



**BANDIRMA
ONYEDİ EYLÜL
ÜNİVERSİTESİ**



JITSA

**Journal of Intelligent Transportation
Systems and Applications**

Cilt / Volume: 8

Sayı / Issue: 1

Yıl / Year: 2025



Akıllı Ulaşım Sistemleri disiplinler arası bir konu ve uygulamaları sektörler arası olduğundan derginin ismine "Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları" dergisi olarak karar verilmiştir. Dergimiz Mühendislik, Teknik Bilimler, Temel Bilimler ve Sosyal Bilimlerin lojistik, ulaşım, haberleşme ve bilişim alanlarını ilgilendiren yapısıyla bilim dünyasına önemli katkı sağlayacaktır.

Dergide, Türkçe ve İngilizce dillerinde makaleler yayımlanmaktadır. Derginin içerdiği konular sayfanın sağ tarafında Konu Başlıkları–Journal Topics sekmesinde verilmiştir. Değerlendirilmek üzere dergimize gönderilen metinlerin, daha önce yayımlanmamış, yayımlanmak üzere kabul edilmemiş ve yayımlanmak için değerlendirilme sürecinde olmaması gerekir. Değerlendirme sürecinde olan ve yayımlanan eserlerin sorumluluğu tümüyle yazar(lar)a aittir. Sayılarımız elektronik olarak yayımlanır. Yayımlanan eserlerin telif hakları Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi'ne aittir. Yayımlanması istenilen çalışmalar dergi yazım kuralları ve yayın ilkelerinde belirtilen koşullara uygun şekilde hazırlanıp gönderilmelidir. Dergiye sunulan makaleler öncelikle şekil ve içerik yönünden ön incelemeye tabi tutulmaktadır. Şekil ve içerik olarak uygun bulunan makaleler hakem tayin edilmek üzere yayın kuruluna sunulmaktadır.

Değerlendirme sürecine geçildikten sonra hakemlik süreci ortalama 3 ile 5 hafta arası sürmektedir. Yayın Kurulu tarafından incelenen makalelere uygun bulunduğu takdirde en az iki hakem atanmaktadır. Hakemlerden gelen raporlar doğrultusunda, makalenin yayımlanmasına, rapor çerçevesinde yazar(lar)dan düzeltme, ek bilgi ve kısaltma istenmesine veya yayımlanmamasına karar verilmektedir. Hakemlerden bir olumlu ve bir olumsuz rapor verilmesi halinde ilgili çalışma Dergi Editörlüğü tarafından uygun görülmesi halinde üçüncü bir hakeme de gönderilmektedir.

Sahibi Prof. Dr. İsmail BÖZ
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ
Dergi Yöneticisi Editör Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ
Editörler Prof. Dr. Hasan ERDAL Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ Prof. Dr. Nevzat ONAT Prof. Dr. Necla TEKTAŞ Doç. Dr. Selahattin KÖŞUNALP Dr. Öğr. Üyesi Caner PENSE Dr. Öğr. Üyesi Cemil KÖZKURT Dr. Öğr. Üyesi Taylan ENGIN
Alan Editörleri Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ Prof. Dr. Serap İNCAZ Prof. Dr. Abdullâh YESİL Prof. Dr. İlgün YAŞAR Prof. Dr. Necla TEKTAŞ Doç. Dr. Abdullâh ELEN Doç. Dr. Adem DALGALI Doç. Dr. Harun OZBAY Doç. Dr. İlyas ÖZER Doç. Dr. Öğür ATIK Dr. Öğr. Üyesi Ahmet FİDAN Dr. Öğr. Üyesi Caner PENSE Dr. Öğr. Üyesi Cemil KÖZKURT Dr. Öğr. Üyesi Melih Naci AĞAOĞLU Dr. Öğr. Üyesi Taylan ENGIN Öğr. Gör. Ömer İNAN
Yayın ve Danışma Kurulu Prof. Dr. İsmail Böz (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Mehmet TEKTAŞ (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Necla TEKTAŞ (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. A. Fevzi BAĞA (Marmara Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Alpaslan SEREL (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Bilent AKINÖĞLU (ODTÜ) (Türkiye) Prof. Dr. Erdiğün KÖSE (İstanbul Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Ergun Saat VAROL (İstanbul Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Feyzullah TEMURTAŞ (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Ferit KACAR (İstanbul Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Hasan ERDAL (Marmara Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Hatice TÜYÜDES YAMAN (ODTÜ) (Türkiye) Prof. Dr. M. Nuri SEYMAN (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Mehmet BEKDEMİR (Ezineci Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Mehmet TEKİN (Gaziosmanpaşa Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Mustafa ELİÇALLI (İstanbul Ticaret Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Nevzat ONAT (Manisa Celal Bayar Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Oğuzhan BEHİR ALANKUŞ (Okan Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Serap İNCAZ (Karadeniz Teknik Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Serdal TERZİ (Süleyman Demirel Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Serif KILIÇ (Ankara Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Turan ARSLAN (Bursa Uludağ Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Viktor Hacker (Graz University of Technology) Prof. Dr. Yücel TAŞDEMİR (Yozgat Bozok Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Abdullâh YESİL (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. Gülşah BİNASCI (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi) (Türkiye) Prof. Dr. İlgün YAŞAR (Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Adem DALGALI (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Harun OZBAY (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. İlyas ÖZER (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Meseret NALÇAKAN (Eskişehir Teknik Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Metin Mulla AYDIN (Samsun 19 Mayıs Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Mijale SOYTÜRK (Marmara Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Murat ERGÜN (İTÜ) (Türkiye) Doç. Dr. Selahattin KÖŞUNALP (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Selçuk ALP (Yıldız Teknik Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Selçuk BAŞ (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Ulaş ÇELİK (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Viktor HACKER (Graz University of Technology) (Avusturya) Doç. Dr. Aslan COBAN (Sakarya Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Cemil OKAR (Gazi Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Erme DEMİR (Anadolu Bilim Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Erhan ÇELİĞİL (Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. İbrahim AKBEN (Hasan Kalyoncu Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Ferit YAKAR (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Murat AY (Yozgat Bozok Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Melis ALMULA KARADAYI (İstanbul Medipol Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Öğür ATIK (Dokuz Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Onursal ÇETİN (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Serif DİLEK (Karadeniz Üniversitesi) (Türkiye) Doç. Dr. Yasin SARIKAVAK (Yıldırım Beyazıt Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Caner PENSE (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) Dr. Öğr. Üyesi Faah YONAR (Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Melih Naci AĞAOĞLU (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Mithat Şimşek (Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ARUÇU (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Mürmet İPEK (Sakarya Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Murat Emr KORKMAZ (Samsun Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Süreyya KOCABEY (Sağlık Bilimleri Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Taylan ENGIN (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Ziya ÇAKICI (İzmir Demokrasi Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi İhsan AKTAŞ (Karadeniz Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AYVAZ (Samsun Üniversitesi) (Türkiye) Dr. Evangelos Mitsakis (Hellenic Institute of Transport) (Yunanistan) Dr. Lee Young Kyun (Director of ITS Korea) (Kore) Öğr. Gör. Turan Volkan KÜÇÜK (Rize Çeşitli Edebiyat Üniversitesi) (Türkiye) AUS Türkiye Demiş Başkan, Esma DİLEK (Türkiye) Uzman, Hasan TUFAN (Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı) (Türkiye) Barış YILDIRIM (Kampüs ve Dökmünasyon Daire Başkanı) (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Türkiye)
Teknik Editör Dr. Öğr. Üyesi Caner PENSE (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)
Dergi Sekreteryası Asy. Gör. Dr. Senic Gülşah DEMİR (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)
Mizansaj Asy. Gör. Dr. Fatih ERGEZER (Bandırma Onyedi Eylül Ünl.)
Ön Kontrol Dr. Öğr. Üyesi Caner PENSE (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)
Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi (AUSUD) Editörlüğü, 10200, Bandırma/BALIKESİR Web: http://dergipark.gov.tr/ausa Telefon: +90 266 717 01 17 Fax: +90 266 717 00 30 E-posta: ausud@bandirma.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENT

Ulaştırmanın Beşinci Modu: Hyperloop Sistemi ve Siber Güvenlik	1-21
Fifth Mode of Transportation: Hyperloop System and Cyber Security	
Esmâ Dilek, Özgür Talih, Bahadır Fatih Yıldırım	
Derleme	
Driver violation analysis: IETT example	22-38
Sürücü ihlal analizi: İETT örneği	
Gizem Kaya, Ebru Demirci, Bükra Doğaner Duman	
Research Article	
Elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum yerleşimine yönelik coğrafi analiz araçlarının geliştirilmesi	39-52
Development of geographic analysis tools for optimal placement of electric vehicle charging stations	
Arif Çağdaş Aydınoğlu, Tansu Çetin, Abdullah Uğur Topal, Süleyman Şişman	
Araştırma makalesi	
Smart traffic monitoring with YOLOv9 object detection algorithm	53-65
YOLOv9 nesne tespit algoritması ile akıllı trafik izleme	
Recep Bilal Sıkar, Sinem Bozatlı Kartal	
Research Article	
Yapay Zekâ ve Yeşil Ulaşım Birlikteliğinin Kente Etkileri	66-89
The Impact of the Integration of Artificial Intelligence and Green Transportation on Cities	
Berna Mumcu, Havva Filiz Alkan Meşhur	
Araştırma makalesi	

Acil durum araçlarının yönlendirilmesinde akıllı ulaşım çözümleri: Ambulans rota oluşturma optimizasyonu .. 90-103

Intelligent transportation solutions in the guidance of emergency vehicles: ambulance route optimization

Ceren Özcan Tatar, Zahra Khoda Karımı, Murat Akın, Emrah Yılmaz, Ozan Kıvanç, Mehmet Küçükpehlivan

Araştırma makalesi

Demiryolu araçları için radyo frekans haberleşmeli çarpışma uyarı sistemi kavramsal tasarımı 104-116

Radio frequency communication based railway vehicles collision avoidance system

Mehmed Akif Özkaya, Ekrem Çağlar

Araştırma makalesi

Benchmarking Intelligent Transportation Systems Performance of Urban Public Transportation Operations . 117-129

Toplu Taşıma Organizasyonlarında Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirme Yöntemi ile Performans Analizi

Tugay Çelik, Soner Haldenbilen, Halim Ceylan

Research Article

Türkiye’de Yenilikçi Bir Adım: Aksaray CFI Kavşak Tasarımı 130-148

Innovative Step in Türkiye: Aksaray CFI Intersection Design

Sefa Gündoğdu, Cemal Önal

Araştırma makalesi

Akıllı kent donatılarının ulaşım sistemlerindeki rolü ve etkileri 149-169

The role and impact of smart urban infrastructure in transportation systems

Rukiye Gizem Öztaş Karlı

Araştırma makalesi

Factors Affecting the Integration of Micromobility into Smart Cities and Effects on Urban Transport..... 170-183

Mikromobilitenin Akıllı Şehirlere Entegrasyonunu Etkileyen Faktörler ve Şehir İçi Ulaşım Etkileri

Nuriye Kabakuş, Merve Eyüboğlu

Research Article

TRDİZİN

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

EBSCO

DergiPark
AKADEMİK
ev sahipliğinde

idealonline

BASE
Bielefeld Academic Search Engine

CiteFactor
Academic Scientific Journals

RESEARCHBIB
ACADEMIC RESOURCE INDEX

OJOP
Journal Platform and
Indexing Association
<https://www.ojop.org> | Mail: info@ojop.org

ASOS
indeks

A bibliometric analysis of studies on intelligent transportation systems and applications using data mining methods

..... 184-203

Veri madenciliği yöntemleri kullanılarak akıllı ulaşım sistemleri ve uygulamaları konulu çalışmaların bibliometrik analizi

Kadir Kesgin, Dilek Zeren Özer

Research Article

Advanced Multi-Robot Path Planning Based on Grey Wolf and Teaching-Learning Based Optimisation 204-222

Gri Kurt ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyona Dayalı Gelişmiş ÇokluRobot Yol Planlaması

Oğuz Mısır

Research Article

Otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımının donatanlar açısından değerlendirilmesi ... 223-244

Evaluation of the using autonomous marine vehicles in the commercial maritime transportation from the point of view shipowners

Ramazan Eyüp Gergin

Araştırma makalesi

Efficient on-Street Parking Management: Priority Parking Permits for Residents Integrated with Digital Systems, Case of Istanbul 245-263

Etkili Yol Üstü Araç Park Yönetimi: Dijital Sistemlerle Entegre Edilmiş Mahalle Sakinleri için Park Önceliği, İstanbul Örneği

Hakan İnaç

Research Article

Navigating the E-Scooter Market in Türkiye: A Theory-Guided Qualitative Analysis 264-284

Türkiye'de E-Skuter Pazarında Yol Almak: Teori Temelli Nitel Bir Analiz

Burak Yaprak, Caner Pense, Ali Ercan, Serhat Doğan

Research Article

Motorlu kara taşıtlarında güvenli ve güvenilir veri yönetim modeli 285-299

Secure and reliable data management model in motor vehicles

Suat Onur, Mehmet Tektaş, İlyas Özer, Ufuk Çelik, Emrah Dönmez, Caner Pense

Araştırma makalesi

TRDİZİN

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

EBSCO

DergiPark
AKADEMİK
ev sahipliğinde

idealonline

BASE
Bielefeld Academic Search Engine

CiteFactor
Academic Scientific Journals

RESEARCHBIB
ACADEMIC RESOURCE INDEX

OJOP
Journal Platform and
Indexing Association
<https://www.ojop.org> | Mail: info@ojop.org

ASOS
indeks

Derleme Makalesi

Ulaştırmanın Beşinci Modu: Hyperloop Sistemi ve Siber Güvenlik

Esma Dilek^{1,*}, Özgür Talih², Bahadır Fatih Yıldırım³

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgi Güvenliği Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

²Fen Bilimleri Enstitüsü, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri Tezli Yüksek Lisans Programı, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye

³Ulaştırma ve Lojistik Fakültesi, Ulaştırma ve Lojistik Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*Correspondence: esma.dilek@gazi.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1511769

Özet: Hyperloop; kapsül adı verilen bileşenin manyetik kaldırma teknolojisi yardımıyla havada süzülmesi, bir tüp içerisinde çok yüksek hızla hareket ettiği ve kapsülün kalkış ile varışlarının kontrol edildiği terminallerden oluşan yenilikçi bir kara taşıma modudur. Ultra yüksek hızlı, sürekli bir taşıma sistemi olan hyperloop; birbiri ile entegre ve birlikte çalışan birçok alt sistem içerdiğinden sağlam bir haberleşme altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Haberleşme, entegrasyon ve dijitalleşme teknolojilerinin yoğun kullanıldığı taşımanın bu modunun, emniyetli ve güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi için hyperloop sistemini oluşturan haberleşme türlerinin siber saldırılara ve tehditlere karşı güvenli olması gerekmektedir. Bu çalışmada, hyperloop teknolojisine genel bir bakış yapılarak taşımanın bu türünü oluşturan unsurların, kendi içinde ve dış dünya ile haberleşmesini sağlayan ağ altyapısı incelenmiştir. Hyperloop sistemini oluşturan haberleşme türleri, teknolojileri, ağ altyapısını oluşturan ağ katmanları ele alınarak haberleşme yöntemleri ve zorlukları değerlendirilmiştir. Hyperloop sistemini hedef alabilecek siber güvenlik saldırıları, siber güvenlik tehditleri ve risk azaltıcı stratejiler araştırılarak literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca Türkiye’de hyperloop sistemi geliştirme girişimleri özetlenerek bu sistemin siber güvenliğini sağlamak için öneriler sunulmuştur. Bu çalışma, hyperloop teknolojisine, bu sistemi oluşturan haberleşme türlerine ve bunların siber güvenliği konularına odaklanan, güvenli bir hyperloop sistemi geliştirme çabalarına katkı sunmayı amaçlayan literatürdeki nadir çalışmalar arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Hyperloop; haberleşme; siber güvenlik; siber saldırı; Türkiye

Fifth Mode of Transportation: Hyperloop System and Cyber Security

Abstract: Hyperloop is an innovative mode of land transport, in which the component called capsule floats in the air with the help of magnetic levitation technology, moves at very high speed in a tube and consists of terminals where the departure and arrival of the capsule are controlled. Hyperloop, which is an ultra-high-speed continuous transport system, requires a robust communication infrastructure as it includes many subsystems that are integrated with each other and work together. In order for this mode of transportation, where communication, integration and digitalization technologies are used intensively, to provide safe and secure service, the communication types that make up the hyperloop system must be secure against cyber attacks and threats. In this study, an overview of hyperloop technology is made and the network infrastructure that enables the elements that make up this mode of transport to communicate within themselves and with the outside world is examined. The communication types, technologies, network layers that make up the hyperloop system, communication methods and difficulties are evaluated. It is aimed to contribute to the literature by investigating cyber security attacks, cyber security threats and risk mitigation strategies that may target the hyperloop system. In addition, hyperloop system development initiatives in Türkiye are summarized and recommendations are presented to ensure the cyber security of this system. This study is one of the rare studies in the literature that focuses on hyperloop technology, the communication types that make up this system and their cyber security issues, aiming to contribute to the efforts to develop a secure hyperloop system.

Keywords: Hyperloop; communication; cyber security; cyber attack; Türkiye

1. Giriş

Sürdürülebilir ve yaşanabilir dünya hedeflerini gerçekleştirmek için ülkelerin belirlediği yol haritalarında, farklı disiplinlere sahip birçok sektöre, oldukça önemli görevler düşmektedir. Bu doğrultuda, küresel iklim hedefleri ile sürdürülebilir şehirler ve toplumlar konusunda yoğun çalışmalar yapılan öncelikli alanlardan biri ulaştırma sektörü olup yolcu ve yüklerin taşınmasına yönelik ulaştırma hizmetlerine ve faaliyetlerine ilişkin yöntemler; gelişime, değişime ve dönüşüme açıktır. Ayrıca ulaştırma faaliyetlerinin hedefleri arasında; hız, güvenlik, emniyet, konfor, etkin maliyet gibi toplumsal ihtiyaçları ve beklentileri karşılayarak çevresel olumsuz etkilerin azaltılması ile enerji ve kaynak verimliliği konularına önem verilmesi yer almaktadır. Bu hedeflerin gerçekleşmesi ise ulaştırma ve hareketlilikte kullanılan geleneksel yöntemlerin iyileştirilmesini ve günümüzde yenilikçi yaklaşımların benimsenmesini gerektirmektedir. Özellikle havayolu taşımacılığı ile motorlu karayolu ve gemi taşımacılığı emisyonlarında meydana gelen artış, alternatif sürdürülebilir ulaştırma ve hareketlilik yöntemleri arayışlarını yoğunlaştırmıştır.

Dünya genelinde, özellikle yüksek hızlı kara yolu taşımacılığı sektöründe, toplu taşıma sistemlerinin faydalarını daha üst düzeye çıkarmak için mevcut ulaştırma sistemlerini değiştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu çerçevede son gelişmelerden biri Elon Musk tarafından tasarlanan, ultra yüksek hızlı (Mitropoulos vd., 2021), yenilikçi kara ulaştırması modu olan hyperloop sistemidir (Premasagar & Kenworthy, 2022). Özellikle son yıllarda özel sermaye yatırımlarındaki hızlı artış, hyperloop taşımacılığına yönelik araştırma ve geliştirmeler için kitle kaynak ve bazı kamu fonları oluşturulması, test pistlerinin inşası ve farklı ülkelerde ticari hatların işletilmesi projeleri, vakum tüpü taşımacılık teknolojileri ve ultra yüksek hızlı ulaşımın fizibilitesi ile performansı konularında büyük beklentiler ortaya çıkarmıştır (Hansen, 2020).

İlk kez 2013 yılında orta menzilli veya şehirler arası seyahat için yenilikçi bir ulaştırma modu olarak önerilen hyperloop teknolojisini geliştirme çalışmaları; İspanya (Zeleros, 2024), Hollanda (HARDT, 2024), Amerika Birleşik Devletleri (ABD)-İsviçre (swisspod, 2024), İsviçre (euroTUBE, 2024), Kanada-Fransa (TRANSPOD, 2024), ABD-Fransa (HyperloopTT, 2024), Hindistan (DGWHyperloop, 2024), Polonya (NEVOMO, 2024), ABD (Virgin Hyperloop One), Almanya (TUM Hyperloop, 2023), İtalya (Hyperloop Italia, 2024), Çin, Birleşik Krallık (Kale, 2019), Suudi Arabistan, Rusya ve İsveç gibi birçok ülkede, özel girişimler tarafından sürdürülmektedir. Bu girişimlere ek olarak Avrupa genelinde hyperloop sistemi geliştirmek için iş birliği yapan 25'ten fazla özel sektör kuruluşu ve araştırma enstitüsünü bir araya getiren bir kamu-özel sektör ortaklığı olarak Hyperloop Geliştirme Programı (Hyperloop Development Program, 2024) geniş bir ekosistemi temsil etmektedir (Nøland, 2024). Hyperloop teknolojisinin savunucuları hem yolcu taşımacılığı hem de yük taşımacılığı bakımından zaman tasarrufu, kolaylık, hizmet kalitesi ve enerji verimliliği gibi potansiyel faydalarına işaret etmektedir. Sistem elektrikle çalışacak şekilde tasarlandığından, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanımını ve enerji depolamayı içeren stratejilere odaklanmaktadır (U.S. Department of Energy, 2021). Hyperloop fikri, geleneksel yük ve yolcu taşımacılığında kullanılan kara, demir, deniz ve havadan oluşan ulaştırma modları alışkanlıklarına alternatif olabilecektir. Aynı zamanda ulaştırma ve hareketlilik paradigma değişiminin benzersiz bir örneği olmaya aday bir yaklaşımdır.

Hyperloop ulaştırma sisteminin dünyanın herhangi bir yerinde inşa edilmesi kararı; sistemin sürdürülebilirlik, ekonomi, güvenlik ve yolcu taleplerine cevap verme gibi özelliklerine bağlıdır (Özbek & Çodur, 2021). Son yeniliklerle birlikte hyperloop sistemi; sürdürülebilir, kendi kendine çalışan, yüksek hızlı, güvenli ve gelecek için umut verici bir ulaştırma modu olarak tanımlanabilmektedir, ancak içerdiği eksiklikler nedeniyle değişiklik, iyileştirme ve geliştirmelere ihtiyaç bulunmaktadır (Armağan, 2020).

Hyperloop konusunda literatürde birçok araştırma bulunmakta olup farklı disiplinlerden birçok araştırmacının konuya ilgi duyduğu görülmektedir. Hyperloop sistemi ve altyapısı, tüp yapısı, tüp-kapsül ara yüzü, kapsül gibi hyperloop sisteminin fiziksel bileşenlerine ilişkin bilimsel çalışmaların olduğu gözlenmektedir. Hyperloop ağ yapıları, iletişim teknolojileri, enerji, emniyet, güvenlik, çevre gibi konularda da çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Hyperloop sistemine ilişkin tartışma ve gelişmeler de araştırma konusu olarak çalışılmıştır (Gkoumas, 2021).

Bu çalışmada; hyperloop sisteminde yer alan haberleşme ağı, haberleşme türleri, haberleşme teknolojileri, bu sistemi hedef alan siber güvenlik tehditleri ile risk azaltıcı stratejiler ele alınarak genel bir bakış açısıyla incelenmiştir. Hyperloop sistemi, henüz küresel olarak herhangi bir yerde tam anlamıyla işlevsel bir teknoloji olmadığından; bu sistemin faydaları, zorlukları ve karşılaşılan sorunlar, varsayımlara dayanmaktadır. Hyperloop sisteminin güvenli ve emniyetli bir şekilde yük ve yolcu taşımacılığında kullanılabilmesi amacıyla mevcut yaklaşımlar incelenmiş, hyperloop haberleşmesi ve siber güvenliğiyle ilgili literatür çalışmaları gözden geçirilmiştir.

Bu çalışmanın temel özellikleri ve önceki çalışmalardan farkları, aşağıda özetlenmiştir:

- Hyperloop teknolojisi ve fiziksel bileşenlerindeki gelişmeler, genel bir bakış açısıyla ele alınmıştır.
- Fiziksel bileşenlerin haberleşme gereksinimleri, bunu nasıl sağlayacakları ve bu kapsamdaki sınırlılıkların neler olduğu incelenmiştir.
- Hyperloop bileşenlerinin birbirleri ve dış dünya ile haberleşmesinin yanında yolcu, kullanıcı ve sürücülerin seyahatleri esnasında dijital fırsatlardan nasıl yararlanabileceği araştırılmıştır.
- Hyperloop teknolojisine yönelen siber güvenlik zafiyetleri, karşılaşılan siber saldırı türleri, kullanılan siber güvenlik standartları ve yaşanan zorluklar, bütüncül bir bakış açısıyla sunulmuştur.
- Türkiye’de hyperloop sistemi için test merkezlerinin kurulması sürecinde ya da bir pilot uygulamada; haberleşme ve siber güvenlik bileşenlerini ele alacak şekilde tasarım modelinin belirlenmesi önerilmiştir.

