gerektiğini ve akıllı ulaşım sistemi kapsamındaki çalışmalarda koordinasyon eksiklikleri olduğunu belirtmiştir. Bunların yanı sıra ulaşım yatırımlarının seyahatteki konfor için arttırıldığına ve teknoloji kirliliğinin de önüne geçilmesi gerektiğine değinmiştir (Bodur 2012).

Göl çalışmasında örnek bir modeli ATUS için önermiş, değerlendirmesini yapmış, örnek modelin mimarisini oluşturmuştur. Bu sayede ATUS kapsamında geliştirilecek uygulamalar için yararlanılabilecek bir çalışma oluşturmayı amaçlamıştır. Gölünde belirttiği gibi Çapalı tarafından akıllı ulaşım sistemleri, bilişim sistemleri teknolojileri ve gerçek eş zamanlı güncel verileri kullanarak faaliyet gösteren, etkin bir ulaşım seviyesini arttırmayı, ulaşımında güvenliği sağlamayı, konfor ve hizmet seviyesini arttırmayı amaçlayan bilişim sistemleri olarak tanımlanmaktadır (Göl 2019).

Doğan, birçok akıllı ulaşım sistemleri uygulamasının yapıldığını belirterek bu teknolojilerin getirdiği avantajlarla ulaşımın daha konforlu, daha etkili, güvenilir hale getirildiğini çalışmasında belirtmiştir. Yolcu Bilgilendirme sistemlerinin ulaşım araçlarını kullanan yolcuların bekleme sürelerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Yolcuların telefon ve internet üzerinden teknolojik uygulamaları kullandığında bekleme sürelerinde gözle görülür farklar olduğunu ortaya koymuştur (Doğan 2015).

Yardım ve Akyıldız akıllı ulaşım sistemleri kullanıcı hizmetlerinin detaylı olarak tanımlanmasının yanı sıra alt sistemlerin sınırlarının da tanımlanması ve bu sistemler arasındaki bağlantının fiziksel olarak oluşturulması gerektiğini belirtmiştir (Yardım ve Akyıldız 2004).

Akıllı Ulaşım Sistemleri iletişim sektörünün gelişmesiyle kablosuz iletişimde gerçekleşen gelişmelerle bu alandaki çalışmalar hızlanmıştır. Gerçek zamanlı verileri elde edebilmek ve bu sistemleri izleyebilmek ve olası sonuçları tahmin edebilmek araçlara GPS

sistemlerinin entegre edilmesi ve telefonlardaki uygulamalardan izlenebilmesi ile sağlanmıştır (Göl 2019).

Eken ve Sayar, durak, hat, varış süresi ve güzergah gibi bilgileri mobil veya internet ortamında yolculara açılmasını Yolcu Bilgi Sistemi olarak tanımlamıştır. Çalışmalarında yolcuların otobüsün geliş saati, kaldığı süresi, hangi güzergahta ilerlediği gibi soru işaretlerini giderecek cevaplar verdiğini ifade etmişlerdir. QR kod teknolojisinin kullanıldığı çalışmalarda, aracın hızı ve konumu GPS modülü ile yolculara gösterilecek ve bunun yanında toplu taşımalara entegre edilebilecek bir sistemin tasarlanması ile yolculara bindikleri otobüsün doluluk oranı hakkında bilgi akışı sağlayacak sistemlerin geliştirilebileceğini öngörmüştür (Eken ve Sayar 2014).

Güngör çalışmasında akıllı kartlarla ilgili diğer ülkelerdeki kullanımlarına örnek vermiştir. Diğer ülkelerdeki kullanım alanlarına da bakıldığında akıllı kartlar kapsamında tek kartın bir şehirde en az risk ile her yerde kullanılabilir şekilde yaygınlaşmasına değinmiştir (Göl 2019).

Akıllı Şehir

Şehirler UNEP'e (2011) göre dünyadaki nüfusun yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Dünyada da şehirlere olan ilgi artmaya başlamasından dolayı halk sağlığı sorunlar, hava kirliliği ve trafik sorunları gibi problemler meydana gelmeye başlamıştır. Ayrıca kaynaklar da şehirlerde miktarca çok olarak tüketilmeye başlanmıştır. Hızlı gelişen şehirleşme ve aşırı kaynak tüketimi şehirlerin yönetimini de zorlaştırmıştır. Artan nüfus ile ortaya çıkan karmaşık sorunlara çözüm bulabilmek amacıyla ortaya akıllı şehir kavramı atılmıştır. Zamanla kentlere akıllı yaklaşımlar uygulanarak çevre, ulaşım sistemler ve ekonomi gibi alanlarda olumlu etkileri ulaşılabileceği düşünülmektedir (Güneş 2022). Bu nedenle akıllı şehir kavramı yeni yeni hayatımıza girmiş ve gelişmekte olan kavramdır.

Literatüre bakıldığında akıllı şehirler incelendiğinde hayat kalitesine etkisi gözlemlenmiş ve çalışmalarda akıllı şehirlerin hayat kalitesini arttırması gerektiği vurgulanmıştır.

Mevcut kentlerin iyileşmesi ve dönüşümü ve yeni kurulan kentlerin kapsayıcılık ve bütüncüllük hedefi ile Akıllı Şehir yaklaşımı öne çıkmaktadır (Ateş 2017). Kentleşmenin artışı, çevreyi kirleten kaynaklar, doğal kaynakların hızla azalmaya başlaması, hizmet talebi karşısında bu arzı karşılanması gibi problemler sürdürülebilir kentlerin yaratılması için akıllı yaklaşımların şehirlerde kullanımını zorunlu kılmıştır. Bu yaklaşımlar enerji ve kaynakları etkin kullanmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için akıllı çözümler ve stratejiler geliştirme

hedefinde olan ve verimlilik sağlamak için politikalar koyan, süreci kentleri bütüncül bakış açısı ile yeniden planlama üzerine yoğunlaşan bir kavramdır.

Sürdürülebilir enerji kaynaklarına, yeterli tarım ve yeşil alanlarına ve su kaynaklarına sahip olması ve katılımcı yönetimi benimsemesi ile akıllı şehirler teknolojik yeniliklerin yanında başarılı olabilecektir (Çelikyay 2008). Akıllı şehirler, akıllı yönetim sistemleri, mobil cihazlar, akıllı sayaçlar, gömülü sistemler gibi teknolojilerle desteklendiğinde kaynakların etkin kullanımını sağlayarak maliyette de tasarrufu ön plana çıkarmaktadır.

Akıllı şehir kavramı ilk olarak sorunları çözmek için ihtiyaç duyulan “yüksek entelektüel ya da beşeri sermaye” ile sürekli yeniliği desteklemek için karakterize edilmektedir. İkinci olarak, hedeflere bakıldığında, akıllı şehirler iyileştirilmiş yaşam kalitesini ve akıllı şehir politikaları, ekonomik kalkınmayı, aynı zamanda yaşam boyu öğrenme, doğal kaynakların optimize edilebilirliği ve sürdürülebilir kentsel kalkınma yoluyla sermayenin geliştirilmesini kapsayan üç temel özelliği ön plana çıkarmaktadır. (Ojo *et al.* 2016).

Şehirler alt sistemlerin bir araya gelmesinden oluşan insan yerleşkeleri olarak tanımlanmaktadır. Ama normal şehirlerde bu alt sistemler birbirleri ile iletişim halinde değildir. Akıllı şehirlerin ise en büyük farkı alt sistemlerin birbirleri ile sürekli olarak iletişim halinde olmasıdır (Lom ve Primbyl, 2020). Şehir kaynaklarının optimize bir şekilde kullanılabilmesi için tüneller, yollar, köprüler, metrolar, tren yolları, enerji, su ve binaların altyapı durumlarının incelenip tüm bu altyapı sistemlerinin bütünleştirilmesi olarak Hall akıllı şehirleri tanımlamaktadır. Akıllı şehirler temelde insan, kolektivite ve yapay zeka olmak üzere üç unsuru barındırmaktadır. Akıllı vatandaşlar, akıllı ekonomi, akıllı hareketlilik, akıllı yönetim, akıllı çevre ve yaşam akıllı şehirlerin gelişimine katkı sağlayan ana unsurlardır. (Örselli ve Akbay 2019)

Kentsel teknolojiler akıllı şehirlerin temel altyapısını meydana getirmektedir. Simülasyonlar, coğrafi bilgi sistemleri ve sanal gerçeklikler akıllı şehirlerin gerçek zamanlı verilerini tutmak ve analiz etmek için önemli bir paya sahiptir. Eskiden şehirler cam ve metallerin kullanım oranları ile değerlendirilirken günümüzde akıllı şehirler internet altyapıları, bilgisayar sistemleriyle değerlendirilmeye ve analiz edilmeye başlanmıştır.

Akıllı şehirlerde kullanılan teknolojiler

Mobil cihazlar, nesnelerin interneti, büyük veri, bulut bilişim, dijital platformlar ve açık veri gibi teknolojilerle akıllı şehirlerin akıllılık dereceleri ölçülebilmektedir.

Mobil cihazlar

Akıllı telefonlar, bilgisayarlar, tabletler, akıllı sayaçlar ve internet merkezleri gibi cihazlar akıllı şehir hizmetlerinin akıllı şehirdeki kişilerin kullanımının genişlemesi için büyük öneme sahiptir. Akıllı şehirlere çözümlerinde bu mobil cihazlar konum tabanlı hizmetler ve servisler ile önemli bir yer tutmaktadır (Örselli ve Akbay 2019).

Nesnelerin interneti

Kentsel öğelerin sensörler aracılığı ile akıllı araçlara dönüşmesi ve bu sensörler yardımıyla birbirleriyle iletişimde kalarak bilgi toplamaları ve paylaşımları nesnelerin interneti olarak adlandırılmaktadır. Kısaca kablosuz internet ve sensör bağlantısının eşyalarda bulunması olarak tanımlanabilmektedir. Kentlerdeki ulaşım güzergahlarında makineden makineye bağlı sistemlerin kullanılarak akıllı ulaşım sistemlerinin oluşturulması nesnelerin internetinin sahada uygulanma örnekleri olarak verilebilir.

Büyük veri

Online ticaret, konum paylaşımı, elektronik uygulamalar, mesajlaşma, algılayıcı cihazlar gibi internet tabanlı etkileşimler, kullanıcıları bilinçli ya da bilinçsizce yüksek miktarda dijital veri üretmeye ve kaydetmeye devam ediyor. Hızla evrilen teknolojiyle birlikte neredeyse herkes, her etkileşim ve iletişimde dijital bir iz bırakıyor. Model bilgi ve teknoloji grubuna giren ağ sensörleri, akıllı yaklaşıma sahip cihazlar ve sosyal medya tarafından yakalanan ve kaydedilen bilgiler büyük veriyi oluşturmaktadır.

Bulut bilişim teknolojisi

Veri üretimi günümüz teknolojisinde dijital cihazlarla günden güne daha fazla olmaktadır. Bu dataları saklamak için ise depolama kapasitesi burada sorunlara sebep olmaktadır. Bulut Teknolojisi, internet üzerinden erişilebilen yazılım uygulamaları, veri depolama hizmeti ve işlem kapasitesi sunarak tanımlanmaktadır. En düşük kapasiteli cihazla bile istenilen yerden herhangi bir zamanda her tür bilgiye ve kişisel veriye ulaşılabilir. Dijital bir ağ aracılığıyla çoklu sunucu bağlantısı kurulması bu işlemler için yeterlidir. Bu kavramın temelleri 1950'li yıllarda atılmıştır. Amazon, veri merkezlerini modernize ederek bulut bilişimin gelişiminde anahtar bir rol oynamıştır ve 2006 yılında ilk gerçek bulut bilişim hizmeti olan Amazon S3'ü hizmete sunmuştur (Örselli ve Akbay 2019).

Dijital platformlar

Kentlerin acil çözüm bekleyen birçok sorunu vardır. Yeni nesil altyapılar ise bu sorunlara çözüm aramaktadır. Dijital platformlar etkili ve maliyeti düşük çözümler sunarak katılımın artmasını sağlayan alanlardır.

Açık veri

Herhangi bir telif, patent gibi kontrollere tabi olmayan serbest veriler açık veri olarak adlandırılmaktadır. Açık veriler herkesçe kullanılabildiği ve paylaşılabildiği için rekabeti ve kaliteli işleri farklı sektörlerde ortaya çıkarmaktadır.

Akıllı şehirler bu teknolojileri kullanarak vatandaşların konforunu arttırdığında ve onlara kolaylık sağladığında anlam kazanmaktadır. Şehir merkezlerindeki konforu arttırmak ise ulaşım alt yapısının güçlendirilip karmaşık mimarı yapısından kurtulmakla olur. Bu bağlamda akıllı şehirler ve akıllı ulaşım sistemleri arasında sıkı bir ilişki vardır.

Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Tarihi

Akıllı Ulaşım altyapıları şehirleri akışkan bir trafikle daha değerli, kazasız ve az gürültü ile daha yaşanabilir, internet ağ bağlantıları ile birbirlerine daha bağlı hale getirerek akıllı şehrin tasarımında büyük rol oynar. Akıllı sistemlerde trafik ışıkları bu uygulamalara ilk olarak örnek verilebilir. Trafik ışıkları, geçiş üstünlüklerini yayalar ve araçlar üzerinde ayarlayan ve kavşaklardaki araçların birbirlerine yol verirken ne kadar süre vereceği sorununu çözen ilk akıllı ulaşım uygulamasıdır. Akıllı ulaşım sistemleri bilişim sistemlerini kullanarak ulaşımı düzenlemeye dayalı uygulamalar yapmaktadırlar. Ulaşım sistemlerinin bir alt sınıfı olan Akıllı Toplu Ulaşım Sistemleri ise toplu taşımada yolcuların seyahatlerini kolaylaştırmak için geliştirilen uygulamaları kapsamaktadır.



Şekil 1. Akıllı ulaşım sistemleri aşamaları

İngiltere’de John Peake Knight’in yaptığı araştırmalar ile 1865’te ilk olarak trafik ışıkları ortaya çıkmıştır. Parlemonterlerin binalarına hızlı ve etkin bir şekilde ulaşmalarının bu trafik sinyallerinin en temel amaçlarından biridir. Gazla çalışan kırmızı “dur” yeşil geç” i ifade eden sistem 1868’de Londra’da geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemin çalışması için gün boyu

başında ışıkların başında bekleyen polislerin yanında bu ışıklar patlayınca uygulama kaldırılmıştır (Demir 2023).

Artan araç sayısını kontrol etmek 1900'li yıllarda sanayileşmenin büyümesiyle daha da karmaşık hal almıştır. Polis memuru Lester Wire 1912 yılında trafik ışıklarının elektrikli olma fikrini ortaya atmıştır. 1914 yılında bu fikir kırmızı ve yeşil ışıklar olarak hayata geçirilmesinin yanı sıra ek olarak da ışıkların renk değişimlerinden önce sesli bir uyarı mesajı da vermektedir.

1960'lı yıllarında elektronik değişken mesaj işaretleri ve kırmızı ışık kameraları kullanılmaya başlanmıştır. 1969'da ABD Elektronik Rota Klavuzluk Sistemi, 1973'te Kapsamlı Otomobil Trafik Kontrol Sistemleri, 1974'te Sürücü Radyo Yayını Bilgi Sistemi çalışmalarına akıllı ulaşım sistemi kapsamında başlanmıştır. Ancak maliyet açısından bu çalışmaların sürekliliği ve uygulanabilirliği geçici hale gelmiştir. Bu bağlamda ARGE çalışmaları hızlandırılmıştır. Bir yandan ARGE'ye önem verilirken diğer yandan da sesli işaretler, hız tespit radarları ve otomatik plaka okuma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Haberleşme teknolojisinin gelişmesiyle akıllı sistemler 1980'lerde uygulanmaya ve kullanılmaya başlanmıştır. Yolcu bilgilendirme sistemleri, sürücü bilgilendirme sistemleri, kavşak kontrollerinin akıllı sistem yaklaşımı ile incelenmesi, ücret toplama sistemlerinin teknolojik alanda yapılması gibi çalışmalar ortaya çıkmıştır (Demir 2023).

1984 yılında başlayan araç güzergâh belirleme sisteminin başı olan Yol/Otomobil İletişim Sistemi çalışması günümüzde Japonya'da kullanılmaya devam etmektedir (Yardım ve Akyıldız 2005).

1990'lı yıllarda akıllı ulaşım sistemi standartlarının belirlenmesi ve ARGE süreçlerine kaynak sağlamak için ERTICO-ITS Europe kurulmuştur. Aynı yıl Amerika'da ITS America (Intelligent Transportation Society of America) ve 1994'te ise 2001 yılında adı ITS Japan olarak değiştirilen VERTIS (Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society) kurulmuştur. AUS standartları günümüzde bu kuruluşlar ile oluşturulmaktadır (Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2014).

Trafik Yönetimi, Yol Ücretlendirme, Yardımcı Sistemler, Acil Durum Araçları ve Denetim Sistemleri ve bunlarla bağlantılı uygulamalar akıllı toplu ulaşım sistemlerinin mimarisini oluşturmuştur.

Akıllı Ulaşım Sistemleri bilgi ve iletişim sistemleri ile entegre çalışarak ulaşımındaki problemleri düzenlemeyi hedeflemektedir. Bu sistemler ulaşımındaki güvenliğin artması, kapasitelerin etkin kullanılması, gecikme ve bekleme sürelerinin azaltılması, yolcu bilgilendirmelerinin artması açısından önemlidir. Yaya, kullanıcı, altyapı sistemleri arasında

çift yönlü bilgi akışı sağlanarak eş zamanlı veri ölçme, inceleme ve kontrollerini kapsayan bilgi ve iletişim temelli sistemler bunların yanında ulaşımdaki akışın artması, enerjilerin etkin kullanılması ve çevreye yararlı olması gibi amaçlarla geliştirilmiştir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı 2020).

Toplum, yol ve araçlar arasındaki iletişimler bilgi ve iletişim teknolojileri sayesinde olmaktadır. Anlık veri akışları bu sistemlerle devam ettikçe yolcu da hangi ulaşım güzergahını seçeceğine karar verebilecektir. Bu bağlamda akıllı ulaşım sistemlerinin amaçlarından biri de konforlu seyahati sağlayarak yolcunun karşılaşacağı tehditleri minimuma indirmektir.

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin tarihsel gelişimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi (Demir 2023)

1960’lar	Manyetik döngü algılayıcıları
	Işık ihlal tespit kamerası
	Değişken mesaj işaretleri
	Hız limiti işaretleri
	ERGS (Elektronik Rota Kılavuzluk Sistemi)
1970’ler	Hız tespit radarları
	CACS (Kapsamlı Otomobil Trafik Kontrol Sistemleri)
	ARI (Sürücü Radyo Yayını Bilgi Sistemleri)
	Otomatik plaka okuma sistemleri
1980’ler	Mobil hız tespit ve trafik kameraları
	SCATS (Sidney Koordineli Uyarmalı Trafik Sistemi)
	Yol-hava durumu bilgi sistemleri
	Otomatik navigasyon sistemleri
	Elektronik hız sabitleyici
1990’lar	Otomatik geçiş sistemi
	GPS tabanlı navigasyon sistemleri
	ISO TC 204 Akıllı Ulaşım Sistemleri Komitesi
	CEN / TC278 Akıllı Ulaşım Sistemleri Teknik Komitesi
	Dinamik trafik ışığı kontrol sistemleri
	Dünya Akıllı Ulaşım Sistemleri Kongresi
2000’ler	ERTICO-ITS Europe
	Dijital kırmızı ışık kamera sistemleri
	LED trafik lambaları
	Kör nokta bilgi sistemleri - Mobil trafik bilgi sistemi
	IEEE 802.11p taşıt içi WİFİ standartları
	Şerit ihlali uyarı bilgi sistemleri

Tablo 1. (devamı)

	e-Call acil durum araç bilgi sistemi (EU)
	Web 2.0
	Otonom araç çalışmaları
	Bağlantılı araçlar ve altyapı
2010'lar	Elektrikli araçlar
	Veri yönetimi ve uygulamaları
	Mobil ve internet tabanlı ulaşım çözümlerinin yaygınlaşması

Akıllı ulaşım sistemleri uygulamaları ülkemizde daha çok otomatik ücret toplama, trafik yönetimi ve trafik güvenliği alanlarında çalışmaları vardır. Bu sistemlerin popülerleşmesi ile belediyelerde ulaşım problemlerini çözmek için birçok proje konusu gündeme gelmektedir. Araç sayıları arttıkça meydana gelen trafik sıkışıklıklarını çözümlmek için sabit zamanlı ulaşım yönetimleri artık çözüm olmamaktadır. Mevcut kapasiteli yollar artık yeterli gelmediği için daha etkin, akılcı ve bilgi sistemleriyle donatılmış, anlık veri akışları ile analiz edilebilecek akıllı ulaşım sistemlerine ihtiyaç artmaktadır.

Çok yönlü veri akışının insan, araç, merkez ve altyapılar arasında sağlanması, trafik ve ulaşım güvenliği, mobilitenin artırılması ve kapasitelerin optimum seviyeye gelmesi akıllı ulaşım sistemlerinin amaçlarındandır.

Akıllı Toplu Ulaşım Sistemleri

Dünyada trafik sorunlarının artması akıllı toplu taşıma sistemlerini kullanarak çözümler üretmeyi ve bunları yaygınlaştırmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu nedenle ise dünyada politikalar yapılmaya başlanmıştır. Akıllı toplu taşıma sistemleri uygulamaları, gelişmiş ülkelerde araçların, taşıtların konum bilgisi ve ödeme sistemleri gibi uygulamaları ilk olarak kullanmışlardır.

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin politikalarında, entegrasyonlarında ve sistemlerin planlanmasında sürecin daha etkin ilerlemesi için hizmet veren kurum ve kişilerin bu uygulama süreçlerinde etkin olması gerekmektedir. Bu uygulamaların, sistemlerin yaygınlaşması, yolculara sağlıklı bir seyahat hizmeti verebilmesinin sağlanması için tasarlanan mimariye uygun uygulama sayesinde teknolojilerin geliştirilmesi ilgili kurumlardaki kişilerin bu süreçte etkin rol alması gerekmektedir.

Akıllı Toplu Ulaşım Sistemlerinde ilk önce uygulamanın hayata geçirileceği alanın ihtiyaçları ve kullanıcı hizmetleri analiz edilmektedir. Akıllı Ulaşım Sistemleri kullanıcı hizmetleri ve hizmet gruplandırmaları tablosu bu sistemlerin mimarisini tasarlamada

gelişmekte olan ülkelere rehber olmaktadır. (Yokota 2004). Akıllı Ulaşım Sistemleri mimarisinin tasarlanmasında aşağıdaki Tablo 2’de görüldüğü gibi 1. Ve 7. Sıradaki hizmet alanlarından Yolcu Bilgisi ve Ulaştırma ile ilgili Elektronik Ödeme hizmet alanları akıllı toplu ulaşım sisteminin ilk adımını oluşturmaktadır.