Bu çalışmanın geri kalan bölümü şu şekilde organize edilmiştir: İlk olarak 2. bölümde, bu çalışmada uygulanan metod özetlenmiş, 3. bölümde hyperloop teknolojisine genel bir bakış yapılarak hyperloop sisteminin haberleşme ağı, haberleşme yöntemleri, zorlukları ve çözüm önerileri incelenmiştir. Hyperloop sisteminin siber güvenliğine odaklanan 4. bölümde, siber güvenlik saldırıları ve siber riskleri azaltma stratejilerine yer verilmiştir. Son olarak 5. bölümde, sonuç ve öneriler paylaşılmıştır.

2. Metod

Bu çalışma, hyperloop teknolojisinde yer alan haberleşme sistemleri ile muhtemel siber saldırı aktörlerine ışık tutmak amacıyla literatür çalışmalarının incelenmesine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında; Web of Science, IEEE, ProQuest, Google Scholar, DergiPark Akademik elektronik veritabanlarında “hyperloop cyber security”, “hyperloop and cyber security”, “hyperloop cyber attacks”, “hyperloop communication systems”, “cyber security performance measurement”, “hyperloop siber güvenliği”, “hyperloop ve siber güvenlik”, “hyperloop siber saldırıları”, “hyperloop haberleşme sistemleri” ve “siber güvenlik performans ölçümü” anahtar kelimeleri kullanılarak yapılan arama sonucunda ulaşılan kaynaklar ile internet üzerinden erişilebilen açık erişim kaynaklar kullanılarak inceleme yapılmıştır. Araştırmalardan elde edilen sonuçlara ve değerlendirmelere çalışmada yer verilmiş, literatürdeki güncel çalışmalar ve sektörel gelişmeler göz önünde bulundurulmuştur.

3. Hyperloop teknolojisine genel bir bakış

Genellikle yeni bir ulaşım sistemine büyük bir yatırım yapıldığı durumlarda, aynı ölçüde ölçülebilir getirisi ve faydalarının olması beklenmektedir. Mevcut ve alternatif ulaşım modları ile kıyaslandığında, hyperloop sisteminin; güvenlik, emniyet, hız, düşük maliyet, konfor gibi faydalarının daha fazla olmasının yanında; hava koşullarına karşı dirençlilik, depreme karşı dayanıklılık, güzergâh üzerinde bulunan varlıklar için zararsız olma ve sürdürülebilir bir şekilde kendi enerjisini sağlayabilme özellikleriyle çok daha efektif bir ulaşım sistemi olması beklenmektedir. Kara, hava, demir ve denizyolunda kullanılan mevcut araçlar ve altyapının ötesinde, bu kriterleri karşılayabilen ve uygulanabilir olan hyperloop teknolojisi, ulaşımın beşinci modu olarak ortaya çıkmıştır (Musk, 2013).

Hyperloop sistemi, ilk olarak 1904 yılında mucit ve roket bilimci Robert Goddard tarafından, Massachusetts’teki Worcester Politeknik Enstitüsü’nde birinci sınıf fizik öğrencisiyken bir vakum tüplü tren fikri olarak ortaya çıkmıştır (Li vd., 2024). Fikir, 1906 yılında Scientific American’a sunulmuş olup

1972-1978 yıllarında Amerikalı fizikçi Robert M. Salter, son olarak da 2013 yılında Elon Musk tarafından ele alınmıştır. Bu konuda başka girişimler de bulunmaktadır, ancak Musk'ın önerisine en yakın olanı Salter'in yaklaşımıdır. Salter'in önerileri, farklı olarak proje inşaatına ilişkin tahminleri ve 1972-1978 yılları için gelir elde etmek ve maliyetleri dengelemek amacıyla yolculara ödenecek nakliye ücretlerini de içermektedir (Thompson, 2019). Elon Musk'ın buradaki temel amacı, vakumlu boru hattıyla ulaştırma konsepti ortaya koymak olduğundan, Hyperloop One'ı kurarak maglev kapsül treninin vakum ortamında tam ölçekli bir testini tamamlamıştır. Akabinde Southwest Jiaotong Üniversitesi, 2014 yılında dünyanın ilk vakum tüplü ultra yüksek hızlı maglev tren prototip test platformunu geliştirmiş, AviChina tarafından 2017 yılında “yüksek hızlı uçan tren” projesi başlatılmış ve Hyperloop Ulaştırma Teknolojisi (Hyperloop Transportation Technologies, HyperloopTT) (HyperloopTT, 2024), 2018 yılında, Çin'in ilk ticari vakum tüp ultra-yüksek hızlı demiryolu hattının Tongren'de inşa edileceğini duyurmuştur. Vakumlu tüp trenler için günümüze kadar ulaşılan normal elektromanyetik kaldırma düzeni, pnömomatik/kalıcı manyetik kaldırma düzeni ve yüksek sıcaklıkta süper iletken manyetik kaldırma düzeninden oluşan üç ana teknik çözüm bulunmaktadır (Li vd., 2024).

Hyperloop sistemi; Los Angeles-California ve San Francisco-California arasındaki mesafeyi, 35 dakikalık bir sürede katetmek için bir ulaştırma ve hareketlilik konsepti olarak önerilerek 2013 tarihli, alfa seviyedeki bir tasarım dokümanı ile Elon Musk tarafından ortaya koyulmuştur. Hyperloop sistemi, tüpün uzunluğu boyunca hem düşük hem de yüksek hızlarda taşınan kapsüllerin bulunduğu, düşük basınçlı bir tüpten oluşmaktadır. Kapsüller, basınçlı hava ve aerodinamik kaldırma özelliğine sahip bir hava yastığı üzerinde taşınmaktadır. Kapsüller, her kapsülde bulunan döndürücülerle düşük basınçlı tüp üzerinde, çeşitli istasyonlarda sabitlenmiş manyetik bir doğrusal ivmelendirici aracılığıyla hızlandırılmaktadır. Hyperloop aracına tüpün uçlarında bulunan istasyonlardan ya da tüp uzunluğu boyunca uzanan bölümlerden giriş-çıkış yapılabilmektedir (Musk, 2013).

Hyperloop ulaştırma teknolojisi henüz kavramsal aşamada olsa da bu sistem, performansı yüksek hızlı demiryolu ve hava taşımacılığı sisteminden daha üstün olabilir ve aynı zamanda seyahat süresini, nakliye maliyetlerini ve enerji tüketimini azaltabilme potansiyeline sahiptir.

Hyperloop vakum treni, (i) manyetik veya hava levitasyonu, (ii) doğrusal motor bölümü ve (iii) vakum tabanlı taşıma sisteminden oluşan üç temel parçaya dayanmaktadır. Ulaştırmanın bu teknolojisindeki temel unsurları; biri ileri, diğeri tam tersi yönde hareket eden iki tüp ve yolcuların taşınmasında kullanılan kapsüller oluşturmaktadır (Rob vd., 2019). Sistem; birçok farklı bileşen içermekte olup kapsül, tüp, tahrik sistemi, altyapı ile coğrafi ve geometrik yapıyı temsil eden rota, bunların en temel olanlarıdır (Musk, 2013). Kapsül (pod), sistemin ana omurgasıdır ve bir uçak gövdesine benzemekte olup yolcuların konfor ve emniyeti düşünülerek tasarlanmış iç mekân ve güç sistemi temel bileşenlerinden oluşmaktadır. Altyapı bileşenini ise kapsülü tüm çevresel koşullara karşı koruyan tüp, noktadan noktaya bağlantıyı sağlayan yüksek hızlı anahtarlar, sürgülü valflerle donatılmış hava kilitleri, basınç bakım sistemi, levitasyon arayüzleri, tahrik ya da itki ara yüzleri gibi cihazlar oluşturmaktadır (Delft Hyperloop, 2019; Mitropoulos vd., 2021). Ayrıca haberleşme sistemi ve test pistleri de hyperloop teknolojisinin gelişiminin önemli unsurlarıdır (Mitropoulos vd., 2021).

Geliştirilme çalışmaları devam eden yenilikçi ulaştırma modu olan hyperloop, olumsuz hava şartlarından veya diğer dış koşullardan korunmayı sağlayan ve çok yüksek hızlarda emniyetli bir seyahati mümkün hale getiren, düşük basınçlı ortam veya manyetik levitasyon gibi yeni ya da gelişmekte olan teknolojileri içermektedir (CEN, 2023). Bu teknoloji, bir demiryolu ulaşım hizmetinin 1.200 km/saat potansiyel hızda çalışmasını sağlayabilmektedir. Hyperloop ulaştırma modunun iddialı hız hedefi, zaman-mekân boyutunu küçültme potansiyeline sahiptir; böylece birbirine uzak şehirleri, büyük ölçüde kısaltılmış seyahat süreleriyle daha erişilebilir hale getirebilmektedir (Premasagar & Kenworthy, 2022).

Hyperloop teknolojisinin küresel ölçekte, henüz uygulanan tam bir örneğinin olmaması, birçok etkisinin araştırılması ve karşılaştırılması noktasında, sınırlılıklar ortaya çıkarmaktadır. Bu ulaştırma ve hareketlilik yönteminin fiziksel, teknik, ekonomik, çevresel etkileri ile enerji, hız, konfor, insan ve ulaşım planlaması gibi konularda potansiyel etkilerinin kapsamlı değerlendirilmesi, değişkenlerin kısıtlı olması nedeniyle henüz varsayım olarak kalabilmektedir. Bu varsayımlar, bu etkilerin olumlu ve olumsuz yanlarını içerebilmektedir (Premasagar & Kenworthy, 2022). Örneğin çevresel etki tartışmaları,

operasyonlar sırasındaki emisyonlara odaklanma eğilimindedir ve güzergâh inşası sırasındaki tüm diğer yaşam döngüsü emisyonlarını göz ardı edebilmektedir. Ayrıca hyperloop sisteminin sunduğu çok yüksek hızların, yolcular için konforlu olup olmayacağı henüz netlik kazanmamıştır (Catherine vd., 2016). Diğer taraftan hyperloop teknolojisi geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Farklı girişimciler ve şirketler; 700 km/saat'in üzerinde, henüz tam ölçekte veya ses hızına yaklaşan yüksek seyir hızları için test edilmemiş çözümler üzerinde çalışmaktadır. Hyperloop sisteminin geleceğe yönelik konsepti; şu anda emniyet, güvenlik, mühendislik açısından uygulanabilirlik ve ekonomik yapılabilmekle ilgili endişeler nedeniyle zorluklar içermektedir. Kapsül başına düşen yolcu sayısı da açık bir konudur; zira daha büyük araçlar daha fazla iş hacmi oluştururken, daha küçük araçların tasarımı daha kolay olmakla birlikte, her bir kapsül arasındaki mesafenin daha kısa olmasını telafi etmek durumunda kalınacaktır (Nøland, 2024).

Hyperloop sisteminin potansiyeline ilişkin ilk tartışmalar, yolcu taşımacılığına odaklanarak yük taşımacılığını ikinci plana atarken, hyperloop şirketleri tarafından sağlanan daha yeni bilgiler ise yük taşımacılığına odaklanmaktadır. Böyle bir gelişme belki de petrol, doğal gaz ve su gibi belirli gaz ve sıvı maddelerin taşınmasında boru hatlarının oynadığı mevcut rolün doğal bir uzantısıdır. Köprü inşa etmeyi engelleyen mesafelerde, su üzerindeki kargo sevkiyatı için yalnızca yüksek maliyetli, ancak hızlı hava taşımacılığı ile uygun maliyetli, ancak yavaş deniz yolu taşımacılığı kullanılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, lojistik faaliyetleri için de ilave bir taşıma moduna ihtiyaç bulunmaktadır. Kargo taşımacılığı için süper yüksek hızlar, kendi başlarına hyperloop sisteminin zorlayıcı özelliği olmamakla birlikte; belirli bir tüp boyutu için daha yüksek verim sağlayabilmektedir (Catherine vd., 2016). Hyperloop yük ve yolcu taşımacılığı konsepti; günümüzde, daha kısa seyahat süresi ve yolcu gelir kilometresi başına daha düşük yakıt tüketimi vaat edebilen kısa mesafeli uçak yolculukları için potansiyel bir alternatif olarak görülmektedir (Nøland, 2021).

Hyperloop teknolojisinin geliştirilmesi, projelendirilerek hizmete sunulabilmesi için standartların belirlenmesi ve topolojinin çıkarılması önemli bir husustur. Avrupa Standardizasyon Komitesi (European Committee for Standardization, CEN) ve Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (European Committee for Electrotechnical Standardization, CLC, CENELEC) tarafından yayınlanan CEN/CLC/TR 17912:2023, bu teknolojiye yer alan sistemlere ilişkin bir standardizasyon yol haritası sunmaktadır. Yol haritası, çeşitli alanlardan uygulanabilir standartlar, değiştirilmesi gerekenler ve yeni geliştirilebilecekler hakkında rehberlik etmektedir (CEN, 2023).

Hyperloop sistemi, dünyadaki gelişmelerin yanında, Türkiye'de henüz yeni bir kavram olarak araştırma kurumları, akademi ve özel sektör tarafından üzerinde çalışmalar yapılan bir teknolojidir. Bu doğrultuda, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Raylı Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü (TÜBİTAK RUTE) tarafından başta üniversite öğrencilerinin projeleri olmak üzere akademik çalışmalar, yenilikçi ulaştırma teknolojilerinin geliştirilmesi ve araştırılması çerçevesinde desteklenmektedir. TÜBİTAK RUTE öncülüğünde, hyperloop geliştirme yarışma kategorisi, TEKNOFEST kapsamında ilk defa 2022 yılında gündeme gelmiş olup manyetik levitasyon teknolojileri, sürtünmenin etkisinin azaltıldığı yenilikçi ulaştırma araçlarının geliştirilmesi ve yeni nesil ulaştırma teknolojileri konularında lisans ve lisansüstü öğrencilerinde farkındalık oluşturulması amaçlanmaktadır. Gazi Üniversitesi TURKUAZ, Selçuk Üniversitesi SÜ Kapsül Hyperloop ve Yeditepe Üniversitesi HyperHawk, 2022 yılındaki yarışmada sırasıyla ilk üçe giren takımlar olmuştur. Hyperloop geliştirme yarışmasında 2023 yılında ise sırasıyla Selçuk Üniversitesi Selçuk Kapsül Hyperloop ve Gebze Teknik Üniversitesi Alfa ETA-H takımları, ilk ikiye girerken Yeditepe Üniversitesi HyperHawk ve İstanbul Teknik Üniversitesi HyperBee üçüncülüğü paylaşmıştır (TEKNOFEST, 2022). TÜBİTAK tarafından düzenlenen Hyperloop Geliştirme Yarışmasının üçüncüsü ise TÜBİTAK Gebze Yerleşkesi'nde gerçekleştirilmiştir (TEKNOFEST, 2024).

Gazi Üniversitesi bünyesinde 2022 yılında kurulan Turkuaz Hyperloop ekibi tarafından yüksek hızlı bir hyperloop aracı tasarlanmıştır. Bu tasarımda; kesintisiz haberleşme ve tam otonom sürüşe olanak sağlayan yer kontrol ara yüzü, fotoelektrik sensörlerle tünel içinde hassas konum takibi, pnömatik ve rejeneratif fren sistemi, çok noktalı çekiş ve tork kontrolü bulunmaktadır (Gazi Üniversitesi, 2022).

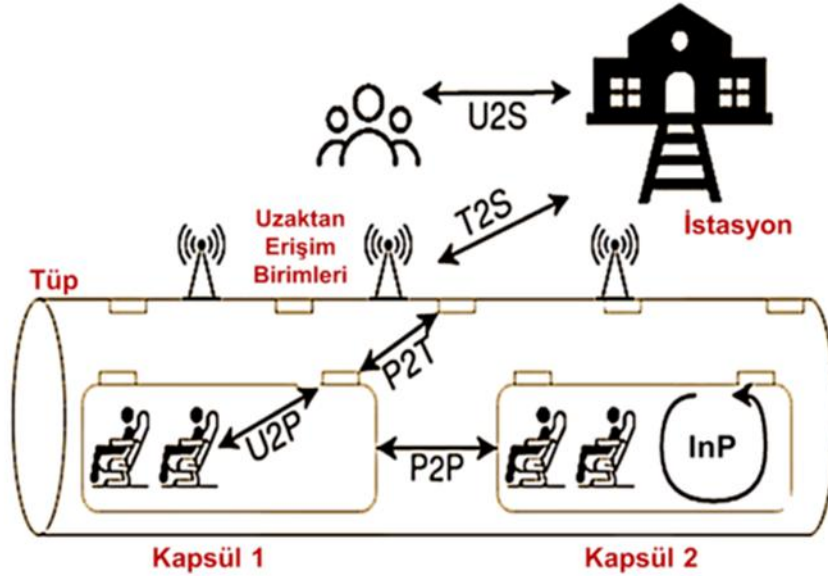
Türkiye'de hyperloop teknolojisinin gelişiminde yatırımcı ve tedarikçi rolü olan özel sektör kuruluşları da bulunmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, 2020). Erciyas Holding, 2017

yılından bu yana iş birliğinde olduğu, merkezi ABD’de bulunan HyperloopTT şirketiyle 2022 yılında imzaladığı anlaşma (UTİKAD, 2022) sayesinde, Hyperloop teknolojisi ile yolcu ve kargo taşımacılığı projesinin tedarikçisi ve yatırımcısı olmuştur (PLATİN, 2023).

Sonuç olarak dünyadaki gelişmeler incelediğinde, hyperloop sisteminin Avrupa ülkelerinde önemli ölçüde gelişme gösterdiği, ancak maglev konusundaki uzmanlığın genel olarak Asya ülkelerinde olduğu gözlenmektedir. Asya ülkeleri, aynı zamanda hyperloop uygulamaları ve gösterimlerine ev sahipliği yapmaktadır. Bu nedenle, arzu edilen hedef hızlarda bir hyperloop ulaştırma sisteminin hayata geçirilmesinde karşılaşılan önemli teknik ve mali zorluklarının üstesinden gelebilmek için bilgi transferi yapmak oldukça önemlidir. Ayrıca hyperloop geliştirme çalışmalarında, çok sayıda temel deneysel araştırmanın da göz ardı edilmemesi gerekmektedir (Nøland, 2024).

3.1. Hyperloop sisteminde haberleşme türleri ve ağ altyapısının incelenmesi

Hyperloop ulaştırma modunun, kapalı ve kısmi vakumlu tüplerde çalışan kapsül gibi bileşenleriyle çok yüksek hızlı, sabit rotalı, şehirler arası kara taşımacılığına yönelik bir konsept olma potansiyeli bulunmaktadır (Catherine vd., 2016). Bu ulaşım teknolojisindeki otonom kapsüller birbirleriyle, kontrol merkeziyle ve dış dünyayla sürekli iletişim halindedir. Veri ve bilgi iletimini yönetmek için sistem altyapısı tarafından çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Delft Hyperloop, 2020). Hyperloop teknolojisindeki bileşenler ve haberleşme türleri, Şekil 1’de gösterilmiş ve aşağıda özetlenmiştir (Brighente vd., 2022, 2024).

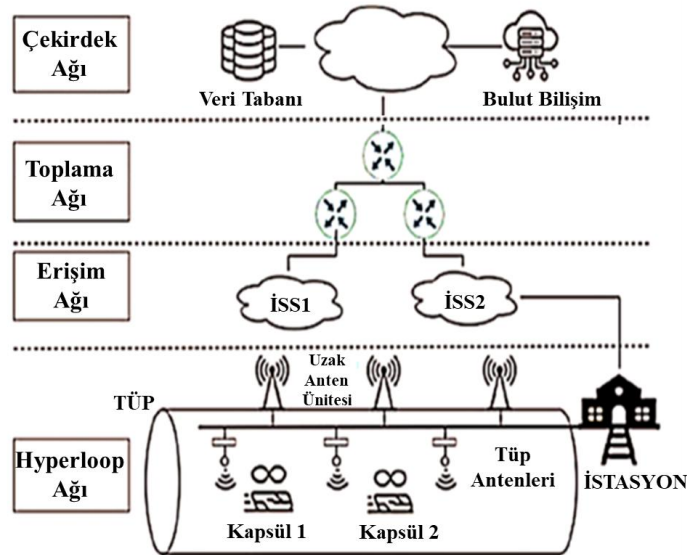


Şekil 1. Hyperloop sisteminde haberleşme türleri

- **Kapsülden Kapsüle (Pod-to-Pod, P2P):** Çarpışmalardan kaçınmak için kapsüllerin birbirlerinin varlığını ve göreceli konumunu tespit etmesi gerekmektedir. Bu amaçla kapsüller, konumları ve hızları hakkındaki bilgileri karşılıklı paylaşabilmektedir. Yüksek hızlı kapsüller arasında veri iletimi, araçtan araca haberleşme için kullanılan tahsis edilmiş kısa mesafeli haberleşme (Dedicated Short Range Communications, DSRC) benzeri ad-hoc protokollerle desteklenebilir.
- **Kapsülden Tüpe (Pod-to-Tube, P2T):** P2T bağlantısı sayesinde tüp, kapsülün hareket ve manevrasını yapabilmesi için gereken manyetik veya hava kuvvetlerini kontrol edebilir ve yönetebilir. Bunun tersi olarak kapsül, yerleşik (onboard) motor tarafından üretilen hareket için manyetik veya hava kuvvetlerini uygulayabilir. Bu durum, altyapı ve yolcuların güvenliği açısından büyük ihtimam gerektirebilir. P2T bağlantısı, kapsülün durumu ve konumu hakkında bilgi paylaşmak için de kullanılabilir. Bu bilgiler, basınç düzenlemesi ile motor yönetimi gibi amaçlar doğrultusunda merkez istasyona tüpten istasyona (T2S) bağlantısı sayesinde iletilebilir.

- **Tüpten İstasyona (Tube-to-Station, T2S):** Kapsüllerin bir istasyondan diğerine güvenli bir şekilde seyahat edebilmesini sağlamak için tüpün faaliyetlerinin merkezi bir birim tarafından yönetilmesi gerekmektedir. Bu faaliyetler arasında, yakın vakum ortamı tesis eden vanaların çalıştırılması ve ihtiyaç halinde acil çıkışların açılması gibi durumlar yer almaktadır. Bununla birlikte kapsüllerin planlanan zamanlara göre hareketinin sağlanması ve raporlamaların yapılması, tüpün görevleri arasındadır. T2S bağlantısı, gecikme süresi ve güvenilirlik açısından gereksinimlere bağlı olarak kablolu veya kablosuz olabilir.
- **Kullanıcıdan Kapsüle (User-to-Pod, U2P):** Seyahat sırasında bilgi-eğlence sistemi hizmeti sunabilmek için kapsül dahili bir kablosuz ağ altyapısı ile donatılmıştır. Böylece kullanıcılar yolculuk durumu, mevcut konumları ve beklenen varış zamanı ile ilgili bilgileri alabilmekte, ayrıca internete erişebilmektedir. Bu bağlantı, tüp boyunca kurulmuş olan uzaktan erişim birimleri (Remote Access Units) sayesinde internete erişim sağlayan P2T haberleşmesi ile garanti edilmektedir. Birçok erişim noktası, internet erişimi sağlayan çekirdek ağa bağlanabilmek için yerel bir internet servis sağlayıcısına (İSS'ye) bağlanmaktadır.
- **Kapsül İçi Haberleşme (In-Pod Communication, InP):** Her bir kapsül, denetleyicilerin ve çalıştırıcıların, temel kapsül fonksiyonlarını düzenlediği dahili bir ağ altyapısı ile donatılmıştır. Tüm bu birimler, güvenliği sağlamak için verileri sürekli olarak izleyen kapsül güvenlik denetleyicisine bağlıdır. Bu ağ altyapısı, aynı zamanda kapsülün farklı bileşenlerine güç sağlamak için de kullanılmaktadır.
- **Kullanıcıdan İstasyona ve İstasyondaki Erişilebilen Tüm Cihazlara (User-to-Station, U2S):** Hyperloop sistemi çerçevesinde istasyon, kullanıcılar ve altyapı arasındaki haberleşmenin kapsamı önemli bir durumdur. Kullanıcılar, akıllı cihaz ve uygulamalar sayesinde bu sistemle, ihtiyaçları çerçevesinde çeşitli şekillerde iletişime geçebilir. Bu doğrultuda bilet satın alma işlemi için kapsüllerdeki koltukların uygunluk durumunu gerçek zamanlı olarak doğrulayan ad-hoc terminallerden yararlanılabilir. Turnikeler, kullanıcıların yolculuk alanına erişimini yönetmek ve erişimi kolaylaştırmak için kullanıcıların biyometrik bilgilerini kullanabilir. Ekranlar, kapsüller için gecikmeleri ve kalkış saatlerini göstererek kullanıcıların uygun kapıyı bulmalarına yardımcı olabilir. U2S haberleşme kapsamında, kullanıcıların uzaktan bilet satın almalarını ya da rezervasyon yapabilmelerini sağlayan uygulamalar ve internet hizmetleri de bulunmaktadır.