Tablo 2. AUS Kullanıcı Hizmetleri ve Hizmet Grupları (Yokota 2004)

Hizmet Alanları	Hizmet Grupları
1. Yolcu Bilgisi	1.1 Yolculuk öncesi bilgi
	1.2 Yolculuk sırasındaki bilgi
	1.3 Yolculuk hizmetleri bilgisi
	1.4 Yolculuk öncesi güzergâh rehberi ve animasyon
	1.5 Yolculuk sırasında güzergâh rehberi ve animasyon
	1.6 Yolculuk planlama desteği
2.Trafik Yönetimi ve İşlemleri	2.1 Trafik kontrolü
	2.2 Ulaştırma ile ilgili olay yönetimi
	2.3 Talep yönetimi
	2.4 Ulaştırma altyapısının bakım yönetimi
3.Araç İçi Sistemler	3.1 Ulaştırma ile ilgili görüş iyileştirme
	3.2 Otonom araç işlemi
	3.3 Çarpışma önleme
	3.4 Emniyet hazırlığı
	3.5 Çarpışma öncesi kısıtlamaların tertibi
4. Yük Taşımacılığı	4.1 Ticari araç ön izin
	4.2 Ticari araç idari işlemleri
	4.3 Otomatik yol kenarı emniyet denetimi
	4.4 Ticari araç içinde emniyet takibi
	4.5 Yük taşımacılığı filo yönetimi
	4.6 İntermodal bilgi yönetimi
	4.7 İntermodal merkezlerin yönetimi ve kontrolü
	4.8 Tehlikeli yüklerin yönetimi
5.Toplu Taşıma	5.1.Toplu taşıma yönetimi
	5.2. Talebe duyarlı ve paylaşımlı toplu taşıma
6. Acil Durum	6.1 Ulaştırma ile ilgili acil durum duyurusu ve kişisel güvenlik
	6.2 Acil durum araçlarının yönetimi
	6.3 Tehlikeli madde ve olay duyurusu

Tablo 2. (devamı)

7.Ulaştırmayla İlgili Elektronik Ödeme	7.2 Ulařtırmayla ilgili elektronik ödeme hizmetlerinin entegrasyonu
	7.1 Ulaştırmayla ilgili elektronik mali işlemler
	7.2 Ulařtırmayla ilgili elektronik ödeme hizmetlerinin entegrasyonu
8.Karayolu Ulaştırması İle İlgili Kişisel Emniyet	8.1 Toplu taşıma güvenliği
	8.2 Savunmasız karayolu kullanıcılarının emniyetinin arttırılması
	8.3 Engelli karayolu kullanıcılarının emniyetinin arttırılması
	8.4 Akıllı kavşaklar ve bağlantı yolları
9.Hava ve Çevre Koşullarının İzlenmesi	9.1 Hava durumunun izlenmesi
	9.2 Çevre koşullarının izlenmesi
10.Afet Müdahalesi Yönetimi ve Koordinasyonu	10.1 Afet veri yönetimi
	10.2 Afet müdahale yönetimi
	10.3 Acil durum merkezleri ile koordinasyon
11.Ulusal güvenlik	11.1 Şüpheli araçların izlenmesi ve kontrolü
	11.2 Enerji tesisleri veya boru hatlarının izlenmesi

Dünya’da ve Türkiye’de akıllı toplu ulaşım sistemleri politikaları

Akıllı toplu ulaşım sistemleri bekle sürelerini azaltmayı, trafik sıkışıklığını gidermeyi, anlık veri akışının incelenmesini, zaman kaybı ve yeşil bir çevrenin artmasını sağlayacak çözümler ortaya koymaktadır. Tüm bunların yapılabilmesi için geliştirilen uygulamaların sürekliliği için ise politikalar oluşturulmaktadır. Her ülkede yapılan çalışma ve oluşturulan politikalar farklılık gösterse de temelinde trafik ve çevre problemlerinin başlıca konu olduğu çalışmalar yer almaktadır. Aynı zamanda bilişim ve iletişim teknolojileri ile entegre çalışmalar yapması da hem bilişim teknolojilerine hem de akıllı toplu ulaşım sistemleri uygulamalarına fayda sağlayacağını göstermektedir.

Akıllı toplu ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması, alt sistemlerin ve yapılan uygulamaların sürekliliği için AB tarafından kararlaştırılmıştır. İkincil amaçlar olarak kullanılan sistemler ve paydaşlar arasında entegre çalışmalar yapmak, kesintisiz ve eş zamanlı erişim ile uygulamalardaki devamlılık gibi konular yer almaktadır (Göl 2019).

Dünyada bu konuda aşağıdaki maddeler prensip olarak geliştirilmiştir (Göl 2019).

- Düşük maliyeti hedefleyerek maliyet yönünden etkin olmak
- AB genelinde Akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılmasında etkin olmak
- Kaliteli bir hizmette orantılı olmak
- Hizmetlerin süreklilięini sağlamak,
- Yapılan uygulamalarla entegre olabilmek,

- Altyapı sistemleriyle uyumlu olmak ve farklı araçlar ile koordinasyonu sağlamak,
- Mevcut AB politikalarına uyumun sağlanması,

Ulaştırma araçlarında yolcu bilgilendirmek ve akıllı ödeme sistemlerini ortak uygulamalar ve sistemler üzerinden kullanmak AB politikalarının bu alanda sağladığı sürekli toplu ulaşım imkanıdır. Dünyadaki akıllı toplu ulaşım sistemleri genel olarak incelendiğinde yapılan uygulamalar ile toplu ulaşım içerisinde geçen seyahat sürelerinin ve bekleme sürelerinin kısılmasına, ulaşım kapasitesinin optimum seviyeye getirilmesine, kazaların oranlarının düşmesine ve seyahatte konforun artmasına yönelik katkıları olduğu gözlemlenmektedir (Göl 2019). Uygulamaların farklı araç türlerinde kullanılması araçlar arası aktarma yapmayı kolaylaştırmaktadır. Avrupa'nın Akıllı ulaşım sistemleri direktifinde olan öncelikli alanlar, faaliyet uygulamalarına doğrudan entegre edilmiştir.

Akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması için Amerika'da 'Yenilikçi Teknolojiler ve Stratejiler' adında kanunlaştırılmış politikalar vardır. Bu politikalar ile yolcu odaklı, eş zamanlı sistemler arası entegrasyonun olduğu yaklaşımların geliştirilmesi amaçlanmıştır. ABD'de akıllı toplu ulaşım sistem teknolojilerinin kullanıldığı programlar üzerinde çalışılmaktadır. 2009 yılında ATUS konusu ile ilgili Japonya'da "Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Uluslararası Standardizasyonu" altında Beyaz Kitap Belgesi hazırlanmıştır. Japonya'da akıllı toplu ulaşım sistemlerinin yaygınlaştırılması, bu alanda uygulama yapan endüstrilerin gelişmesi ve uluslararası standartlara uyması için Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalarda ulaşımdaki konfor seviyesinin artırılması ve toplu ulaşım sistemlerinin verimliliğin artması için bilgi ve iletişim teknolojileri kullanılması önemli bir husus olmuştur. Ulaşımında büyük şehirlerde kullanılan akıllı kartlar ve küçük şehirlerde kullanılan akıllı kartlar arasında daha düşük maliyetli kartlar geliştirilerek akıllı kart ve ödeme sistemlerinin küçük kentlerde kullanımı için desteklenecek politikalar geliştirmişlerdir (Göl 2019).

Seul'de toplu ulaşım araçlarının zaman kontrolünü sağlamak, ulaşım araçlarıyla ilgili çeşitli bilgileri sunmak, toplu ulaşım verilerine dayanarak politikalar geliştirmek ve özel araç kullanımını azaltarak toplu ulaşım araçlarını popüler hale getirmek amacıyla geliştirilen otobüs yönetim sistemleri, Transport Operation and Information Service (TOPIS) tarafından sunulan ATUS hizmetlerine örnek olarak gösterilmektedir. TOPIS sistemi, Seul yerel yönetiminin otobüs operasyonlarının verimliliğini artırmak için geliştirdiği otobüs bilgi sistemi ile entegre bir şekilde çalışmaktadır. Bu entegrasyon, otobüslerin konumlarını belirlemek, zamanlamayı analiz etmek ve yolculara bilgi vermek amacıyla Küresel Konumlandırma Sistemi teknolojilerini kullanmaktadır. Ayrıca, bu bilgiler, sistem geliştirme çalışmalarına destek

sağlamak ve karar verme süreçlerinde yöneticilere yardımcı olmak için kullanılmaktadır (Kim 2007).

Toplu ulaşım sistemini çekici hale getirebilmek, özel araç kullanımını azaltmak ve insanların toplu ulaşım araçlarını birinci tercih olarak görmelerini sağlayacak çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak için ATUS uygulamalarının ve bilişim teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılması oldukça önemlidir. Yolcuların duraklardaki bekleme sürelerini ve trafikte geçirdikleri süreyi kısaltmak, toplu ulaşım araçlarının ödeme sistemlerini birbiriyle entegre hale getirmek, konforlu ve güvenli bir ulaşım sunmanın yanı sıra ücretlerin kullanıcılar için makul düzeyde olmasını sağlamak önemlidir. Şehirlerin hızlı ve plansız bir şekilde büyümesi, yüksek nüfus artışı, yakıt tüketiminin artması, çevresel kirlilik, kazalar ve trafik sıkışıklığı gibi problemlere neden olmaktadır. Bu mevcut sorunların çözümü için bilişim teknolojilerine dayalı çalışmalar yapılmakta, yeni sistemler geliştirilmekte, sistemler arası entegrasyon sağlanmakta ve ödeme kolaylığı, güvenlik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi konularda gelişim sağlanması için yerel yönetimler merkezi yönetimler tarafından önemli bütçe ve kaynaklar ayrılmaktadır.

Türkiye’de toplu taşıma seçenekleri, online harita bilgisi tahmini varış süreleri, akıllı kart, güzergah planlaması ve ödeme sistemleri gibi hizmetlere dair bilgilere günümüzdeki kullanıcıların en hızlı erişim sağlayan mobil uygulamaların geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Toplu ulaşımında kullanılan tüm araçların akıllı ulaşım sistemlerine entegre edilmesi amaçlanmaktadır.

Ulaşım ile ilgili hizmetlere odaklanarak uygulamaların geliştirilmesi, veri tabanlı karar destek sistemlerinin oluşturulması, taleplerin daha etkili bir şekilde yönetilebilmesi için yolcu bilgilendirme sistemlerinin geliştirilmesi için açık veri sistemleri uygulanması gibi stratejilere odaklanılmıştır. E-bilet uygulamaları, NFC, QR kod ve temassız ödeme sistemlerinin kullanımının yaygınlaştırılması için uygulamalar yapılmaktadır. Türkiye’de akıllı toplu ulaşım sistemlerinin gelişmesi ve yaygınlaştırılması için projelerin desteklenmesi, sanayi ve endüstriyel kuruluşlarla üniversitelerin birlikte çalışarak uluslararası standartlara uygun uygulamalar üretilmesi hedeflenmektedir (Göl 2019).

Yolcu bilgi sistemleri

Dünya’da trafik sıkışıklığının ve yoğunluğunun artmasının sebeplerinden biri de bireysel araç kullanımının artmasıdır. Akıllı toplu ulaşım sistemleri teknolojilerinden faydalanarak yapılan uygulamalarla bu bireysel araç kullanma oranı azaltılarak yolcuların akıllı ulaşım sisteminin önemli bir parçası olan otobüs gibi toplu taşıma araçlarına yönlendirmek

hedeflenmektedir. Bu sistemlerle yolculara eş zamanlı gerçek veriler verilebilmesi için yolcu davranışı üzerine odaklanılmıştır. Yolcunun eş zamanlı bilgi alması yolculuk süresi, ulaşım türü ve alternatifi, kalkış ve bekleme süreleri hakkında karar vermelerini sağlamaktadır.

Yolcu Bilgi Sistemleri çeşitli bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak yolculara yapacakları seyahat ile ilgili veriler sağlayabilmektedir. Bu noktada bilgi ve iletişim teknolojilerinin yeri önemlidir. Bu sayede mevcut ulaşım olanakları daha iyi kullanılmış olup yolcuların anlık bilgilere göre seçim yaparak konforlu bir ulaşım sürmeleri sağlanmaktadır. Yolcu bilgilendirme sistemleri kullanılarak yolcu davranış değişikliği ile trafik sıkışıklığı, hava kirliliği ve bekleme sürelerinin azaltılması hedeflenmektedir (Doğan 2015).

Enerji ve zaman tasarrufu yolcu bilgi sistemlerinin temel amaçlarından biridir. Yolcu bilgi sistemleri ulaşım araçlarında bulunan GPS konum verilerini kaydetmektedir. Konum verilerini işleyerek yolculara araçların durağa ulaşma süresini hesaplayabilmektedir. Araçların durağa gelme süresi akıllı duraklarda gösterilmekte ve bu sayede yolcu kendini planlayabilmektedir. Duraklardaki ekranlarda gösterilmesinin yanı sıra yolcular uygulamalar yolu ile otobüsün anlık nerede olduğunu ve durağa gelişi için kala süreyi öğrenebilmektedir.

Otobüs Yönetim Merkezi, anlık toplu ulaşım süreçlerini analiz edebilmek için Seoul'de kurulmuştur. Araçların kalkış saatinin iyileştirilmesine yönelik, devamlılığı olan ulaşım sistemleri politika tasarısı düzenlenip uygulanmıştır. Toplanan veriler işlendikten sonra sürücüler ve yolcular için anlamlı hale getirilerek onlarla paylaşılmaktadır. Otobüs Bilgi sistemi olarak adlandırılan bu sistem bilişim teknolojilerini kullanarak araçların kalkış ve seyahat süreleri gibi verileri toplamaktadır. Yolcuların davranışlarına odaklanarak geliştirilen yolcu bilgi sistemleri uygulamalar sayesinde verileri yolculara ulaştırmaktadır (Lee *et al.* 2016).

Yolcu Bilgi Sistemleri, planlanan bir yolculuk için, tercih edilen ulaşım türünün güzergahını ve kalkış zamanını içeren ulaşım bilgilerini sunarak yolculara destek sağlamaktadır. Evde, iş yerinde, parklarda ve binme noktalarında ya da ulaşım istasyonlarında, seyahat öncesinde yolcu bilgilendirmesi sağlanarak, yolcuların daha bilinçli kararlar alması desteklenir. Bu sayede trafik sıkışıklığı azalır ve zaman kaybı önlenir. Akıllı telefonlar, bilgisayarlar, kişisel iletişim araçları, otomatik veri alma sistemleri gibi sistemler kullanılarak seyahatten önce yolculara bilgi verilebilmektedir (Göl 2019). Bu sistemler, otobüslerin izlenmesini, doluluk oranlarının takip edilmesini, trafik durumu ve güzergahtaki bekleme noktalarında bekleyen bir yolcunun, sistemdeki bir otobüsün o durağa olan uzaklığını ve tahmini varış süresini öğrenmesini mümkün kılmaktadır (Çapalı 2009).

Toplu taşıma araçlarının varış süreleri ve seyahat süreçleri ile ilgili detaylı zaman bilgisi, yolcuların endişelerini azaltarak, güvenli ve sakin bir yolculuk deneyimi yaşamalarına katkı

sağlamaktadır. Bu tip sistemler toplu taşıma ağları için güven artırır ve insanları toplu taşımayı tercih etmeye teşvik eder. Bu sistemlerin mevcudiyeti, hizmetin güvenilirlik algısını güçlendirerek toplu taşımanın tercih edilirliliğini artırmaktadır. Mobil uygulamalardan farklı olarak geliştirilen akıllı durak konseptine yönelik çeşitli uygulamalar da bulunmaktadır. Akıllı durak sistemleri, yolcuların seyahat planlamalarına destek sağlayarak, doğru zaman ve yerde olmalarını sağlayan yönlendirmeler sunmaktadır. Bu sistemler, ulaşım hizmeti sağlayan kurumun yönetimini kolaylaştırdığı gibi, aynı zamanda yolcuların durakta geçirdikleri bekleme sürelerini de azaltmaktadır. SafeWay2School sistemi, Avrupa ülkelerinde geliştirilen, çocukların güvenliği odaklı tasarlanmış ve servis araçları ile entegre bir yapıya sahip bir sistemdir. Çocukların üzerlerine takılan vericiler ile duraklardaki vericiler arasında veri iletişimi sağlanarak, duraktan geçen araçlara anında uyarı gönderilmektedir. Çocukların güvenliğini artırarak kazaların önüne geçmeyi hedeflemektedir. Araçlardaki GPS vericileri sayesinde çocuğun bulunduğu durak bilgisi, araç operatörüne iletilerek takip edilebilmektedir. Bu sistem, 2012 yılından bu yana Avrupa'nın birçok ülkesinde aktif olarak kullanılmaktadır (Göl 2019).

ATUS haberleşme alanında kullanılan teknolojiler

Uydu sinyalleri kullanılarak yüksek hassasiyetle konum, hız ve zaman belirleme yeteneği sunan teknoloji, Global Navigasyon ve Uydu Sistemleri olarak bilinmektedir (Göl 2019). Bu teknoloji anlık ulaşım bilgilerini, güzergah, varış süresi ve mesafe gibi bilgilere erişimi sağlayan araç içi navigasyon, konum tabanlı servisler ve rota yönlendirme sistemleri arkasındaki temel teknolojidir. Akıllı toplu ulaşım sistemleri de bu bilgileri depolayarak yolculara bilgiler vermek için bazı haberleşme teknolojilerini kullanılır. Bunlara GPS, GLONASS ve Diğer Uydu Navigasyon Teknolojileri, Wİ-Fİ Teknolojisi, WİMAX Teknolojisi, Bluetooth Teknolojisi, Kızılötesi Teknolojisi, LTE Teknolojisi, GSM Teknolojisi, GPRS Teknolojisi, 4G ve 5G Teknolojileri örnek verilebilir.

GPS teknolojisi

Uydu navigasyon sistemleri arasında öne çıkan Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS), nesnelerin yer yüzündeki konumlarını belirleme amacıyla geliştirilmiş bir teknolojidir. GPS, başlangıçta 1960'ların ortalarında ABD ordusunun ihtiyaçları için tasarlanmış olup, zamanla teknolojinin evrimiyle birlikte bireylerin de günlük kullanımına açılmıştır. GPS alıcıları otomobillerden akıllı telefonlara, egzersiz saatlerinden CBS cihazlarına kadar birçok sistem ve teknolojiyle entegre bir şekilde kullanılmaktadır. GPS sistemi, genel olarak GPS uyduları, yer kontrol istasyonları ve GPS alıcıları olmak üzere üç ana bileşeni içermektedir (Pehlivan 2005).

GPS teknolojisi, bireysel cihazlardan toplu ulaşım araçlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılmakta olup, özellikle cep telefonları, kol saatleri gibi kişisel cihazlarda vazgeçilmez bir konuma sahiptir. GPS, ulaşım sektöründe kazaların önlenmesinde etkili bir rol oynamaktadır (Göl 2019).

Kablosuz iletişim teknolojisi, kısa mesafeli iletişimde kullanılan bir türdür ve hem ağ yapıları üzerinden hem de noktadan noktaya iletişim kurma imkanı sağlayan bir teknoloji olarak karşımıza çıkar. Kızılötesi, bluetooth, Wi-Fi gibi teknolojiler bunlara örnek verilebilir. Bunların ulaşım sektöründe kullanılması ile araçların birbiri arasında, yol kenarı ile arasında, trafik işaretleri arasında, sürücü ile yolcu ve araç arasında hızlı ve anlık iletişim sunmaktadır.

Kızılötesi teknolojisi

Yüksek hızla çalışıp düşük maliyetli sistemler olan kızılötesi teknolojisi ile güvenli veri aktarımı sağlanabilmektedir. Veri aktarımının akıcı olması için alıcı ve verici arasında herhangi bir engel bulunmaması gerekmektedir. Kızılötesi ışınlar cam gibi saydam yüzeylerden geçebilirler. Kızılötesi alıcı ve kızılötesi verici ile kızılötesi iletişimini araçlarda ve cihazlarda kullanılabilmektedir. 5-6 metre mesafedeki cihazları kontrol etmek bu teknolojilerle mümkündür. Yolcu bilgilendirme sistemlerinde ve akıllı toplu ulaşım sistemlerinde yol ve seyahat bilgilerinin gerçek zamanlı veri aktarımında ve paylaşımında kullanılmaktadır (Göl 2019).

Wifi teknolojisi

Wifi teknolojisi kablosuz yerel ağı oluşturmak için ev, iş ve diğer ortamlarda tercih edilmektedir. Wi-Fi özellikli cihazlar, birbirleriyle kablosuz ağ oluşturmak için radyo frekanslarını kullanırlar. Wi-Fi dağıtıcıları birçok alıcı cihaza bağlanabilir ve çift yönlü veri iletimi gerçekleştirebilirler. Bu teknoloji, 2.4GHz ile 5GHz frekans aralıklarını destekler. Bu sayede geniş çaplı internet hizmetini de toplu alanlarda kişilere sunmaktadır (Göl 2019).

Toplu ulaşım araçları, içinde bulunan Wi-Fi cihazları aracılığıyla LTE, mobil hat üzerinden internete erişim sağlar. Bu araçlarda yer alan kameralar, validatörler ve yolcuların mobil cihazları, Wi-Fi router üzerinden internet bağlantısı kurar. Şekil “2” de gösterilen toplu ulaşım sisteminde kullanılan bu teknoloji sayesinde ulaşım kontrol merkezlerine gerçek zamanlı veri aktarımı sağlanabilmektedir.



Şekil 2. Otobüslerde Wi-Fi teknolojisi (Anonymous, <https://www.dataweek.co.za/15313r> 15.12.2004).

Örneğin, araç içi Wi-Fi bağlantısı sayesinde, araçtaki sensörlerden veya kameralardan elde edilen anlık veriler dijital ikizde kullanılarak aracın durumu, yolcu sayısı gibi bilgileri güncel tutmaktadır ve ulaşımın güvenliğinin, ulaşım araçlarının bakımının dijital ortamda takip edilmesine olanak tanımaktadır.

Bluetooth teknolojisi

Dünyada 2000’li yıllardan beri kullanılan bu teknoloji, cihazlar arasında kablosuz veri transferini sağlamak için kullanılan bir yöntemdir ve günümüzde halen birçok cihaz tarafından desteklenmektedir. Bluetooth teknolojisi, özellikle akıllı cihazlar ve kameralar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu teknoloji, aynı anda 8 cihaza kadar bağlantı sağlayabilen Bluetooth alıcı ve vericilerini kullanarak 10-12 metre mesafede iletişim kurabilir. Özellikle toplu ulaşım araçları için duraklarda veya istenilen noktalarda veri iletişimi yapabilen bu cihazlar, konum bilgisi veya araçla ilgili çeşitli bilgileri aktarabilir (Göl 2019).

LTE (Long Term Evaluation), GSM (Global System for Mobile Communication) ve 4G ve 5G gibi teknolojiler mobil cihazlarda kullanılan veri iletişim teknolojileridir (Ekren ve Kesim 2016). Toplu ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ve internet erişiminde kullanılan başlıca teknolojilerdir.

LTE teknolojisi

Kablosuz veri iletimi için kullanılan yüksek hızlı ağ teknolojileri LTE (Long Term Evolution) olarak adlandırılmaktadır. Bu teknoloji 50 Mbps veri yükleme, 100 Mbps veri indirme kapasitesine sahiptir. Yüksek bant genişliği gerektiren veri aktarımlarında düşük bekleme süreleri sağlayarak internet erişimini hızlandırmaktadır. Bu standartı GSM operatörleri ve telekomünikasyon şirketleri kullanmaktadır. Mobil iletişim teknolojilerinde 4G ve üzeri teknolojiler, bu teknoloji üzerinden kullanılmaktadır. Cep telefonu iletişiminde kullanılan en

yaygın protokol olan GSM (Global System for Mobile Communication) dünya genelinde 900-1900 MHz frekans aralıklarında faaliyet göstermektedir. Bu teknoloji, veri iletişimini GSM operatörlerinin kurduğu baz istasyonları aracılığıyla gerçekleştirdiği gibi sesli mesaj, faks, mesaj ve yüksek kapasiteli veri iletişimi gibi çeşitli hizmetleri de desteklemektedir (Göl 2019).

4G ve 5G teknolojisi

Bobil telefonlardaki hızlı gelişimle birlikte 4G teknolojisi, günümüz akıllı telefonlarının ihtiyaç duyduğu yüksek hızlı interneti, düşük maliyetli IP tabanlı ağ sistemleri üzerinden sunmaya başladı. Hızla evrilen akıllı cihazlar ve artan görüntü kalitesi, hızlı veri talebini artırarak, bu bağlamda yeni teknolojilere olan ihtiyacı tetiklemektedir. 4G teknolojisinin hemen ardından geliştirilen 5G teknolojisi 1 Gbps'den fazla bant genişliği ve 25 Mbps bağlantı hızı gibi, veri trafiği açısından en yüksek kapasiteye ulaşacaktır.