Hyperloop sistemi ağ altyapısını (i) çekirdek (core), (ii) toplama (aggregation), (iii) erişim (access) ve (iv) hyperloop ağı olmak üzere dört ana katmana ayırmak mümkündür (Brighente vd., 2022, 2024; Hedhly vd., 2021; T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, 2020). Hyperloop ağ altyapısını oluşturan katmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir (Brighente vd., 2022, 2024; Hedhly vd., 2021).



Şekil 2. Hyperloop ağ altyapısını oluşturan ağ katmanları

Erişim ağı katmanı, toplama ağı ve hyperloop ağını birbirine bağlamakta olup aynı zamanda tüp boyunca yerleştirilen, uzaktan iletimi destekleyen çeşitli uzak anten birimleri (Remote Antenna Units, RAU) arasındaki bilgilerin toplanmasından ve bunların bir veya daha fazla İSS'ye bağlanmasından sorumludur. Tüpün uzunluğunun farklı ülke sınırları boyunca uzanabiliyor olması nedeniyle coğrafi bölgeye göre İSS'ler de farklılık gösterebilmektedir (Brighente vd., 2022, 2024). Ağın ön kısmını oluşturan ve doğrudan kullanıcı ekipmanına, yani hyperloop trenine bağlı olan bu katman; sinyallerin alımı ve iletimi, kodlama ve kod çözme, modülasyon ve demodülasyon gibi işlevleri yürütmektedir. Başta uydu iletişimi, kablosuz veri ve hücresele ağlar olmak üzere çeşitli teknolojiler kullanarak çalışan bu katmanda benimsenen teknolojiye bağlı olarak bu işlevler, tek bir birimde yürütülebilmekte veya üniteler arasında dağıtılabilmektedir (Hedhly vd., 2021).

Toplama ağı, farklı İSS'ler arasındaki bilgileri toplayıp yönlendirerek erişim ağını çekirdek ağına bağlamaktadır. Ağda, yaklaşan paketlerin bir paket anahtarlama işleminin ardından hedeflerine iletiildiği bir kavşağı temsil etmektedir (Hedhly vd., 2021). Ethernet ve fiber optik (Fokum & Frost, 2010) ile asimetrik sayısal abone hattı (Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL), Wi-Fi bu katmanda kullanılan haberleşme teknolojileri arasındadır (Brighente vd., 2022, 2024).

Çekirdek ağı veya omurga ağ, ağın farklı bileşenlerini birbirine bağlayan (Brighente vd., 2022, 2024) ve ara bağlantı kuran kısımdır (Hedhly vd., 2021). Bu ağ, aynı zamanda hesaplama işlemleri için veri tabanı, bulut gibi çeşitli hizmetlere erişim sağlamaktan sorumludur (Brighente vd., 2022, 2024).

Hyperloop ağı, tüp ve seyahat kapsülünden oluşmaktadır. Erişim ağı ile tüp arasındaki haberleşme, hızlı iletişim ve kısa gecikme gereksinimlerini karşılamak için kablosuz veya kablolu olabilmektedir. Antenler, tüpün tavanına yerleştirilmektedir ve transfer sürecini kolaylaştırmak ya da bu sürece yardımcı olmak için kapsülün üzerine yerleştirilen bir veya iki antenle iletişim kurmaktadır. Tren kontrol ünitesinden ve yolcuların kişisel cihazlarından gelen sinyaller, kapsül duvarları üzerinden iletim sırasında sinyallerin zayıflamasını önlemek için kapsülün içine monte edilen tren erişim terminali tarafından alınmaktadır (Hedhly vd., 2021).

Hyperloop kapsülleri, kablosuz haberleşme sistemlerini ve yerel alan ağı (Local Area Network, LAN) altyapısını kullanarak birden fazla varlıkla iletişim kurabilmektedir. Araçtan her şeye (Vehicle-to-Everything, V2X) konseptini benimseyen bir kapsülden her şeye (Capsule-to-Everything, C2X) haberleşme çerçevesi, bilgilerin iletilmesi için omurga sağlayacaktır. C2X sistemi; kapsülden altyapıya (Capsule-to-Infrastructure, C2I), kapsülden şebekeye (Capsule-to-Grid, C2G), kapsülden yolcuya (Capsule-to-Pedestrian, C2P), kapsülden kapsüle (Capsule-to-Capsule, C2C) ve kapsülden ağına (Capsule-to-Network, C2N) gibi diğer daha spesifik haberleşme türlerini içermektedir. C2X, kablosuz yerel alan ağı (Wireless Local Area Network, WLAN)/Wi-Fi 6 ve beşinci nesil hücresele yeni radyo (5G New Radio, 5G NR) gibi temel haberleşme teknolojileri tarafından desteklenebilir (Tavsanoğlu vd., 2021).

Bir haberleşme sisteminin istenilen verimlilikte çalışabilmesi için bant genişliği, internet hızı ve gecikme süreleriyle ilgili minimum sistem özelliklerini karşılaması önemlidir. Hyperloop teknolojisini oluşturan tüm cihazların ve bileşenlerin haberleşmesinin sağlanmasında kullanılan bant genişliği, verilerin gerçek zamanlı iletimi ve gönderilen sinyallere verilen cevaplar arasındaki zaman farkının minimum seviyelerde olması, ulaştırma sisteminin konforu, güvenliği ve emniyeti için gereklidir. Hyperloop hızında haberleşme ihtiyacını ve teknolojilerini destekleyecek kablosuz iki temel standart, (i) 5G NR ve (ii) 802.11ax ağları (Tavsanoğlu vd., 2021) olarak değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle mevcut hyperloop altyapısında, dahili antenler ve kapsüller arasında, bu standartların kullanılmaları muhtemeldir.

Hyperloop ulaştırma modunun çok yüksek hız ve benzersiz teknolojik altyapısı göz önüne alındığında, hyperloop haberleşme sisteminin performansı; seyahat emniyeti ve güvenliği açısından önem arz etmektedir. Hyperloop sisteminin düzgün ve verimli çalışması da haberleşme sisteminin çalışmasından doğrudan etkilenmektedir. Bu çerçevede, hyperloop ulaştırma sisteminin haberleşmesinde göz önünde bulundurulması gereken farklı boyutları ele alan bir sınıflandırma modeli, Şekil 3'te yer almaktadır (Hedhly vd., 2021).



Şekil 3. Hyperloop sistemi haberleşmesinde farklı boyutlar

3.2. Hyperloop sistemi haberleşme yöntemlerinin zorlukları ve çözüm önerileri

Hyperloop sisteminde kapsüller ve altyapı haberleşmesi çerçevesinde, yüksek hızlı bağlantının kurulması, kapsül haberleşmesi ve verilerin toplanması gibi bazı zorluklar bulunmaktadır (Delft Hyperloop, 2019; Mitropoulos vd., 2021; Qiu vd., 2020; Tavsanoğlu vd., 2021; Zhang vd., 2020). Ayrıca bu sistemlerde kablosuz haberleşme tasarımında; tüpteki yayılma özellikleri, hızlı ve sık devirler, doppler frekans kayması, yüksek penetrasyon kaybı ve frekans spektrumsuz ortam gibi konular, temel zorlukları oluşturmaktadır (Qiu vd., 2020).

Yüksek hızlar nedeniyle hyperloop sistemi kapsülleri, genellikle haberleşme hücreleri arasında geçiş yapmaktadır ve bu işlem devir (handover) olarak adlandırılmaktadır. Yüksek devir sıklığı, devir hatası olasılığını artırarak geçici bir haberleşme kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle hyperloop haberleşme sistemi, güvenilir devir yeteneklerine sahip olmalıdır. Ayrıca, hyperloop sisteminde yer alan çelik boru, kablosuz sinyallerin kapsüle ulaşmasını engelleyebileceğinden, bu sorunu aşmak için haberleşme sistemi hem kablolu hem de kablosuz çözümleri bir araya getirmektedir (Delft Hyperloop, 2020).

Vakum tüplü trenler için tren ve yer arası kablosuz haberleşme kapsamında, frekans değişimi ve şiddetli doppler etkisinin ortaya çıkarması muhtemel olan sorunların üstesinden gelmek amacıyla mobil hücreye ve sızıntı dalga kılavuzuna dayalı, çok seviyeli bir kablosuz veri iletim mimarisi kullanılabilmektedir. Bu mimaride, vakum tüplü ultra yüksek hızlı tren kablosuz haberleşme sistemi için uygun olan devir gecikmesinin etkili bir şekilde azaltılabildiği ve aktarım gücünün artırılabilirdiği, simülasyonlar ile doğrulanabilmektedir (Li vd., 2024).

Yüksek hızlı demiryollarında kullanılan mevcut haberleşme sistemleri ve teknolojileri arasında yer alan sinyalizasyon sistemleri, mobil iletişim için küresel sistem (GSM), üçüncü nesil (3G) ve dördüncü nesil (4G) haberleşme sistemleri (Gheth vd., 2021), hyperloop sisteminin hız seviyeleri ve güvenilirlik gereksinimleri için uygun performansa sahip olmayabilir. Buradaki başlıca zorluk, kapsül ile dış dünya arasında veri alışverişi için gerekli olan haberleşmenin sağlanmasıyla ilgili ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Fiber optik altyapının iyileştirilmesi ve 5G gibi yeni haberleşme protokollerinin geliştirilmesi, bu zorluklara çözüm olarak değerlendirilmektedir. Ancak yeni teknolojilerin gelişimi belirsiz olduğundan, mevcut teknolojilerin yüksek hızlı ulaştırma faaliyetlerine uygun hale getirilmesi ve iyileştirilmesinde fayda bulunmaktadır (Delft Hyperloop, 2019).

Hyperloop sistemi için haberleşme çözümlerinde doppler etkisi, sık devirler gibi sebeplerle ortaya çıkması muhtemel zorlukların üstesinden gelebilecek yaklaşımlar geliştirmek önemlidir. Bu doğrultuda hyperloop haberleşmesine yönelik olası çözümler (i) anten, (ii) radyo, (iii) ağ ve (iv) yazılım tabanlı çözümler olmak üzere dört temel kategoriye ayrılabilir. Bunun yanında hyperloop haberleşmesini

sağlamak için milimetre dalga ve terahertz teknolojisi ile boş alan (free space) optik haberleşmesi gibi bazı yeni teknolojiler potansiyel olabilir (Hedhly vd., 2021). GSM-R (Global System for Mobile Communications-Railway), yüksek hızlı tren için birincil haberleşme teknolojisi tercihi olmakla birlikte, uzun süreli gelişim (Long Term Evolution, LTE), kullanılan diğer bir yöntemdir (Delft Hyperloop, 2019; Sniady & Soler, 2014) ve hyperloop için de uygun olması muhtemel haberleşme teknolojileri arasındadır.

Demiryolu ortamlarında olduğu gibi hyperloop sistemi boyunca, belirli aralıklarla yerleştirilen özel antenler ile bir radyo ve fiber haberleşme ağının en son 802.11 Wi-Fi standartlarını kullanarak kapsülde kurulu bir donanım ile iletişime geçilebilmektedir. Yüksek bant genişliğine sahip bu kablosuz ağ bağlantısı, daha sonra kapsülün yerleşik ağı aracılığıyla yolculara ve yerleşik sistemlere iletilmektedir (Icomera, t.y.; Mitropoulos vd., 2021). Hyperloop kablosuz iletişim sisteminin kurulumu ve performans analizi için kesin ve ayrıntılı geniş bant kablosuz kanal karakterizasyonu ön koşul olup ayrıca daha ileri düzeyde haberleşme teknolojilerinin ve kaynak yönetiminin etkili bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır (Zhang vd., 2020).

4. Hyperloop sisteminde siber güvenliğe genel bir bakış

Ulaştırma altyapıları ve sistemleri, siber saldırılar çerçevesinde ele alındığında, nüfus ve çevre için felaketle sonuçlanabilecek güvenlik sorunlarını içeren kritik altyapılardır. Hyperloop ulaştırma modunun temsil ettiği kritik altyapının ve sistemin performans gereksinimleri dolayısıyla güvenlik ve emniyet konularının dikkatli bir şekilde ele alınması gerekmektedir (Brighente vd., 2024). Bu yenilikçi ulaştırma modunda, mevcut ulaştırma modlarında tecrübe edilenlerin yanında, kendine özgü muhtemel güvenlik sorunlarının öngörülmesi gerekmektedir. Hyperloop sisteminin haberleşmesi ve güvenliği konusunda altyapı, tüp, kapsül ve ara yüzler gibi bileşenler arasındaki ilişkilerin iyi tanımlanması ve fonksiyonel prosedürlerin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Ulaştırma ağının içinde olduğu kritik altyapılar, çoğunlukla siber saldırılara açık (Gkoumas & Christou, 2020) olup hyperloop teknolojisindeki muhtemel siber güvenlik zafiyetlerinin, sistemi oluşturan insan unsuru dahil olmak üzere tüm bileşenler arasındaki haberleşmeden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Uzun mesafelerin izlenebilirliği zorlaştırması ve muhtemel siber saldırıların ciddi sonuçlarının olabilmesi nedeniyle hyperloop sisteminde siber güvenliğe ilişkin tüm risklerin adreslenmesine ve azaltılmasına yönelik tedbirlerin alınması önem arz etmektedir.

4.1. Siber saldırı türleri

Hyperloop sistemlerine yönelebilecek siber saldırı türlerinden bazıları, potansiyel etkileri ve güvenlik önlemleri aşağıda özetlenmiştir (Brighente vd., 2022, 2024; Turrin, 2023):

- *Hizmet Reddi (Denial of Service, DoS) saldırısı*, makineler arasındaki iletişimi bozmak için sistem kaynaklarını aşırı tüketerek cihazları kullanılamaz hale getirir. Genellikle yaygın bir teknik, paket taşmasıdır (flooding) ve paketler birçok farklı kaynaktan üretilirse, bu durum dağıtık hizmet reddi (Distributed Denial of Service, DDoS) olarak tanımlanır. Bu saldırı, bazı cihazları durdurarak kullanılamaz hale getirebilir ve endüstriyel kontrol sistemlerinde (EKS'de) beklenmedik davranışlara yol açabilir. Endüstriyel cihazlar genellikle eski ve düşük hesaplama gücüne sahip olduğundan, düşük miktarda paket taşması, normal işleyişlerini durdurabilir. DoS saldırısı, hyperloop bilgi-eğlence sisteminin kesintiye uğramasına ve güvenlik açısından kritik veri akışlarının gecikmesine yol açabilir. Ayrıca bir DoS saldırısı paket alışverişini engelleyebilir, öngörülemeyen bir enerji aktarım davranışına yol açabilir veya bundan yararlanacak kapsül sayısını sınırlayabilir. Kötü niyetli bir kullanıcı, diğer kullanıcıların sistemi kullanmasını engellemek için bir DoS saldırısı oluşturabilir. Kapsül; tüpün içinde korumalı olduğundan, bu iletişim kanalının zarar görmesi, tüpün dışındaki tüm haberleşmenin durdurulması anlamına gelebilir. Ayrıca kötü niyetli bir aktör, kısıtlamaları aşmak için başka bir kullanıcının kimliğini ele geçirebilir ya da diğer kullanıcıların erişim noktasına bağlanmasını önlemek için kimlik doğrulama sistemine DoS saldırısı yapabilir. Bir DoS saldırısı sistemin kullanılabilirliğini tehlikeye atabilir ve T2S haberleşmesinde mesaj alışverişini engelleyebilir. Kapsül içerisinde ortaya çıkan bir DoS saldırısı, kaynakların tüketilmesine yol açabilir, kritik mesajların alınmasını engelleyebilir veya geciktirebilir. Bu acil mesajlar, acil durdurma veya

yangın sensörleri gibi kritik sistemleri kontrol etmektedir. DoS saldırılarını önlemek çok zordur. Yaygın stratejiler arasında kaynak yöneticilerinin belleği kritik süreçlere doğru şekilde tahsis etmesi ve bir DoS saldırısı tespit edildiğinde, kaynakları yeniden dağıtması yer almaktadır. Ağ saldırılarını önlemek için yaygın bir çözüm, kötücül davranışları erken tespit etmek ve sistemi korumak için doğru kararlar almak üzere saldırı tespit sistemlerinin (Intrusion Detection System, IDS) uygulanmasıdır. Ayrıca ağın çevresel korumasını artırmak için ağın stratejik noktalarına güvenlik duvarı uygulamak mümkündür. Bir kapsülün bağlantısını kesmeye zorlamanın bir başka yolu da DoS'a yol açan bir taşma saldırısı olabilir. Bu, bir kapsülü diğer kapsüllerden mesaj alamaz hale getirerek hyperloop sistem bileşenlerinin doğru çalışmasını engelleyebilir.

- *Gizlice Dinleme (Eavesdropping) saldırısı* çerçevesinde, belirli bir kullanıcının kapsül erişimi izlenerek profilini çıkarmak üzere U2P iletişimi gizlice dinlenebilir. Aynı erişim noktasına bağlı kullanıcı sayısı göz önüne alındığında, kötü niyetli bir unsur, örneğin iletişimi gizlice dinlemek ve hassas bilgileri çalmak için diğer kullanıcılara saldırmaya çalışabilir.
- *Fiziksel Kurcalama (Physical Tampering) saldırısı*, hyperloop sisteminin dağıtık yapısı nedeniyle fiziksel altyapıda bulunan potansiyel güvenlik açığı alanlarını hedeflemektedir. Fiziksel kurcalamayı önlemek için en yaygın çözüm, girişimleri tespit eden sensörlerle donatılmış kurcalama önleyici mekanizmaların oluşturulmasıdır. Diğer bir çözüm yöntemi, anomali tespit yazılımı kullanarak güvenlik ihlalinin olduğu bileşenlerin tespit edilmesi şeklindedir.
- *Taşma (Flooding) saldırısı*, bir kapsülün bağlantısını kesilmeye zorlayacak şekilde DoS saldırısına yol açabilmektedir. Kapsül, yer istasyonuna ve İSS'ye ulaşmak için verileri tüp üzerinden iletmektedir. Taşma saldırısı gerçekleştiren bir saldırgan, kapsülün bilgi alışverişini engelleyebilir veya geciktirebilir.
- *Mahremiyet ihlali (Privacy violation) doğrultusunda* belirli bir kullanıcının alışkanlıklarına ilişkin bilgiler, profil oluşturmaya veya kullanıcı takibine yol açarak ihlallere neden olabilir.
- *Ortadaki Adam (Man-in-the-middle, MitM) saldırısı*, sistemde birbiriyle iletişim kuran tarafların ortasına bir saldırganın girmesi şeklindedir. Saldırgan daha sonra haberleşme yönlerini kolayca değiştirebilir, komutlar ekleyebilir ya da paketleri kesebilir. EKS'ye yönelik MitM saldırıları, ağ bağlantısı kurulmasını gerektiren kablolu haberleşmeyi veya antenler kullanarak kablosuz haberleşmeyi engelleyebilir. MitM saldırıları, kapsüle ilişkin yanlış bilgiler içerecek şekilde paketleri değiştirebilir veya yenilerini oluşturabilir. Bu durum, yakındaki diğer kapsüllerde yanlış tepkiler ortaya çıkarabilir. Örneğin saldırı altındaki bir kapsül, bir önceki kapsüle yakın olduğunu söyleyerek hızlanmasına ya da kazalara neden olabilir. MitM saldırısı, bir kapsülü konvoydan ayırmak için kötücül mesajlar göndermek için de kullanılabilir. Bir MitM saldırısı, kapsülün tüpün kenarlarına veya tabanına çarparak raydan çıkmasına yol açacak şekilde gücünü artırmak veya azaltmak için levitasyon mekanizmasını manipüle edebilir. Bir kapsülün kaçırılması da mümkün olabilir. Yüksek hızlı anahtarlama sistemi sayesinde bir saldırgan, herhangi bir kapsülü konvoydan ayırmak ve yanlış yönlendirmek için bir anahtarı tetikleyebilir. MitM saldırısı, şifrelenmemiş haberleşmeler için mümkün olup şifrelenmiş verileri izleyerek saldırganların faaliyetleri hakkında trafik analizi uygulanabilir. Kapsül içi ağda MitM yeteneği kazanan bir saldırgan, yanlış mesajlar yayarak kapsülün durumunda tutarsızlıklar, dolayısıyla yanlış alarm mesajları oluşturabilir. MitM ve gizli dinleme sayesinde kötü niyetli kişiler tarafından hassas veriler çalınabilir.
- *Sybil saldırısı*, bir saldırganın, farklı sensörler arasında tutarsızlık oluşturmak için var olmayan bir kapsülden veri göndermesi ile başlamaktadır.
- *Kara Delik (Blackhole Attack) saldırısı* ile bir saldırgan, paket iletimini engelleyerek P2P iletişim paketlerini ele geçirebilir.
- *Oltalama-Kimlik Avı (Phishing) saldırısı*: Hyperloop sistemleri, zehirlenme saldırılarına (poisoning attacks) karşı savunmasız olabilir ve bu da kimlik avı saldırılarına ve kimlik

bilgilerinin sızmasına neden olabilir. Kötü niyetli bir kullanıcı, belirli bir kullanıcının kapsül erişimini izlemek ve profilini çıkarmak için U2P haberleşmesini de gizlice dinleyebilir.

- *Tekrarlama saldırısı (Replay Attack)*, ağda daha önce görülen geçerli bir mesajın, yeniden iletilmesine dayanmaktadır. Bu saldırının tespit edilmesi zordur ve sistemde arızalara yol açabilir. Bu saldırı, meşru iletişimi kopyalamak için daha önce iletilmiş ve gizlice dinlenmiş bir mesajı, ardışık iletişimde yeniden kullanmayı amaçlar. Yolcular ve erişim noktası arasındaki iletişimi gizlice dinleyerek kullanıcı gizliliğini tehlikeye atar.
- *Sahtecilik (Spoofing) saldırıları* ile hyperloop sistemini tehlikeye atmak için kapsülün konumu, sahte olarak bir saldırgan tarafından değiştirilmeye çalışılabilir. Sahteciliği önlemek için şifreleme ve kimlik doğrulama gibi geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Bunun yanında haberleşmeye yönelen sahteciliğe engel olmak için bir mesafe sınırlama protokolü kullanılabilir. Bu protokol, beklenen yanıt süresini analiz ederek bir varlığın fiziksel mesafesini ölçer. Bu şekilde, verilerin manipüle edilmesiyle veya sahte bir konumla eklenen gecikme, alıcı tarafından tespit edilebilir. Bu protokol yaygın olarak röle saldırılarını (relay attacks) ve küresel konumlama sistemi (Global Positioning System, GPS) sahteciliğini önlemek için kullanılmaktadır.
- *Konum sahteciliği (Location Spoofing)*; kapsüllerin yakınındaki tüm kapsülleri uyarmak için konumlarını periyodik olarak yayınladığı varsayıldığında, diğer tüm kapsüllerin ihtiyaç duyulmasa bile mola verme veya hızlanma ve yavaşlama gibi yanlış eylemlerde bulunmasına neden olabilir. Bu durum, gecikmelerin olması gibi verimsizliğe veya kazalara yol açabilir.
- *Kimlik doğrulama sistemine saldırılar (Attacks to Authentication System)*, saldırganların hassas verilere ve işlemlere erişim sağlamasına olanak tanıyabilir. Bu saldırı, hyperloop sisteminde bulunan kimlik doğrulama ile ilgili yöntemlerdeki güvenlik açıklarını hedef alır ve daha fazla istismar için ek saldırı yüzeyi oluşturabilir.