Bu bilgilere bakıldığında 4G ve 5G yolcu bilgi sistemleri ve dijital ikiz için avantajlar sunmaktadır. Yolcu bilgisi sistemleri bakımından yolcuların akıllı toplu ulaşım için zengin medya içeriklerine ulaşması, otobüsler hakkında anlık verilere hızlı bir şekilde ulaşabilmesi, canlı güzergah takipleri ile haritalara ulaşım hızlı ve akıcı erişime olanak sağlamaktadır. Dijital ikiz bakımından ise dijital ikizlerin gerçek verileri anlık takip etmesini, hızlı veri iletişimi ile karar etkili kararlar almasını ve gerçekçi ve güvenilir simülasyon sonuçları üretmesine katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu teknolojiler toplu ulaşım sistemlerinin dijital ikizinin oluşturulması ve verilerinin güncellenmesinde önemli bir rol oynar. Bu sistemler sayesinde elde edilen gerçek zamanlı veriler, gerçek dünyadaki ulaşım sistemini sanal bir modelle eşleştirmek ve daha akıllı ve etkili bir ulaşım yönetimi sağlamak için kullanılmaktadır.

Akıllı kart ve ödeme sistemi ve kullanılan teknolojiler

Toplu ulaşım araçlarında, yolcuların nakit ödeme yapmadan seyahat etmelerini sağlayan sistemler, aynı zamanda kullanıcı verilerini işleme olarak saklama görevini de üstlenir (Yardım ve Akyıldız 2005). Bu alanda NFC((Near Field Communication), RFID (Radio Frequency Identification) ve QR kod gibi birçok teknoloji kullanılmaktadır.

Günümüzde, ödeme işlemleri sadece akıllı kartlarla sınırlı kalmayıp, yakın alan iletişim teknolojileri, radyo frekans dalgaları ve QR kod teknolojisi gibi akıllı ödeme sistemlerinin kullanımıyla da gerçekleştirilebilmektedir. Bu teknolojiler, mobil cihazlardaki okuyucuların veya vericilerin yanı sıra duraklara veya ulaşım araçlarına entegre edilen alıcılar veya kodlar aracılığıyla ödeme işlemlerini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, mobil telefonlardaki NFC teknolojisi de mobil cüzdanlar veya yolcu bilgi sistemleri uygulamaları ile entegre olarak, toplu

ulaşımda seyahat ücretlerini ödemek için kullanılan en yeni teknolojiler arasında bulunmaktadır (Kim ve Kang 2005).

RFID, nesneleri tanımak için kullanılan bir yakın alan iletişim teknolojisi olan Radyo Frekans Tanımlama Teknolojisi'dir (Radio Frequency Identification). Bu teknoloji, nesnelerin üzerindeki kodlanmış mikroişlemciye sahip etiketlerin bir okuyucu yardımıyla tanınmasını sağlar ve veri alışverişini radyo frekansı üzerinden gerçekleştirir. Etiketler içinde bulunan mikroişlemciler, nesneye ait verileri taşır. Bu etiketler, antenler aracılığıyla RFID okuyucular tarafından takip edilebilir ve yönetilebilir. NFC (Near Field Communication), mobil cihazlarda bulunan ve yakın mesafeden radyo frekanslarıyla iletişim sağlayan temassız kart teknolojisidir, bu da hızlı ve güvenli bir iletişim yöntemi sunar. Mobil cihazlar üzerinde NFC teknolojisi, temassız ödeme uygulamalarını destekleyerek mobil ödeme seçeneklerini çeşitlendirir. Ulaşım sektöründe ise NFC'nin kullanımı, mobil bilet uygulamaları ve temassız okuyucular gibi alanlarda toplu ulaşım operatörleri ve kullanıcılar için çeşitli avantajlar sunar. NFC'nin toplu ulaşımdaki kullanımı, mobil ödeme sistemlerinin ve temassız özellikli RFID sistemlerinin entegrasyonunu mümkün kılar. Bu gelişmeler, toplu ulaşımın daha erişilebilir, hızlı ve pratik bir hale gelmesine katkı sağlar (Göl 2019).

Akıllı toplu ulaşım sistemlerinde, NFC (Near Field Communication) ve QR kodları, yolcuların seyahat deneyimini zenginleştiren önemli teknolojilerdir. NFC, kısa mesafeli kablosuz iletişim sayesinde hızlı ve güvenli yolcu kimliği tanımlama, ödeme işlemleri ve bilet geçişleri sağlar. Akıllı kartlar veya mobil cihazlar üzerinde bulunan NFC etiketleri, entegre ödeme sistemleriyle birleştirilerek kullanıcıların seyahat belgelerini dijital olarak taşımalarına olanak tanır. QR kodları ise hızlı tanıma ve izleme özellikleri sayesinde, yolcuların biletleri ve bilgileri üzerindeki kodları tarayarak kolayca geçiş yapmalarını sağlar. Ayrıca, QR kodları mobil uygulamalarda sıkça kullanılır ve kullanıcılara hızlı bir şekilde güzergah bilgilerine, kampanyalara ve indirimlere erişim imkanı sunar. Bu teknolojiler, kullanıcıların seyahatlerini daha kolay ve etkili bir şekilde yönetmelerine olanak tanırken, dijital ikiz konseptiyle birleştirildiğinde, gerçek zamanlı veri analitiği ve öngörülebilirlik gibi daha gelişmiş özelliklere de kapı aralamaktadır. Yolcular, bu entegre sistemlerle seyahat bilgilerini dijital ikizleri üzerinden takip edebilmekte, anlık güncellemeler alabilmekte ve ulaşım hizmetlerinden daha verimli bir şekilde yararlanabilmektedir.

Toplu taşımada akıllı yaklaşımlar

Şehirlerin nüfusları arttıkça sahip olunan araç oranı arttığından araç-nüfus oranı büyümektedir. Buna bağlı olarak ulaşım sistemlerinde sorunlar meydana gelmektedir. Ulaşım kontrol merkezleri bu sorunları tespit edip normal trafik akışını sağlamak için

kullanılmaktadırlar. Bu sorunları tespit etmek için şehirlerde akıllı sistemler kullanılarak ulaşımın geliştirilmesi, sanal bir ortamda dijitalleşmesi sağlanmaktadır.

Ulaşım kontrol merkezleri yol ağının izlenmesi, ulaşım sistemindeki araçların koordinasyonu, alternatif güzergahlar hakkında bilgilendirilmesi, verimli trafik akışının organizasyonu ve ulaşımındaki acil durumların sonuçlarının ortadan kaldırılması üzerindeki kontroller gibi görevleri yerine getirmektedir. Akıllı ulaşım sistemleri, yol ağındaki akışların düzenlenmesinde ve sistemlerin modellenmesinde, güncel gelişmeleri kullanarak ana verilere daha güvenli ve daha çok bilgi içeriği ile ulaşmamızı sağlamaktadır. Bu sistemlerin başında gelen, kent içi ulaşım sorunlarını çözmek için matematiksel modelleme yöntemlerini kullanan dijital ikizler yer almaktadır. Araçların ve yayaların optimizasyonu, toplu taşıma, trafik akış yönetimi ve ulaşım altyapısının inşasında dijital ikiz modellemeleri kullanılarak çözümler sağlanmaktadır.

Akıllı toplu ulaşım sistemlerinde akıllı duraklar, yolcu bilgi sistemleri ve akıllı ödeme sistemi yaklaşımları mevcuttur. Yolcu bilgi sistemler yolculara toplu taşıma süreçleri ile ilgili bilgileri sağlamaktadır. Toplanan bilgileri iletmek için ise bilgi teknolojilerinin yanı sıra iletişim teknolojilerini de kullanmaktadır. Bu sistemler otobüslerde GPS konum verileri olarak analiz eder ve bu konum verileri ile otobüsün durağa ulaşmasındaki süreyi hesaplamaktadır. Elde edilen bilgiler duraklarda yolcularla paylaşılmaktadır. Yolcular ise bilgi teknolojileri ile desteklenen uygulamalar sayesinde bilgilere ulaşabilmektedir. Bu sayede yolcular gerçek zamanlı olarak otobüslerin rotaları hakkında bilgi sahibi olup kalkış bilgilerine ve güzergahlara ulaşabilmektedir. Akıllı durak olarak da adlandırılan bu durum sayesinde yolcuların durakta bekleme süreleri de azalmaktadır. GPS ve diğer verilerin kullanımı sonucu seyahat süreleri tahmin edilebilir, rotalar GPS ile alınan veriler sayesinde optimize edilebilmektedir.

Toplu ulaşım araçları, kameralar, validatörler ve yolcuların mobil cihazları gibi bir dizi cihaz, Wi-Fi router aracılığıyla internete bağlanır. Bu bağlantılar sayesinde toplu ulaşım bilgi sistemlerini yöneten merkezlere veri aktarımı yapılır. Ayrıca, toplu ulaşım araçlarındaki Wi-Fi cihazları, LTE (mobil hat) üzerinden internete çıkış sağlar. Toplu taşımalarda Bluetooth veya Wi-Fi aracılığıyla araçlara bağlanılmakta ve trafik koşulları hakkında birbirleriyle iletişime geçebildikleri gibi sensörler ve kameralar aracılığı ile de toplu taşımadaki verileri gerçek zamanlı olarak yönetim merkezlerine aktarmaktadır.

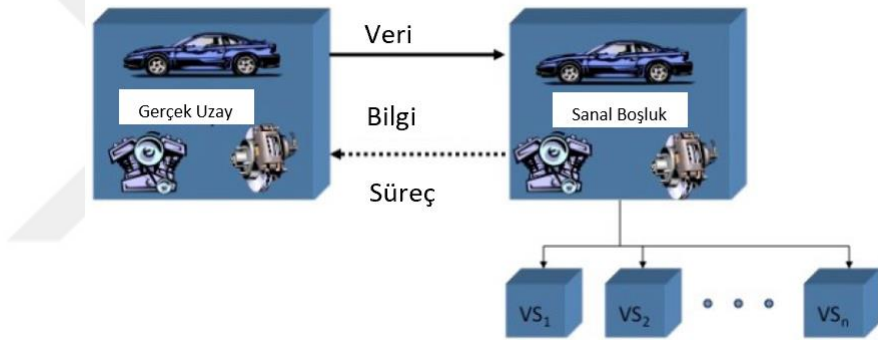
Dijital İkiz

Sanayi ve ürün tasarımında yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, büyük veri odaklı ürün ve süreç tasarımı dönemi başlamıştır. Buna bağlı olarak, fiziksel ve sanal

dünyayı birbirine bağlayan, yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz kavramı ortaya çıkmıştır.

Algılama, modelleme ve hesaplama gibi bilgi teknolojilerini kapsamlı bir şekilde kullanan dijital ikiz, sanal ortamda dijital formdaki fiziksel alanla tutarlı, yüksek kaliteli bir model oluşturur. Fiziksel alandaki bilgi, gerçek zamanlı geri bildirimi ve veri bütünleşmesi sayesinde nesnelerin davranışlarını simüle edebilir, fiziksel alanı izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kararlar alarak fiziksel alan ve sanal alan arasındaki etkileşimi gerçekleştirebilir (Tao ve Qi 2019).

Michael Grieves 2002 yılında Michigan Üniversitesi Üretim Mühendisleri Topluluğu konferansında ilk dijital ikiz konseptini sunmuştur. Dijital ikiz konseptini Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi için kullanılan modeli baz alarak önermiştir. Bu model gerçek alan, sanal alan ve bu alanların birbirleri arasındaki bilgi için bağlantı iş akışı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Bu kavram Bilgi Yansıtma Modeli olarak adlandırılmıştır (Grieves, 2006).



Şekil 3. Dijital ikiz (Hocaoğlu 2022)

Akıllı üretim çağında dijital ikizi temel araştırma alanlarından biri haline getirmesi veri toplama teknolojilerinin ve dijital teknolojilerin gelişiminden kaynaklanmaktadır. Dijital ikiz NASA'nın eşleşme teknolojisi ile doğmuştur. Bu kavram 2010 yılına kadar farklı isimlendirmelere sahiptir. 2010'da NASA tarafından yayımlanan 20 yol haritası raporunda ise günümüzde halini alarak dijital ikiz olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk dijital ikiz ise yine NASA tarafından Apollo 13 görevi için yapılmıştır. Astronotlar bu dijital ikiz modeli ile başarısızlıklar ve kurtarma senaryoları için eğitimler almıştır. Apollo 13'ün görevi sırasında oksijen deposu patlamış ve dünyaya geri dönüş yapmak zorunda kalmıştır. Dijital ikiz sayesinde başarısızlıklar eş zamanlı işlenmiş ve astronotlar güvenli bir şekilde geri dönüş yapabilmişlerdir.

İkizler prensipleri

İkizler ilkeleri üç ana kategoride düzenlenen ilkeler Amaç, Güven ve İşlev'dir. Dijital ikizi sistemlerin, süreçlerin ve varlıkların fiziki veya doğal ortamdaki gerçekçi dijital temsili olarak ikizler ilkeleri tanımlamaktadır. Dijital ikiz fiziksel modele bağlı dinamik bir modeldir. Bu da dijital ikizi diğer dijital modellerden farklılaştırmaktadır. Buna fiziksel bir alan hakkında eş zamanlı gerçek verileri tutan sensörler veya kameralar örnek olarak verilebilmektedir. Belirli doğruluk düzeyine sahip olan dijital ikizler veri, model ve görselleştirmelere bağlı olarak fiziksel gerçeklikleri sunar.

Dijital ikiz mimarisi

İkizler Altı başlık altında gruplandırılan dijital ikiz mimarisi oluşturma, iletişim, toplama, analiz, anlama ve kavrama ve eylem işlem adımlarından oluşmaktadır. İşletmeler genellikle aşağıdaki adımları kullanarak modellemelerini yaparlar.

Oluşturma: Birçok sensör ile donatılan fiziksel işlemlerin sürecini ifade eder. Önemli girdi verilerinin oluşturulduğu adımdır. Sensörler ve çeşitli araçlarla toplanan verileri sınıflandırdığımızda iki grup meydana gelir. Gerilme kuvveti, tork, renk bütünlüğü ve yer değiştirme gibi üretken varlığın fiziksel performans kriterlerine ilişkin operasyonel ölçümler bunlardan ilki olarak sıralanmaktadır. Barometrik basınç, nem seviyesi ve ortam sıcaklığı gibi fiziksel varlığın süreçlerini etkileyen çevresel veya harici veriler ise ikinci olarak sıralanmaktadır. Yapılan analog ölçümler bu sistemlerde farklı dijital araçlar tarafından sayısal verilere dönüştürülerek sanal ortamdaki yani bilgisayarlardaki dijital ikizlere iletilir (Aydın ve Yükçü 2020).

İletişim: Dijital ve fiziksel ortam arasındaki anlık çift taraflı veri akışını sağlar. Uçta hesaplama, İletişim arayüzleri ve Uç güvenlik olmak üzere iletişim üç ana unsura bağlıdır.

Uçta Hesaplama: Veri ortamına kaynaklardan gelen işaretleri ve bilgileri işleyerek aktarır. Bu sayede bazı zor anlaşılan verilerin kolay veri formatlarına dönüştürmeyi ve ağ iletişimindeki zorlukları ortadan kaldırmayı sağlar.

İletişim Arayüzleri: Sensörler ve duyarılardan entegrasyon ortamına bu araçlar ile veriler aktarılır.

Uç Güvenlik: Gelişen dijital çağda yeni güvenlik tehlikeleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Uygulama anahtarları, şifreleme, sertifikalar ve güvenlik duvarı gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Toplama: Veri akışları sonucu elde edilen verilerin toplanması ve işlenmeye incelenmeye hazır hale getirilmesi sağlanır.

Analiz: Toplanan verilerin incelendiği yapılır ve sunuma hazır hale getirilir.

Anlama/Kavrama: Analiz adımıdaki veriler sunulur, değişiklik olacak alanlar için fiziksel ortamdaki farklılıklar dijital ikiz modeli ile ortaya konur.

Eylem: Bu adım ile birlikte önceki adımlarda elde edilen ve karar verilen bilgilerin fiziksel ortama geri bildirim yapılması gerçekleşir (Aydın ve Yükçü 2020).

Otobüs işletmeleri de yukarıdaki adımları kullanarak modellemelerini oluşturabilirler. Bu modellemeleri yapmak için ise adımları belirleyen iş akış şemalarına ihtiyaç duymaktadır. Yolcuların otobüse biniş ve iniş işlemlerinin dijital ikiz yaklaşımı ile iş akış şemasını açıklayan temel adımlar aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir.

Veri Toplama ve Sensörler: Otobüs duraklarına yerleştirilen sensörler, sayesinde duraklara gelen yolcular algılanabilmektedir. Bu sensörler sayesinde de duraklardaki yolcu sayısı sayılmaktadır.

Yolcu Bilgilendirme: Dijital ikiz sistemleri gerçek zamanlı olacak şekilde yolculara otobüs saatlerini ve durak bilgilerini sağlayabilir. Bu bilgiler duraktaki dijital ekranlar, telefonlardaki uygulamalar veya web siteleri aracılığıyla sunulmaktadır.

Yolcu Beklemesi ve İzleme: Yolcuların bekleme süreleri ve sıraları dijital ikiz tarafından izlenip analiz edilip hesaplanabilmektedir.

Otobüs Bilgilendirme: Ulaşım kontrol merkezine yolcu sayısı ve yolcuların duraklara ne zaman geldiği ile ilgili veriler sunulmaktadır. Bu sayede yolcu yoğunluğu yönetilebilmektedir.

Yolcuların Otobüse Binmesi: Otobüse binerken akıllı kartlar veya dijital ödeme sistemleri kullanılması ile bu veriler dijital ikiz tarafından kaydedilmektedir.

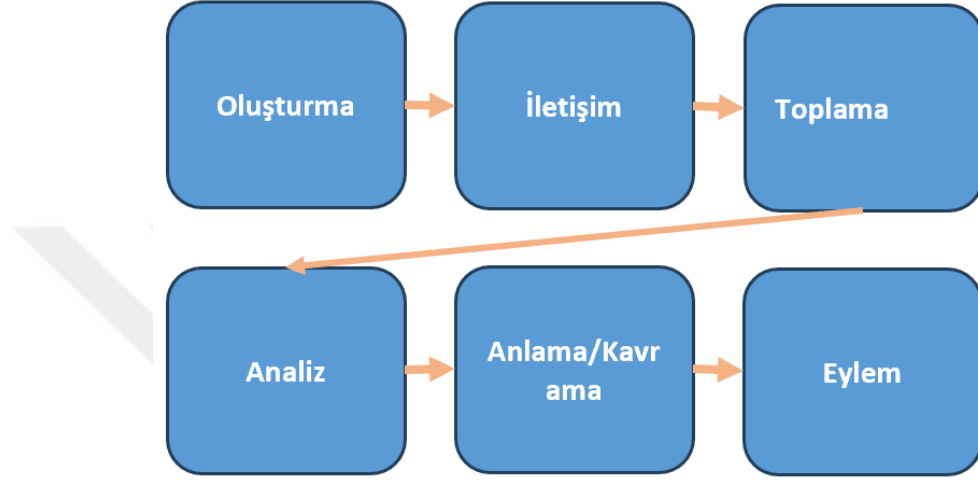
Yolcu Sayımı: Otobüse binen yolcular otobüsün içindeki sensörler veya kameralar aracılığı ile sayılmaktadır. Yolcu sayısı dijital ikiz tarafından anlık olarak izlenebilmektedir.

Otobüs Hareketi ve Güzergah İzleme: Otobüsün seyahati ve güzergahı dijital ikiz tarafından izlenir. Bu, otobüsteki yolcu sayısını ve duraklara ulaşma süresini belirlermektedir.

Yolcu İnişi: Otobüs duraklarına ulaştığında yolcular otobüsten inerler. Otobüsteki sensörler ve kameralar sayesinde de bu veriler anlık gözlemlenebilmektedir.

Yolcu Bilgilerinin Kaydedilmesi ve Analizi: Otobüse biniş ve iniş verileri dijital ikiz sistemlerinde olan sensörler ve kameralar sayesinde veri olarak toplanabilmektedir. Bu veriler, yolcu hareketlerini analiz etmek, otobüs güzergahlarını optimize etmek ve toplu taşıma hizmetini iyileştirmek için kullanılır.

Dijital İkiz Analizi ve Raporlama: Dijital ikiz, toplanan verilere göre analizler yapar. Bu analizler ulaşım sistemlerinin performans değerlendirmelerine yardımcı olacağı gibi seferlerin optimizasyonunu da sağlamaktadır.



Şekil 4. Dijital ikiz mimarisi

Dijital ikiz faydaları ve kullanım alanları

Dijital ikizin potansiyel avantajlarına göz attığımızda, üretim planlamasının en iyi duruma getirilmesi, risklerin ve darboğazların tespit edilmesi, üretim süreçlerinin minimize edilmesi ve kullanılan kaynakların değerlendirilmesi gibi faydalar sayılabilir. Dijital ikiz, toplam yaşam döngüsü yaklaşımını benimseyerek fiziksel ikizinden ayrılmaktadır. Bu kavramın getirdiği kolaylıklar arasında ürün tasarımı, yeni ürün tanıtımı, üretim süreçlerinin kurulumu ve bütünleşik tedarik zincirinin yönetimi bulunmaktadır. Ayrıca, tasarım, simülasyon ve yaygın olarak karşılaşılan modelleme mühendisliği uygulamalarıyla kıyaslandığında, bir dijital ikizin temel farkı gerçek ve sanal kısım arasında kalıcı ve iki yönlü bir bağlantı sağlamasıdır (Aydın ve Yükü 2020).

Dijital ikiz, ürün yaşam döngüsünün uzatılması, üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve ürün geliştirme aşamalarında çeşitli çözümler bulma ve araştırma imkanı sunarak önemli bir etki yaratmıştır. Bu bağlamda, maliyet temel bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bilindiği üzere fiziksel bir ortamın test edilmesi veya tekrar oluşturulması pahalı bir süreçtir. Ancak, dijital ikiz ile gerçek dünyada bulunan fiziksel ortamın gerçek verileriyle dijital bir ikiz oluşturulduğunda, bu çözümler ve işlemler maliyet ve uygulanabilirlik açısından daha kolay bir şekilde

gerçekleştirilebilmektedir. Dijital ikizler sayesinde oluşabilecek sorunları daha önceden sanal ortamda test ederek veya anlık verilerle okuyarak daha hızlı aksiyon alınabilir ve sorunlar maddi kayıplara yol açmadan önlenir. Dijital ikizin bir çok sektörlerde de kullanım alanları vardır.



Şekil 5. Dijital ikizin kullanıldığı sektörler (Attaran ve Çelik 2023)

Dijital ikiz teknolojisi müşterinin ihtiyaçlarını analiz ederek ürünlerde ve hizmetlerde iyileştirmeler yaparak müşteri memnuniyetini arttırmaktadır. Böylece üretime yardımcı olmaktadır. Bu teknoloji sayesinde kullanılan ekipmanların ne zaman yıpranacağı veya bakımının yapılması gerektiği önceden tahmin edilebilmektedir. Kullanılan araçların, makinelerin performanslarında iyileştirme yapılabilir ve ömrü uzatılabilir. Kısacası ürün ve süreç tasarımı ile optimizasyonunda, tedarik zinciri yönetiminde, önleyici bakımda dijital ikiz önemli bir yer tutmaktadır.