Hyperloop haberleşme sistemlerini hedeflemesi muhtemel siber saldırı türleri, tehditler, muhtemel etkileri, alınabilecek önlemler ve etki düzeyleri Tablo 1’de gösterilmiştir (Brighente vd., 2022, 2024):

Tablo 1. Hyperloop haberleşmesini hedef alan siber saldırılar (yazarlar tarafından uyarlanmıştır)

Haberleşme Türü	Siber Saldırı Türleri	Tehditler	Muhtemel Etkileri	Karşı Önlemler	Etki Düzeyi
Kullanıcıdan İstasyona (U2S)	– MitM	– Özel Veri Sızıntısı	– Kullanıcıdan hassas bilgileri çalmak	– Şifreleme – Kimlik doğrulama – VPN	Düşük
	– Sahtecilik	– Manipülasyon	– Bir bileti yanlış kullanıcıya fatura etme	– Şifreleme – Dijital imza	Düşük
	– Kimlik doğrulama sistemine saldırılar	– Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı	– Bilet rezervasyonunu engelleme – Doğru kapsüle ulaşılmasını engelleme		
	– Mahremiyet ihlali	– Özel Veri Sızıntısı	– Kullanıcı kapsül erişimlerini izleme – Kullanıcı profillerini çıkarma	– Veri anonimleştirme	Düşük

Tablo 1. Hyperloop haberleşmesini hedef alan siber saldırılar (devamı)

Kapsülden Kapsüle (P2P)	– MitM	– Kimlik Taklidi (Impersonation)	– Kapsül çalışma prosedür ve fonksiyonunda bozulmalar	– Kimlik doğrulama	Yüksek
	– Sahtecilik	– Bilgi Toplama	– Kazalar	– Şifreleme	
	– Röle	– Güvenlik Açığı			
	– Tekrarlama	– İstismarı			
		– Manipülasyon			
		– Sistem Bozulması (Corruption)			
		– Hizmet kaybı			
			– Kapsül veri alışverişinde bozulma		
	– DoS		– Veri iletiminde gecikmeler	– Kaynak yönetimi kurtarma	Orta
	– Taşma Saldırısı	– Sistem Bozulması	– Kullanılamaz hale gelen bilgiler	– Saldırı tespit sistemi	
	– Sybil	– Hizmet kaybı	– Haberleşme ağında düzensizlik		
	– Kara Delik		– Sensör tutarsızlığı		
			– Kapsüllerin hatalı konum bilgisi	– Mesafe sınırlaması	
	– Konum sahteciliği	– Manipülasyon	– İletimi sonucu kazalar, gecikmeler ve verimsizlik	– Dijital İmza	Yüksek
		– Sistem Bozulma		– Konum bilgisi gizliliğini koruma	
Kullanıcıdan Kapsüle (U2P)	– MitM	– Özel Veri Sızıntısı	– Kullanıcıların dış ağ bağlantısını ele geçirme ve engelleme	– Saldırı tespit sistemi	Düşük
	– Gizlice Dinleme	– Hizmet Kaybı	– Hassas bilgileri çalma	– Şifreleme	
	– Kimlik doğrulama sistemine saldırılar		– Satın alınan biletlerin kullanımı ve kapsüle erişimi engelleme	– Kimlik doğrulama	
				– Veri anonimleştirme	
	– DoS	– Sistem Bozulması	– Kullanıcıların kapsüle ve dolayısıyla internete erişimini engelleme	– Kaynak yönetimi kurtarma	Düşük
	– Kimlik doğrulama sistemine saldırılar	– Hizmet Kaybı		– Kimlik doğrulama	
				– Güvenlik duvarı	
	– Mahremiyet ihlali	– Özel Veri Sızıntısı	– Kullanıcıların özel bilgilerini çalma	– Şifreleme	Düşük
	– Oltalama			– Kimlik doğrulama	

Tablo 1. Hyperloop haberleşmesini hedef alan siber saldırılar (devamı)

Kapsülden Tüpe (P2T)	– MitM – Röle – Tekrarlama	– Kimlik Taklidi – Bilgi Toplama – Güvenlik Açığı – İstismar – Manipülasyon – Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı	– Kapsüle veya tüpe sahte komutlar gönderme – Kapsülü raydan çıkarma – Kapsülü kaçırma	– Kimlik doğrulama – Şifreleme – Saldırı tespit sistemi	Yüksek
	– DoS – Taşma Saldırısı	– Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı	– Tüp ve kapsül arası veri alışverişini devre dışı bırakma ya da geciktirmek – Tüp ve kapsül arası enerji aktarımını önleme	– Kaynak yönetimi kurtarma – Saldırı tespit sistemi	Orta
	– Konum Sahteciliği	– Manipülasyon, – Sistem Bozulması	– Kapsülün konum bilgisiyle ilgili tutarsızlıklar oluşturma	– Mesafe sınırlaması – Dijital imza – Konum bilgisi gizliliğini koruma	Orta
	– Mahremiyet ihlali	– Özel Veri Sızıntısı	– Kapsül konum bilgisini ve kullanıcıların kimlik bilgilerini takip etme	– Veri anonimleştirme – Şifreleme	Düşük
Kapsül İçi Haberleşme (InP)	– MitM – Sahtecilik – Röle – Tekrarlama	– Bilgi Toplama – Güvenlik Açığı – İstismarı – Manipülasyon – Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı	– Kapsül içi tüm sistemleri tehlikeye atma (bilgi-eğlence, havalandırma, ışık, acil çıkışlar, yangın dedektörleri ve yangın söndürücüler gibi)	– Saldırı tespit sistemi – Bütünlük kontrolü	Orta
	– DoS – Taşma Saldırısı	– Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı	– Kaynakları tüketme – Kritik mesajların alınmasını önleme veya geciktirme	– Güvenlik duvarı – Saldırı tespit sistemi	Yüksek

Tablo 1. Hyperloop haberleşmesini hedef alan siber saldırılar (devamı)

Tüpten İstasyona (T2S)				
<ul style="list-style-type: none"> – MitM – Sahtecilik – Röle – Tekrarlama 	<ul style="list-style-type: none"> – Bilgi Toplama – Güvenlik Açığı – İstismarı – Manipülasyon – Sistem Bozulması – Hizmet kaybı 	<ul style="list-style-type: none"> – Tüpe kötücül kontrol mesajları gönderme – Anomaliler oluşturma – Kapsül bilgilerinde sahtecilik yapma – Tüpün bazı bölümlerini kapatma – Var olan anomalileri gizleme 	<ul style="list-style-type: none"> – Kimlik doğrulama – Şifreleme – Saldırı tespit sistemi 	Yüksek
<ul style="list-style-type: none"> – DoS 	<ul style="list-style-type: none"> – Sistem Bozulması 	<ul style="list-style-type: none"> – Tüp istasyon arası iki yönlü mesaj alışverişini önleme 	<ul style="list-style-type: none"> – Güvenlik duvarı – Saldırı tespit sistemi – Belleğin kritik süreçlere doğru şekilde tahsis edilmesi – Kaynakların yeniden dağıtılması 	Orta
<ul style="list-style-type: none"> – Fiziksel Kurcalama 	<ul style="list-style-type: none"> – Sistem Bozulması – Hizmet Kaybı 	<ul style="list-style-type: none"> – Kablolı iletişimi kesme – RAU’ları manipüle etme – Hizmeti kesintiye uğratma 	<ul style="list-style-type: none"> – Kurcalama önleyici malzemeler kullanma – Anomali tespit dedektörü 	Orta

4.2. Siber riskleri azaltma stratejileri ve siber güvenlik mekanizmaları

Hyperloop sisteminin veri iletimi ve diğer ihtiyaçları doğrultusunda haberleşmesi, çeşitli yöntemler ile sağlanabilmektedir. Ancak bu verilerin dış tehditlerden ve siber saldırılardan korunması önemlidir. Bu nedenle siber güvenliği geliştirmeye yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda bilgi sistemleri, eğlence sistemleri ve güvenlik için ayrı haberleşme ağlarının kullanılması, sistem açısından kritik verilerin korunmasını sağlayabilir. Altyapı boyunca fiber optik ağ kurulması ile haberleşme sinyallerinin bilgisayar korsanları tarafından fiziksel olarak ele geçirilmesi önenebilir (Delft Hyperloop, 2020).

Hedeflenen siber güvenlik performansını ölçmek için literatür çalışmalarında kullanılan bazı metrikler bulunmaktadır. Bu metrikler dikkate alınarak hyperloop sisteminin siber güvenliği için de stratejiler geliştirilebilir. Siber güvenlik performans ölçümü ya da metriği olarak Tablo 2’deki anahtar performans göstergeleri (Key Performance Indicator, KPI) kullanılabilir (RiskXChange, 2023).

Tablo 2. Siber güvenlik performans ölçümü için KPI'lar

KPI	Açıklama
Hazırlıklı olma seviyesi	Siber olayı önleme, müdahale etme ve kurtarmaya yönelik bir stratejiye sahip olunması, uygulanması ve takibiyle ilgilidir.
Saldırı girişimleri	Saldırı girişimlerini takip etmek; mevcut güvenlik açıklarına, güvenlik önlemlerine ve müdahale ekiplerinin hazır olup olmadığına dair bir görünüm sunmaktadır.
Ortalama tespit süresi	Bir siber güvenlik riskini veya siber tehdidini tespit etmek için geçen ortalama süre ile ilgili olup temel amaç, bu hedefe mümkün olan en kısa sürede ulaşmaktır.
Ortalama yanıt süresi	Bir siber güvenlik riskine veya tehdiye yanıt vermek için geçen ortalama süre ile ilgili olup temel amaç, bu hedefe mümkün olan en kısa sürede ulaşmaktır.
Ortalama kontrol altına alma süresi	Bir siber güvenlik riskinin veya tehdidin kontrol altına alınması için geçen ortalama süre ile ilgili olup temel amaç bu hedefe mümkün olan en kısa sürede ulaşmaktır.
Güvenlik olayları	Sistem donanımı veya yazılımı aracılığıyla güvenliğin ihlal edilmesiyle ilgili sorunlar ya da önlemlerin yeterliliği ölçülebilir. Siber güvenlik ekipleri, güvenlik olaylarını sürekli izleyerek her olasılığa hazırlıklı olmalıdır.
Güvenlik derecelendirmeleri	Gelişmiş risk ölçüm yöntemlerini kullanarak gerçek zamanlı risk derecelendirmeleri ve analizler sunulması, tüm hyperloop ekosistemindeki siber riskleri ölçerek proaktif bir şekilde riskleri azaltmaya yardımcı olabilir.
İnsan dışı trafik	Bot'lar tarafından tetiklenen insan dışı trafik miktarının ölçülmesi ve takibidir.
Virüs izleme	Sistem yazılımları, haberleşme ağı veya donanımıyla ilgili potansiyel virüsleri veya kötücül yazılım sorunlarını tespit etmeye yöneliktir.

Hyperloop haberleşme sistemlerine yönelen siber güvenlik tehditlerine karşı kullanılan yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kuantum kriptografi (National Security Agency, 2020)
- Yazılım Tanımlı Ağ (Software Defined Networking, SDN) (Kaur vd., 2014)
- Mesafe sınırlama (distance bounding) protokolü
- Veri toplama ve veri anonimleştirme (data aggregation and data anonymization)
- IDS
- Kaynak yönetimi kurtarma (resource management recovery)

Genel olarak bilişim sistemlerinin siber saldırılardan korunmasında temel koruma önlemleri, sistemin tasarım aşamasından itibaren en iyi güvenlik uygulamalarını ve tüm paydaşlar tarafından kullanılması gereken güvenlik standartlarının takip edilmesini içermektedir. Hyperloop sistemi yeni bir teknoloji olduğu için henüz tasarım aşamasında olan bu sistem özelinde, siber güvenlik konusunu adresleyen bir standart bulunmamaktadır. Hyperloop ulaştırma moduna yönelik siber güvenlik çözümleri geliştirmede; otomotiv, raylı sistemler ve havacılık gibi diğer sektörlerdeki tecrübeleri içeren; CEN-CENELEC yol haritasında belirtilen mevcut standartlar (CEN, 2023), Uluslararası Standardizasyon Örgütü'nün (International Organization for Standardization, ISO) ISO/IEC 27000 serisi gibi bilgi güvenliğine yönelik genel standartlar (ISO, 2018), Uluslararası Otomasyon Topluluğu (International Society of Automation, ISA) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical

Commission, IEC) tarafından yayınlanan ISA/IEC 62443 otomasyon ve kontrol sistemleri özelindeki standartlar (ISA, 2019), CLC/TS 5071 demir yoluyla ilgili uygulamalara yönelik siber güvenlik standartları (CLC, 2023), ISO Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers, SAE) tarafından hazırlanan ISO/SAE 21434:2021 karayolu taşıtlarının siber güvenlik standartları (ISO, 2021), Ulusal Siber Güvenlik Merkezi tarafından yayınlanan güvenlik prensipleri (National Cyber Security Centre, 2019), Otomotiv Açık Sistem Mimarisi (AUTomotive Open System Architecture, AUTOSAR) topluluğunun oluşturduğu güvenliğe yönelik standartları ve prosedürleri içeren genel bakış dokümanları (AUTOSAR, 2023) gibi kaynaklardan da faydalanılabilir (Brighente vd., 2024).

5. Sonuç ve Öneriler

Ulaştırma için kullanılan tüm modlar, dış dünya ile sürekli iletişim halindedir. Uydular aracılığıyla konum tespiti, radyo dalgaları aracılığıyla eğlence sistemlerinin kullanımı ve mobil ağlar aracılığıyla internete erişilmesi gibi hizmetler, ulaştırma sistemlerinde kullanılmaktadır. Ulaştırma ve hareketliliğin sağlanmasında yenilikçi bir mod olan hyperloop teknolojisinde de yer alan tüm bileşenlerin ve altyapının, bir ağ üzerinden kontrol merkezine sürekli bağlantılı olması gerekmektedir. Bu nedenle diğer tüm ulaştırma modlarında olduğu gibi hyperloop teknolojisi de etkin ve verimli bir haberleşme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada, hyperloop teknolojisinde kullanılan haberleşme ağı, haberleşme türleri, haberleşme teknolojileri ve yöntemleri ile bu sistemleri hedef alan siber güvenlik tehditleri ve siber güvenlik risklerini azaltıcı stratejiler incelenmiştir.

Haberleşme teknolojileri, güvenilir ve yüksek hızlı bir haberleşme imkânı sağlayarak yolculukların konforlu, güvenilir ve emniyetli olmasına katkı sunmaktadır. Hyperloop sisteminin haberleşme gereksinimlerini karşılamak için kablolu ve kablosuz birçok teknolojiden faydalanılmaktadır. Bu gereksinimler, olası siber güvenlik tehditlerini ve zorlukları da beraberinde getirmektedir. Hyperloop sisteminde, çelikten yapılmış kalın tüp kablosuz haberleşme için engeller oluştururken vakumlu ortam, bakım ve onarım gibi işleri zorlaştırmaktadır. Hyperloop sisteminin yüksek hıza sahip olması ve yolculuk boyunca kapsüldeki süreklilik arz eden devir nedeniyle sistemin bütün olarak haberleşmesinin verimli şekilde sağlanması için tüpün başka bölümlerine bağlantının aktarılması gerekebilmektedir. Bu aktarımların güvenilir olması önemli olup yüksek hızda seyahat sırasında doppler etkisinin ortaya çıkması da muhtemeldir.

Dünyada olduğu gibi Türkiye için de hyperloop sistemi; araştırılması, incelenmesi ve uygulamaya alınması zorluklar içeren ve ekonomik açıdan maliyetli bir ulaştırma modudur. Bu teknolojiyi oluşturan sistemlerin, mekanizmaların, haberleşme çözümlerinin, uçtan uca güvenlik ve emniyet ihtiyacı gibi birçok varlığın geliştirilmesi ile sonrasında yönetilmesi, kapsamlı süreçler içermektedir. Hyperloop teknolojisinin geliştirilmesi için test mekanizmalarının ve alanlarının, yani bu teknoloji özelindeki laboratuvarların oluşturulması, ulaştırma ve hareketliliğin yeni bir boyut kazanması açısından önem arz etmektedir.

Dünyadaki hyperloop sistemi geliştirme çalışmaları göz önünde bulundurularak Türkiye'nin bu alanda teknolojik gelişime öncülük edebilmesi için prototip düzeyde de olsa, ekonomik ve teknik açıdan minimum ölçekli bir hyperloop uygulama projesinin, çok paydaşlı bir yaklaşımla kamu-özel sektör iş birliği ile başlatılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir. Bu çerçevede ihtiyaç duyulan mevzuat, kurallar ve prosedürler, organizasyon yapısı, yer seçimi ve benzeri öncelikli konuların belirlenmesi gerekmektedir. Sistemin karmaşık yapısı ve çok kapsamlı bileşenleri olması nedeniyle çok farklı sektörleri bir araya getirmesi gerekeceği için planlama ve projelendirmenin doğru bir şekilde yapılması, ayrıca kritik bir konudur. Yol altyapısı, hyperloop tüpü, kapsülü, istasyonu, kontrol merkezi, haberleşme sistemleri, sensör ağları, uygulama yazılımları ve daha birçok varlık, ulaştırmanın beşinci modunun pilot bir uygulamasında yerini alacak olup bu varlıkların, güvenli ve güvenilir bir sistem oluşturacak şekilde çalışabilmesi için hyperloop sistemini oluşturan haberleşme türlerinin uçtan uca güvenliği, önemli bir husus olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle pilot uygulamalarda, olası siber saldırılar ve bu saldırılara karşı alınabilecek önlemler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Türkiye'de hyperloop sistemindeki gelişmeler ile haberleşme altyapısı ve siber güvenlik çözümlerinin mevcut durumu araştırılarak bu teknolojinin kurulumu ve pilot uygulaması için analiz yapılması, gelecek çalışmalar için potansiyel bir araştırma konusu olabilir. Türkiye'deki hyperloop sistemi

geliştirme çabalarının hız kazanması amacıyla test merkezlerinin kurulması ya da kentsel veya kurumsal ihtiyaçlar çerçevesinde prototip bir model geliştirilmesi, haberleşme ve siber güvenlik bileşenlerini de ele alacak şekilde tasarlanarak modellenmesi önerilmektedir. İzleyen çalışmalarda, olası siber saldırı senaryoları üzerinden siber saldırıları azaltmaya yönelik stratejilerin ve yöntemlerin seçimine ve uygulanmasına yönelik çözümler geliştirilebilir. Tasarlanacak pilot hyperloop sisteminin siber saldırılara karşı dayanıklılığını, literatürde yer alan siber güvenlik ölçüm KPI'larına göre analiz edecek bir model geliştirilebilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Sorumlu yazar ve ikinci yazar tarafından araştırmanın ilk versiyonu hazırlanmış, tüm yazarlar tarafından düzenlenerek gözden geçirilmiştir.

Destek ve teşekkür beyanı

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Armağan, K. (2020). The fifth Mode of Transportation: Hyperloop. *Journal of innovative transportation*, 1(1), 1105.

AUTOSAR. (2023). Explanation of Safety Overview. https://www.autosar.org/fileadmin/standards/R23-11/FO/AUTOSAR_FO_EXP_SafetyOverview.pdf

Brighente, A., Conti, M., Donadel, D., & Turrin, F. (2022). Hyperloop: A Cybersecurity Perspective. *arXiv preprint arXiv:2209.03095*.

Brighente, A., Conti, M., Donadel, D., & Turrin, F. (2024). Hyperloop: A Cybersecurity Perspective. <https://doi.org/10.1109/EuroSPW61312.2024.00045>

Catherine, T., Barr, L. C., & By Hyde, D. J. (2016). *Hyperloop Commercial Feasibility Analysis : High Level Overview*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/12308>

CEN. (2023). JTC 20-CEN/CLC/TR 17912:2023, Hyperloop systems- Standards Inventory and Roadmap. <https://www.cencenelec.eu/news-and-events/news/2023/eninthespilight/2023-02-13-a-first-step-in-the-standardization-of-the-european-hyperloop-industry/>

CLC. (2023). CLC/TS 50701:2023, Railway applications-Cybersecurity, European Committee For Electrotechnical Standardization, Brussels, Belgium.

Delft Hyperloop. (2019). *The Future of Hyperloop*. <https://hyperloopconnected.org/2019/06/report-the-future-of-hyperloop/>

Delft Hyperloop. (2020). Safety Framework for the European Hyperloop Network. İçinde *Hyperloop Connected*. <https://hyperloopconnected.org/2020/07/report-safety-framework-for-the-european-hyperloop-network/>

DGWHyperloop. (2024). *Developing the future of high-speed transportation*. Erişim tarihi 25 Kasım 2024, <https://www.dgwhyperloop.in/careers.html>

euroTUBE. (2024). *Hyperloop A new mode of transport*. Erişim tarihi 25 Kasım 2024, <https://eurotube.org/hyperloop/>

Fokum, D. T., & Frost, V. S. (2010). A survey on methods for broadband internet access on trains. *IEEE communications surveys & tutorials*, 12(2), 171-185.

Gazi Üniversitesi. (2022). *TEKNOFEST'te Üniversitemiz Teknoloji Fakültesi Öğrencilerinden Büyük Başarı "Türkiye'nin En Hızlısı Turkuaz Hyperloop"*. <https://gazi.edu.tr/view/news/289802/teknofest->

te-universitemiz-teknoloji-fakultesi-ogrencilerinden-buyuk-basari-turkiye-nin-en-hizlisi-turkuaz-hyperloop-

Gheth, W., Rabie, K. M., Adebisi, B., Ijaz, M., & Harris, G. (2021). Communication systems of high-speed railway: a survey. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(4), e4189.

Gkoumas, K. (2021). Hyperloop Academic Research: A Systematic Review and a Taxonomy of Issues. *Applied Sciences*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/app11135951>

Gkoumas, K., & Christou, M. (2020). Hyperloop in Europe: State of Play and Challenges. *Proceedings of the 8th Transport Research Arena, TRA*.

Hansen, I. A. (2020). Hyperloop Transport Technology Assessment and System Analysis. *Transportation Planning and Technology*, 43(8), 803-820. <https://doi.org/10.1080/03081060.2020.1828935>

HARDT. (2024). *Hyperloop is the most environmentally friendly solution*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://www.hardt.global/>

Hedhly, W., Amin, O., Shihada, B., & Alouini, M.-S. (2021). Hyperloop Communications: Challenges, Advances, and Approaches. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 2413-2435.

HyperloopTT. (2024). *Hyperloop Transportation Technologies*. Erişim tarihi 25 Kasım 2024, <https://www.hyperlooptt.com/>

Hyperloop Development Program. (2024). *The Hyperloop development program*. Erişim tarihi 25 Kasım 2024, <https://www.hyperloopdevelopmentprogram.com/questions-hdp>

Hyperloop Italia. (2024). *Firma del contratto tra cav e hyper builders per lo studio di fattibilità del progetto futuristico hyperloop in italia*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://hyperloopitalia.com/media/comunicati-stampa/firma-del-contratto-tra-cav-e-hyper-builders-per-lo-studio-di-fattibilita%e2%80%a8del-il-progetto-futuristico-hyperloop-in-italia/>

Icomera. (2021). *HyperloopTT Connects with Icomera TraXside™ for Wireless Communications*. Erişim tarihi 12 Mart 2024, gönderen <https://www.icomera.com/hyperlooptt-connects-with-icomera-traxside-for-wireless-communications/>

ISA. (2019). ISA/IEC 62443 Series of Standards. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>

ISO. (2018). ISO/IEC 27000:2018 Information technology-Security techniques-Information security management systems-Overview and vocabulary, Geneva. <https://www.iso.org/standard/73906.html>.

ISO. (2021). ISO/SAE 21434:2021- Road vehicles- Cybersecurity engineering, International Organization for Standardization, Geneva, CH, Standard. <https://www.iso.org/standard/70918.html>

Kale, S. (2019). Hyperloop: Advance Mode of Transportation System and Optimize Solution on Traffic Congestion. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 7, 539-552. 10.22214/ijraset.2019.7085.

Kaur, K., Singh, J., & Ghumman, N. S. (2014). Mininet as software defined networking testing platform. *International conference on communication, computing & systems (ICCCS)*, 139-142.

Li, P., Niu, Y., Wu, H., Han, Z., Wang, Y., Wang, N., Zhong, Z., & Ai, B. (2024). Scheduling of Millimeter Wave Communications for Ultra-High-Speed Vacuum Tube Train. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.

Mitropoulos, L., Kortsari, A., Koliatos, A., & Ayfantopoulou, G. (2021). The Hyperloop System and Stakeholders: A Review and Future Directions. *Sustainability*, 13(15), 8430.