Şekil 6. Dijital ikiz kullanım alanları (Attaran ve Çelik 2023)

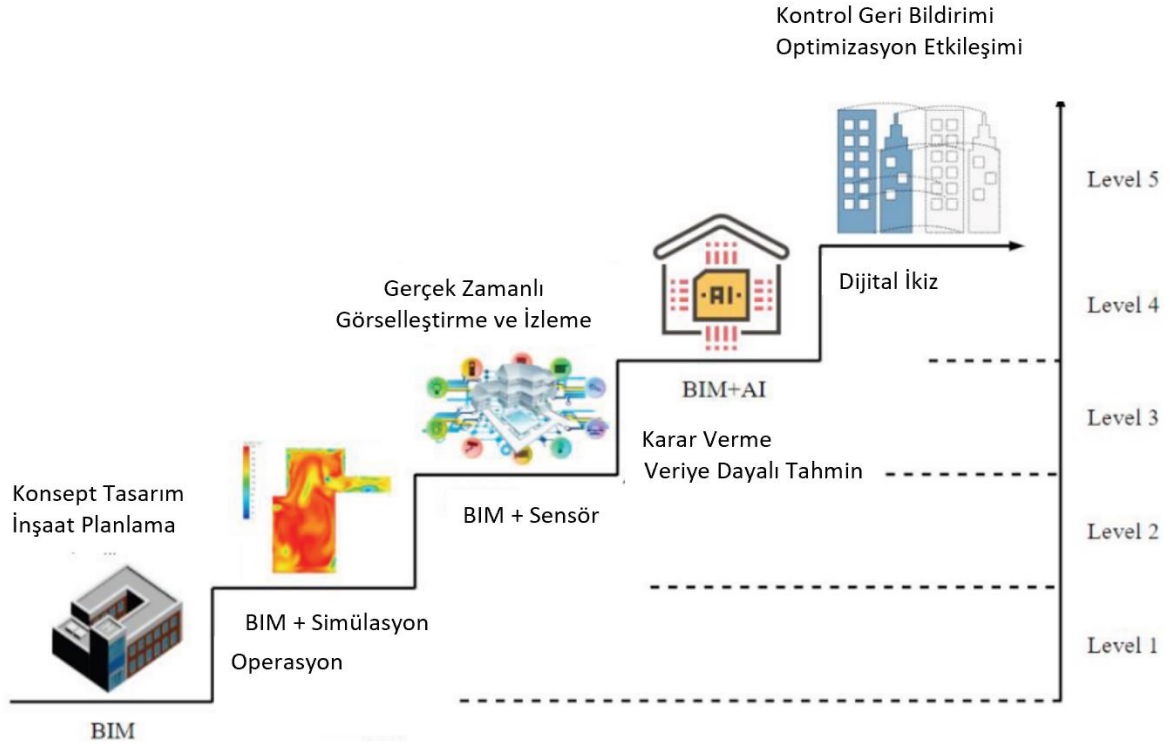
Tarım sektöründe çiftlik yönetimi ve kaynak optimizasyonu için dijital ikizlerden yararlanılır. Tarım süreçleri mevsimsellik, iklim, hava durumu gibi durumlara bağlı olduğu için dinamik bir sürece sahiptir. Dijital ikiz sayesinde tarım endüstrisinin ihtiyaçları analiz edilerek problemler ortadan kaldırılması için geliştirmeler yapılmaktadır. Tarımsal dijital ikiz hava durumu modellemesine ve iklim değişikliğinin etkilerinin de tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Mahsullerin yetiştiği toprağın kalitesi, kapasitesi ve içeriği ile ilgili verileri ölçmemizi ve analiz etmemizi, aynı zamanda da bu toprağa ihtiyaç duyan tohumlar hakkında analiz yapmamızı sağlamaktadır.

Sağlık sektöründe ise covid-19 salgını dijital dönüşüm çabalarını hızlandırmaya zorlamıştır. Dijital ikiz çözümleri sağlık tesislerinin, hastaların ve tıbbi cihazların dijital yani sana modellerinin oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu sayede sağlık tesislerinin ve tıbbi cihazların öngörücü bakımı ve maliyetleri ile ilgili tahmin de yapılabilmektedir.

Otomotiv endüstrisinde ise birçok üretici, müşteri etkileşimini artırmak için web sitelerinde interaktif otomobil gösterge panoları kullanan Dijital İkizler gibi teknolojileri kullanmaktadırlar. Bu teknolojiler sayesinde müşteri araçları kişiselleştirebildikleri için şirketler bu davranışları izlemek ve modellerde geliştirmeler yapmak için kullanmaktadırlar.

İnşaat sektöründe Yapı Bilgi Modellemesi ile dijital ikizler benzerlik göstermektedir. Yapı Bilgi Modellemesi bir projenin fiziksel özelliklerini dijital ortamda temsilidir. Ancak Dijital ikiz ve Yapı Bilgi Modellemesi arasındaki temel fark yapı bilgi modellemesi statik veriler sağlarken Dijital ikizler sensörler ve çeşitli kameralar sayesinde yöneticilerin, tasarımcıların ve müşterilerinin projelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir. Proje

yöneticileri bu sayede süreci izleyebilir ve olası sorunları önceden tespit edebilir ve projenin güvenliği ile maliyeti konularında çeşitli stratejiler geliştirebilirler.



Şekil 7. BIM'in dijital ikizlere evrimi (Aktürk 2022)

Dijital ikiz uygulamalarını ele alan literatür incelendiğinde, büyük veri, yapay zeka (AI), nesnelerin interneti (IoT), artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve blok zinciri teknolojilerinin destekleyici olduğu ve elde edilen yüksek hacimli verilerin işlenmesi, depolanması ve yanıtlanması için uyarlandığı görülmektedir (Aktürk 2022).

Nesnelerin interneti

IoT kavramı, fiziksel nesnelerin (mekanik veya dijital araçlar, canlı varlıklar, nesneler vb.) sensörler ve yazılım gibi teknolojilerle desteklenerek birbirine bağlandığı ve internet veya diğer bağlantı türleri üzerinden veri alışverişi yaptığı bir ağı temsil eder. Dilakshan ve ekibinin (2021) tanımına göre, IoT bir "Şeyler" sistemi olarak kabul edilir ve bu "Şeyler", İnternet veya özel bir ağ aracılığıyla birbirine bağlı olan ve çoğunlukla insan müdahalesi olmaksızın iletişim kuran "akıllı cihazlar" olarak adlandırılır. IoT cihazları, endüstrinin hızlı gelişimi ile son yıllarda muazzam bir genişleme yaşamış ve birçok sektöre yayılmıştır (Liang ve diğerleri, 2021). Radyo frekansı tanımlama, küresel konumlandırma sistemleri ve diğer bilgi algılama cihazları kullanılarak, bu, bilgiyi güvenli ve etkili bir şekilde paylaşabilen akıllı bir algılama ağı oluşturur. C. Zhang ve ekibinin (2022) ifadesine göre, IoT teknolojisinin bileşenleri aşağıdaki dört ana katmanda toplanmaktadır:

Algılama Katmanı: Gerçek dünyada meydana gelen fiziksel olayları, miktarları, kimlikleri ve konumları toplama görevini üstlenen algılama katmanı önemli bir rol oynar.

Ağ Katmanı: Bağlantı türleri, internet, mobil veya kablosuz ağ, ağ katmanının temelini oluşturur.

Uygulama Katmanı: Analiz ve karar alma süreçlerini tamamlamak için şeyler ile insanlar arasındaki etkileşim, uygulama katmanı tarafından gerçekleştirilir; ayrıca işbirliğini ve paylaşımı teşvik etmek amacıyla kullanılır.

Kamu Teknolojisi: Tanıma ve çözünürlük, güvenlik ve ağ yönetimi açısından tüm IoT katmanları, kamu teknolojileri ile bağlantılıdır (Aktürk 2022)

IoT (Nesnelerin İnterneti), ulaşım sektöründe birçok alanda kullanılmaktadır. Ulaşımında kullanıldığı bazı örnekler aşağıdaki gibidir.

1. Araç Takip ve Lojistik Yönetimi: IoT, taşıma araçlarını yönetmek ve takip etmek için kullanılır. Bu sayede filo yöneticileri, araçların bakım ihtiyaçlarını, konumunu, hızını ve yakıt tüketimini gerçek zamanlı olarak izleyebilirler.
2. Akıllı Trafik Yönetimi: IoT sensörleri, trafik sıkışıklıklarını önlemeye yardımcı olmak için trafiğin yoğunluğunu ve akışını ölçmektedirler. Akıllı trafik ışıkları ve yönlendirme sistemleri, trafiği düzenlemek ve sorunları önlemek için IoT teknolojisini kullanır.
3. Araç Güvenliği: IoT, araçlarda kullanılan güvenlik sistemlerini destekler. Akıllı park sensörleri ve çarpışma önleme sistemleri gibi özellikler, IoT ile entegre edilerek sürücü güvenliğini artırılabilir.
4. Akıllı Ulaşım Sistemleri: Şehirler, toplu taşıma araçları ve trafik yönetimi için IoT tabanlı akıllı ulaşım sistemleri kullanabilir. Bu sistemler, seyahat edenlerin güzergahlarını, varış sürelerini, bekleme sürelerini ve araçların durumunu takip etmelerini sağlamaktadır.
5. Otopark Yönetimi: Akıllı otoparklar, IoT sensörleri sayesinde boş otopark alanlarını tespit edebilir ve sürücülere boş alanları göstererek park etme işlemini kolaylaştırabilir.
6. Araç İletişimi: IoT sensörleri sayesinde araçlar birbirleriyle ve çevre altyapısıyla iletişim kurabilir. Bu, trafik koordinasyonunu ve kazaların önlenmesini sağlar.
7. Yük Taşıma ve Takip: Nakliye endüstrisinde, IoT sensörleri sayesinde gönderilerin konumu, durumu ve sıcaklığı gibi bilgileri izleyerek tedarik zinciri yönetimini optimize etmeye yardımcı olmaktadır.

8. Ulaşım Analitiği: IoT, büyük veri analitiği kullanarak ulaşım verilerini değerlendirebilir. Bu, trafik akışını ve planlamayı optimize etmek ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri oluşturmak için kullanılabilir.

Yapay zeka (AI)

Sanayi Devrimi 4.0 için dünyanın önemli teknolojilerinden biri olan yapay zeka, bilgisayarın veya bilgisayar kontrolündeki bir robotun, insan zekasıyla ilişkili işlemleri veya görevleri gerçekleştirme ve simüle etme yeteneğidir. Yapay zekanın öne çıkan avantajlarından biri, insanın düşünme, hesaplama ve kontrol etme gibi zaman alan görevlerdeki iş yükünü hafifletmesidir. Bu terim, kökleri 1940'larda olan ancak günümüz bilgisayar biliminde hala en karmaşık alanlardan biri olarak kabul edilen bir terimdir ve ilk kez John McCarthy tarafından 1956'daki bir konferansta kullanılmıştır. Yapay zeka, öğrenebilen, akıl yürüten, plan yapan, algılayan veya belirli dilleri işleyebilen bilgi gibi yapay yaratımlara atıfta bulunmak için kullanılan bir terimdir (Aktürk 2022).

Yapay zekanın ulaşım sistemlerindeki yeri azımsanmayacak kadar önemlidir. Trafik yönetimi, Araç iletişimi ve Otonom araçlar, toplu taşıma optimizasyonu, otopark yönetimi optimize edilmiş güzergah planlaması gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır.

Dijital ikiz bağlantılı gerçek zamanlı simülasyon, bakım ve onarım optimizasyonu, veri analitiği ve tahmin ve optimizasyon ile de yapay zeka birlikte çalışarak ulaşım sisteminde daha güvenilir ve etkili ulaşım sistemleri oluşturabilmektedir.

Sanal gerçeklik

Sanal gerçeklik, günlük hayatımızda sıkça kullandığımız, kullanıcıların yapay olarak oluşturduğu ve simüle edilen sanal ortamlarda etkileşimde bulunmalarını sağlar. Bu teknoloji, 1960'larda uçuş simülasyonu araştırmalarının bir ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Sanal gerçeği bilgisayar grafikleri, multimedya, yapay zeka, simülasyon ve diğer ilgili disiplinlerin entegrasyonu ile geliştirilen bir teknoloji olarak tanımlamıştır. Kullanıcılar, gerçekçi manzaralar ve etkileyici nesnelerle donatılmış sanal ortamda görme, duyma ve hatta koku alma deneyimini yaşayabilirler (Aktürk 2022).

Günümüz teknolojisinde, çoklu ekranlı dijital odalar veya giyilebilir VR başlıkları, bu deneysel ortamı kullanıcılara sunabilmektedir. Önceki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi, VR özellikle görselleştirme teknolojisi olarak işlev görmektedir.

Ulaşımında ise sanal gerçeklik kullanılarak eğitim verilebilmektedir. VR simülasyonlar kullanılarak gerçek dünya koşulları sanal ekranlarda görselleştirilerek kullanıcılara pratik

yapma olanağı sunmaktadır. VR kullanılarak Trafik ve şehir planlamaları yapılabilir, sanal ortamlarda farklı ulaşım senaryolarını değerlendirerek verimli çözümler bulunabilmektedir. Toplu taşıma araçlarındaki araç içi ve çevresini simüle ederek gerçekçi bir toplu taşıma deneyimi sunabilir.

Artırılmış gerçeklik (AR)

Artırılmış Gerçeklik (AR), bilgisayar tarafından üretilmiş nesneleri, görsel öğeleri ve sesleri kullanıcının fiziksel çevresine entegre eden teknolojilerle gerçek dünyanın geliştirilmiş bir versiyonunu ifade eder. Benzer şekilde, giyilebilir başlıklar gibi akıllı teknolojiler, kullanıcı deneyimini tamamlamak için kullanılırken, AR sanal verileri gerçek ve fiziksel dünyanın üzerine ekleyerek sanal gerçeklikten ayrılır. Görüntülerin, sesin, dokunsal geri bildirimlerin ve koku ekleyerek, AR gerçek dünyaya daha yakın bir deneyim sunar, bu da VR'dan farklılaştırır AR'ın hızla artan kullanımı, farklı sektörlerde yayılmış ve navigasyon, tıp, akıllı alışveriş, eğitim, üretim, müzeler ve kütüphaneler, güvenlik vb. gibi birçok uygulamada kullanılmıştır (Aktürk 2022).

Kentiçi toplu taşımanın bir parçası olan otobüslerdeki ve duraklardaki dijital ikizler otobüslerin ve durakların gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve yönetilmesine yardımcı olan teknolojileri içerir. Aşağıda otobüslerde ve duraklardaki dijital ikiz sistemlerinin örnekleri verilmiştir.

Otobüs İzleme Sistemleri: Otobüslerde kullanılan GPS teknolojisi ve diğer sensörler, otobüslerin anlık konumlarını belirlemek için kullanılır. Bu bilgiler, yolculara ve işletmelere otobüslerin nerede olduğu hakkında bilgi sağlar.

Dijital Otobüs Haritaları: Yolcular için dijital harita uygulamaları, otobüs rotalarını ve duraklarını gerçek zamanlı olarak göstermektedir. Bu, yolcuların otobüslerin ne zaman geleceğini ve hangi güzergahı takip edeceğini önceden görmelerine yardımcı olmaktadır.

Akıllı Duraklar: Bazı duraklar, dijital ekranlar veya bilgi panoları ile donatılmıştır. Bu panolar, otobüslerin tahmini varış saatlerini ve güzergah bilgilerini göstermektedir. Ayrıca Wi-Fi veya şarj cihazları gibi hizmetler mevcuttur.

Yolcu Sayımı ve İzleme: Otobüslerdeki sensörler, yolcu sayısını izlemek ve otobüsün kapasitesini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Bu veriler, otobüs doluluk oranını yönetmek için kullanılmaktadır.

Akıllı Ödeme Sistemleri: Yolcular, otobüs binişlerini veya duraklardan inmelerini dijital ödeme sistemleri aracılığıyla yapabilmektedirler. NFC kartları, cep telefonları veya diğer dijital ödeme yöntemleri kullanılmaktadır.

Sürücü Yardım Sistemleri: Otobüslerdeki kameralar, çevresel izleme için kullanılmaktadır ve sürücülere park ve güvenli sürüş konusunda yardımcı olmaktadır.

Yönetim ve Bakım: Otobüs filolarını ve durakları yönetmek ve bakımını yapmak için dijital ikizler kullanılmaktadır. Bu, bakım gereksinimlerini tahmin etmek ve otobüslerin verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır.



Şekil 8. Toplu ulaşım sistemlerinde artırılmış gerçeklik

Dijital ikizler, toplu taşıma sistemlerini daha verimli hale getirmektedir. Bu teknolojiler, yolcuların seyahatlerini planlamalarına, kaynakların optimum seviyede kullanmalarına ve şehirlerin ulaşım hizmetlerini geliştirmelerine yardımcı olmaktadır.

Artırılmış gerçeklikle toplu taşıma sistemlerinde duraklardaki gerçek zamanlı bilgileri göstererek kullanıcılara güzergahlar ve sefer saatleri ile ilgili bilgiler vermektedir. Sürücülere önemli bilgileri doğrudan görüş alanlarına entegre ederek dikkatleri dağılmadan verilere ulaşmalarını sağlamaktadır ve bu da sürüş güvenliğini artırmaktadır.

Etmen Tabanlı Modelleme

Kendi kararlarını alabilen, çeşitli tepki ve davranışlarda bulunabilen, çevresi ve diğer etmenlerle etkileşim halinde olan ajanlar adı verilen varlıkların bir araya gelmesiyle oluşan karmaşık sistemlerdir. Bu sistemler, ajanların davranış ve tepkilerine bağlı olarak farklı çıktılar elde edebilirler. Etmen tabanlı modelleme, bu tür sistemleri modellemek için birbiriyle etkileşimde bulunan otonom ajanlardan meydana gelen bir yapay zekâ tekniğidir (Seyhan 2013).

Dünyadaki birçok olayın etmenler, çevre ve etmen-etmen, etmen-çevre etkileşimlerinin tanımı ile etkin bir şekilde modellenebileceği temel bir yaklaşımdır. Etmenler, kendi amaçları, davranışları, hafızaları ve öğrenme yetenekleri olan varlıklardır. Etmen tabanlı modelleme, genellikle üç ana yapıyı içerir: Etmenlerin nitelikleri ve davranışları, Etmenler arasındaki ilişkiler; Etmenlerin davranışı ve etkileşiminin benzetimi için bir platform (Çelik ve Zorba 2019).



MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada; otobüs güzergahları oluşturmak ve genel trafik akış ile yolcu arasındaki bağlantıyı incelemek için bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Simülasyonlar üç ana başlık altında toparlanabilmektedir. Bunlar ayrık olay simülasyonu, sistem dinamikleri ve ajan tabanlı simülasyonlardır. Burada ajan tabanlı simülasyonlar kentiçi ulaşım problemlerin çözümü, otobüs hatlarının belirlenmesi ve yolcu davranışını analiz etmek için daha çok parametre sağlamaktadır. Bu noktada ajanlar karşılıklı ve sanal çevre ile iletişim kurabilmektedir. Birden fazla etmen tanımlanabilen bu simülasyonda otobüsler ve yolcular birer etmen olarak hareket etmektedir.

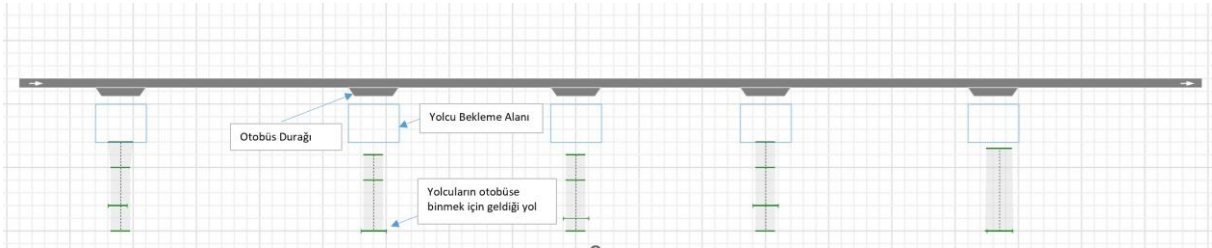
Modelin çıktıları ile yapılan incelemeler sonucu ile optimum sefer sayıları, duraklardaki darboğazları, yolcu geliş süreleri, yolcu bekleme süreleri gibi verileri analiz etmek için Anylogic 8.8.3 programında üç ayrı hat ve toplam 14 durak dağılımsal verilerle incelenmiştir. Verileri fiziksel koşullarında anlık olarak izleyebilmek, depolayabilmek için fiziksel ve sanal dünyayı birbirine bağlayan dijital ikiz kavramlarının varlığına vurgu yapılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde yapılan simülasyon çalışması incelenip analiz edilmiştir. Simülasyon modeli oluştururken hangi araçların kullanıldığı ve bağlantıların nasıl kurulduğu detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Modelin çıktıları incelenmiş ve sistemin darboğazları tespit edilerek iyileştirme önerileri sunulmuştur.

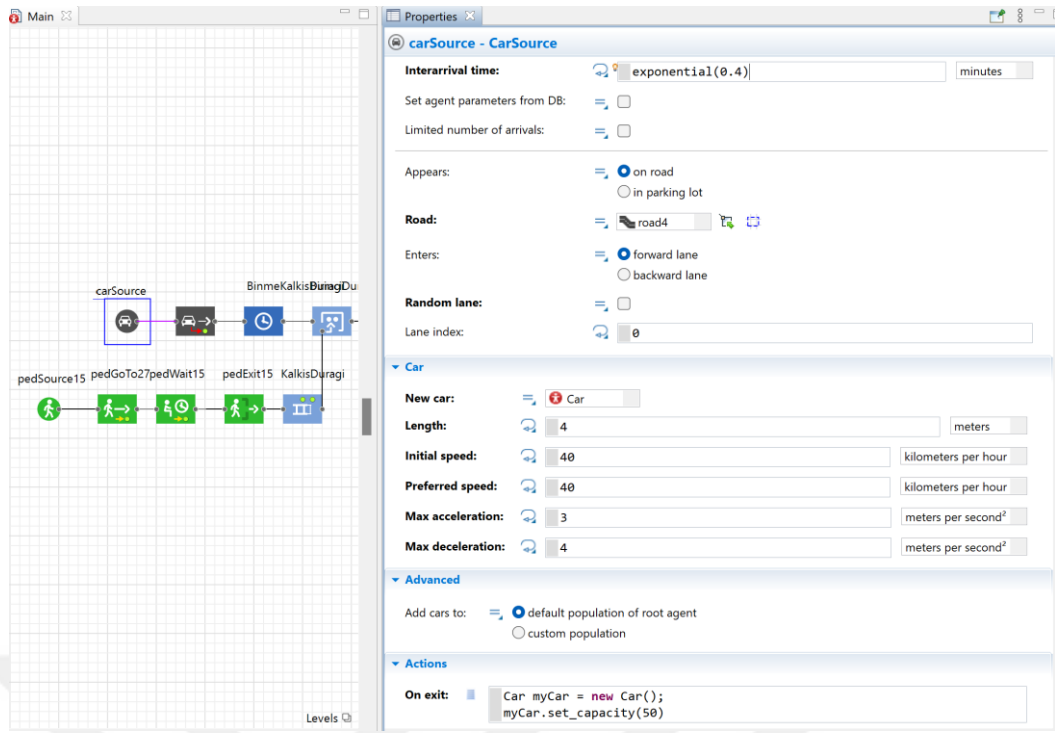
Simülasyon Modelinin Oluşturulması

Modelde Road Traffic ve Pedestrian kütüphanesindeki bloklar kullanılarak Beykoz bölgesindeki 3 hat ve 14 durak incelenmiştir. Road, CarSource, CarMoveto, CarDispose, pedEnter, pedExit, pedSink, dropoff, pedGoto, pedSource, pedWait, pickup, queue, selectOutput5 blokları modelde hatları oluşturmak için kullanılmıştır. Model oluşturulurken ilk önce otobüsün geçeceği üç farklı hat için yollar, duraklar ve yolcu geliş alanları bloklarla belirlenmiştir. Bu görsel alanlar Anylogic'te bloklardaki eşleştirmelerde kullanılmıştır. Bu sayede anylogic modeli görsel anlamda da desteklemektedir. Şekil 9'da Anylogic'te bulunan otobüs durağı, yolcuların otobüse geldikleri yol ve oluşturulan güzergah örnek olarak verilmiştir.