Musk, E. (2013). Hyperloop Preliminary Design Study Technical Section. *Hyperloop Alpha*. https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf

- National Cyber Security Centre.** (2019). Secure design principles. <https://www.ncsc.gov.uk/collection/cyber-security-design-principles>
- National Security Agency.** (2020, Eylül 16). *Kuantum Anahtar Dağıtımı ve Kuantum Kriptografi*. <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/>
- NEVOMO.** (2024). *Projects for a new passenger and freight*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://www.nevomo.tech/en/vehicles/>
- Nøland, J. K.** (2021). Prospects and Challenges of the Hyperloop Transportation System: A Systematic Technology Review. *IEEE Access*, 9, 28439-28458. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057788>
- Nøland, J. K.** (2024). A Reality Check on Maglev Technology for the Hyperloop Transportation System: Status Update After a Decade of Development. *IEEE Access*.
- Özbek, R., & Çodur, Y. M.** (2021). Comparison of Hyperloop and Existing Transport Vehicles in Terms of Security and Costs. *Modern Transportation Systems and Technologies*, 7(3), 5-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.17816/transsyst2021735-29>
- Platin.** (2023). *Sürdürülebilir ve çevre dostu yeni ulaşım konsepti Hyperloop'ta Türk imzası*. <https://www.platinonline.com/sectorler/surdurulebilir-ve-cevre-dostu-yeni-ulasim-konsepti-hyperloopta-turk-imzasi-1087505>
- Premasagar, S., & Kenworthy, J.** (2022). A Critical Review of Hyperloop (Ultra-High Speed Rail) Technology: Urban and Transport Planning, Technical, Environmental, Economic, and Human Considerations. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.842245>
- Qiu, C., Liu, L., Han, B., Zhang, J., Li, Z., & Zhou, T.** (2020). Broadband wireless communication systems for vacuum tube high-speed flying train. *Applied Sciences*, 10(4), 1379.
- RiskXChange.** (2023). *A guide to cybersecurity metrics and KPIs*. <https://riskxchange.co/1006911/a-guide-to-cybersecurity-metrics-and-kpis/>
- Rob, M. A., Sagar, A. S. M., & Uddin, M. N.** (2019). Prospects of Hyperloop Transportation Technology: A Case of China. *International Journal of Engineering and Management Research*.
- Sniady, A., & Soler, J.** (2014). Capacity gain with an alternative LTE railway communication network. *2014 7th International Workshop on Communication Technologies for Vehicles (Nets4Cars-Fall)*, 54-58. <https://doi.org/10.1109/Nets4CarsFall.2014.7000913>
- swisspod.** (2024). *Preliminary Testing For World's Longest Hyperloop Mission*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://www.swisspod.com/our-journey>
- Tavsanoglu, A., Briso, C., Carmena-Cabanillas, D., & Arancibia, R. B.** (2021). Concepts of Hyperloop Wireless Communication at 1200 km/h: 5G, Wi-Fi, Propagation, Doppler and Handover. *Energies*, 14(4), 983.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi.** (2020). *Yeni Nesil Ulaşım Teknolojisi Hyperloop*. <https://cbddo.gov.tr/SharedFolderServer/Genel/3.Aras%CC%A7t%C4%B1rma-Raporu-Yeni-Nesil-Ulas%CC%A7t%C4%B1m-Teknolojisi-Hyperloop.pdf>
- TEKNOFEST.** (2022). *Hyperloop Geliştirme Yarışması*. <https://www.teknofest.org/tr/yarismalar/hyperloop-gelistirme-yarismasi/>
- TEKNOFEST.** (2024). Geleceğin Ulaşım Teknolojisi TÜBİTAK Hyperloop Geliştirme Yarışması Sona Erdi. <https://www.teknofest.org/tr/yarismalar/hyperloop-gelistirme-yarismasi/>
- Thompson, P. J.** (2019). *A Scientific and Economic Analysis of the Hyperloop as it Pertains to Mass Transportation*. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=case1560510307453676
- Turrin, F.** (2023). *Cybersecurity of Modern Cyber-Physical Systems*.

U.S. Department of Energy. (2021). *Effect of Hyperloop Technologies on the Electric Grid and Transportation Energy*. USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Washington <https://www.osti.gov/biblio/1773025/>

UTIKAD. (2022). *Erciyas ve Çimtaş, Hyperlooptt'e Tedarikçi ve Yatırımcı Oldu*. <https://www.utikad.org.tr/Detay/Sektor-Haberleri/30900/erciyas-ve-cimtas-hyperlooptt-e-tedarikci-ve-yatirimci-oldu>

TRANSPOD. (2024). *TransPod system*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://www.transpod.com/transpod-system/>

TUM Hyperloop. (2023). *Ultra-fast connections between mobility hubs*. Erişim tarihi 25 Kasım 2024, <https://tumhyperloop.com/about-hyperloop/>

zeleros. (2024). *We develop hyperloop Technologies*. Erişim tarihi 24 Eylül 2024, <https://zeleros.com/hyperloop/>

Zhang, J., Liu, L., Han, B., Li, Z., Zhou, T., Wang, K., Wang, D., & Ai, B. (2020). Concepts on train-to-ground wireless communication system for hyperloop: Channel, network architecture, and resource management. *Energies*, 13(17), 4309.

Research Article

Driver violation analysis: IETT example*

Gizem Kaya¹, Bükra Doğaner Duman^{*1}, Ebru Demirci¹

¹Transportation and Logistics Department, Istanbul University, Istanbul, Türkiye

*Correspondence: bukra.doganer@gmail.com

DOI: 10.51513/jitsa.1520267

Abstract: This article discusses the importance of driver behavior analysis in improving public transportation safety. It specifically focuses on the case of Istanbul Metropolitan Municipality Istanbul Electricity Tram and Tunnel Operations General Directorate (IETT), which operates a large number of public vehicles in Istanbul, including buses, Metrobus, Beyoğlu nostalgic tram, and Karaköy tunnel funicular system. The article highlights various technologies IETT uses to analyze driving behavior, such as GPS data analysis, bus telemetry data analysis, and driver behavior data analysis. It also presents an analysis of driver violation data obtained from a driver motion analysis system used by IETT to detect violations. The data shows that the most violated rule is seat belt fastening, followed by distraction, drowsiness, and other violations. The article suggests that analyzing driver behavior data can help identify areas where driver behavior can be improved, reduce the risk of accidents, and improve overall safety.

Keywords: Driver violation, Driving behavior, Driver motion analysis, urban transportation

Sürücü ihlal analizi: İETT örneği*

Özet: Bu makale, toplu taşıma güvenliğinin artırılmasında sürücü davranış analizinin önemini tartışmaktadır. Özellikle İstanbul'da otobüs, metrobüs, Beyoğlu nostaljik tramvayı ve Karaköy tünel funiküler sistemi gibi çok sayıda kamu aracını işleten İstanbul Büyükşehir Belediyesi İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri Genel Müdürlüğü (İETT) örneğine odaklanmaktadır. Makalede, İETT'nin sürüş davranışını analiz etmek için kullandığı GPS veri analizi, otobüs telemetri veri analizi ve sürücü davranış veri analizi gibi çeşitli teknolojiler vurgulanmaktadır. Ayrıca, İETT tarafından ihlalleri tespit etmek için kullanılan bir sürücü hareket analiz sisteminden elde edilen sürücü ihlal verilerinin bir analizini de sunmaktadır. Veriler, en çok ihlal edilen kuralın emniyet kemeri takma olduğunu, bunu dikkat dağınıklığı, uyuşukluk ve diğer ihlallerin izlediğini göstermektedir. Makale, sürücü davranış verilerinin analiz edilmesinin, sürücü davranışının iyileştirilebileceği alanların belirlenmesine, kaza riskinin azaltılmasına ve genel güvenliğin iyileştirilmesine yardımcı olabileceğini öne sürmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürücü ihlali, Sürüş davranışı, Sürücü hareket analizi, kentsel ulaşım

* This study was presented as an abstract at the International Intelligent Transportation Systems Summit 2024.

1. Introduction

Urban transportation systems are essential to ensuring the mobility and connectivity of modern cities, supporting economic activities, and improving the quality of life for citizens. However, with the increasing demand for public transportation, safety concerns have become a critical issue for operators and policymakers. Among the myriad factors influencing transportation safety, driver behavior has emerged as a pivotal aspect due to its direct and measurable impact on accident rates, passenger satisfaction, and operational efficiency. Unsafe driving practices, such as failing to fasten seat belts, fatigue, distractions, and mobile phone usage, not only increase the likelihood of accidents but also compromise public trust in transportation systems.

In Türkiye, the Istanbul Electricity Tram and Tunnel Operations (IETT), managed by the Istanbul Metropolitan Municipality, operates one of the most extensive public transportation networks. Its diverse fleet includes buses, Metrobus lines, nostalgic trams, and funicular systems, serving millions of passengers daily. Given the complexity and scale of its operations, IETT faces unique challenges in maintaining high safety standards while meeting the mobility needs of Istanbul's 16 million residents. To address these challenges, IETT has embraced technological innovations, deploying GPS systems, telemetry devices, and in-vehicle cameras to monitor and analyze driver behavior in real time. These technologies enable the detection of risky behaviors, the identification of patterns, and the implementation of corrective actions to improve safety outcomes.

This study focuses on analyzing driver violations within IETT's transportation network by utilizing comprehensive datasets obtained from advanced driver monitoring systems. It explores common violations, such as seat belt non-compliance and fatigue-related distractions, and examines their correlation with external factors, including operator performance, time of day, and day of the week. To better understand the relationship between driver behaviors and accident probabilities, this study employs binomial logistic regression analysis. This statistical method allows for the identification of significant predictors and the estimation of accident probabilities under different scenarios. By leveraging this approach, the study provides actionable insights into the specific behaviors that most significantly increase safety risks. The study highlights the critical role of data analytics in identifying high-risk behaviors and providing actionable insights to reduce accident risks and enhance safety protocols. Moreover, it underscores the importance of proactive interventions, such as tailored training programs, optimized scheduling, and fatigue management systems, in fostering a safety-oriented culture within urban transportation.

In addition to contributing to local safety improvements, this research has broader implications for urban transit systems globally. By presenting a scalable framework for driver behavior analysis, the study offers valuable insights into the role of technology in advancing public transportation safety. It demonstrates how data-driven decision-making can be integrated into urban transit strategies to achieve sustainable, efficient, and passenger-centric mobility solutions. Furthermore, the findings serve as a guide for policymakers and transportation agencies seeking to adopt innovative approaches to enhance safety and operational performance in increasingly complex urban environments.

By situating driver behavior analysis within the broader context of urban transportation challenges and technological advancements, this study aims to inform stakeholders about best practices for ensuring safer, more efficient, and sustainable mobility systems. It emphasizes the need for collaboration among operators, passengers, and policymakers to build a resilient and safety-focused public transportation framework adaptable to the needs of diverse urban landscapes.

2. Literature Review

2.1 Driver training and simulation studies

One of the factors that affect driver behavior is the management practices of the enterprise. A study of Chinese bus drivers found that enterprises with better management practices had fewer incidents of risky driving behavior (Liu and Hansen, 2019). In the same article Information relevancy can also affect driving behavior, as highlighted by a simulator study on professional bus drivers, which demonstrated the effects of information relevancy on driving behavior. Another factor that affects driver behavior is the use of new technology. A study of driving behavior recognition methods based on vehicle multi-

sensor information found that the use of sensors can provide accurate data on driver behavior, which can be used to improve safety. Similarly, modeling driver behavior in real-world scenarios using multiple noninvasive sensors can help identify patterns and areas that require improvement, as suggested by a study on the same topic (Li et al., 2013).

A gamification program to improve driver behavior, as suggested by a study on improving driver behavior using gamification (Helvacı et al. 2018). The program incentivized safe driving based on individual driver histories, promoting responsible behavior. Another study used a driving simulator to explore gap acceptance behavior. Findings revealed that acceptance time and distance varied based on driver experience and traffic density, highlighting the unpredictable nature of driver clearance behavior influenced by multiple factors (Farah et al., 2007). The other article discusses the use of mobile apps to improve driving behavior. A systematic mapping study allowed the researchers to analyze existing mobile applications. The results show that there are applications designed using various techniques to change the behavior of drivers. The gamification features of these apps are popular as they increase the frequency of users using the app and the motivation to improve their driving behavior (El hafidy et al., 2021).

An article touches on some of the issues to consider about the validity of driving simulators. The researchers warn that driving simulators may not fully reflect the real-world driving experience, and there may be some differences. Despite this, driving simulators offer many advantages, for example, they can check driving conditions and simulate special situations in a safe environment. As a result, the validity of driving simulators depends on the simulator's purposes, driver experience, and usage scenarios (Kaptein et al. 1996). The paragraph discusses how instructional conditions affect mental effort and performance. Suitable conditions lead to high performance with low mental effort, while unsuitable conditions result in the opposite. Finding the right teaching conditions is crucial for effective learning, although effectiveness may vary depending on tasks and individual differences (Paas and Van Merriënboer, 1993).

An article presents a new method for detecting driver maneuvers using a rule classifier. The proposed method uses a set of rules to classify driver maneuvers, such as lane changing, turning, and braking, based on the vehicle's speed, acceleration, and steering wheel angle. The authors evaluated the method on a dataset of real-world driving scenarios and compared its performance to other existing methods. The results showed that the proposed method achieved higher accuracy and stability in detecting driver maneuvers, making it a promising approach for real-world applications such as autonomous driving and driver monitoring systems (Porwik et al. 2022).

2.2 Risky driving behaviors and fatigue

Attitudes toward traffic safety also play a significant role in driver behavior. A study of bus drivers in China found that attitudes toward traffic safety were associated with risky driving behavior (Wang et al. 2022). Fatigue is another factor that can affect driver behavior. A study of bus rapid transport (BRT) drivers found that stress-related psychosocial factors at work, along with fatigue, were associated with risky driving behavior (D'souza, and Maheshwari, 2015). A methodological approach for studying public bus transit driver distraction was suggested by a study (D'souza, and Maheshwari, 2015) which involved monitoring driver behavior using various sensors and devices. Finally, analyzing driver behaviors during common tasks using a frontal video camera and CAN-Bus information can help identify violations and areas that require improvement, as suggested by a study on the analysis of driver behaviors during common tasks (Sathyanarayana et al. 2014).

The another article, the influence of road condition and age on the driver's secondary duties was investigated using an online method for driver load estimation. In the research, driving parameters such as drivers' reaction time, average speed, and standard deviation of speed were analyzed and the effects of age and distractions on driving performance were verified. The results showed that younger drivers drive at higher speeds than middle-aged and older drivers and that distractions negatively affect driving performance (Verwey, 2000).

An article proposes a method using a support vector machine (SVM) algorithm to detect the cognitive distractibility states of drivers in real time. This model detects changes in vehicle acceleration and steering control if a driver is distracted. Experiments show that the model can accurately detect driver

distraction in real time. It is envisaged that this technology can be used to increase driver safety (Liang et al. 2007). The article explores measuring drivers' mental load by analyzing their biological data like brain waves, heart rate, and eye movements at various load levels. Findings indicate that increased mental load leads to changes in brain waves, higher heart rate, and decreased eye movements. These measurements could be useful for assessing driver strain in different conditions, potentially enhancing evaluations of driving performance (De Waard and Brookhuis, 1996). Another article presents a method for predicting risky driving events using explainable artificial intelligence techniques. This method aims to understand why the driver exhibits risky driving behaviors by using environmental data as well as driving behavior data. The authors note that this method improves the results of previous studies and could potentially have a major impact on driving safety in the future (Masello et al., 2023).

2.3 Device use while driving

The use of mobile phones while driving is also a significant concern for public transportation companies. A study of intra-city bus drivers in India found that there was a tendency to use mobile phones while driving (Ahmed et al., 2023). Similarly, the use of cell phones while driving is a common violation that can result in distracted driving and accidents, as indicated by the tendency of intra-city bus drivers to use cell phones while driving, using the ordered probit model (Shaaban et al, 2018). A study of distracted driving in commercial vehicles and buses found that distractions such as mobile phone use were a significant cause of accidents. Next to cell phones one common cause of distraction driving on the bus is the use of electronic devices, such as navigation systems, or entertainment systems, by the driver. Research has shown that the use of such devices while driving can increase the risk of accidents, particularly if the driver is texting, emailing, or browsing social media. Other potential sources of distraction for bus drivers include interacting with passengers, eating or drinking, and adjusting the vehicle's controls (Shaaban et al, 2018). The other article explores the effects of information relevancy on driving behavior (Nilsson et al., 2021). Another article analyzed the age of drivers and the effect of distractions on driving performance. 87 participants were made to drive with different distractions and their driving parameters were examined (Papantoniou, et al. 2017).

An article is a meta-analysis to examine the effects of mobile phones on driver performance. The study examined 48 studies examining the effect of mobile phone use on driving performance. The meta-analysis results showed that the use of mobile phones adversely affected the driver's reaction times, accelerator pedal use, steering wheel control, and vehicle following distance. It was also determined that the effects of mobile phone use on driving performance depend on factors such as age, gender, type of phone used, and driving conditions. The meta-analysis results showed that mobile phone use significantly affects driving performance and therefore it is important to prevent mobile phone use while driving (Caird et al. 2008).

Another study aims to investigate the effect of mobile phone use on driver performance. For this purpose, 20 participants (11 men, and 9 women with an average age of 20) were given driving tasks in the driving simulator accompanied by different levels of distraction (for example, using a mobile phone). The results showed that mobile phone use negatively affects driving performance. This effect is explained by reducing the time it takes for eyes to look at the road while driving and causing distraction from important objects in traffic. The researchers emphasize that these results pose a serious risk to the driving safety of mobile phone use (Strayer et al. 2003). The article demonstrates using driver modeling in the UTDrive research platform to detect and assess distractions. Parameters like eye movements, reaction time, and biometric data are analyzed to understand drivers' responses to distractions and their impact on driving performance. Results indicate that driver modeling is effective for distraction detection and evaluation (Hansen et al. 2017).

The article examines drivers' attitudes toward distraction-reduction strategies and their response to their flaws. Using driving simulations with various distractions, the study found that drivers are willing to use imperfect strategies but doubt their effectiveness. They express openness to better strategies for greater effectiveness and comfort. This research aids in understanding drivers' needs to combat distractions and supports the development of improved strategies (Donmez et al., 2006).

An article, the effect of cell phone conversations on driving performance is examined using a meta-analysis of 23 previous studies. According to the results of the meta-analysis, it has been determined

that mobile phone conversations have a significant negative impact on driving performance, especially prolonging the reaction time, reducing driving speed, and increasing the risk of lane violation. However, it was concluded that the influence of some factors (eg, type of speech, journey time, driver experience) differs, and future studies should consider these factors. In addition, it was stated that hands-free devices also negatively affect driving performance, and therefore, the use of mobile phones while driving should be reduced as much as possible (Horrey and Wickens, 2006).

An article discusses whether hands-free phones are safer than handheld phones. In the experimental study, the performances of the participants in the driving simulator were compared while talking on hands-free and handheld phones. The results showed that hands-free phones improved driving performance, but were not safer than handheld phones. In addition, it has been found that phone use negatively affects driving performance in general (Ishigami and Klein, 2009). The other article explores the effect of cell phone conversations on driving performance. The researchers used a simulator to measure driving performance by allowing participants to make phone calls at various intervals. The results showed that cell phone calls caused a significant decrease in driving performance. This decrease was particularly evident in tracking, maneuvering, and vehicle control (Rakauskas et al., 2004).

In recent years, research has emphasized the critical role of public transportation drivers' behaviors in traffic safety. Aggressive driving behaviors, significantly influenced by demographic factors such as age, gender, and driving experience, are among the leading contributors to traffic accidents (Hamarat & Duran, 2020). Research in Türkiye identified three key categories of negative driving behaviors: errors, violations, and inattentiveness (Trafik Hizmetleri Başkanlığı, n.d.). The nally, fatigue and stress levels among public transportation drivers have been shown to significantly increase accident risks (Terzi, 2019). These findings underscore the importance of monitoring and improving driver behaviors through big data analytics and real-time monitoring systems. Particularly, big data-driven driver behavior models developed for fleet and public vehicles are regarded as effective tools for enhancing driving safety (Terzi, 2019). Moreover, advanced methods employing visual and vehicular sensors, as well as machine learning algorithms such as Graph Convolutional Recurrent Networks, have shown promising results in accurately detecting and mitigating hazardous driving behaviors (Adhikari, 2023; Khosravinia et al., 2023).

3. IETT Data Sets

IETT is responsible for managing all the rubber-tired public vehicles in Istanbul and operates a total of 6241 buses, including 3202 public sector buses and 3039 private sector buses. IETT has utilized artificial intelligence to analyze real-time driver violations detected by specialized in-vehicle cameras capable of performing detailed driver movement analysis. These advanced cameras are designed to monitor driver actions such as seat belt compliance, distracted driving, and fatigue. The data generated from these analyses is instantly recorded in the IETT database, enabling real-time monitoring and data-driven improvements in public transportation safety and efficiency. With the driver behavior analysis camera, smoking, talking on the phone, wearing seat belts, sleepiness, inattention, driver tracking with facial recognition, and inspections of drivers who work more than working hours are carried out. In IETT, analysis can be made on driving safety and driver performance evaluation by using 2 types of technological system data. These are data received from telemetry system devices in the entire fleet of IETT and data from in-vehicle camera systems. There is a telematics device in 6241 vehicles, and driver movement analysis systems are installed in 3039 vehicles.

3.1 GPS Data Analysis

IETT GPS data analysis involves analyzing the location data collected from the GPS devices installed in IETT buses. This data provides valuable insights into bus routes, travel times, and passenger behavior, which can be used to optimize bus routes and schedules to improve overall efficiency and effectiveness. Real-time monitoring of bus locations and performance allows IETT to quickly identify and respond to issues while tracking passenger behavior helps IETT adjust routes and schedules to better serve passengers and improve satisfaction. By leveraging the insights gained from this data, IETT can make data-driven decisions that lead to improved operations, reduced costs, and increased customer satisfaction.

3.2 Driver Behavior Data

Driver behavior data is crucial for analyzing safety in public transportation. Collected from cameras, it offers insights into driver habits like fatigue and distractions. Analyzing this data helps improve driver behavior, reducing accident risks and enhancing safety. Initially met with resistance, the project gained acceptance through passenger support and explanations of its safety aims. As a result, the institution's reputation improved and also gained public support.

4. IETT Data Analysis

The numerical data cited in this study were sourced from the institutional knowledge repository of the Istanbul Metropolitan Municipality, Directorate General of IETT (2023). These include internal operational records and data provided by the Information Technology Department. The graphs were created using Excel, while the logistic regression analyses were conducted using the Jamovi software.

Driver behavior analysis relies on data collected from in-vehicle cameras to monitor activities such as seat belt usage, distracted driving, fatigue, smoking, and mobile phone use. These insights help identify unsafe behaviors, enabling interventions to improve safety and reduce accidents. Real-time monitoring ensures immediate corrective actions, while long-term data analysis highlights areas requiring additional training. These efforts enhance road safety, optimize operations, and boost both passenger and driver satisfaction.

IETT employs approximately 14,000 drivers. Initially, the introduction of driver behavior monitoring cameras faced resistance from personnel, sparking criticism on social media. However, with strong passenger support and transparent communication about the project's safety goals, the institution successfully addressed concerns, gaining acceptance and public trust.

4.1 Violation Data

Our article presents an analysis of monthly data from April 2023 obtained from a driver motion analysis system used to detect driver violations. The analysis is presented in Figure 1, which displays the percentage and numerical distribution of driver violations. The data shows that the most violated rule is seat belt fastening, with 140,478 instances or 80% of all violations. Other violations include Distraction (look around alarm) with 8,036 instances or 5%, drowsiness with 24,063 instances or 14%, phone call alarm with 1,342 instances or 1%, and smoking alarm with 982 instances or 0%.

Table 1. Driver violations

Driver Violations	Total
Distraction (Look Around Alarm)	8036
Drowsiness	24063
Phone Call Alarm	1342
Seat Belt Not Fastening Alarm	140478
Smoking Alarm	982
Grand Total	174901

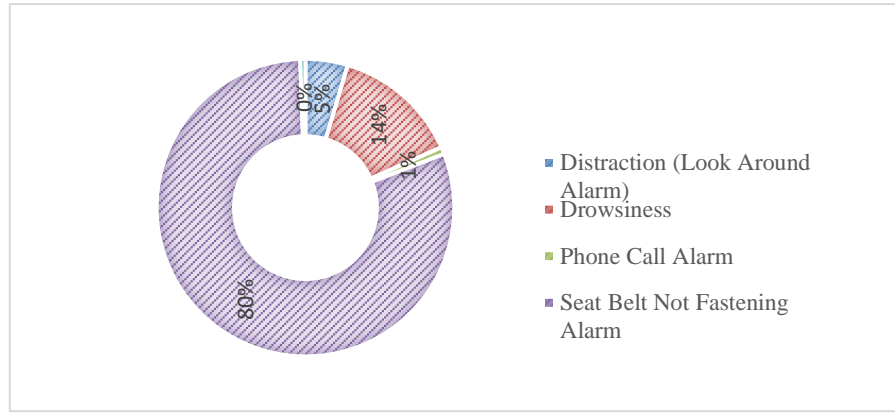


Figure 1. Driver violations percentages

4.1.1 Violation rates by the operator

The rate of driver violations by operators can be used as an indicator to measure the performance of an operator's drivers in obeying traffic rules. These rates may reflect how much an operator cares about driver training, what tools he uses to monitor compliance, and his sensitivity to passenger safety.