Şekil 9. Anylogic güzergah örneği

Başlangıç ve Bitiş durağı ortak olan bu güzergahlarda carSource bloku ile modelde otobüsler üretilmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi otobüslerin hızı 40 km/saat olup otobüsün uzunluğu 4m olarak kabul edilmiştir. Her bir aracın kapasite 50 kişi olarak belirlenmiştir. Üretilen otobüsler exponential (0.4) dağılımına sahiptir.



Şekil 10. Otobüs üretim bloku

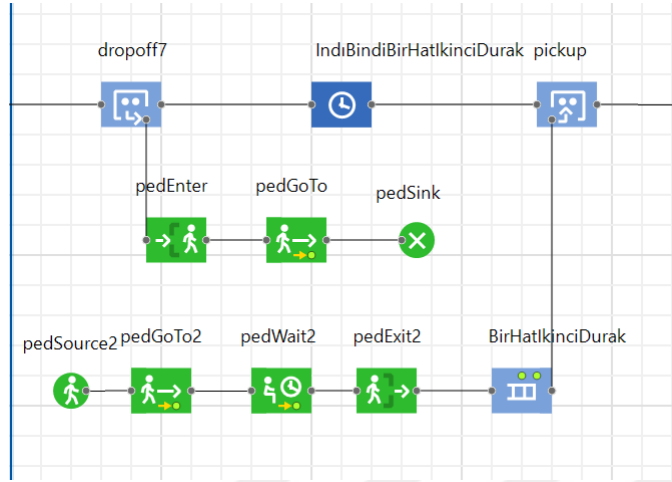
Modelde 14 tane pedSource bloku ile her durak için farklı dağılımlarla yolcu üretimi yapılmıştır. Bu duraklar için belirlenen dağılımlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Duraklar İçin Yolcu Üretim Dağılımları

PedSource Blokları	Dağılımlar
pedSource1	exponential(2)
pedSource2	poisson(0.4)
pedSource3	beta(3,1)
pedSource4	triangular(1,2.5,3.5)
pedSource5	exponential(2.5)
pedSource6	exponential(3)
pedSource7	triangular(0.2,0.3,0.5)
pedSource8	exponential(3)
pedSource9	normal(1,3)
pedSource10	normal(1,3)
pedSource11	beta(3,1)
pedSource12	poisson(0.5)
pedSource13	exponential(3)
pedSource14	exponential(4)

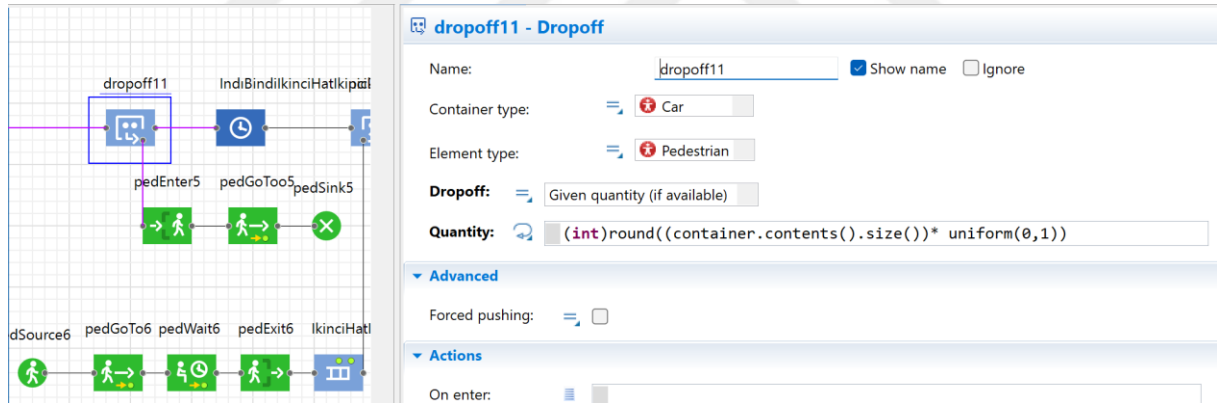
Belirlenen otobüs duraklarına bu farklı dağılımlarla giden yolcular için modelin görüntüsü Şekil 11'deki gibidir. İndirme (dropoff) ve bindirme (pickup) blokları ile yolcuların otobüsten inme-binme hareketleri sağlanmış ve bu iki blok arasına her bir duraktaki inme-

binme süresini ölçen farklı blok adlarıyla isimlendirilmiş Delay blokları eklenmiştir. Otobüslerin indi bindi süresi her bir yolcu dikkate alınarak delay time süresi dakika cinsinden exponential(0.5) olarak belirlenmiştir.



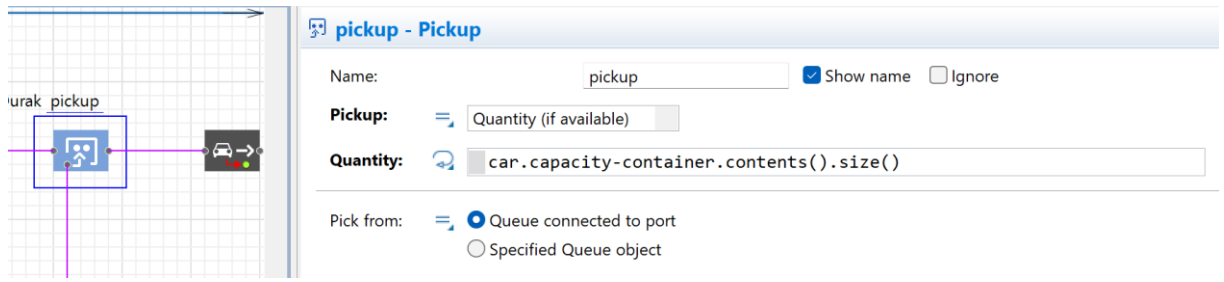
Şekil 11. İndi-Bindi model örneği

Her bir durakta bir dağılımla yolcuların indirilmesi için dropoff blokuna Şekil 12’teki gibi bir kod tanımlanmıştır. Bu kod, önceden alınan yolcuların uniform(0,1) dağılımı ile duraklarda inmesini sağlamaktadır.



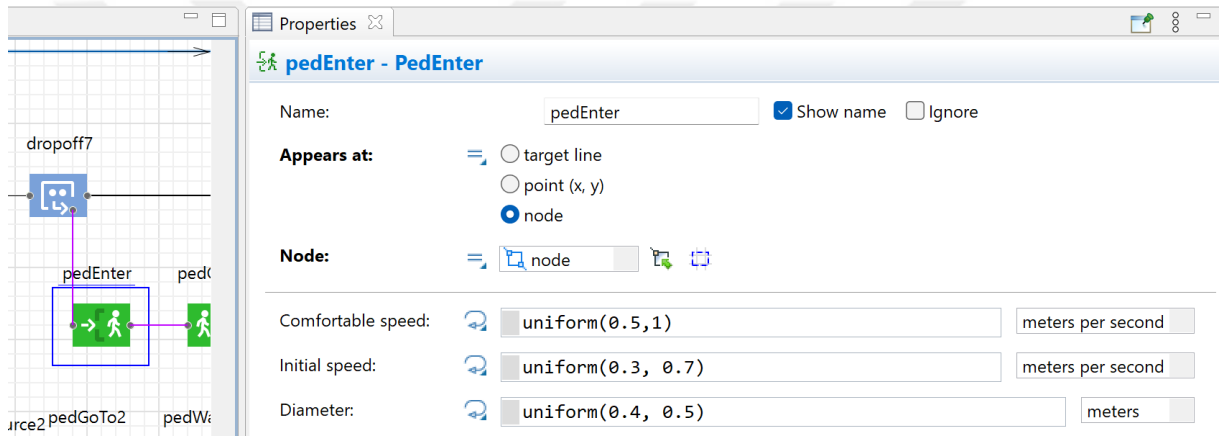
Şekil 12. İndirme bloku (dropoff)

Her bir durakta yolcu alınırken otobüsün kapasitesini aşmaması için Şekil 13’te belirtilen kod pickup blogunun içine tanımlanmıştır. Bu sayede otobüsler yolcu alırken araç kapasitesinden araçta bulunan yolcuları çıkartarak duraktan alabileceği maksimum yolcu sayısını belirlemektedir.



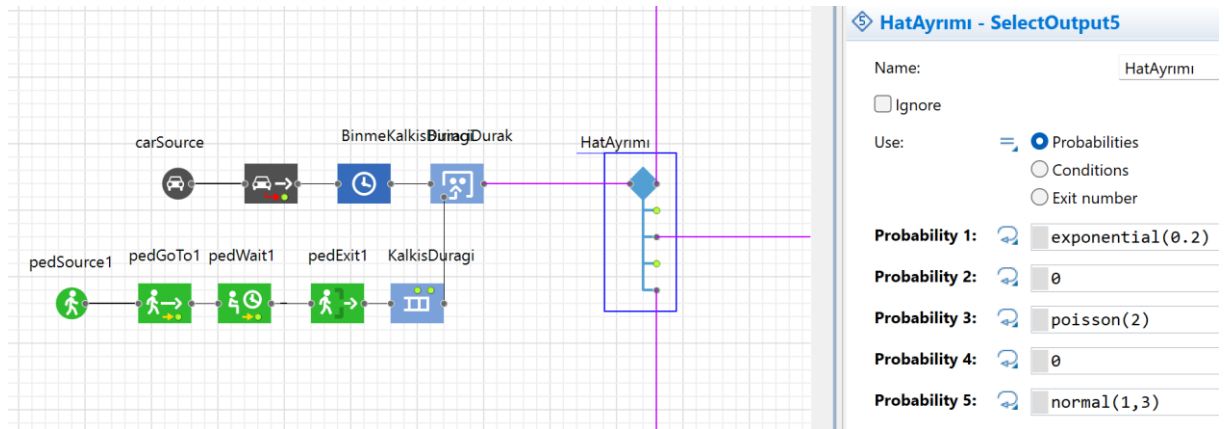
Şekil 13. Bindirme bloku (pickup).

PedEnter bloku içinde bulunan comfortable speed uniform(0.5,1), initial speed uniform(0.3, 0.7) dağılımları ile belirlenmiştir. Bu alandaki diameter olan ise yolcuların çapını yani omuz genişliğini ifade etmektedir. Anylogic'te bu değer default olarak belirlenip değiştirilmesi tavsiye edilmemektedir. Bu nedenle default değer bırakılarak simülasyon modeli oluşturulmuştur.



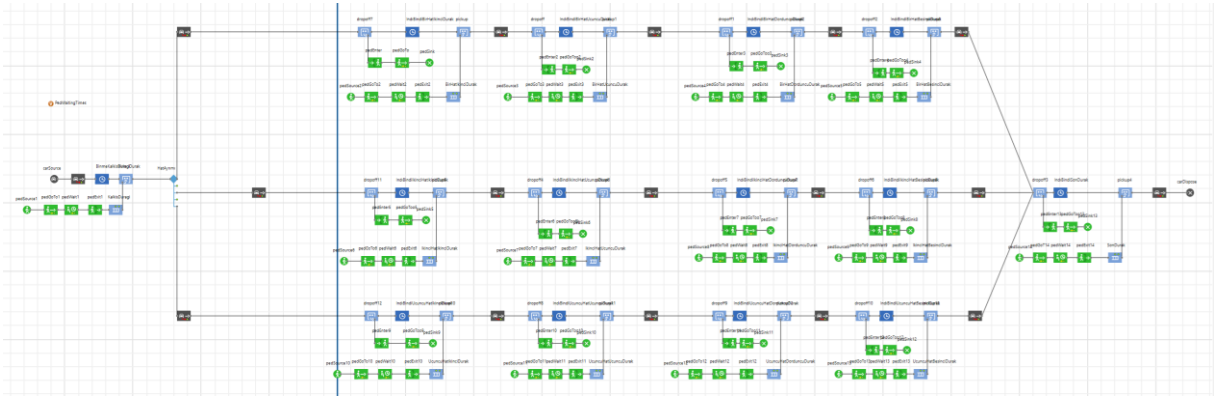
Şekil 14. Yolcunun indiği nokta

Otobüslerin üç ayrı hat oluşturulması ve bu hatlara otobüslerin dağılımları Şekil 15'da verilmiştir.

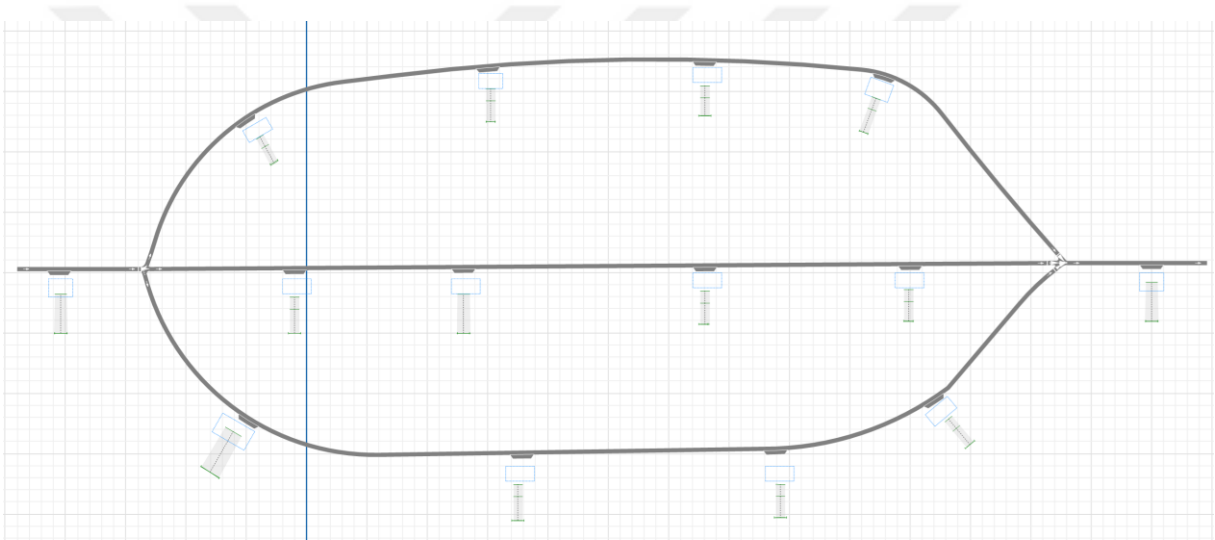


Şekil 15. Anylogic hat ayrımı örneği

Tüm bu değerler ile simülasyon modeli oluşturulup darboğazlar belirlenmiştir. Modelin tamamı Şekil 16’da ve modeli oluşturmak ve bloklara tanımlamak için çizilen yol, otobüs durağı ve yolcu bekleme alanı da şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 16. Model tasarımı genel görüntü



Şekil 17. Bloklarda kullanılan yol, durak ve yolcunun geldiği yollar.

Senaryo 1

Otobüs güzergahları oluşturmak ve genel trafik akış ile yolcu arasındaki bağlantıyı incelemek için oluşturulan model Anylogic 8.8.3 programında üç ayrı hat ve toplam 14 durak için çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları alınmıştır.

Model 15 kez çalıştırılmış ve alınan simülasyon sonuçlarına göre duraklardaki ortalama bekleme süreleri Tablo 4’te verilmiştir. Bu sonuçlara göre “İkinci Hattaki Beşinci Durak”, “İkinci Hattaki Dördüncü Durak” ve “İkinci Hattaki Üçüncü Durak”larda darboğazlar tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında en çok darboğaz ikinci hatta bulunan dördüncü duraktadır.

Tablo 4. Duraklardaki Bekleme Süreleri

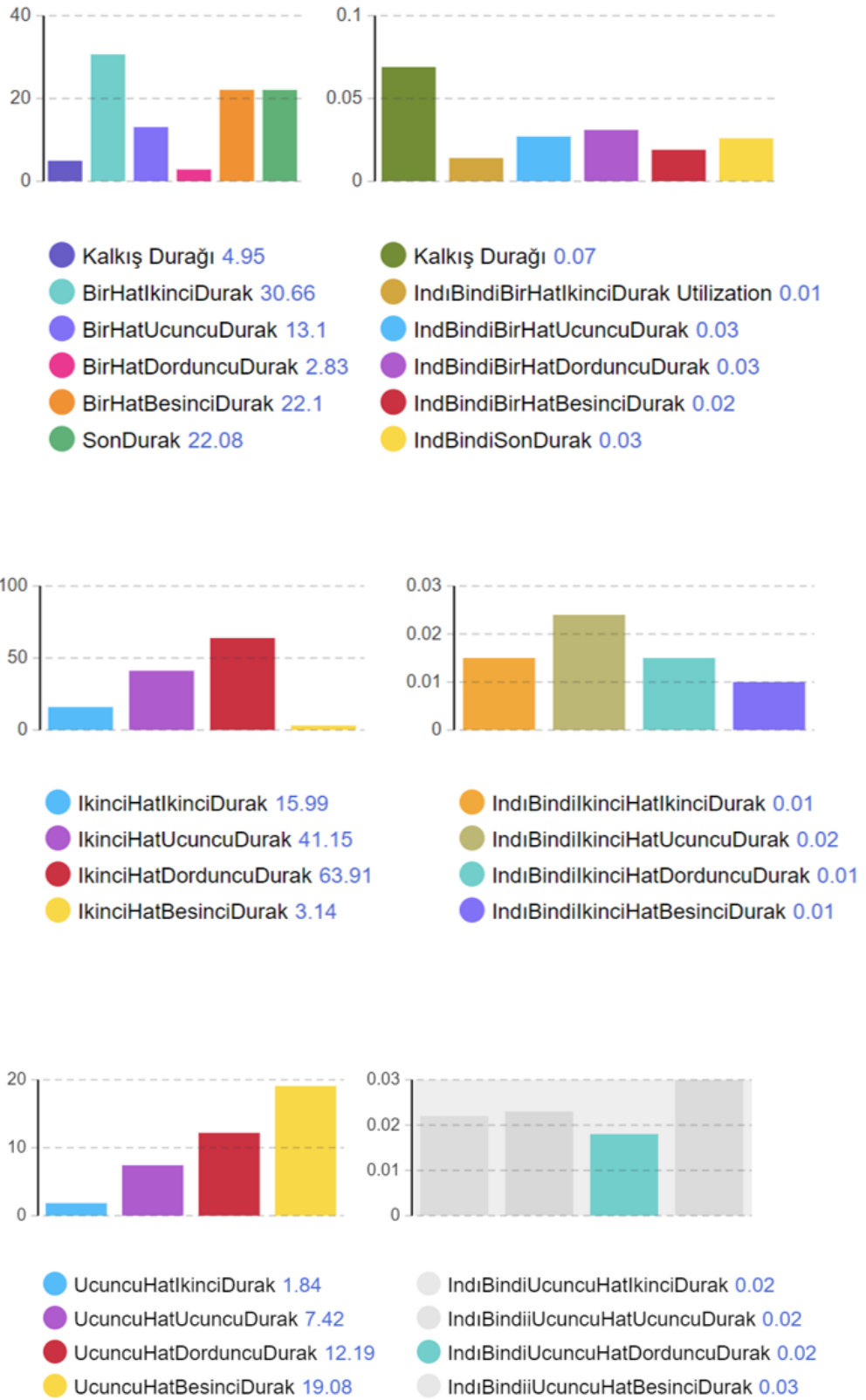
Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	120,37	2471,27	8,79	361,50	20,66	1,46
	BirHatBesinciDurak	409,30	50632,73	4,19	1096,19	124,47	6,27
	BirHatDorduncuDurak	332,50	6861,99	6,09	880,59	20,40	5,07
	BirHatİkinciDurak	371,75	51540,74	1,23	1107,38	141,60	5,67
	BirHatUcuncuDurak	353,75	22967,15	9,35	995,20	65,07	5,33
	İkinciHatBesinciDurak	665,74	9377,06	57,23	1481,26	14,27	10,53
	İkinciHatDorduncuDurak	1194,65	76099,74	683,50	1766,88	71,33	19,47
	İkinciHatİkinciDurak	410,32	50931,22	2,36	1022,65	121,73	6,40
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	İkinciHatUcuncuDurak	1042,45	88615,99	426,00	1637,04	93,27	16,80
	İndBindiBirHatBesinciDurak	87,19	601,11	13,57	215,46	6,87	0,93
	İndBindiBirHatDorduncuDurak	106,35	771,69	13,51	280,11	7,20	1,33
	İndBindiBirHatİkinciDurak	95,50	793,65	12,77	322,68	8,00	1,07
	İndBindiBirHatUcuncuDurak	175,18	1268,04	22,35	497,18	7,47	2,27
	İndBindiİkinciHatBesinciDurak	126,38	393,79	52,10	244,26	3,13	1,73
	İndBindiİkinciHatDorduncuDurak	109,33	373,73	48,95	199,84	3,40	1,33
	İndBindiİkinciHatİkinciDurak	144,13	517,73	67,22	250,32	3,87	1,80
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	İndBindiİkinciHatUcuncuDurak	163,83	551,31	83,08	260,10	3,67	2,27
	İndBindiSonDurak	97,89	1479,02	9,49	294,28	15,07	1,00
	İndBindiUcuncuHatBesinciDurak	101,23	652,10	18,33	256,38	6,40	1,13
	İndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	71,55	496,79	7,33	219,10	6,60	0,60
	İndBindiUcuncuHatİkinciDurak	141,21	1050,52	24,18	385,79	7,67	1,93
	İndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	130,16	914,85	2,67	303,18	7,07	1,73
	KalkisDuragi	133,57	16707,69	0,17	472,95	124,87	1,60
	SonDurak	315,11	73084,24	1,57	908,36	232,47	4,87
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	UcuncuHatBesinciDurak	343,98	47751,63	4,03	992,27	138,20	5,20
	UcuncuHatDorduncuDurak	335,71	30799,78	6,28	1043,35	91,00	5,20
	UcuncuHatİkinciDurak	327,29	5289,57	25,96	878,85	16,27	4,93
	UcuncuHatUcuncuDurak	347,09	22800,50	1,36	975,99	66,00	5,20

“İkinci Hat Dördüncü Durak” yolcularının en çok bekleme süresine ait değerleri Tablo 5’deki gibidir. Delay blokları araçların indi-bindi süresi boyunca geçen minimum ve maksimum değerleri hesaplayıp ortalama süreleri saniye cinsinden vermektedir. Tablonun sonunda ise ortalama saniye değerleri dakikaya çevrilmiştir. Queue bloku ise yolcuların duraklardaki bekleme sürelerini ifade etmektedir. “n agents” kısmı “Delay” için araç sayısını, “Queue” için ise yolcu sayısını ifade etmektedir.