Figure 2 displays the distribution of these violations by the operator, with the majority of violations attributed to seat belts, and not fastening alarms. Particularly, the operators Mavi Marmara, Kent İçi İstanbul, and Özulaş have values ranging from 10% to 20%, making them the top violators of this rule. Drowsiness violations, on the other hand, are below 5%, with the highest violators being Mavi Marmara, Öztaş Ulaşım, and Özulaş operators.

In addition, rates of driver violations, according to operators, can help determine which lines or areas drivers commit more violations, helping to take preventive measures. This can be an important step in increasing the quality of public transportation service, increasing passenger satisfaction, and ensuring safety.

Table 2. Driver violations by operator-dependent

Operator	Distraction (Look Around Alarm)	Drowsiness	Phone Call Alarm	Seat Belt Not Fastening Alarm	Smoking Alarm	Grand Total
İst Halk Otobüs	651	2328	167	15497	169	18812
İst Özel Taşımacılık	145	762	107	9249	58	10321
İstanbul Çift Katlı Halk Otobüsleri	120	621	23	1256	20	2040
İstanbul Halk Ulaşım	827	1799	44	24542	35	27247
Kentiçi İstanbul	273	301	16	1286	11	1887
Mavi Marmara	1840	4874	150	36491	68	43423
Öztaş Ulaşım	1330	4469	281	12531	235	18846
Özulaş	1923	5273	241	21258	191	28886
Yeni İstanbul Halk Otobüsleri	927	3636	313	18368	195	23439
Grand Total	8036	24063	1342	140478	982	174901

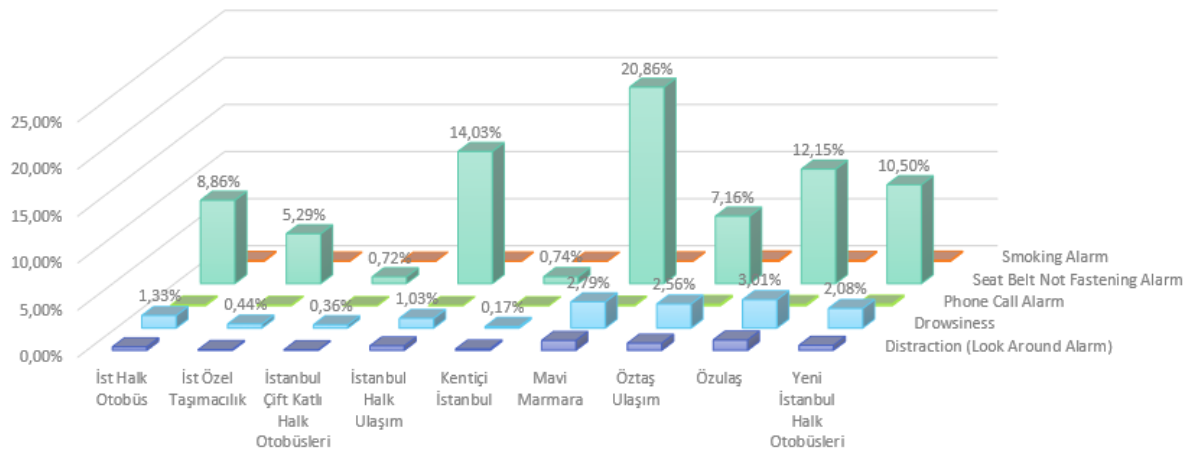


Figure 2. Driver violation percentages by operator-dependent

4.1.2 Violation rates by day of the week

The article presents an analysis based on one month of data from April 2023. As April is a spring month and the weather is warmer, there may be an increase in traffic on the roads. Figure 3 shows the percentage of driver violations on weekdays and weekends, indicating that drivers are more likely to violate rules related to drowsiness on weekends. This could be due to the accumulation of fatigue throughout the week, as well as the fact that roads are more congested on weekends. Overall, the most frequent violation is related to seat belt fastening.

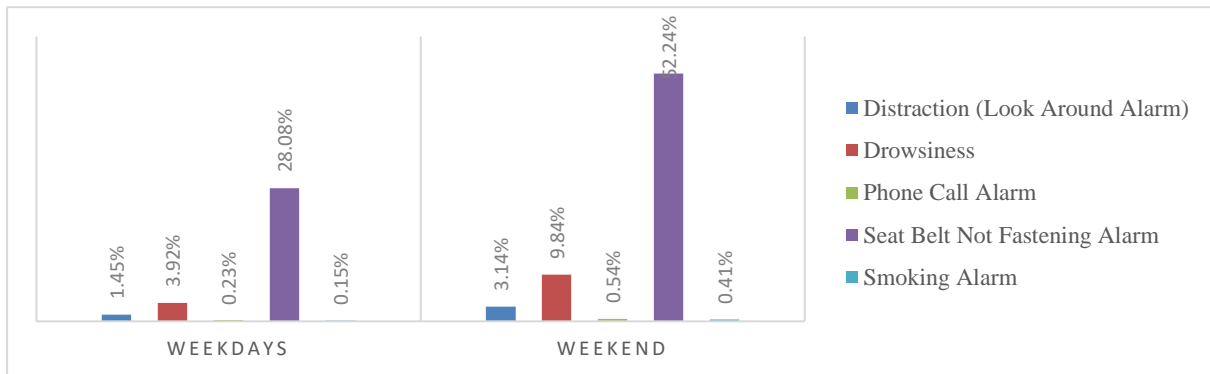


Figure 3. Driver violation percentages by weekdays and weekend

4.1.3 Violation rates by hour (average)

When analyzing the data on violation rates by hour (average), it becomes evident that violations tend to be higher during the peak morning hours on weekdays. This could be due to the increased traffic and congestion during this time, causing drivers to become more impatient and make reckless decisions. Additionally, people may be rushing to get to work or school and may be less mindful of traffic laws. It's also possible that law enforcement agencies are more active during these times, leading to more violations being reported. It's important to note that these trends may vary depending on the location and specific circumstances, but understanding the patterns can help inform traffic safety measures and enforcement strategies.

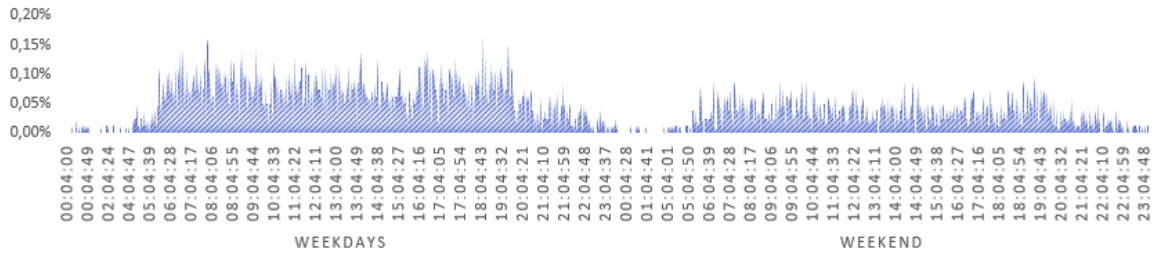


Figure 4. Driver's distraction graph

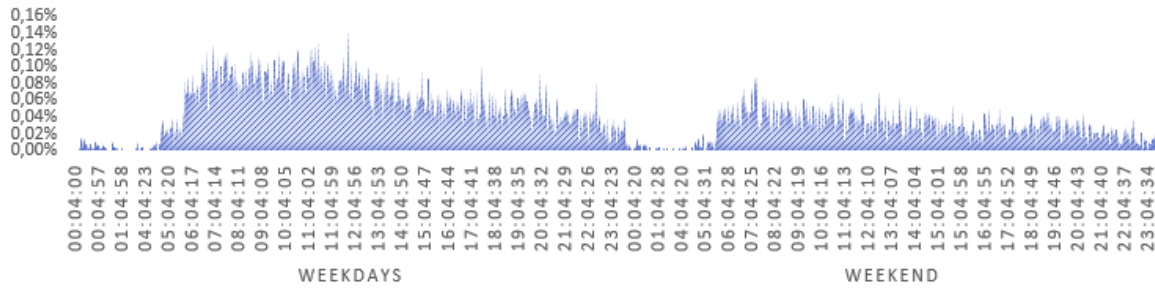


Figure 5. Driver's drowsiness graph

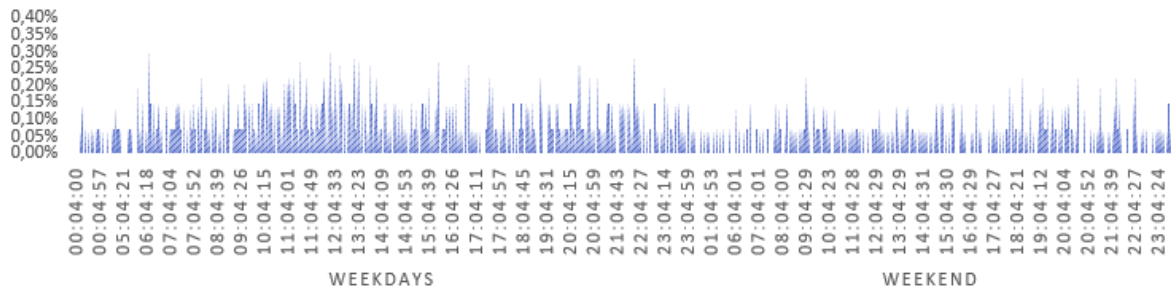


Figure 6. Driver's phone call alarm graph

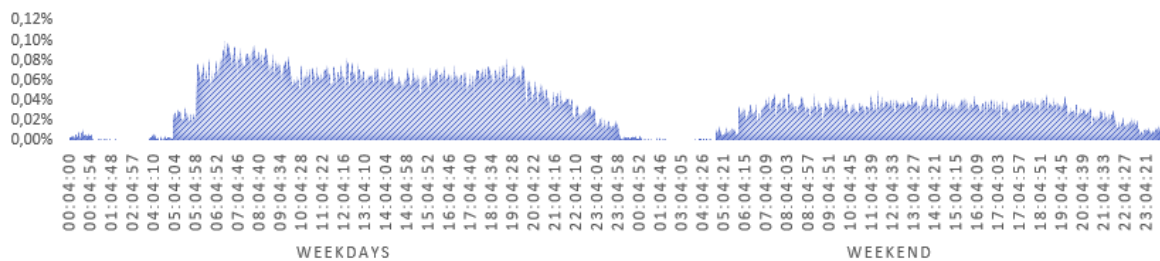


Figure 7. Driver's seat belt fastening alarm graph

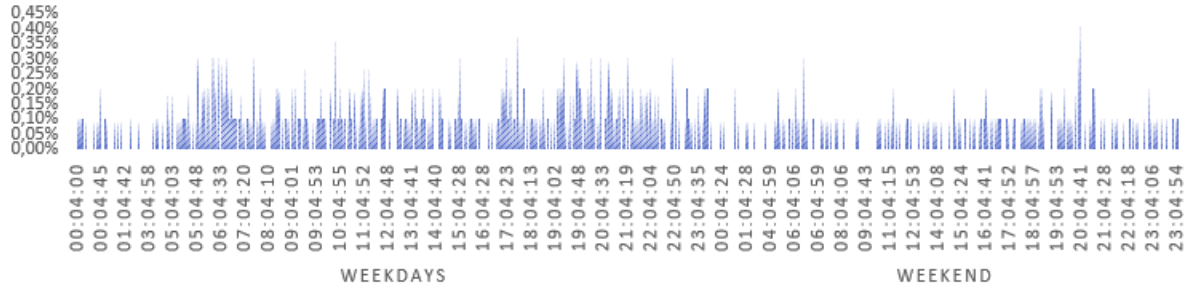


Figure 8. Driver's smoking alarm graph

4.2 Accident Data

According to the analysis of the accident data for April 2023, the number of accidents that occurred can be categorized based on the type of crash. The data shows in Figure 7 that 84 crashes occurred due to crashing into each other within public buses, 265 crashes occurred due to crashing into another vehicle, and 14 crashes occurred due to damage by attack. In addition, 6 accidents occurred due to falling passengers, 5 due to collisions with pedestrians, and 5 due to hitting other vehicles. 3 accidents caused damage to passengers and 13 accidents where the vehicle went off the road. It is important to note that these numbers represent a snapshot of accident data for a single month and that the causes of accidents can vary widely. However, analyzing this data can help identify patterns and potential areas for improvement in road safety.

Table 3. Accident types

Accident Types	Total
Crashing into each other (within public buses)	84
Crashing into vehicle	265
Damage by attack	14
Falling passenger	6
Other vehicles hit us	5
Passenger damage	3
Pedestrian collision	5
Vehicle off the road	13
Grand Total	395

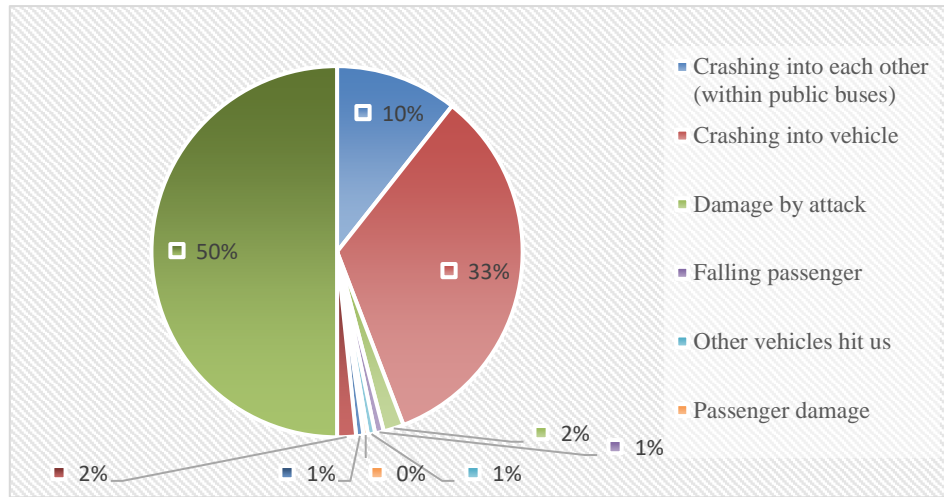


Figure 9. Accident types percentages

When the accident status in Figure 10 is analyzed according to accident types, 0 indicates no accident and 1 indicates an accident. This approach allows us to comprehensively examine the relationship between different types of accidents and their accident situations. Thanks to the assignment of these binary values, it is possible to evaluate the frequency and characteristics of accidents that occur in each type of alarm.

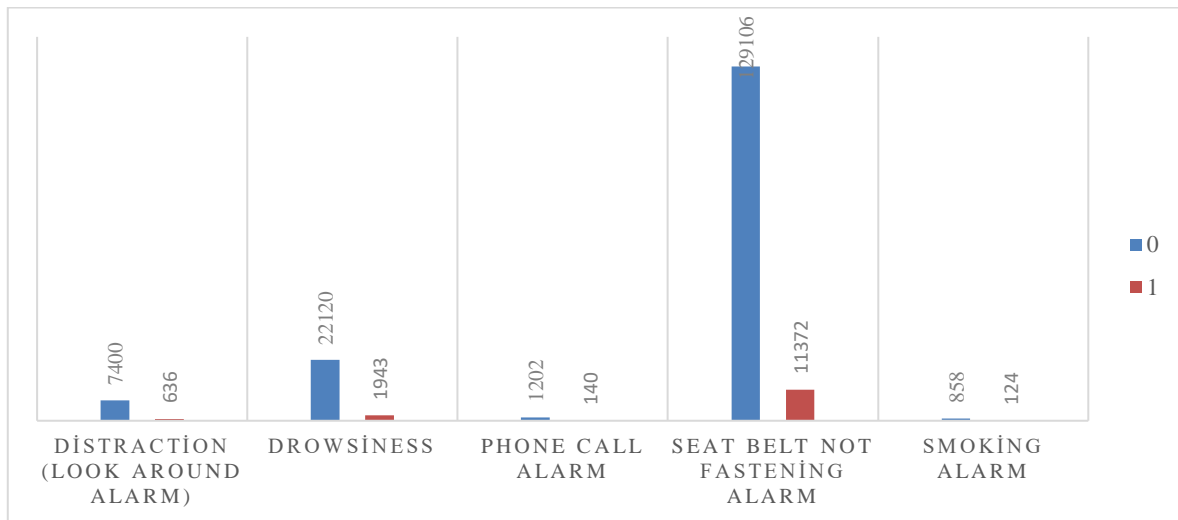


Figure 10. Accident status by accident types, 0 - there is no accident, 1- there is an accident

5. Estimating Accident Probability of Alarm Types with Binomial Logistic Regression Analysis

In an article reviewed, a binomial logistic regression model was used to examine the effect of independent variables such as drivers' sleepiness and fatigue level on rule violations. In this article, the following are mentioned about the reasons for using the binomial logistic regression model (Mahajan et al., 2019).

The nature of the dependent variable: The research analyzes a categorical dependent variable such as violations. Binomial logistic regression is a frequently preferred method for the analysis of such dependent variables. This model is used when the dependent variable is divided into two categories (violation or no violation).

Estimation of the effect of independent variables: Logistic regression is used to estimate the effect of independent variables on the dependent variable. In this article, it is desired to determine the effect of independent variables such as drivers' sleepiness and fatigue level on rule violations. The binomial

logistic regression model is a suitable option for estimating these effects quantitatively and obtaining statistically significant results.

Our study aims to examine the relationship between driver alarm data and accidents using data collected by IETT. This analysis can help us understand the impact of driver distraction measures on accident rates and can guide the development of traffic safety policies. In this study, binomial logistic regression analysis was used on the dependent variable 'Accident Status' column. Binomial logistic regression is a statistical analysis method used in binary classification problems. Binomial logistic regression is a statistical analysis method used when the dependent variable is binary. This method evaluates the influence of independent variables to estimate the probability of the dependent variable.

In this model, the dependent variable named "Accident Status" has two values: 0 and 1. These values represent whether there has been an accident. Binomial logistic regression uses an argument called "Alarm Type" to predict this accident situation.

In Table 4., the "Model Fit Measures" section of the model has some criteria that evaluate the fit of the model. These:

Deviance: A statistical measure by which the fit of the model is measured.

AIC (Akaike Information Criterion): An information criterion that takes into account the fit and complexity of the model.

R²: A measure of the explanatory power of the model.

McF: Another statistical measure that evaluates the fit of the model.

The "Model Specific Results" section contains model-specific results. This section displays the estimated coefficients and other statistical information for the dependent variable "Accident Status". The estimated coefficient (Estimate), standard error (SE), Z statistic, and p value of each independent variable are indicated. Estimated coefficients represent log ratios between status "Accident Status = 1" and status "Accident Status = 0".

Table 4. Binomial logistic regression by accident types

Predictor	Estimate	SE	Z	p
Intercept	-4.002	0.00946	-422.87	<.001
Alarm Type:				
Distraction (Look Around Alarm) – Seat Belt Not Fastening Alarm	-0.365	0.04101	-8.89	<.001
Drowsiness – Seat Belt Not Fastening Alarm	0.104	0.02479	4.20	<.001
Phone Call Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm	0.352	0.08613	4.09	<.001
Smoking Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm	0.201	0.09129	2.20	0.028

If explained through an example calculation. For example, when we want to predict "Alarm Type: Distraction (Look Around Alarm) – Seat Belt Not Fastening Alarm". In this case, the corresponding estimated coefficient is used to determine how the relevant alarm type affects the probability of the dependent variable "Accident Status". The estimated coefficients are represented as log odds (logistic regression coefficients).

In the example, the estimated coefficient for the alarm type "Distraction (Look Around Alarm) – Seat Belt Not Fastening Alarm" is given as -0.365. This coefficient affects the log odds value of the dependent variable "Accident Status" of the relevant alarm type. The log odds value represents the probability of an accident. To make an estimate, the log odds value is calculated using the corresponding estimated coefficient for a given "Alarm Type" value. Next, the logistic function is used to convert the log odds value to probability. The logistic function converts log odds to a probability value in the range [0, 1].

Distraction (Look Around Alarm) – Seat Belt Not Fastening Alarm:

Estimated coefficient: -0.365

Log Odds = Intercept + Alarm Type (Coefficients) = -4.002 + (-0.365) = -4.367

Accident probability: $P(\text{Accident Status} = 1 \mid \text{Alarm Type} = \text{Distraction}) = 1 / (1 + \exp(-\text{Log Odds})) = 1 / (1 + \exp(-(-4.367))) = 1 / (1 + 0.012) \approx 0.988$

Drowsiness – Seat Belt Not Fastening Alarm:

Estimated coefficient: 0.104

Log Odds = Intercept + Alarm Type (Coefficients) = -4.002 + 0.104 = -3.898

Accident probability: $P(\text{Accident Status} = 1 \mid \text{Alarm Type} = \text{Drowsiness}) = 1 / (1 + \exp(-\text{Log Odds})) = 1 / (1 + \exp(-(-3.898))) = 1 / (1 + 0.020) \approx 0.980$

Phone Call Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm:

Estimated coefficient: 0.352

Log Odds = Intercept + Alarm Type (Coefficients) = -4.002 + 0.352 = -3.650

Accident probability: $P(\text{Accident Status} = 1 \mid \text{Alarm Type} = \text{Phone Call}) = 1 / (1 + \exp(-\text{Log Odds})) = 1 / (1 + \exp(-(-3.650))) = 1 / (1 + 0.025) \approx 0.976$

Smoking Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm:

Estimated coefficient: 0.201

Log Odds = Intercept + Alarm Type (Coefficients) = -4.002 + 0.201 = -3.801

Accident probability: $P(\text{Accident Status} = 1 \mid \text{Alarm Type} = \text{Smoking}) = 1 / (1 + \exp(-\text{Log Odds})) = 1 / (1 + \exp(-(-3.801))) = 1 / (1 + 0.022) \approx 0.977$

Accident probabilities have been estimated under the following alarm types:

Distraction (Look Around Alarm) – Seat Belt Not Fastening Alarm: Estimated accident probability is approximately 98.8%.

Drowsiness – Seat Belt Not Fastening Alarm: The estimated probability of an accident is approximately 98.0%.

Phone Call Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm: Estimated accident probability is approximately 97.6%.

Smoking Alarm – Seat Belt Not Fastening Alarm: The estimated probability of an accident is approximately 97.7%.

According to these results, drivers with the "Distraction (Look Around Alarm)" alarm type have the highest accident probability (98.8%), while drivers with the "Phone Call Alarm" alarm type have the lowest accident probability (97.6%). It is seen from these probability results that all of them can increase the risk of accidents.

These results show the impact of different alarm types on the probability of an accident in the absence of seat belts. According to estimates, distractions, drowsiness, phone calls, or smoking, along with not using a seat belt, significantly increase the risk of an accident. The presence of these alarm types can cause drivers to distract themselves from the road or drive while drowsy. This increases the probability of causing an accident. These estimates are important for understanding the relationship between alarm types and seat belt use, and for encouraging drivers to avoid such risky behavior. These data can be used to improve traffic safety measures and prevent accidents.

6. Conclusion

In conclusion, ensuring the safety of drivers and passengers on the road is a critical issue, and the transportation industry has focused on improving driving behavior through the use of technology and

interventions aimed at reducing the risk of accidents. The Istanbul Metropolitan Municipality Istanbul Electricity Tram and Tunnel Operations General Directorate (IETT) is a leading public transportation government service that provides various services, including buses. As with any public transportation service, IETT must prioritize the safety of its passengers and employees. Therefore, it is crucial to understand the driving behavior of bus drivers and identify any violations that may impact the safety of the passengers and the general public. IETT has implemented various technological systems, including telemetry system devices and in-vehicle camera systems, to analyze driving safety and driver performance. The data obtained from GPS and telemetry systems installed in buses and driver behavior cameras can provide valuable insights into bus routes, travel times, passenger and driver behavior, and bus performance. By analyzing this data, IETT can optimize bus maintenance schedules, reduce fuel costs, and improve overall efficiency and effectiveness.

The institution provides services with approximately 14,000 driver personnel. Initially, the driver personnel were uncomfortable with the inspections carried out with the driver behavior analysis camera, which was put into operation with the project. However, with the support of the passengers, the institution convinced the driver personnel by explaining on every platform that the project aimed to increase the safety of both passengers and driver personnel. The personnel involved in the project gained significant experience on the subject, and the institution's reputation has increased, and public support has been obtained.

In conclusion, IETT has implemented various technological systems to analyze driving behavior and ensure the safety of its passengers and employees. By analyzing the data obtained from these systems, IETT can optimize its operations, reduce costs, and increase customer satisfaction. Furthermore, analyzing driver behavior data can help IETT identify areas where driver behavior can be improved, reduce the risk of accidents, and improve overall safety on the road. With a population of approximately 16 million people in Istanbul, the systems that operate within the city have the potential to be integrated into many countries and cities. This means that the systems in place in Istanbul can serve as a model for other places to follow, due to the large and diverse population and the range of needs and challenges that come with it.

The findings of this study highlight significant patterns and trends in driver behavior, providing actionable insights for improving public transportation safety. One key takeaway is the critical role of integrating real-time monitoring systems to address high-risk behaviors such as seat belt violations, fatigue, and distractions. By identifying these behaviors promptly, transportation agencies can implement corrective measures that not only reduce accident rates but also enhance operational efficiency and public trust. Furthermore, the correlation between specific operator practices and violation rates underscores the importance of tailored training programs and stricter compliance monitoring.

Looking ahead, the data-driven approach adopted in this research lays the groundwork for developing predictive safety models capable of preempting potential incidents. These models, coupled with AI-powered intervention systems, can revolutionize public transportation by enabling adaptive scheduling, personalized driver feedback, and predictive maintenance of vehicles. Beyond safety improvements, these innovations have the potential to lower operational costs, reduce environmental impact through optimized routes, and improve passenger experiences, fostering a more sustainable urban transportation system. As global cities face increasing mobility challenges, the methodologies and technologies explored in this study can serve as a scalable blueprint for enhancing urban transit systems worldwide.

Future directions for improving driving safety in public transportation could include the integration of real-time data analytics and predictive modeling. By using real-time data, transportation agencies can identify safety risks and take proactive measures to prevent accidents and incidents. This could involve the use of sensors and other connected devices that can gather data on vehicle performance, road conditions, and traffic patterns in real-time. Also the development of more sophisticated machine learning algorithms that can analyze complex data sets, such as video footage from cameras mounted on buses or other vehicles. By analyzing this data, transportation agencies could identify patterns of driver behavior that may indicate a risk of accidents or other safety incidents. Furthermore, the use of artificial intelligence could also help improve driving safety in public transportation. AI-powered

systems could be used to monitor driver behavior in real-time, alerting drivers when they are exhibiting unsafe behaviors or taking corrective action when necessary. Additionally, AI could be used to optimize routes and schedules to minimize the risk of accidents and reduce the potential for congestion and delays.

Researchers' Contribution Statement

In the author's colophon, the researchers' contribution rates are indicated.

Conflict of Interest Statement, if any

The authors certify that they have NO affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent-licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs) in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

Acknowledgment and/or disclaimers, if any

There is no institution or organization to thank.

References

- Adhikari, B.** (2023). Using Visual and Vehicular Sensors for Driver Behavior Analysis: A Survey. *arXiv preprint arXiv:2308.13406*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2308.13406>
- Ahmed, S., Uddin, M. S., Feroz, S. I., Alam, M. R. B., Farabi, F. A., Uddin, M. M., & Rifaat, S. M.** (2023, January). The tendency of intra-city bus drivers to use a cell phone while driving using ordered probit model. *Int AIP Conference Proceedings* (Vol. 2643, No. 1, p. 030007). AIP Publishing LLC.
- Caird, J. K., Willness, C. R., Steel, P., & Scialfa, C.** (2008). A meta-analysis of the effects of cell phones on driver performance. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1282-1293.
- D'souza, K. A., & Maheshwari, S. K.** (2015). A methodological approach for studying public bus transit driver distraction. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 10(2), 229-244.
- De Waard, D., & Brookhuis, K. A.** (1996). The measurement of drivers' mental workload.
- Donmez, B., Boyle, L. N., Lee, J. D., & McGehee, D. V.** (2006). Drivers' attitudes toward imperfect distraction mitigation strategies. *Transportation research part F: traffic psychology and behavior*, 9(6), 387-398.
- El hafidy, A., Rachad, T., Idri, A., & Zellou, A.** (2021). Gamified Mobile Applications for Improving Driving Behavior: A Systematic Mapping Study. *Mobile Information Systems*, 2021, 1-24.
- Farah, H., Polus, A., Bekhor, S., & Toledo, T.** (2007). Study of passing gap acceptance behavior using a driving simulator. *Advances in Transportation Studies an International Journal*, 9-16.
- Hamarat, B., & Duran, S.** (2020). Factors Influencing Aggressive Driving Behaviors: A Case Study from Çanakkale Province. *Journal of Awareness*, 5(4), 503-514. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1390557>
- Hansen, J. H., Busso, C., Zheng, Y., & Sathyanarayana, A.** (2017). Driver modeling for detection and assessment of driver distraction: Examples from the UTDriVe test bed. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(4), 130-142.
- Helvaci, S., Senova, A., Kar, G., & Gören, S.** (2018). Improving driver behavior using gamification. In *Mobile Web and Intelligent Information Systems: 15th International Conference, MobiWIS 2018, Barcelona, Spain, August 6-8, 2018, Proceedings 15* (pp. 193-204). Springer International Publishing.

- Horrey, W. J., & Wickens, C. D.** (2006). Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques. *Human factors*, 48(1), 196-205.
- Ishigami, Y., & Klein, R. M.** (2009). Is a hands-free phone safer than a handheld phone? *Journal of safety research*, 40(2), 157-164.
- Kaptein, N. A., Theeuwes, J., & Van Der Horst, R.** (1996). Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation research record*, 1550(1), 30-36.
- Khosravinia, P., Perumal, T., & Zarrin, J.** (2023). Enhancing Road Safety through Accurate Detection of Hazardous Driving Behaviors with Graph Convolutional Recurrent Networks. *arXiv preprint arXiv:2305.05670*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2305.05670>
- Li, N., Jain, J. J., & Busso, C.** (2013). Modeling of driver behavior in real-world scenarios using multiple noninvasive sensors. *IEEE transactions on multimedia*, 15(5), 1213-1225.
- Liang, Y., Reyes, M. L., & Lee, J. D.** (2007). Real-time detection of driver cognitive distraction using support vector machines. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 8(2), 340-350.
- Liu, Y., & Hansen, J.** (2019). Analysis of Driving Performance Based on Driver Experience and Vehicle Familiarity. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 7(2), 175-190.
- Mahajan, K., Velaga, N. R., Kumar, A., & Choudhary, P.** (2019). Effects of driver sleepiness and fatigue on violations among truck drivers in India. *International journal of injury control and safety promotion*, 26(4), 412-422.
- Masello, L., Castignani, G., Sheehan, B., Guillén, M., & Murphy, F.** (2023). Using contextual data to predict risky driving events: A novel methodology from explainable artificial intelligence. *Accident Analysis & Prevention*, 184, 106997.
- Nilsson, H., Mullaart, M., Strand, N., & Eriksson, A.** (2021). The effects of information relevancy on driving behavior: A simulator study on professional bus drivers. *Cognition, Technology & Work*, 23, 429-437.
- Paas, F. G., & Van Merriënboer, J. J.** (1993). The efficiency of instructional conditions: An approach to combine mental effort and performance measures. *Human factors*, 35(4), 737-743.
- Papantoniou, P., Antoniou, C., Pavlou, D., Papadimitriou, E., Yannis, G., & Golias, J.** (2017). Exploratory analysis of the effect of distraction on driving behavior through a driving simulator experiment. *International Journal Transportation*, 5, 35-46.
- Porwik, P., Orczyk, T., & Doroz, R.** (2022, December). A Stable Method for Detecting Driver Maneuvers Using a Rule Classifier. In *Intelligent Information and Database Systems: 14th Asian Conference, ACIIDS 2022, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 28–30, 2022, Proceedings, Part I* (pp. 156-165). Cham: Springer International Publishing.
- Rakauskas, M. E., Gugerty, L. J., & Ward, N. J.** (2004). Effects of naturalistic cell phone conversations on driving performance. *Journal of safety research*, 35(4), 453-464.
- Sathyanarayana, A., Boyraz, P., & Hansen, J. H.** (2014). Effects of multitasking on drivability through can-bus analysis. *Smart Mobile In-Vehicle Systems: Next Generation Advancements*, 169-182.
- Shaaban, K., Gaweesh, S., & Ahmed, M. M.** (2018). Characteristics and mitigation strategies for cell phone use while driving among young drivers in Qatar. *Journal of Transport & Health*, 8, 6-14.
- Strayer, D. L., Drews, F. A., & Johnston, W. A.** (2003). Cell phone-induced failures of visual attention during simulated driving. *Journal of experimental psychology: Applied*, 9(1), 23.
- Terzi, R.** (2019). Big Data-Based Driver Behavior and Driving Models for Fleet and Public Transportation Vehicles (Doctoral dissertation). Gazi University, Institute of Science. Retrieved from <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/c1fbcddb-ec43-4e56-aa1b-0602eecffef/>

Trafik Hizmetleri Başkanlığı. (n.d.). The Role of Driver Behaviors in Accident Risk: Violations, Errors, and Inattentiveness. *Trafik Hizmetleri Başkanlığı Publications*. Retrieved from <https://www.trafik.gov.tr/>

Verwey, W. B. (2000). On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures. *Ergonomics*, 43(2), 187-209.

Wang, L., Wang, Y., Shi, L., & Xu, H. (2022). Analysis of risky driving behaviors among bus drivers in China: The role of enterprise management, external environment and attitudes towards traffic safety. *Accident Analysis & Prevention*, 168, 106589.

Araştırma Makalesi

Elektrikli araç şarj istasyonlarının optimum yerleşimine yönelik coğrafi analiz araçlarının geliştirilmesi

Arif Çağdaş Aydınoglu^{1,2*}, Tansu Çetin², Abdullah Uğur Topal², Süleyman Şişman¹

¹ Harita Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

² Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

*Correspondence: aydinoglu@gtu.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1525522

Özet: Elektrikli araçlar, iklim değişikliği ile mücadele, sıfır emisyon hedeflerine ulaşma, sürdürülebilir ulaşım ve enerji verimliliği gibi küresel konulara çevre dostu bir çözüm olarak görülmektedir. Gelişen üretim teknolojileri ve genişleyen satış pazarıyla elektrikli araçların yaygınlaşması beraberinde şarj ekosistemi kavramını getirmiştir. Sunulan bu çalışma, elektrikli araç şarj istasyonlarının uygun yerlere konumlandırılması için coğrafi analiz araçlarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Şarj istasyonları yer seçiminde kritik rol oynayan kentsel parametrelerden çevresel, enerji, kentsel tesisler, sosyoekonomik özellikler ve ulaşım ana kriterler olmak üzere 32 kriter belirlenmiştir. Karmaşık coğrafi verilerin analiz edilmesini kolaylaştırmak ve karar verme sürecinde daha etkili bir yaklaşım benimsemek amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri bir arada kullanılmıştır. Kriterlerin önem sıralaması 20 uzman karar vericiye uygulanan ankete göre yapılmış ve en iyi-en kötü yöntemi kullanılarak ağırlıkları hesaplanmıştır. Pendik ve Tuzla ilçeleri çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Model geliştirme ortamında 8 adet analitik araç geliştirilmiş, bunlar çeşitli coğrafi veri analiz tekniklerini içermekte ve yer seçimi için uygunluk haritalarının üretilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, farklı çalışma gruplarına uygulanan değerlendirme endeksi sistemi sonuçlarına göre öncelikleri belirlenen kriterler ve geliştirilen analiz araçları, elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi sürecinde karar vericilere ve politika yapıcılara geniş bir bakış açısı sunarak sürecin kapsamlı ve bilimsel bir yaklaşımla yönetilmesini kolaylaştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi bilgi sistemi, çok kriterli karar verme, elektrikli araç şarj istasyonu, en iyi-en kötü yöntemi, yer seçimi

Development of geographic analysis tools for optimal placement of electric vehicle charging stations

Abstract: Electric vehicles are seen as an environmentally friendly solution to global issues such as climate change, zero-emission targets, sustainable transportation, and energy efficiency. Their proliferation, driven by evolving production technologies and expanding sales markets, has introduced charging ecosystem concept. This study develops geographic analysis tools for optimal siting of electric vehicle charging stations. 32 criteria were identified, comprising environmental, energy, urban facilities, socioeconomic characteristics, and transportation as main criteria influencing location selection of charging stations. To facilitate analysis of complex geographic data and adopt a more effective approach in decision-making process, Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision Making techniques were combined. Criteria prioritization was based on a survey of 20 expert decision-makers, with weights calculated using best-worst method. Pendik and Tuzla districts were selected as study area. 8 analytical tools were developed using GIS model development platform; they encompass various geographic data analysis techniques and enable generation of suitability maps for location selection. Ultimately, this study facilitates comprehensive and scientifically managed decision-making process for selection of electric vehicle charging station locations by providing decision-makers and policymakers with a broad perspective based on results of evaluation index systems and developed analysis tools.

Keywords: Best-worst method, electric vehicle charging station, geographic information system, multi-criteria decision making, site selection

1. Giriş

Günümüzde artan şehirleşme ve nüfus yoğunluğu sebebiyle ortaya çıkan dünya enerji krizi ve yükselen küresel ısınma bilinci şehirlerin mevcuttaki ulaşım planında ve çevresel düzeninde değişikliği zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, şehirlerin sürdürülebilir kentsel ulaşım stratejileri, enerji verimliliği ve çevre dostu altyapılar gibi konulara odaklanması gerekmektedir. Çevresel etkileri azaltmak ve yaşanabilir kentler inşa etmek amacıyla toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesi, bisiklet ve yaya yollarının genişletilmesi, araç paylaşımı modellerinin teşvik edilmesi gibi önlemlerin yanı sıra elektrikli araçların üretimi ve yaygınlaştırılması çevreye duyarlı projelerin başında gelmektedir.

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motora sahip türdeşlerinin aksine petrol ve türevi yakıtlara ihtiyaç duymazken; araçlarda bulunan lityum iyon ve benzeri pillerden oluşan setler sayesinde elektrik motoruna güç aktararak aracın sessiz şekilde çalıştırılması sağlanmaktadır. Bu anlamda elektrikli araçlar giderek artan motor güçlerine rağmen hava ve gürültü kirliliğine karşı doğa dostu profil sergilemektedir (Url-1).

Küresel araç pazarında elektrikli araç satışlarının gittikçe daha büyük paya sahip olduğu ve 2023 yılı raporlarına göre ilk 6 ay içerisinde %40 artışla toplam 6 milyon yeni araç sahiplerine teslim edildiği bilinmektedir (Irle, 2023). Bir başka pazar araştırması sonucuna göre elektrikli araç pazarının 2020'den 2027'ye kadar %33,6'lık bir bileşik büyüme oranıyla 2495,4 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Meticulous Market Research, 2022). 2050 net sıfır emisyon senaryoları dahilinde içten yanmalı motorlu araç satışının 2035 yılında durdurulması ve elektrikli araçların toplam pazar payının 2050 yılında %60 olması hedeflenmektedir (IEA, 2022). Ülkemizde ise 2022 yılında elektrikli araç sayısının da bir önceki yıla göre %132,2'lik bir artışla 14 bin 552'ye yükselirken, hibrit araçların sayısı da bir önceki yıla göre %55,3'lük bir artışla yaklaşık 135 bine ulaştığı raporlanmıştır (TÜİK, 2024).

Elektrikli araçların üretiminde, yeniden doldurulabilir bataryalar tercih edilmektedir. Bu sayede sürücüler, şarj istasyonları vasıtasıyla planladıkları seyahati mümkün kılacak enerjinin araçlarına oldukça kısa sürede aktarılmasını sağlayabilmektedir. Ancak, elektrikli araçların kullanımı adına yeterli şarj altyapısının olmaması, yüksek maliyetler, menzil endişeleri ve hala geleneksel içten yanmalı araçlara kıyasla daha az çeşitlilikte model bulunması gibi çeşitli zorluklar ve engeller bulunmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için devletlerin teşvik politikaları, şarj altyapısının genişletilmesi, mali destekler ve teknolojik gelişmeler gibi çeşitli önlemler alması gerekmektedir.

Elektrikli araçların yaygınlaşması, Avrupa'nın öncülük ettiği karbon salınım azaltma hedefini güvence altına almaktadır. Bu kapsamda gelişmiş ülkelerde 5, 10 ve 20 yıllık kalkınma planları dahilinde içten yanmalı motorlu araçların dönüşümlerinin tamamlanması için özel elektrikli araç şirketleriyle çalışmalar yapılmakta ve elektrikli araç üretici şirketler yeni marka ve modellerini otomotiv sektörüne sunmak üzere çalışmalarını sürdürmektedir (EU, 2020).

Elektrikli araçların yaygınlaşması, araç üretim teknolojilerinin iyileştirilmesi ve satış pazarının geliştirilmesiyle mümkün olduğu gibi en önemli rolün elektrikli araçların şarj ekosistemi teknolojileri olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Kapsamı; elektrik enerjisi üreticilerinden son kullanıcı elektrikli araç sahiplerine, elektrik şebekesi altyapısından Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarına (EAŞİ) uzanan şarj ekosisteminde yüksek verimli şarj istasyonlarının sayısının artması ve kolay erişilebilir olması, hızlı şarj istasyonlarının tasarlanıp kurulması başlıca ihtiyaçlardandır. Bu bağlamda elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesi için şarj istasyonlarının uygun kapasitede ve konumda yerleşimi son derece önemlidir.

Daha planlı, sürdürülebilir ve yaşanabilir şehirler için şehir yöneticileri, politikacılar ve karar vericiler, EAŞİ optimum yerleşimi stratejisi belirlerken ihmali mümkün olmayan; elektrikli araç sürücülerinin araç bataryası şarjının bitmesi, sürüş menzili ve coğrafi koşullar sebebiyle şarj istasyonlarına sınırlı erişim ile ilgili endişeleri dolayısıyla elektrikli araç satın alma sayısındaki azalma ihtimali, elektrik şebekesinin mevcut yükünde oluşacak mevsimsel talep değişkenliği, şebekede enerji arz güvenliği ve güç kalitesi problemlerini değerlendirerek ve nüfus, arazi yapısı, ulaşım ve erişilebilirlik gibi tüm kentsel parametreleri dikkate alarak bütüncül bir coğrafi bakış açısı ile karar vermelidir. Böylece elektrik şebekesinde alınacak önlemler, maliyet etkin kurulum metodolojileri ve uygun yatırım kararları değerlendirilebilecektir. Bu kapsamda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri kullanılarak EAŞİ için en uygun yer analizinin yapılması literatürde sunulan

metodolojilerden biridir. CBS konumsal verileri yakalamak, depolamak, analiz etmek ve görüntülemek için kullanılan bir bilgisayar sistemini ifade ederken; yer seçim analizlerinde kullanılan en önemli yaklaşımlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle konumsal verileri işleme ve analiz etme yeteneği ile EAŞİ yer seçiminde coğrafi faktörlerin dikkate alınmasını sağlarken; bu faktörleri haritalandırarak görsel olarak inceleme ve analiz etme imkanı sunar. ÇKKV tekniklerinin ise yer seçimi için önem derecesi birbirinden farklı olan kriterleri sıralamak ve karar sürecini rasyonel bir hale getirmek için kullanıldığı bilinmektedir. ÇKKV analizi kullanılarak CBS tabanlı yöntemin çalıştırılmasıyla EAŞİ gibi yer seçimi problemlerinde coğrafi kriterleri ve bunların ağırlıklarını dikkate alarak işlem yapma imkanı sağlayarak daha optimum ve bilimsel bir yaklaşım sunulmaktadır (Topal, Sisman ve Aydınoglu, 2023).

İstanbul gibi büyük bir metropol şehir için Elektrikli Taksi Şarj İstasyonu (ETŞİ) konum seçimi problemini ele alan bir çalışmada (Kaya, Alemdar ve Çodur, 2020), 6 ana kriter grubu ve 25 alt kriter belirlenmiş ve bunlar Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (fuzzyAHP) ile ağırlıklandırılmıştır. Kriterlerin konumsal analizi coğrafi bilgi sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve belirlenen istasyonların önceliği performans değerlerine göre Benzerlik İdeal Çözüme Göre Sıralama Tekniği (TOPSIS) kullanılarak sıralanmıştır. Önerilen metodolojiyle, İstanbul'da Avrupa yakasının güneydoğu ve Anadolu yakasının güneybatı kısmının ETŞİ için daha uygun olduğu görülmüş ve bu çözümün yüksek belirsizlik derecesi olan problemler için daha doğru olduğu sunulmuştur.

Etkili karar verme için CBS tabanlı yer seçimi modellerinin tasarlanması amacıyla EAŞİ yer seçimi uygulamasını akıllı şehir konseptinde yatırım planlaması sürecinde vaka çalışması olarak belirleyen bir çalışmada (Sisman, Ergul ve Aydınoglu, 2021) çevresel/coğrafi, ekonomik ve kentsellik olmak üzere 3 ana kriter grubu tarafından 15 kriter belirlenmiş, bu kriterlerin ağırlıkları ÇKKV teknikleriyle elde edilmiş ve bir model tasarlanmıştır. Bu model İstanbul'un Pendik ilçesindeki EAŞİ uygunluk haritasını analiz etmek için uygulanmış ve ilgili modellerin iyileştirilerek akıllı şehir yatırımlarında kentsel kaynakların etkileyici ve verimli kullanımı için entegre ve planlı bir yatırım mekanizmasının geliştirilebileceği vurgulanmıştır.

ÇKKV metotları ile EAŞİ'lerin optimum konumlandırılması üzerine Balıkesir Üniversitesi Çağış Yerleşkesinde bulunan araç ve kullanıcı verileri ile gerçekleştirilen çalışmada (Asnaz ve Özdemir, 2021) ilk olarak araç giriş-çıkış verileri ve sürücülerin kullanım alışkanlıklarına dair anket sonuçları kullanılarak Kuyruk Teorisi (QT) ile kampüsteki otoparklara kurulması planlanan EAŞİ'lerin toplam sayısı tespit edilmiştir. Ardından kampüs içindeki otoparklar, şarj istasyonlarının yerleştirileceği alanlar olarak belirlenmiş ve otoparklara dağılım için otopark doluluk oranları, otopark kapasiteleri, trafo merkezine uzaklık gibi kriterler ÇKKV metotlarıyla çözümlenmiştir. Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (FAHP) kullanılarak kriterler önceliklerine göre sıralanmış ve tüm alternatif konumlar Tercih Sıralama Organizasyon Metodu (PROMETHEE) ve Basit Çok Kriterli Değerlendirme Tekniği (SMART) yöntemleri ile sıralanarak karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.

EAŞİ için en sürdürülebilir yerin seçilmesinde karar vericilerin öznel değerlendirmelerinden elde edilen çelişkili kriterlerin dikkate alınmasının önemi üzerine Pekin'in Changping bölgesinde yapılan bir çalışma (Guo ve Zhao, 2015) toplam 11 alt kriterle ilişkilendirilen çevresel, ekonomik ve sosyal kriterlerden oluşmaktadır. Burada çeşitli alternatiflerin kriter performansları ve kriter ağırlıkları, çevre, ekonomi, toplum, elektrik enerji sistemi ve ulaşım sistemleri alanlarından 5 uzman panel tarafından değerlendirilmiş ve Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak EAŞİ için yer alternatifleri sıralanmıştır. Karar vericilerin ekonomik kriterlerden daha çok çevresel ve sosyal kriterlere önem verdiği belirlenirken öznel değerlendirmelerinden kaynaklanan belirsizlik anlamlı olarak değerlendirilmiştir.