Tablo 5. İkinci Hat Dördüncü Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	123,3101	2466,201	12,416	425,762	20	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	84,4056	422,028	2,325	185,436	5	1
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	124,4192	622,096	52,751	202,652	5	2
	IndBindiBirHatIkinciDurak	68,51871	479,631	12,188	164,12	7	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	190,4546	952,273	62,663	497,183	5	3
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	91,66525	366,661	30,751	178,342	4	1
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	104,1798	520,899	14,305	238,93	5	1
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	84,72317	508,339	12,722	212,564	6	1
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	167,1286	835,643	106,045	284,632	5	2
	IndBindiSonDurak	66,38685	863,029	1,647	203,888	13	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	209,7644	1048,822	25,943	697,343	5	3
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	105,7342	634,405	7,784	245,233	6	1
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	121,0775	726,465	38,463	307,445	6	2
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	128,1547	768,928	3,212	281,953	6	2
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	445,6237	32530,53	28,441	1092,316	73	7
	BirHatDorduncuDurak	249,2878	3490,029	6,538	796,14	14	4
	BirHatIkinciDurak	667,5714	108146,6	1,257	1784,674	162	11
	BirHatUcuncuDurak	307,264	11983,3	25,256	923,894	39	5
	IkinciHatBesinciDurak	616,6577	9249,865	9,372	1352,118	15	10
	IkinciHatDorduncuDurak	2054,891	137677,7	1548,232	2465,814	67	34
	IkinciHatIkinciDurak	377,0509	56557,64	3,016	916,446	150	6
	IkinciHatUcuncuDurak	906,3307	146825,6	23,214	1645,913	162	15
	KalkisDuragi	126,3171	17810,71	0,167	414,699	141	2
	SonDurak	348,9992	76081,83	0,444	908,36	218	5
	UcuncuHatBesinciDurak	390,3166	59328,12	5,359	779,906	152	6
	UcuncuHatDorduncuDurak	371,1345	43051,6	10,183	1300,46	116	6
	UcuncuHatIkinciDurak	348,0727	6265,309	1,857	910,694	18	5
	UcuncuHatUcuncuDurak	365,4924	25584,47	1,598	1116,867	70	6

Tablo 5’de alınan değerlere göre Şekil 18’da sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki bloğun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat dördüncü durak 63.91 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.



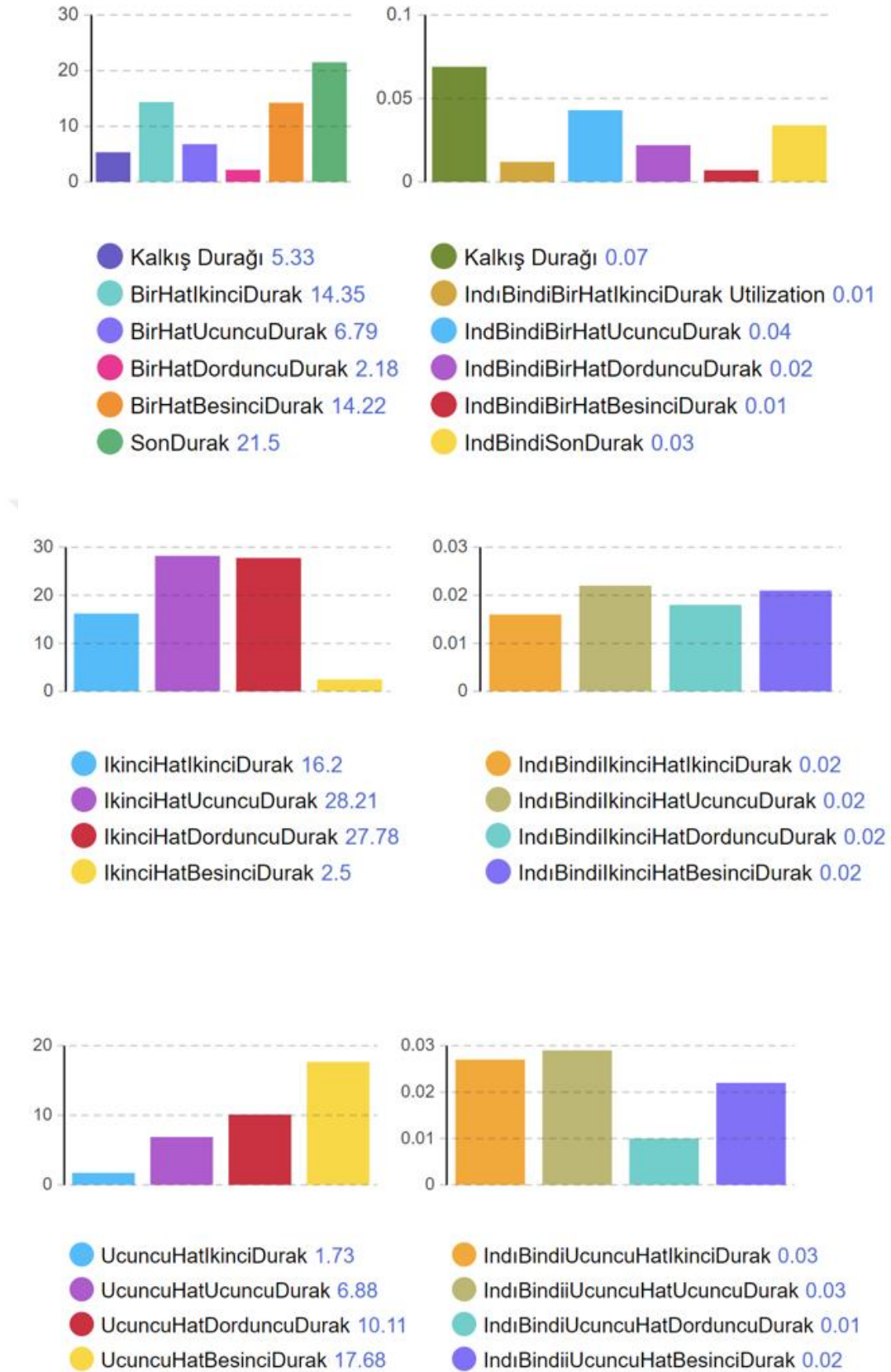
Şekil 18. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı

“İkinci Hat Dördüncü Durak” yolcularının en az bekleme süresine ait değerleri Tablo 6’daki gibidir.

Tablo 6. İkinci Hat Dördüncü Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	117,5278	2468,083	7,116	324,605	21	1
	IndBindiBirHatBesinciDurak	35,587	249,109	3,061	88,085	7	0
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	91,86838	734,947	1,878	272,987	8	1
	IndBindiBirHatIkinciDurak	54,46413	435,713	7,265	114,312	8	0
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	167,8178	1342,542	12,293	497,183	8	2
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	134,2	671	16,025	406,864	5	2
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	113,5	567,5	52,525	258,012	5	1
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	99,2274	496,137	48,618	212,564	5	1
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	133,8104	669,052	43,397	227,646	5	2
	IndBindiSonDurak	70,76459	1202,998	2,145	298,619	17	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	104,4723	626,834	19,133	180,749	6	1
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	44,678	268,068	10,314	125,946	6	0
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	113,4093	680,456	39,237	307,445	6	1
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	130,8575	785,145	3,212	266,39	6	2
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	397,5367	49294,56	1,588	1092,316	124	6
	BirHatDorduncuDurak	343,1772	7549,898	6,538	796,14	22	5
	BirHatIkinciDurak	388,8775	47443,06	1,257	1206,13	122	6
	BirHatUcuncuDurak	338,0179	22309,18	1,533	923,894	66	5
	IkinciHatBesinciDurak	496,7545	8444,827	28,312	1369,256	17	8
	IkinciHatDorduncuDurak	687,6683	85270,87	66,363	1414,865	124	11
	IkinciHatIkinciDurak	340,6712	48034,64	3,016	972,84	141	5
	IkinciHatUcuncuDurak	646,1085	79471,35	5,003	1340,993	123	10
	KalkisDuragi	143,5482	19091,91	0,167	545,732	133	2
	SonDurak	322,5083	77079,48	1,161	908,36	239	5
	UcuncuHatBesinciDurak	290,1493	36848,96	4,012	748,893	127	4
	UcuncuHatDorduncuDurak	260,3912	22393,65	10,183	725,104	86	4
	UcuncuHatIkinciDurak	236,8215	3078,68	3,805	508,189	13	3
	UcuncuHatUcuncuDurak	273,03	15562,71	1,598	698,735	57	4

Tablo 6’da alınan değerlere göre Şekil 19’da sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki bloğun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat dördüncü durak 27,78 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.



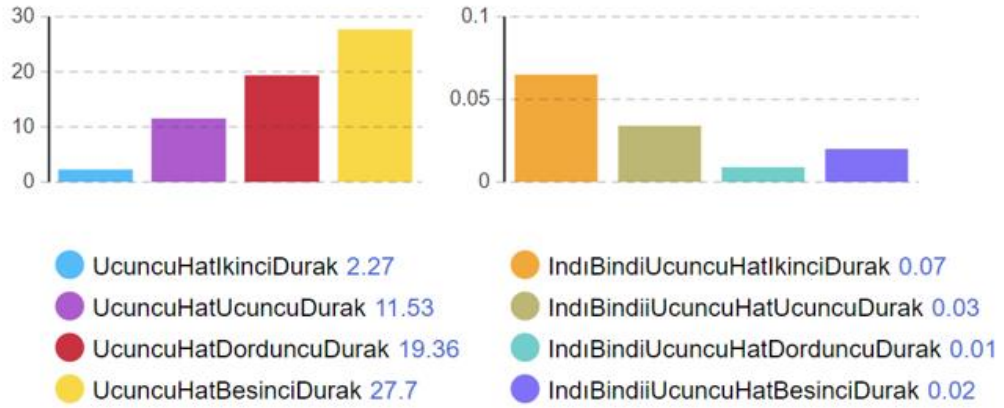
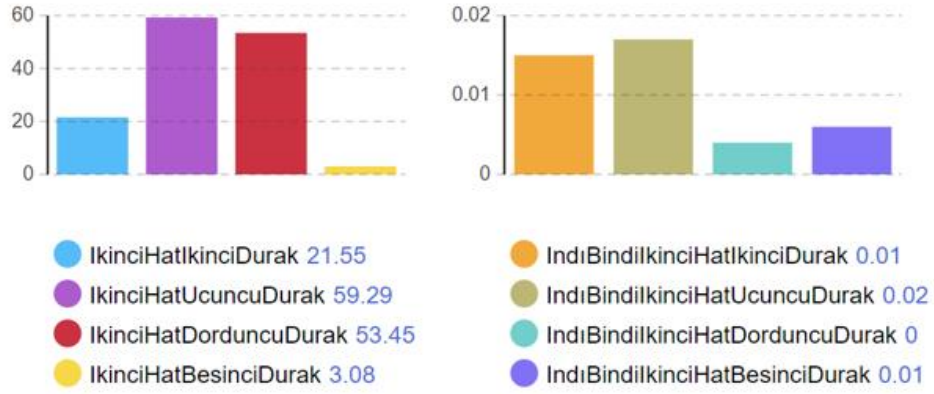
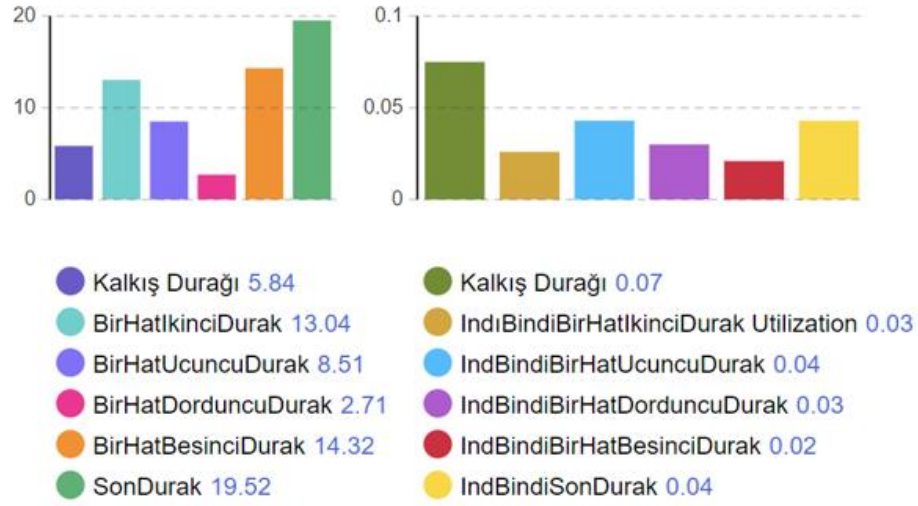
Şekil 19. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı.

“İkinci Hat Üçüncü Durak” yolcularının en çok bekleme süresine ait değerleri Tablo 7’deki gibidir.

Tablo 7. İkinci Hat Üçüncü Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	135,3548	2707,096	12,055	428,596	20	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	92,92763	743,421	22,419	210,969	8	1
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	114,7446	1032,701	25,733	391,82	9	1
	IndBindiBirHatİlkinciDurak	93,6262	936,262	13,947	244,445	10	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	172,4488	1552,039	3,324	497,183	9	2
	IndBindiİlkinciHatBesinciDurak	71,08067	213,242	46,022	109,617	3	1
	IndBindiİlkinciHatDorduncuDurak	44,093	132,279	15,989	99,616	3	0
	IndBindiİlkinciHatİlkinciDurak	146,527	439,581	110,633	212,564	3	2
	IndBindiİlkinciHatUcuncuDurak	190,306	570,918	53,784	358,764	3	3
	IndBindiSonDurak	106,1045	1485,463	1,891	321,714	14	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	121,0735	726,441	14,945	282,039	6	2
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	46,29083	277,745	10,314	94,318	6	0
	IndBindiUcuncuHatİlkinciDurak	300,5388	1803,233	30,091	1097,095	6	5
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	173,4113	1040,468	0,72	446,721	6	2
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	382,8433	50535,31	0,8	1092,316	132	6
	BirHatDorduncuDurak	420,6211	9674,286	6,538	1204,552	23	7
	BirHatİlkinciDurak	271,9004	46223,07	1,257	1094,667	170	4
	BirHatUcuncuDurak	409,0736	29453,3	2,712	1193,687	72	6
	İlkinciHatBesinciDurak	642,9224	10929,68	58,355	1377,255	17	10
	İlkinciHatDorduncuDurak	1311,25	104900	588,969	2096,16	80	21
	İlkinciHatİlkinciDurak	516,1296	68129,1	1,098	1136,748	132	8
	İlkinciHatUcuncuDurak	1907,159	89636,46	794,093	2750,874	47	31
	KalkisDuragi	166,6151	20993,5	0,167	565,138	126	2
	SonDurak	309,3194	69596,88	0,137	908,36	225	5
	UcuncuHatBesinciDurak	601,4358	99236,9	4,012	1598,455	165	10
	UcuncuHatDorduncuDurak	671,4239	66470,97	5,792	1783,038	99	11
	UcuncuHatİlkinciDurak	441,2504	6177,506	35,235	1341,293	14	7
	UcuncuHatUcuncuDurak	597,6612	38847,98	1,598	1712,515	65	9

Tablo 7’de alınan değerlere göre Şekil 20’de sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki bloğun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat üçüncü durak 59,29 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.



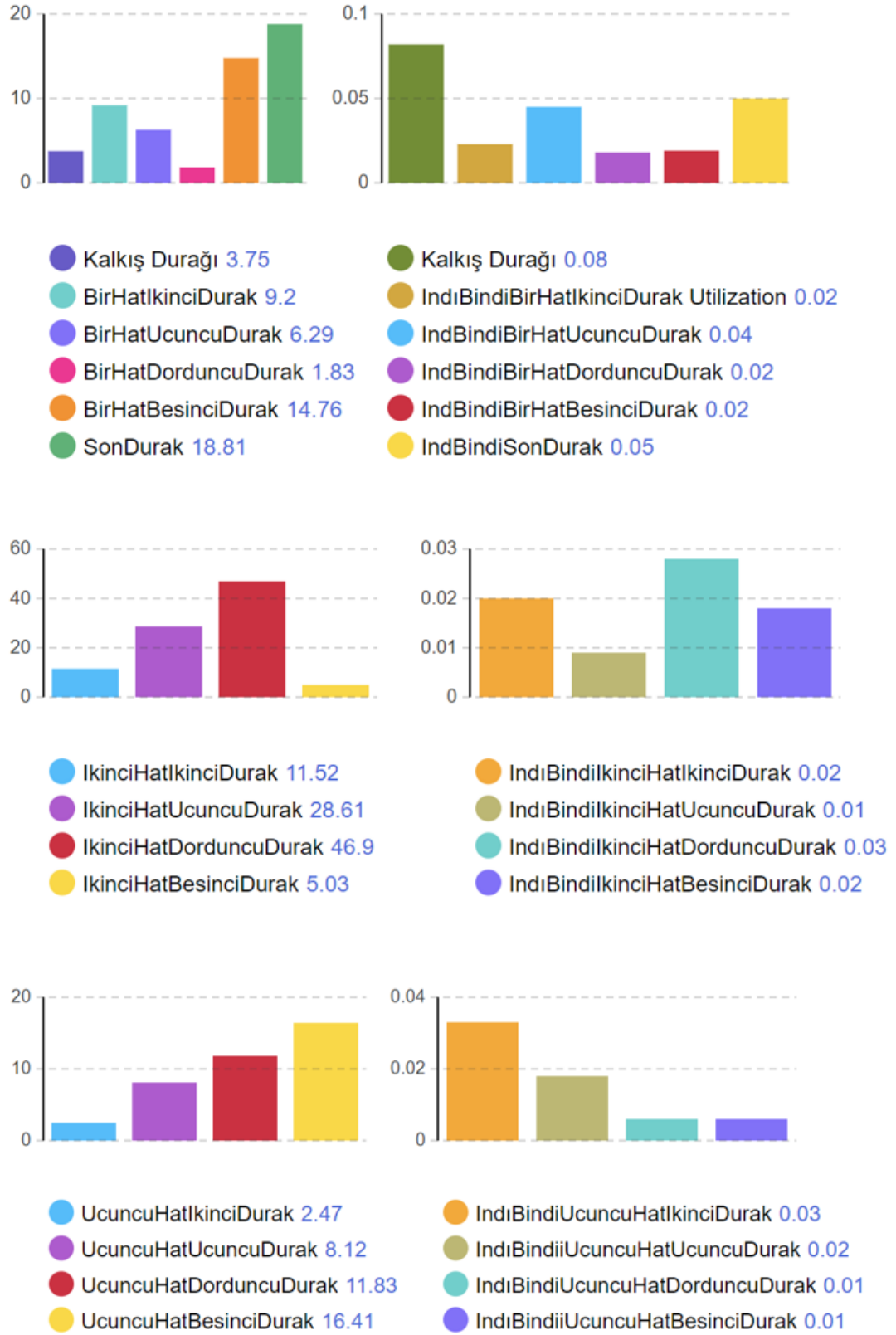
Şekil 20. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı

“İkinci Hat Üçüncü Durak” yolcularının en az bekleme süresine ait değerleri Tablo 8’deki gibidir.

Tablo 8. İkinci Hat Üçüncü Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	143,4149	2868,297	6,43	347	20	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	75,10913	600,873	22,419	136,586	8	1
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	69,73113	557,849	14,248	187,831	8	1
	IndBindiBirHatİkinciDurak	81,63388	653,071	7,353	372,056	8	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	167,623	1340,984	8,051	497,183	8	2
	IndBindiİkinciHatBesinciDurak	125,5048	627,524	34,681	352,834	5	2
	IndBindiİkinciHatDorduncuDurak	167,4312	1004,587	67,939	288,762	6	2
	IndBindiİkinciHatİkinciDurak	109,9358	659,615	38,352	212,564	6	1
	IndBindiİkinciHatUcuncuDurak	53,3545	320,127	7,194	158,37	6	0
	IndBindiSonDurak	106,2584	1806,393	1,128	369,546	17	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	30,6644	153,322	8,395	75,406	5	0
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	30,9106	154,553	7,784	63,071	5	0
	IndBindiUcuncuHatİkinciDurak	193,1142	1158,685	39,237	464,538	6	3
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	107,6108	645,665	3,212	266,39	6	1
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	354,9078	46847,84	3,415	1092,316	132	5
	BirHatDorduncuDurak	273,3943	5467,885	6,538	796,14	20	4
	BirHatİkinciDurak	235,5102	27554,69	1,143	773,475	117	3
	BirHatUcuncuDurak	293,7753	18801,62	2,507	923,894	64	4
	İkinciHatBesinciDurak	995,3091	17915,56	180,944	1997,47	18	16
	İkinciHatDorduncuDurak	1166,912	161033,9	490,023	1664,598	138	19
	İkinciHatİkinciDurak	269,5847	39628,95	3,016	835,888	147	4
	İkinciHatUcuncuDurak	634,8464	102210,3	1,284	1340,993	161	10
	KalkisDuragi	112,7324	12513,29	0,167	350,739	111	1
	SonDurak	305,8331	66977,46	1,273	908,36	219	5
	UcuncuHatBesinciDurak	293,7111	32895,64	2,584	748,893	112	4
	UcuncuHatDorduncuDurak	255,2075	18885,35	10,183	702,991	74	4
	UcuncuHatİkinciDurak	482,227	8680,086	51,475	1207,125	18	8
	UcuncuHatUcuncuDurak	377,7222	29084,61	0,025	1103,852	77	6

Tablo 8’de alınan değerlere göre Şekil 21’de sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki bloğun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat dördüncü durak 46,9 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.



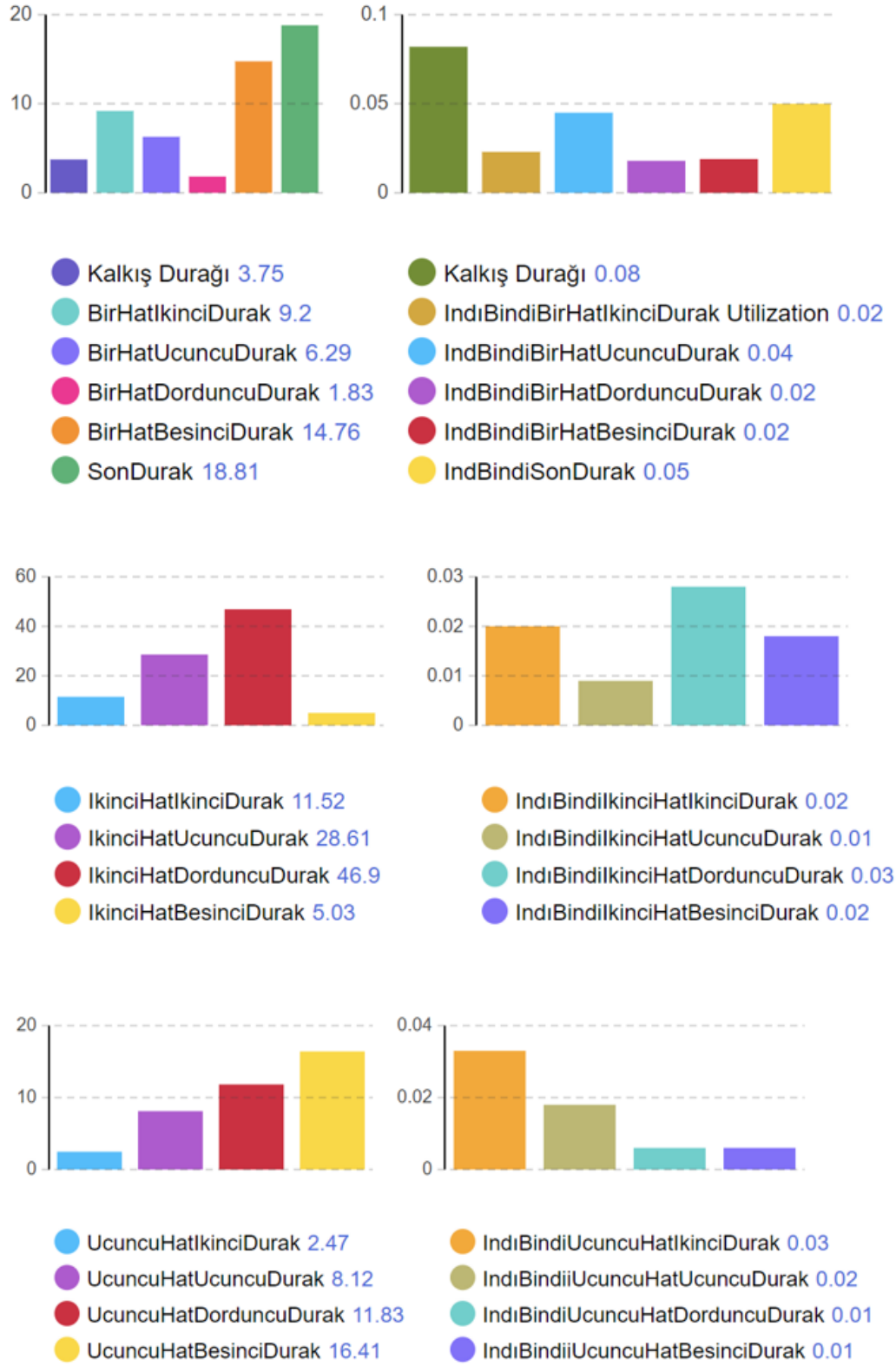
Şekil 21. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı

“İkinci Hat Beşinci Durak” yolcularının en çok bekleme süresine ait değerleri Tablo 9’daki gibidir.

Tablo 9. İkinci Hat Beşinci Durak Yolcularının En Çok Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	143,4149	2868,297	6,43	347	20	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	75,10913	600,873	22,419	136,586	8	1
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	69,73113	557,849	14,248	187,831	8	1
	IndBindiBirHatIkinciDurak	81,63388	653,071	7,353	372,056	8	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	167,623	1340,984	8,051	497,183	8	2
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	125,5048	627,524	34,681	352,834	5	2
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	167,4312	1004,587	67,939	288,762	6	2
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	109,9358	659,615	38,352	212,564	6	1
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	53,3545	320,127	7,194	158,37	6	0
	IndBindiSonDurak	106,2584	1806,393	1,128	369,546	17	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	30,6644	153,322	8,395	75,406	5	0
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	30,9106	154,553	7,784	63,071	5	0
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	193,1142	1158,685	39,237	464,538	6	3
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	107,6108	645,665	3,212	266,39	6	1
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	354,9078	46847,84	3,415	1092,316	132	5
	BirHatDorduncuDurak	273,3943	5467,885	6,538	796,14	20	4
	BirHatIkinciDurak	235,5102	27554,69	1,143	773,475	117	3
	BirHatUcuncuDurak	293,7753	18801,62	2,507	923,894	64	4
	IkinciHatBesinciDurak	995,3091	17915,56	180,944	1997,47	18	16
	IkinciHatDorduncuDurak	1166,912	161033,9	490,023	1664,598	138	19
	IkinciHatIkinciDurak	269,5847	39628,95	3,016	835,888	147	4
	IkinciHatUcuncuDurak	634,8464	102210,3	1,284	1340,993	161	10
	KalkisDuragi	112,7324	12513,29	0,167	350,739	111	1
	SonDurak	305,8331	66977,46	1,273	908,36	219	5
	UcuncuHatBesinciDurak	293,7111	32895,64	2,584	748,893	112	4
	UcuncuHatDorduncuDurak	255,2075	18885,35	10,183	702,991	74	4
	UcuncuHatIkinciDurak	482,227	8680,086	51,475	1207,125	18	8
	UcuncuHatUcuncuDurak	377,7222	29084,61	0,025	1103,852	77	6

Tablo 9’da alınan değerlere göre Şekil 22’te sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki bloğun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat dördüncü durak 46,9 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.



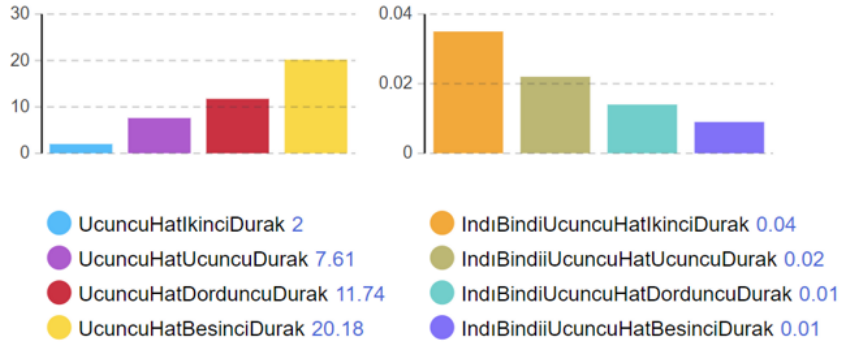
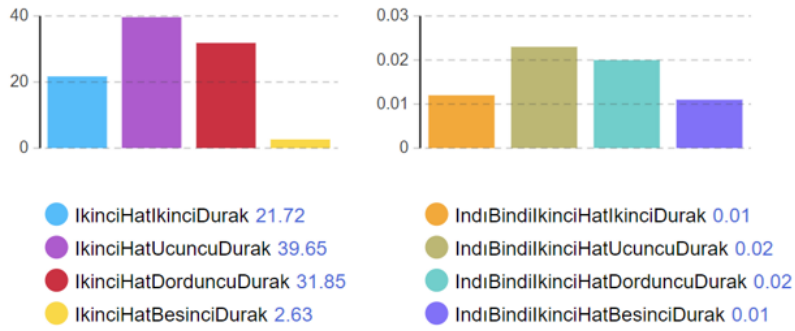
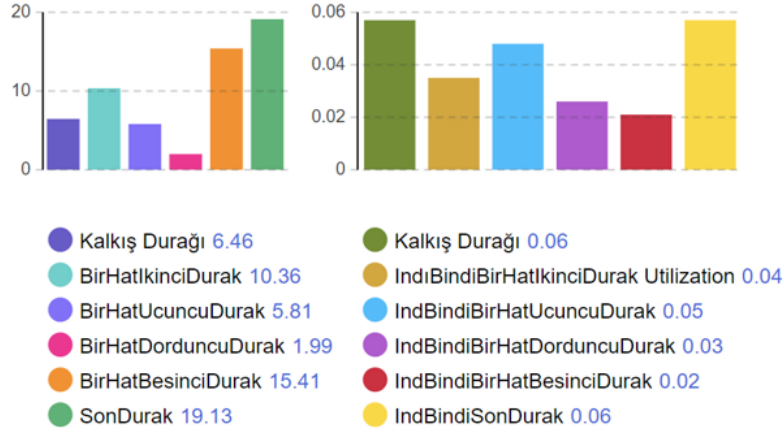
Şekil 22. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı

“İkinci Hat Beşinci Durak” yolcularının en az bekleme süresine ait değerleri Tablo 10’deki gibidir.

Tablo 10. İkinci Hat Beşinci Durak Yolcularının En Az Bekleme Süresi

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	107,8779	1941,803	1,776	309,725	18	1
	IndBindiBirHatBesinciDurak	94,994	759,952	1,926	393,951	8	1
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	102,8044	925,24	15,298	213,323	9	1
	IndBindiBirHatİkinciDurak	127,7384	1149,646	22,723	321,872	9	2
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	179,9372	1619,435	32,911	497,183	9	2
	IndBindiİkinciHatBesinciDurak	111,206	333,618	42,616	241,187	3	1
	IndBindiİkinciHatDorduncuDurak	180,1703	540,511	15,082	466,305	3	3
	IndBindiİkinciHatİkinciDurak	140,3703	421,111	58,767	212,564	3	2
	IndBindiİkinciHatUcuncuDurak	164,7627	494,288	69,902	266,016	3	2
	IndBindiSonDurak	136,3513	2045,269	18,359	301,66	15	2
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	53,248	266,24	12,028	131,116	5	0
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	82,887	414,435	10,314	265,664	5	1
	IndBindiUcuncuHatİkinciDurak	193,8266	969,133	39,237	497,529	5	3
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	125,6334	628,167	0,483	266,39	5	2
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	396,7871	55153,41	0,366	1092,316	139	6
	BirHatDorduncuDurak	308,8255	7102,986	6,538	796,14	23	5
	BirHatİkinciDurak	272,1994	36202,52	1,257	763,737	133	4
	BirHatUcuncuDurak	266,0779	20488	19,596	923,894	77	4
	İkinciHatBesinciDurak	559,6838	8395,257	89,22	1289,249	15	9
	İkinciHatDorduncuDurak	712,9352	72006,46	84,11	1377,422	101	11
	İkinciHatİkinciDurak	320,6953	29824,66	3,016	835,888	93	5
	İkinciHatUcuncuDurak	771,4049	61712,4	405,393	1340,993	80	12
	KalkisDuragi	176,8588	22637,93	0,167	735,11	128	2
	SonDurak	278,6806	68276,75	1,929	908,36	245	4
	UcuncuHatBesinciDurak	459,5273	63874,29	14,679	1176,703	139	7
	UcuncuHatDorduncuDurak	386,7575	34421,42	0,742	1272,823	89	6
	UcuncuHatİkinciDurak	363,818	5821,088	51,475	921,585	16	6
	UcuncuHatUcuncuDurak	359,8797	21592,78	1,598	1031,558	60	5

Tablo 10’de alınan değerlere göre Şekil 23’te sol tarafta bulunan grafikler kuyrukta bulunan ortalama yolcu sayısını (length (av)), sağ taraftaki grafikler ise indi-bindi sürelerindeki blogun doluluk oranını vermektedir. Sol taraftaki değerlerde görüldüğü gibi ikinci hat üçüncü durak 39,65 değeri diğer tüm duraklardan yüksektir. Bu da simülasyon boyunca en çok bu durakta bekleme olduğunu ifade etmektedir.

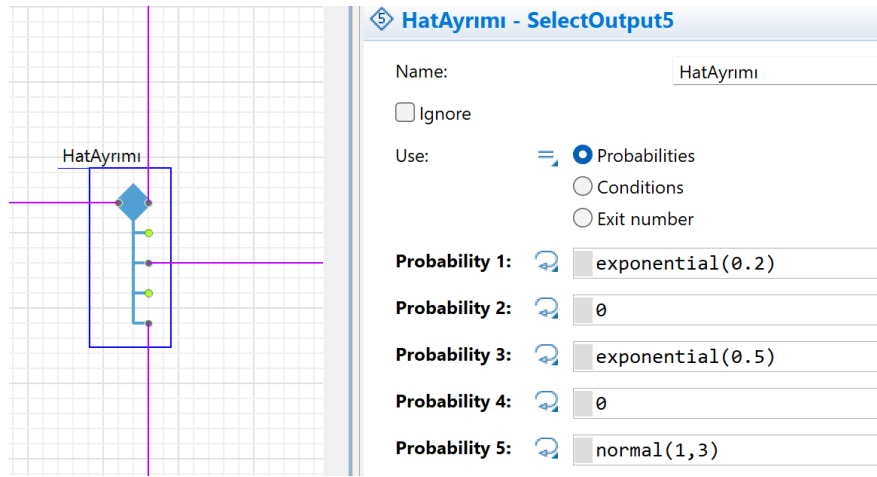


Şekil 23. Kuyrukta bulunan yolcu sayısı ve bloğun doluluk oranı

Senaryo 2

Çalışmada otobüs ve duraklara kamera, sensör, IOT gibi dijital ikiz teknolojileri yerleştirilerek alınan anlık verilere göre duraklardaki ve hatlardaki darboğazlardan sinyal alınarak bu darboğazları engellemek için otobüslerin dijital ikize göre yeniden hatlara dağıtılması öngörülmüştür.

Dijital ikizden alınan sinyallere göre bekleme sürelerinin daha fazla olduğu durakların ikinci hatta olduğu görülmektedir. Alınan bu sinyallere göre ikinci hatta daha fazla araç dağıtımı yapılması öngörülmüştür. Dijital ikize göre güncel hat ayırımı dağılımları Şekil 24'teki gibidir.



Şekil 24. Güncellenmiş hat ayrımı bloğ

Model tekrar çalıştırılarak alınan yeni güncel hat dağılımına göre bu duraklardaki ortalama bekleme süreleri Tablo 11’de bulunmaktadır.

Tablo 11. Darboğazın Daha Fazla Olduğu Duraklardaki Bekleme Süresindeki Değişimler

Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)						
BinmeKalkisDuragi	135	2609,62	4,63	395,97	19,47	1,87
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)						
BirHatBesinciDurak	350,54	40132,73	4,09	874,68	114,2	5,4
BirHatDorduncuDurak	342,12	6629,42	49,77	878,29	18,73	5,4
BirHatIkinciDurak	283,77	29421,46	2,43	1004,57	98,73	4,2
BirHatUcuncuDurak	291,71	17971,54	12,1	961,52	59,13	4,4
IkinciHatBesinciDurak	426,72	7591,2	27,94	987,1	17,8	6,6
IkinciHatDorduncuDurak	535,47	87572,48	1,24	1109,77	163,27	8,27
IkinciHatIkinciDurak	320,35	35979,7	2,16	1050,32	112,07	5
IkinciHatUcuncuDurak	633,98	94033,03	0,93	1409,14	148,73	10,07
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)						
IndBindiBirHatBesinciDurak	197,74	1186,18	15,82	559,84	6,07	2,8
IndBindiBirHatDorduncuDurak	148,46	917,53	18,26	333,3	6,2	2
IndBindiBirHatIkinciDurak	115,65	815,43	7,53	307,46	7,07	1,27
IndBindiBirHatUcuncuDurak	74,15	496,27	6,95	181,84	6,6	1
IndBindiIkinciHatBesinciDurak	120,11	685,61	16,19	295,18	5,73	1,4
IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	140,6	855,47	33,3	277,13	6,13	2

Tablo 11. (devamı)

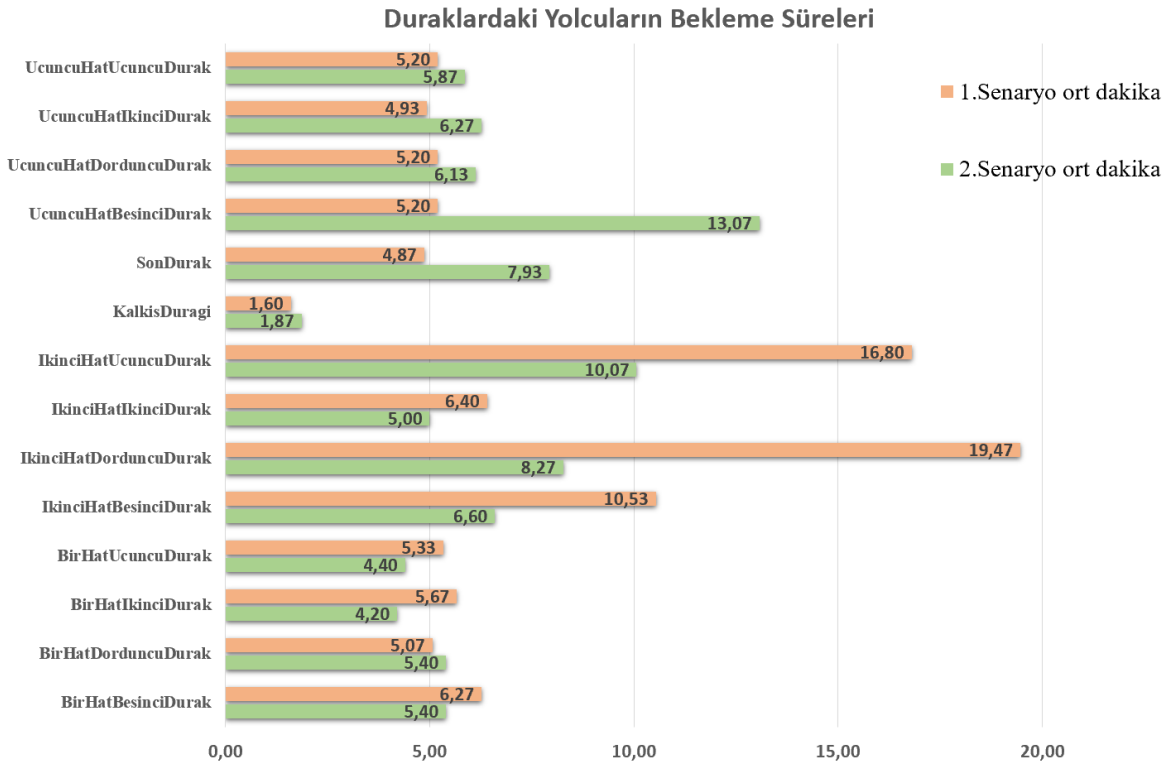
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	117,01	793,82	21,55	237,36	6,73	1,27
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	213,29	1395,54	10,07	757,65	6,53	3
	IndBindiSonDurak	143,94	1931,64	14,84	364,18	13,53	1,87
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	86,08	302,04	39,66	150,07	3,53	1
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	100,9	385,1	23,82	213,53	3,93	1,33
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	78,13	379,87	16,89	188,21	4,93	0,8
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	105,14	468,86	30,79	207,64	4,47	1,2
Yolcuların Bekleme Süresi (Etmek : Yolcu)	KalkisDuragi	129,59	13117,69	1,25	379,46	100,93	1,87
	SonDurak	503,07	114509,52	3,11	1259,83	228,6	7,93
	UcuncuHatBesinciDurak	820,02	74659,21	256,79	1323,81	93,47	13,07
	UcuncuHatDorduncuDurak	399,1	43183,55	9,63	1042,67	109	6,13
	UcuncuHatIkinciDurak	403,85	6799,25	28,82	818,9	16,93	6,27
	UcuncuHatUcuncuDurak	388,77	25561,77	3,93	943,01	66,07	5,87

Senaryo 1 ve Dijital ikiz kurulduktan sonra Senaryo 2'ye göre yeni dağılımlarla bekleme sürelerinin ortalamaları alınmıştır. Tablo 12'te de görüldüğü gibi İkinciHatUcuncuDurak'ta %40,06 azalış, İkinciHatDorduncuDurak'ta %57,52 azalış ve İkinciHatBesinciDurak %37,32 azalış ile bekleme süresinde iyileşme gözlenmiştir.

Tablo 32. Darboğazın Daha Fazla Olduğu Duraklardaki Bekleme Süresindeki Değişimler

Duraklar	Ortalamalar (dk)		İyileşme Oranı
	Önceki Değer	Sonraki Değer	
İkinciHatUcuncuDurak	16,80	10,07	40,06%
İkinciHatDorduncuDurak	19,47	8,27	57,52%
İkinciHatBesinciDurak	10,53	6,6	37,32%

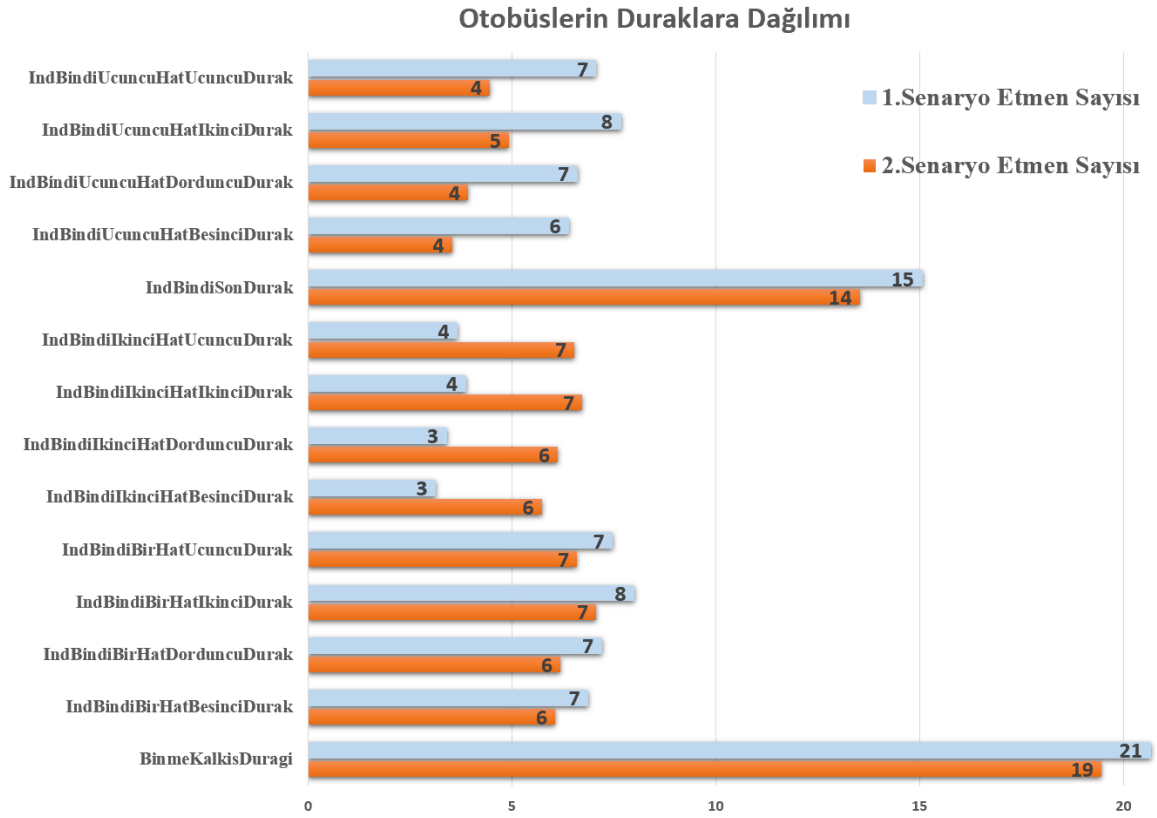
Duraklardaki ortalama bekleme sürelerine baktığımızda Senaryo 1 ve Senaryo 2'deki değişim Şekil 25'te gösterilmiştir. 2.Senaryo ile Senaryo 1'deki darboğazların giderildiği ve sistemdeki durak davranışlarındaki değişim görülmektedir. Tüm duraklardaki bekleme sürelerine baktığımızda dijital ikizin sistemin performansını arttırdığını görmekteyiz.



Şekil 25. 1. ve 2. senaryoya göre duraklardaki bekleme süreleri.

Şekil 26 ise Senaryo 1 ve dijital ikiz kurulduktan sonra Senaryo 2'ye göre otobüslerin hatlara dağılımını göstermektedir. Modelde Şekil 10'da da gözüktüğü gibi carSource bloku ile exponential(0.4) dağılımı ile otobüs üretimi sağlanmaktadır. Senaryo 2'ye göre yine aynı dağılım ile otobüs üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 26'da iki farklı senaryoda ilgili duraklardan kaçar tane otobüsün geçtiği analiz edilebilmektedir. Senaryo 2'ye göre ikinci hatta dağılım olasılığı dijital ikiz ile değiştirilen otobüslerin sayısı gözükmemektedir. Darboğazın daha çok olduğu Tablo 12'de verilen durakların Senaryo 2 ile otobüs dağılımlarının arttığı ve darboğazların giderildiği gözükmemektedir.

Modeldeki üretilen otobüslerin dağılımları senaryolara göre değişmediği göz önünde alındığında, mevcut üretilen otobüslerin hatlara dağılımının yapıp darboğazların giderilmesi maliyete olumlu anlamda etki etmektedir. Araç üretiminde farklı dağılım ile artış olmadığı için pozitif anlamda etkisi olmaktadır.



Şekil 26. Senaryo 1 ve 2'ye göre otobüslerin duraklara dağılımı

Simülasyon 1000, 10000 ve 100000 kez çalıştırıldığında duraklardan geçen otobüs sayıları, yolcu bekleme süreleri, ortalama, toplam, min ve max bekleme süreleri etmen cinsinden gözlemlenebilmektedir.