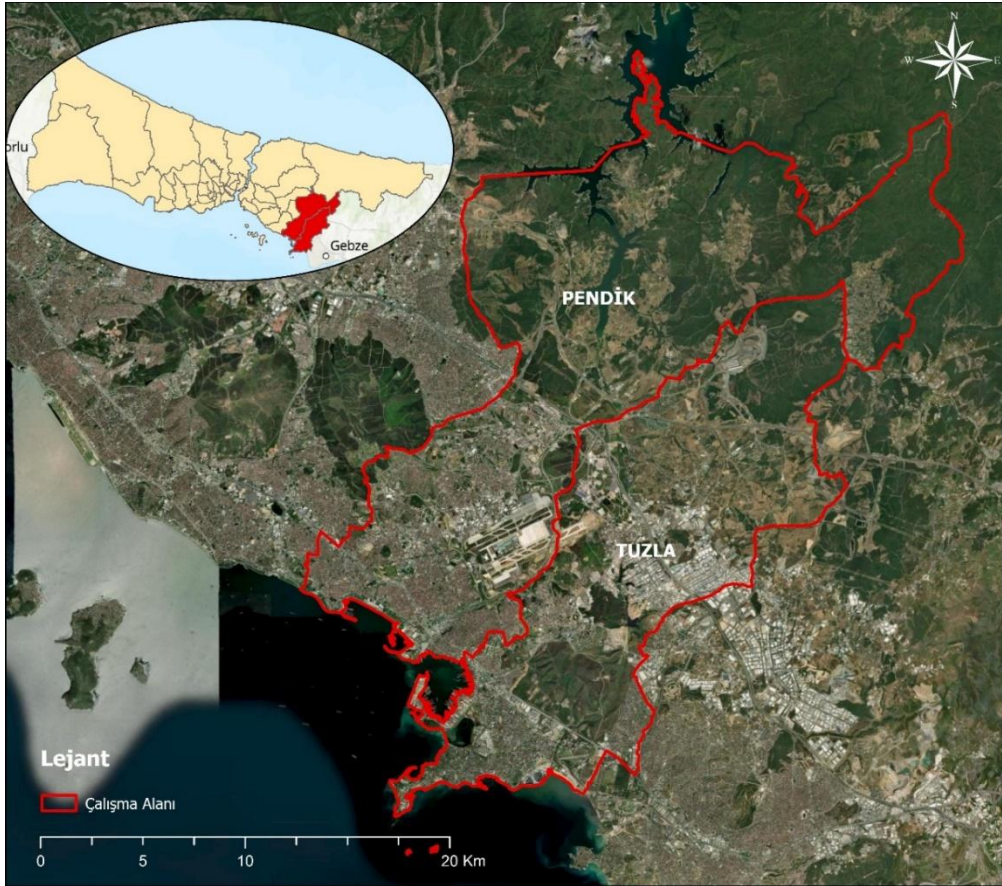
Özetle, CBS ile farklı ÇKKV yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir dizi çalışma literatürde bulunmaktadır. Bu çalışma ile EAŞİ'lerin optimum konumlarının seçimi için güvenilir bir coğrafi analiz aracı oluşturmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda İstanbul ili Pendik ve Tuzla ilçeleri pilot bölge olmak üzere akademik literatürden, fizibilite araştırma raporlarından ve farklı alanlardaki uzman görüşlerinden yararlanarak Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler, Ulaşım olmak üzere 5 ana kriter grubunda tanımlanan 32 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin birbirine göre tercih oranları/öncelikleri karar verici 20 kişiye uygulanan değerlendirme endeksi sistemi (anket) ile belirlenmiş ve BWM (best-worst method) yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Kriterlere ait veriler,

CBS platformunda yakınlık ve enterpolasyon gibi konumsal analizlerle işlenmiştir. Her bir kriter için oluşturulan analiz sonuçları birleştirilerek, EAŞİ yer seçimi için CBS tabanlı final uygunluk haritası çıkarılmıştır. Bu çalışma, sürdürülebilir kentsel ulaşım hedeflerine ulaşmada önemli bir yol haritası olurken EAŞİ'ler için hem kapasite hem de konumlandırma ile ilgili optimum kurulum metodolojilerini tanımlayan gelecekteki çok aşamalı çalışmalar adına motivasyon oluşturmaktadır.

Materyal ve metot

1.1. Çalışma alanının belirlenmesi ve verilerin temini

Hava, kara, deniz ve demir yolu ulaşım modlarını bir arada bulandıran hem kentsel yoğunluğa hem de kırsal unsurlara sahip olması sebebiyle Türkiye'de birçok yönüyle model olabilecek İstanbul iline bağlı Pendik ve Tuzla ilçeleri, çalışma alanı olarak belirlenmiştir ve Şekil 1'de gösterilmiştir. TÜİK tarafından açıklanan verilere göre, bu alanların toplam yüzölçümü 315 km²'dir ve nüfusu yaklaşık olarak 1 milyon kişidir. Bu bakımdan da birçok Avrupa şehrine denk büyüklükte ve yoğunlukta kentsel bir alan oluşturduğu söylenebilir.



Şekil 1. Çalışma alanı: İstanbul ili Pendik ve Tuzla ilçeleri.

EAŞİ'lerin optimum yer seçimi için literatürde geçen tüm kriterler irdelenmiş ve bu ilçeler ölçeğinde elde edilebilir verilere sahip kriterler seçilmiştir. Çevresel, enerji, kentsel tesisler, sosyoekonomik özellikler ve ulaşım olmak üzere 5 ana kriter çatısı altında 32 kriter tanımlanmıştır. Belirlenen kriterlere ait, yaklaşık son yılın verileri olduğu teyit edilerek veri sağlayıcılar tarafından servislerde sunulmuş mevcut ve güncel veri setleri toplanmış ve tek bir veri tabanında organize edilmiştir. Yol ağı, kavşaklar ve trafo merkezleri için OpenStreetMap (OSM, 2024) kaynağı kullanılmıştır. Ormanlar, yerleşim yerleri, su kaynakları ve yeşil alanlarla ilgili veriler ise Urban Atlas (UrbanAtlas, 2024) tarafından

sağlanmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verileri, AlosPalsar platformu (AlosPalsar, 2024) üzerinden elde edilmiştir. İlçelere ait sağlık kuruluşları, kültürel tesisler, akaryakıt (benzin) istasyonları, taksi durakları, otopark gibi veriler için İstanbul Büyükşehir Belediyesi Açık Veri Portalı (İBB, 2024) kullanılmıştır. Ayrıca bu portaldan elde edilen trafik verileri ile trafik hacmi verisi hesaplanmıştır. İlçe ve mahalle nüfusu, hane geliri, ulaşım harcamaları gibi veriler Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK, 2024) temin edilmiştir. Aktif EAŞİ verisi, şarj istasyonu kurulumu yapan firmaların kendi sitelerinden alınan haritaların karşılaştırmalı analiziyle Google My Maps (ZES, 2024; Eşarj, 2024) üzerinden elde edilmiştir. Elektrikli araç sahipliği verisi, TÜİK verilerine dayanarak elektrikli ve hibrit araç sayısının mahalle nüfus bilgilerine oranlanması yoluyla elde edilmiştir. Deprem verileri AFAD deprem tehlike haritasından (AFAD, 2024) alınmıştır. Hava kalitesi verisi Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'ndan (T.C. ÇŞİDB, 2024) elde edilmiştir.

1.2. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçiminde etkili kriterler

Farklı çalışma gruplarına uygulanan anket sonuçlarına göre öncelikleri belirlenecek; akademik literatürden, fizibilite raporlarından ve uzman görüşlerinden yararlanılarak tespit edilmiş kriterler 5 ana kriter grubu altında toplanmış olup Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. EAŞİ yer seçiminde etkili kriterler

Ana kriterler		Alt kriterler	
Çevresel	Çevresel faktörler		Eğitim
			Hava kalitesi
			Jeotehlike
			Ormanlara mesafe
			Su kaynaklarına mesafe
Enerji	Arazi kullanımı		Yerleşim bölgelerine mesafe
			Yeşil alanlara mesafe
			Elektrik trafo merkezlerine mesafe
			Sürdürülebilir enerji kaynağı potansiyeline mesafe
			Alışveriş tesislerine mesafe
Kentsel tesisler	Maliyet		Eğitim merkezlerine mesafe
			İş yerlerine mesafe
			Kamu tesislerine mesafe
			Kültürel tesislere mesafe
			Sağlık kuruluşlarına mesafe
Sosyoekonomik özellikler	Araç kullanımı		Spor tesislerine mesafe
			Araç sayısı
			Elektrik araç sahipliği
			Nüfus yoğunluğu
			Arazi maliyeti
	Hane gelir oranı		
	İstasyon yapım maliyeti		
	Ulaşım harcamaları		

Tablo 1 (Devamı). EAŞİ yer seçiminde etkili kriterler

	Erişilebilirlik	Aktarım istasyonlarına mesafe
		Ana yollara mesafe
Ulaşım		Kavşak noktalarına mesafe
		Trafik hacmi
	Hizmet altyapısı	Bakım ve servis tesislerine mesafe
		Akaryakıt istasyonlarına mesafe
		Mevcut elektrikli araç şarj istasyonlarına mesafe
		Otoparklara mesafe
		Taksi duraklarına mesafe

1.3. En iyi-en kötü yöntemi (best-worst method)

Karar verme, bir dizi alternatif arasından bir seçenek belirlemeyi ve seçim yapmayı içerir. Bu seçim sürecinde çeşitli kriterler değerlendirilir. Bu nedenle, bu tür problemlere çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemleri denir. En İyi-En Kötü Yöntemi, Best-Worst Method, 2015 yılında Jafar Rezaei tarafından geliştirilen çok kriterli karar verme yöntemidir. Bu yöntem daha spesifik olarak, özellikle alternatiflerin değerlendirilmesi için objektif metrikler mevcut değilse alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, problemin ana hedefini karşılamak için bir çözüm bulmada kullanılan kriterlerin önemini (ağırlık) bulmak için de kullanılabilir. Bu amaçla kullanılacak yöntemin uygulama adımları şu şekilde sıralanmıştır (Rezaei, 2015):

Adım 1: Karar verme sürecinde kararın niteliğine bağlı olarak kullanılacak olan kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu adımda karar verici tarafından karar vermek için kullanılan n sayıda olmak üzere $\{C_1, C_1, \dots, C_n\}$ kriterleri belirlenmektedir.

Adım 2: Karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterlere dayalı olarak en iyi (en çok istenen, en önemli) ve en kötü (en az istenen, en az önemli) kriterler belirlenmektedir.

Adım 3: Seçilen en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre önceliği/tercih oranı 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenmektedir. Burada 1: eşit derecede önemli, 3: orta derecede daha önemli, 5: yüksek derecede önemli 7: çok daha yüksek derecede önemli, 9: son derece daha önemli olarak tanımlanmıştır. Bu adımın sonucunda en iyiden diğerlerine doğru ilerleyen Best-Others (AB) adı verilen bir vektöre ulaşılmaktadır. A_B olarak ifade edilen vektör içerisindeki a_{Bj} , en iyi B kriterinin j kriterine göre önceliğini/tercihini göstermektedir ve Denklem (1)'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

Burada a_{BB} , 1 değerini almaktadır. Bu da en önemli kriterin kendisiyle karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir.

Adım 4: Diğer tüm kriterlerin tercih edilen en kötü kriterine göre önceliği 1 ile 9 arasında bir sayı kullanılarak belirlenmektedir. Bu adımın sonucunda diğer kriterlerin en kötüsüne sahip vektör elde edilir. A_W olarak ifade edilen vektör içerisindeki a_{jW} , j kriterinin en kötü kriter W kriterine göre önceliğini/tercihini göstermektedir ve Denklem (2)'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (2)$$

Burada a_{WW} , 1 değerini almaktadır. Bu en kötü kriterin kendisiyle karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir.

Adım 5: Karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterlerin önem derecelerini belirlemek için ağırlıklar atanması gerekmektedir. Bu adımda her bir kriter için en uygun ağırlık $(W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*)$

belirlenmektedir ve maksimum mutlak farkların en aza indirildiği bir çözüm gerekir. Bunu sağlayacak şekilde kriterlerin optimum ağırlıkları belirlenmektedir. Kriterler için en uygun ağırlık, her bir W_B/W_j ve W_j/W_W çifti için sırasıyla $W_B/W_j = a_{Bj}$ ve $W_j/W_W = a_{jW}$ olarak tanımlanmaktadır. Maksimum mutlak farkların minimize edildiği $\{|W_B - a_{Bj}W_j|, |W_j - a_{jW}W_W|\}$ bir j kriteri bulunmalıdır. Bu problem aşağıdaki gibi *min-max* modeline dönüştürülmüştür:

$$\min \max_j \{|W_B - a_{Bj}W_j|, |W_j - a_{jW}W_W|\} \quad (3)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (4)$$

$$W_j \geq 0 \text{ ve } \forall j \text{ için} \quad (5)$$

Model denklemi doğrusal programlama problemi olarak çözümlenmiştir:

$$\min \xi^L \quad (6)$$

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j \text{ için} \quad (7)$$

$$\left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j \text{ için} \quad (8)$$

$$\sum_j W_j = 1 \quad (9)$$

$$W_j \geq 0 \text{ ve } \forall j \text{ için} \quad (10)$$

Belirlenen amaç fonksiyonu kısıtlar altında çözüldüğünde optimum ağırlıklar $(W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*)$ ve tutarlılık oranı değeri ξ elde edilmektedir. ξ değeri, yapılan analizlerin tutarlılık oranlarını göstermektedir. Bu değer arttıkça kriter karşılaştırmalarının daha az güvenilir ve tutarlılıklarının zayıf olduğu, azaldıkça ise tutarlılık oranlarının yüksek olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

2. Bulgular ve tartışma

2.1. Kriter ağırlık düzeylerinin belirlenmesi

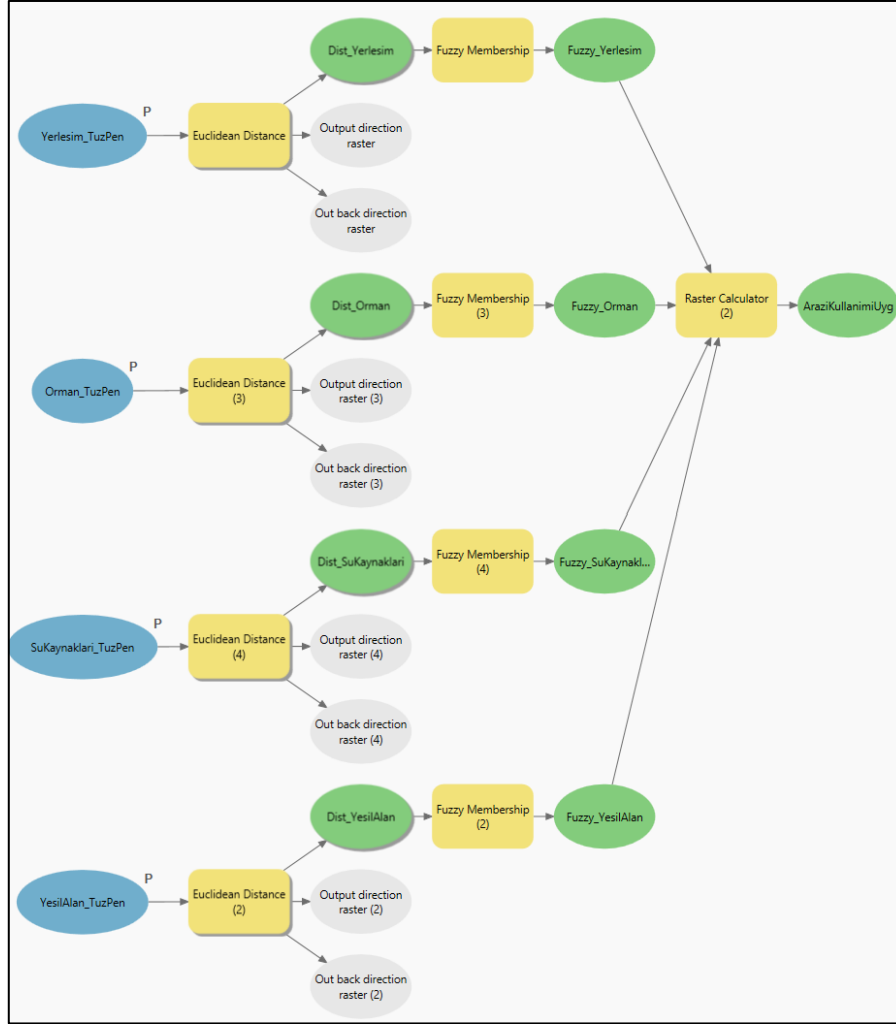
Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler, Ulaşım, ana kategorilerinde tanımlanan 32 kriter BWM yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Bu yöntemde ilk olarak karar verme sürecinde kullanılacak olan kriterler arasından en iyi (en çok istenen, en önemli) ve en kötü (en az istenen, en az önemli) kriterler karar verici 20 kişi tarafından belirlenmiş, ardından en iyi kriteri diğer kriterlerle ve diğer tüm kriterleri en kötü kriterle karşılaştıran karşılaştırmalar 1 ile 9 arasında tanımlı sayılar kullanarak yapılmıştır. Son olarak yöntemin geliştiricisi tarafından sunulmuş olan, kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için maksimum matematiksel bir model ve yöntemin güvenilirliğini kontrol etmek için tutarlılık oranı üzerine kurulu BWM çözücüsü kullanılarak her bir ana kriterin ve alt kriterlerin ağırlıkları ortalaması hesaplanmıştır. Tablo 2'de kriterlerin sahip oldukları ağırlık değerleri gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde en yüksek önem düzeyine sahip ana kriter grubu 0,2798 ile Ulaşım olurken, en düşük önem düzeyine sahip ana kriter grubu 0,1444 ile Sosyoekonomik özellikler olmuştur. Alt kriterler incelendiğinde en yüksek ağırlık değerine (0,1208) hizmet bölgesindeki elektrik trafo merkezine olan mesafe kriteri sahipken, en düşük ağırlık değerine (0,0067) taksi duraklarına mesafe kriteri olmuştur.

Tablo 2. EAŞİ yer seçiminde etkili kriterlerin ağırlıkları

Ana kriterler	Alt kriterler	Ağırlık	
Çevresel (0,1582)	Çevresel faktörler (0,0978)	Eğim	0,0457
		Hava kalitesi	0,0256
		Jeotehlike	0,0275
	Arazi kullanımı (0,0603)	Ormanlara mesafe	0,0084
		Su kaynaklarına mesafe	0,0071
		Yerleşim bölgelerine mesafe	0,0304
	Yeşil alanlara mesafe	0,0134	
Enerji (0,2171)	Elektrik trafo merkezlerine mesafe (0,1133)		0,1208
	Sürdürülebilir enerji kaynağı potansiyeline mesafe (0,1038)		0,0963
Kentsel tesisler (0,2005)	Alışveriş tesislerine mesafe (0,0519)		0,0578
	Eğitim merkezlerine mesafe (0,0215)		0,0211
	İş yerlerine mesafe (0,0425)		0,0362
	Kamu tesislerine mesafe (0,0286)		0,0279
	Kültürel tesislere mesafe (0,0206)		0,0216
	Sağlık kuruluşlarına mesafe (0,0233)		0,0229
	Spor tesislerine mesafe (0,0122)		0,0128
Sosyoekonomik özellikler (0,1444)	Araç kullanımı (0,0829)	Araç sayısı	0,0144
		Elektrik araç sahipliği	0,0394
		Nüfus yoğunluğu	0,0179
	Maliyet (0,0615)	Arazi maliyeti	0,0133
		Hane gelir oranı	0,0182
		İstasyon yapım maliyeti	0,0266
	Ulaşım harcamaları	0,0146	
Ulaşım (0,2798)	Erişilebilirlik (0,1863)	Aktarım istasyonlarına mesafe	0,0290
		Ana yollara mesafe	0,0693
		Kavşak noktalarına mesafe	0,0328
		Trafik hacmi	0,0689
	Hizmet altyapısı (0,0935)	Bakım ve servis tesislerine mesafe	0,0179
		Akaryakıt istasyonlarına mesafe	0,0135
Mevcut elektrikli araç şarj istasyonlarına mesafe		0,0298	
	Otoparklara mesafe	0,0119	
	Taksi duraklarına mesafe	0,0067	

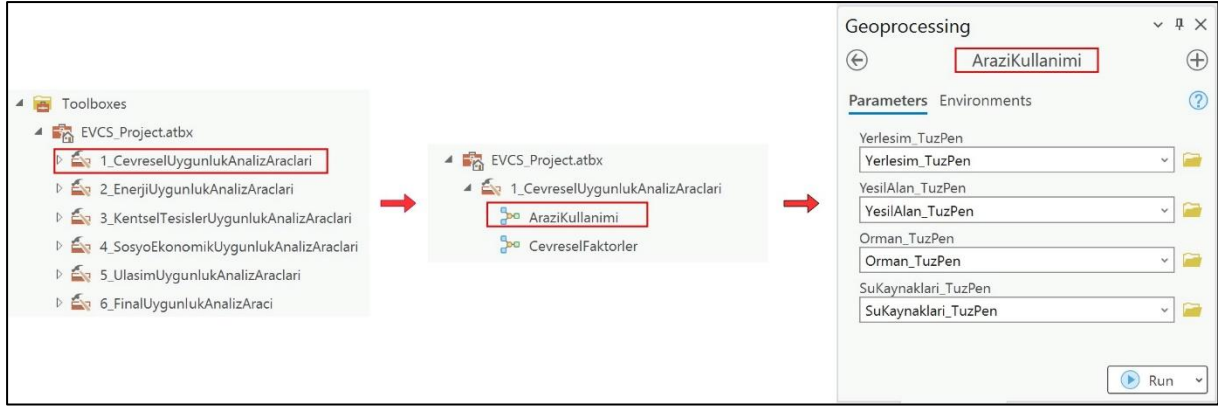
2.2. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçimi analiz araçlarının geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında belirlenen EAŞİ optimum yer seçiminde değer kriterlerinin analizi ve parametrik değer hesaplarının yapılabilmesi için coğrafi analiz araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, ArcGIS Model Builder platformunda oluşturulmuş ve çeşitli vektör (Euclidean Distance) ve raster (Inverse Distance Weighting) tabanlı coğrafi analiz teknikleri tanımlanarak iş akışlarının birleştirilmesiyle geliştirilmiştir. Şekil 2’de örnek olarak arazi kullanımı alt kriteri için model arayüzü verilmiştir.



Şekil 2. Analiz modeli arayüzü: arazi kullanımı alt kriter örneği.

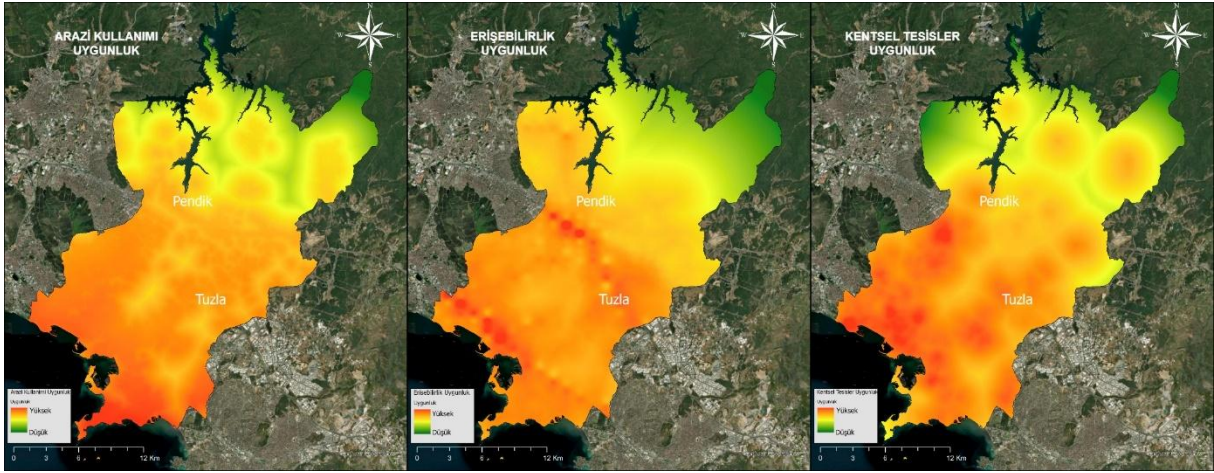
Bu bağlamda, Çevresel ana kriter grubu için çevresel faktörler ve arazi kullanımı; Enerji ana kriter grubu için enerji, Kentsel Tesisler ana kriter grubu için kentsel tesisler, Sosyoekonomik Özellikler ana kriter grubu için araç kullanımı ve maliyet; Ulaşım ana kriter grubu için erişilebilirlik ve hizmet altyapısı olmak üzere toplamda 8 adet analiz aracı geliştirilmiştir. Çevresel Uygunluk Analiz Araçlarının altındaki Arazi Kullanımı analiz aracının parametre değer ekranı ise Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Analiz aracı parametre değer ekranı: arazi kullanımı aracı örneği.

2.3. Elektrikli araç şarj istasyonları yer seçimi analiz araçlarının geliştirilmesi

Kriterlere ait veri kümeleri, Euclidean Distance ile yapılan yakınlık analizi, Inverse Distance Weighting (IDW) yöntemi ile yapılan enterpolasyon ve eğim gibi coğrafi analiz yöntemleri kullanılarak sonraki aşama için hazır hale getirilmiştir. Ardından verileri karşılaştırılabilir hale getirmek için 0-1 aralığında bulanık mantık üyelikleri kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te, bazı kriterlere ilişkin konumsal analiz sonucu elde edilen haritalar örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Analiz araçları ile üretilen örnek haritalar.

Haritaların üretiminden sonra, ana kriterler olarak kabul edilen Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler ve Ulaşım'a yönelik gerçekleştirilen konumsal analizlerin sonuçları, ilgili kriterlerin ağırlıklarına göre birleştirilerek EAŞİ Uygunluk Haritası oluşturulmuş ve Şekil 5'te verilmiştir. Bu harita, çeşitli faktörlerin coğrafi dağılımını göstererek, EAŞİ yer seçimi sürecinde karar vericilere önemli bilgiler sağlamaktadır.