Bu üç tablo incelendiğinde maksimum ve minimum otobüs sayıları Şekil 27’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Tablo 13. 1000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	132,57005	2518,831	4,602	395,944	19	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	221,7748	1108,874	19,911	559,836	5	3
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	131,41083	788,465	7,257	331,687	6	2
	IndBindiBirHatIkinciDurak	184,4965	1106,979	7,567	542,229	6	3
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	67,497667	404,986	6,953	169,376	6	1
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	108,4848	542,424	20,544	247,24	5	1
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	189,041	1134,246	60,75	274,29	6	3
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	143,412	1147,296	28,148	415,109	8	2
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	188,97575	1511,806	10,874	788,534	8	3
	IndBindiSonDurak	168,64315	2192,361	15,216	469,653	13	2
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	68,128667	204,386	41,015	111,266	3	1

Tablo 13. (devamı)

Yolcuların Bekleme Süresi (Etmen : Yolcu)	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	80,404667	241,214	11,435	196,514	3	1
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	38,66125	154,645	15,794	85,47	4	0
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	89,173333	267,52	17,683	206,133	3	1
	BirHatBesinciDurak	311,45015	29276,314	2,121	835,409	94	5
	BirHatDorduncuDurak	421,83418	9280,352	38,563	1214,035	22	7
	BirHatIkinciDurak	447,59155	41626,014	2,87	1401,047	93	7
	BirHatUcuncuDurak	462,38216	26355,783	13,158	1444,258	57	7
	IkinciHatBesinciDurak	392,77806	6677,227	13,258	888,21	17	6
	IkinciHatDorduncuDurak	567,21941	87919,009	1,302	1215,029	155	9
	IkinciHatIkinciDurak	331,35325	38105,624	2,158	1050,322	115	5
	IkinciHatUcuncuDurak	610,64089	95870,619	0,928	1409,142	157	10
	KalkisDuragi	137,35865	15109,452	1,089	419,903	110	2
	SonDurak	466,93909	117201,71	1,886	1259,833	251	7
	UcuncuHatBesinciDurak	813,85949	62667,181	273,493	1272,57	77	13
	UcuncuHatDorduncuDurak	372,25974	33503,377	15,203	1023,286	90	6
	UcuncuHatIkinciDurak	454,25289	8176,552	33,521	936,871	18	7
	UcuncuHatUcuncuDurak	381,54414	19458,751	4,468	940,117	51	6

Tablo 13’de 1000 kez çalıştırılan model sonucu durakların bekleme süreleri mevcuttur. Bu bekleme süreleri sonucu darboğazların bulunduğu İkinciHatBesinciDurak, İkinciHatDorduncuDurak ve İkinciHatUcuncuDuraklarının ortalama bekleme süreleri dk cinsinden sırası ile 6,9,10 dk’dır. Duraklardan geçen otobüs sayıları ise sırası ile 5,6 ve 8’dir.

Tablo 14. 10000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri

Süre	Bloklar	Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etm Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etm : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	134,6185	2692,369	4,602	395,944	20	2
	IndBindiBirHatBesinciDurak	181,156	1449,248	19,911	559,836	8	3
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	153,4188	1227,35	7,146	331,687	8	2
	IndBindiBirHatIkinciDurak	105,6551	845,241	7,567	266,915	8	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	63,33738	506,699	0,646	169,376	8	1
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	134,8593	809,156	12,684	334,954	6	2
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	160,66	963,96	60,75	272,73	6	2
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	149,2105	895,263	28,148	318,182	6	2
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	224,551	1347,306	10,874	788,534	6	3
	IndBindiSonDurak	125,1263	1751,768	32,789	322,935	14	2
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	128,545	514,18	52,105	198,82	4	2
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	142,002	568,008	33,265	268,176	4	2
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	84,669	423,345	22,787	250,934	5	1
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	149,6368	598,547	2,574	346,136	4	2

Tablo 14. (devamı)

Yolcuların Bekleme Süresi (Etm : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	324,1243	46025,65	4,316	835,409	142	5
	BirHatDorduncuDurak	353,7945	7429,685	57,057	935,796	21	5
	BirHatIkinciDurak	303,9386	36168,7	2,87	1074,991	119	5
	BirHatUcuncuDurak	297,03	21980,22	13,158	1046,873	74	4
	IkinciHatBesinciDurak	596,2464	11328,68	26,207	1301,634	19	9
	IkinciHatDorduncuDurak	563,3514	70982,27	1,302	1280,414	126	9
	IkinciHatIkinciDurak	338,2825	34504,81	2,158	1050,322	102	5
	IkinciHatUcuncuDurak	650,7347	96308,74	0,928	1409,142	148	10
	KalkisDuragi	129,57	14382,27	1,646	364,793	111	2
	SonDurak	504,9784	115135,1	0,446	1259,833	228	8
	UcuncuHatBesinciDurak	997,0433	116654,1	435,592	1698,198	117	16
	UcuncuHatDorduncuDurak	539,7752	66392,35	15,203	1180,104	123	8
	UcuncuHatIkinciDurak	380,0928	6841,67	15,003	804,471	18	6
	UcuncuHatUcuncuDurak	392,8054	27889,18	3,791	940,117	71	6

Tablo 14’te 10000 kez çalıştırılan model sonucu durakların bekleme süreleri mevcuttur. Bu bekleme süreleri sonucu darboğazların bulunduğu İkinciHatBesinciDurak, İkinciHatDorduncuDurak ve İkinciHatUcuncuDuraklarının ortalama bekleme süreleri dk cinsinden sırası ile 9,9,10 dk’dır. Duraklardan geçen otobüs sayıları ise sırası ile 6,6 ve 6’dır.

Tablo 15. 100000 Kez Çalıştırıldığında Duraklardaki Bekleme Süreleri

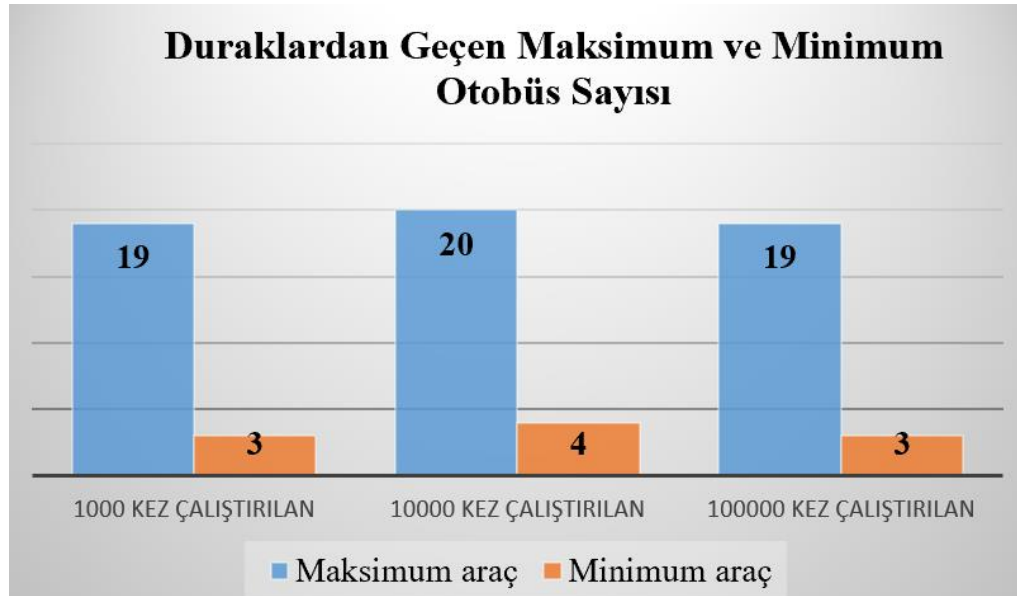
Bloklar		Ortalama Bekleme Süresi (saniye)	Toplam Bekleme Süresi (saniye)	Min. Bekleme Süresi (saniye)	Max Bekleme Süresi (saniye)	Etmen Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk)
Yolcuların Otobüslere İndi-Bindi Süresi (Etmen : Otobüs)	BinmeKalkisDuragi	119,9444	2278,944	0,127	395,944	19	1
	IndBindiBirHatBesinciDurak	163,3156	1306,525	19,911	559,836	8	2
	IndBindiBirHatDorduncuDurak	117,3295	938,636	12,371	331,687	8	1
	IndBindiBirHatIkinciDurak	98,65213	789,217	7,567	266,915	8	1
	IndBindiBirHatUcuncuDurak	56,24563	449,965	5,228	169,376	8	0
	IndBindiIkinciHatBesinciDurak	113,6399	795,479	20,544	247,24	7	1
	IndBindiIkinciHatDorduncuDurak	110,9551	776,686	9,248	272,73	7	1
	IndBindiIkinciHatIkinciDurak	136,135	952,945	28,148	296,21	7	2
	IndBindiIkinciHatUcuncuDurak	208,4319	1459,023	10,874	788,534	7	3
	IndBindiSonDurak	117,5691	1998,675	1,589	322,935	17	1
	IndBindiUcuncuHatBesinciDurak	66,48833	199,465	36,094	111,266	3	1
	IndBindiUcuncuHatDorduncuDurak	111,037	444,148	19,071	196,514	4	1
	IndBindiUcuncuHatIkinciDurak	67,446	269,784	22,787	130,933	4	1
	IndBindiUcuncuHatUcuncuDurak	67,92275	271,691	9,68	206,133	4	1

Tablo 15. (devamı)

Yolcuların Bekleme Süresi (Etkilenen : Yolcu)	BirHatBesinciDurak	282,9118	37344,36	0,058	835,409	132	4
	BirHatDorduncuDurak	266,233	5590,893	5,861	676,56	21	4
	BirHatIkinciDurak	229,4065	30281,66	2,232	873,882	132	3
	BirHatUcuncuDurak	262,5792	17592,8	3,746	876,884	67	4
	IkinciHatBesinciDurak	416,6434	7499,582	36,293	923,379	18	6
	IkinciHatDorduncuDurak	479,4628	90618,46	1,302	1106,379	189	7
	IkinciHatIkinciDurak	321,9622	43786,86	2,158	1050,322	136	5
	IkinciHatUcuncuDurak	618,5537	99587,15	0,928	1409,142	161	10
	KalkisDuragi	124,1674	12540,9	0,404	364,793	101	2
	SonDurak	443,3389	114381,4	1,903	1259,833	258	7
	UcuncuHatBesinciDurak	702,7451	64652,55	3,371	1272,57	92	11
	UcuncuHatDorduncuDurak	458,4633	53640,2	15,203	1131,076	117	7
	UcuncuHatIkinciDurak	462,0988	7393,58	33,521	804,471	16	7
	UcuncuHatUcuncuDurak	418,814	29735,79	4,468	944,367	71	6

Tablo 15’de 100000 kez çalıştırılan model sonucu durakların bekleme süreleri mevcuttur. Bu bekleme süreleri sonucu darboğazların bulunduğu İkinciHatBesinciDurak, İkinciHatDorduncuDurak ve İkinciHatUcuncuDuraklarının ortalama bekleme süreleri dk cinsinden sırası ile 6,7,10 dk’dır. Duraklardan geçen otobüs sayıları ise sırası ile 7,7 ve 7’dir.

Tüm bu tablolara baktığımızda ise duraklardan geçen maksimum ve Minimum Otobüs sayısı Şekil 27’deki gibidir.

**Şekil 27.** Otobüslerin max ve min bekleme süreleri

Anlamlılık testi yapıldığında %90 doğruluk payı ile yani $\alpha = 0.1$ iken anlamlılık düzeyi 0.1’den küçükse fark istatistiksel olarak anlamlıdır. Alpha değeri 0.1 olduğunda anlamlılık testi daha toleranslı olacaktır. Bu da bize daha geniş bir kabul alanı sağlamaktadır.

Yapılan testte P-değeri yaklaşık 0.062 olduğunda bu değer anlamlılık düzeyi 0.1'ten küçük olduğu için, istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu ve H_0 hipotezinin reddedileceği anlamına gelmektedir.

Senaryo 1 ve Senaryo 2 için darboğazların olduğu duraklardaki bekleme süreleri alınarak anlamlılık testi yapılmıştır. Bu da Tablo 13'deki iyileşme oranlarının anlamlı olduğunu göstermektedir.

```
from scipy import stats

# Veriler
senaryo1_durak_bekleme = [16.80, 19.47, 10.53]
senaryo2_durak_bekleme = [10.07, 8.27, 6.6]
# Bağımsız iki örneklem t-testi
t_statistic, p_value = stats.ttest_ind(senaryo1_durak_bekleme, senaryo2_durak_bekleme)

# Hipotez testi sonuçları
alpha = 0.1
print("T İstatistiği:", t_statistic)
print("P-değeri:", p_value)

if p_value < alpha:
    print("İstatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. H0 reddedilir.")
else:
    print("İstatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. H0 kabul edilir.")
```

```
T İstatistiği: 2.572341544718934
P-değeri: 0.06182555805446343
İstatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. H0 reddedilir.
```

Şekil 28. Anlamlılık testi (t -testi sonuçları)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kentiçi ulaşım problemlerinin çözümünde akıllı ulaşım sistemlerine, bunların modellenmesi ile dijital ikiz arasındaki kavramlara değinilmiştir. Bu sayede oluşturulan modeller ile güzergahlar belirlenerek araçların operasyonlarını inceleyebilmek için farklı hatlar üzerinde hareket eden ve duraklarda duran araçlar için yolcu ve otobüslerin parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametrelere göre ise eksiklikler tespit edilerek modelde dijital ikiz kurularak darboğazlar için iyileştirilmeler sağlanmıştır.

Modelleme ile optimum otobüs sayısı, sefer aralıkları belirlenebilmektedir. Yayaların hızı, talebi, indi-bindi hareketleri ve duraklara inen yolcu sayıları tespit edilebilmektedir. Dijital ikiz kavramı ile birleşince otobüs ve yayaların anlık verilerinin sürekli olarak takibi sağlanabilmektedir. Bu, gerçek zamanlı eksikliklerin, engellerin belirlenmesi ve kentiçi toplu taşıma sistemlerindeki sorunların çözümünü kolaylaştıracaktır.

Geliştirilen bu model verimli trafik akışını organize etmek, trafik akışlarının dağılımını optimize etmek, yolculara yollardaki durum hakkında bilgi sağlamak ve dijital ikiz yardımı ile sorunların çözümlenerek ulaşım altyapısını geliştirmek gibi görevlere hizmet edebilmektedir. Ayrıca akıllı toplu ulaşım ve dijital ikizlerin kullanımı, yapay zeka ile işlenen ve gelecekteki tahminler için bir veri tabanı oluşturan trafik durumu hakkında sürekli ve hızlı bir şekilde bilgi toplanmasına olanak tanıyabilmektedir.

Akıllı Ulaşım Sistemleri ve dijital ikiz teknolojileri sayesinde yolculara anlık bilgiler, gerçek zamanlı veriler ulaştırılabilir. Bu nedenle akıllı duraklara yerleştirilen sensörler ve kişisel cihazlardan alınan anlık veriler ile yolcu yoğunluğu ve otobüsün güzergah ve tahmini varış sürelerine yolcuların ulaşımı sağlanarak darboğaz olan ikinci hattaki duraklardaki yolcu geliş sıklıkları azaltılabilir. Dijital ikiz teknolojileri sayesinde duraklardaki yoğunluk incelenebilmekte, yolcular farklı durak ve güzergahlara yönlendirilerek durak içi trafiği düzenleyebilmekte ve bekleme sürelerinde azalışı sağlamaktadır.

Bu teknolojiler sayesinde kişiselleştirilen yolculuk planlamaları yapılarak optimize edilmiş rota önerileri sunularak hem bekleme süreleri azaltılabilir hem de geliş sıklıkları azaltılabilmektedir. Dijital ikiz teknolojileri kullanılarak sensörler aracılığı ile alınan ve depolanan bilgiler sayesinde hem otobüsler hem de yolcuların davranışları ile ilgili bilgiler verdiği için bu depolanan bilgiler ile analizler yapılarak yolcu ve otobüslerin geliş sıklıklarını optimize etmeyi sağlamaktadır.

Dijital ikizlerin kullanımı, gerçek ulaşım ve karayolu ağının doğru bir şekilde simüle edilmesini mümkün kılmakta ve darboğazları değerlendirmek için hesaplamalar yapmak da dahil olmak üzere ulaşım ağının geliştirilmesine ilişkin kararlar almak için tahmine dayalı analitiğe dayalı yaklaşımların uygulanmasına hizmet etmektedir.

Bu çalışma bağlamında 'dijital ikiz', yolun ayrıntılı bir sanal ortamını oluşturan ve modelleme ve deneylere olanak sağlayan bir model olarak anlaşılmaktadır. Başlıca amacı çözümleri test etmenin yanında farklı durumları simüle edebilmektir. Bu model, dijital ikiz ve akıllı toplu ulaşım teknolojileri ile güzergahların ve durakların sensörlerinden alınan birikmiş bilgiler sayesinde düzeltilebilmektedir.

Çalışmada duraklardaki darboğazlar dijital ikizdeki sinyaller sayesinde tespit edilerek anlık darboğazların olduğu hatlardaki otobüs dağılımlarının değiştirilebileceği öngörülmüştür. Alınan sonuçlara göre ise Senaryo 2’de de görüldüğü gibi bekleme sürelerinde azalmalar meydana gelmiştir. Diğer araştırmalardan en büyük farkı ise sistemin tamamının performansını iyileştirmektir. Otobüs üretimini arttırmadan darboğazları önlemenin ise maliyete olumlu etkisi olmaktadır.

KAYNAKÇA

- Aktürk, B. 2022. Digital Twin For Enhanced Construction Project Management During Construction. Y.Lisans Tezi, Mimarlık, İstanbul.
- Ali, A., Kim, J. ve Lee, S., 2016. Travel Behavior Analysis using Smart Card Data. KSCE Journal of Civil Engineering, 20 (4), 1532-1539.
- Andersen, J. ve Sutcliffe, S. 2000. Intelligent Transport Systems (ITS) – An Overview. IFAC Technology Transfer in Developing Countries, Pretoria, 106.
- Ateş, M., 2017. Akıllı Şehirler ve Dünya Şehirlerinin Geleceği. İtü Vakfı Dergisi, 77, 28-31.
- Attaran, M. ve Çelik, B. G., 2023. Digital Twin: Benefits, Use Cases, Challenges, and Opportunities. Decision Analytics Journal, 6, 1-10.
- Aydın, Ö. Ve Yükçü S., 2020. Maliyet Düşürme Yöntemi Olarak Dijital İkiz. Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi, 22(3), 563-579
- Bodur, M. A., 2012. Akıllı Ulaşım Sistemleri. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Ceder, A., Wilson, N. H., 1986. Bus network design. Transportation Research Part B: Methodological, 20(4), 331-344.
- Chakroborty, P. and Dwivedi, T., 2002. Optimal Route Network Design for Transit System Using Genetic Algorithms. Engineering Optimization, 34(1), 83-100.
- Cosgrove M and al, 2011. Smart Cities series: introducing the IBM city operations and management solutions, IBM.
- Çapalı, B., 2009. Akıllı Ulaşım sistemleri ve Türkiye’deki Uygulamaları. Y.Lisans Tezi, T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Çelik, B. ve Yusuf, Z., 2019. Deniz Ulaştırmasında Etmen Tabanlı Modelleme ve Benzetim İncelemesi. Denizcilik Fakültesi Dergisi, 11 (2), 151-176.
- Çelikyay, H. H., 2008. Teknoloji Girdabından Akıllı Şehre Dönüşüm: İstanbul Örneği. II.Türkiye Lisanüstü Çalışmaları Kongresi - Bildiriler Kitabı V, 1315-1328 p.
- Demir, A., 2023. Akıllı Şehirlerde Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Yeri ve Önemi: Sakarya İli Örneği. Y.Lisans Tezi, Trafik Enstitüsü, Ankara.
- Doğan, G. 2015. Yolcu Bilgilendirme Sistemlerinin Toplu Ulaşım Kullanıcı Davranışları Üzerindeki Etkilerinin Modellenmesi (Yüksek Lisans Tezi) T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Doğan, G., Özuysal, M., 2017. Toplu Ulaşım Bekleme Süresini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Güvenilirlik, Yolcu Bilgilendirme Sistemi ve Fiziksel Koşullar. İMO Teknik Dergi, 7927-7954.
- Eken, S. ve Sayar, A., 2014. Web Tabanlı Akıllı Bir Durak Sisteminin Gerçekleşmesi. T.C. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 2 (1), 62.
- Ekren, G. ve Kesim M., 2016. Mobil İletişim Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Mobil Öğrenme. Açık öğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi AUAd, 2 (1), 36-51.
- Göl, B., 2019. Akıllı Toplu Ulaşım Sistemlerinin Geliştirilmesine Yönelik Model Önerisi. Y.Lisans Tezi, Yönetim Bilişim Sistemleri, Sakarya.

- Güneş, M., 2022. Akıllı Şehirler ve Akıllı Şehirlerin Sıralanmasına Yönelik Bir Çok Kriterli Karar Verme Uygulaması. Y.Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul.
- Güngör, A., 2017. Akıllı Şehir Otopark Sistemleri'nde NFC Kartların Ödeme Aracı Olarak Kullanılması Ve Güvenlik Alt Yapısı; İspark Ve İstanbul Kart Örneği. Y.Lisans Tezi, İstanbul.
- Kim, G. C., 2007. Challenges for Environmentally Sustainable Transport In Seoul. Seoul Development Institute, 112-116.
- Kim, J. ve Kang, S., 2005. Development of Integrated Transit-Fare Card System in the Seoul Metropolitan Area. Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems 9th International Conference, KES 2005, (Melbourne, Australia, September 14-16), 95-100.
- Köz, A., 2011. Akıllı Ulaşım Sisteminin Kentiçi Uygulamaları; İstanbul Örneğinin Değerlendirilmesi. Y.Lisans Tezi, T.C. Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Lom, M. ve Pribyl, O., 2021. Smart City Model Based On Systems Theory. International Journal of Information Management, 56, 102092.
- Negri, E., L. Fumagalli, and M.J.P.M. Macchi, 2017. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. 11, 939-948.
- Ojo, A., Dzhusupov, Z. ve Curry, E., 2016. Exploring the Nature of the SmartCities Research Landscape. Smarter as the New Urban Agenda: Public Administration and Information Technology , Springer International Publishing, 23-47, Switzerland.
- Örselli, E. ve Akbay, C., 2019. Teknoloji ve Kent Yaşamında Dönüşüm: Akıllı Kentler. Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi, 2 (1), 228-241.
- Özcan, M. (2013). Bir Android Uygulama Modeli: İstanbul Toplu Taşıma Bilgisi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Özgüner, M., Ovalı, E., 2023. Dijital İkiz Teknolojisinin İmalat Sektöründe Kullanımı Noktasında Kritik Öne Sahip Başarı Faktörlerinin Swara Yöntemiyle Değerlendirilmesi. Doğu Üniversitesi Dergisi, 24 (1), 449-462.
- Pehlivan, H. 2005. Kara Ulaşımında GPS Teknolojisi Uygulamaları, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23 -25 Kasım 2005, İstanbul Teknik Üniversitesi, 544-551.
- PTV, A., 2011. VISUM-Fundamentals, Karlsruhe, Germany: PTV Traffic Mobility Logistics.
- Qi, Q. and F.J.I.A. Tao, 2018. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. 6, 3585- 3593.
- Qi, Q., *et al.*, 2018. Digital twin service towards smart manufacturing. 72(1), 237-242.
- Rosen, R., *et al.*, 2015. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. 48(3), 567-572.
- Seyhan, O., 2013. Kamu Yönetiminde Etmen Tabanlı Modelleme. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 14 (1), 69-86.
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020. Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi ve 2020-2023 Eylem Planı. Ankara, <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/ulusal-akilli-ulas-im-sistemleri-strateji-belgesi-ve-2020-2023-eylem-planı.pdf>, (13.01.2024).
- Tao, F., & Qi, Q., 2019. Make more digital twins. Nature, 573, 490-491.

- Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı (UDHB), 2014. Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi (2014-2023) ve Eki Eylem Planı (2014-2016). Strateji Geliştirme Başkanlığı. Ankara.
- Yardım, M. S. ve Akyıldız, G., 2005. Akıllı Ulaştırma Sistemleri ve Türkiye’deki Uygulamalar. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ulaştırma Kongresi Bildiriler Kitabı.
- Yokota, T. ve Weiland, R. J., 2004. ITS System Architectures for Developing Countries. World Bank



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Melike BAYINDIR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Beykoz Anadolu Lisesi (2011 – 2015)
Lisans:	Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği (2015 – 2019)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı (2021 – 2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi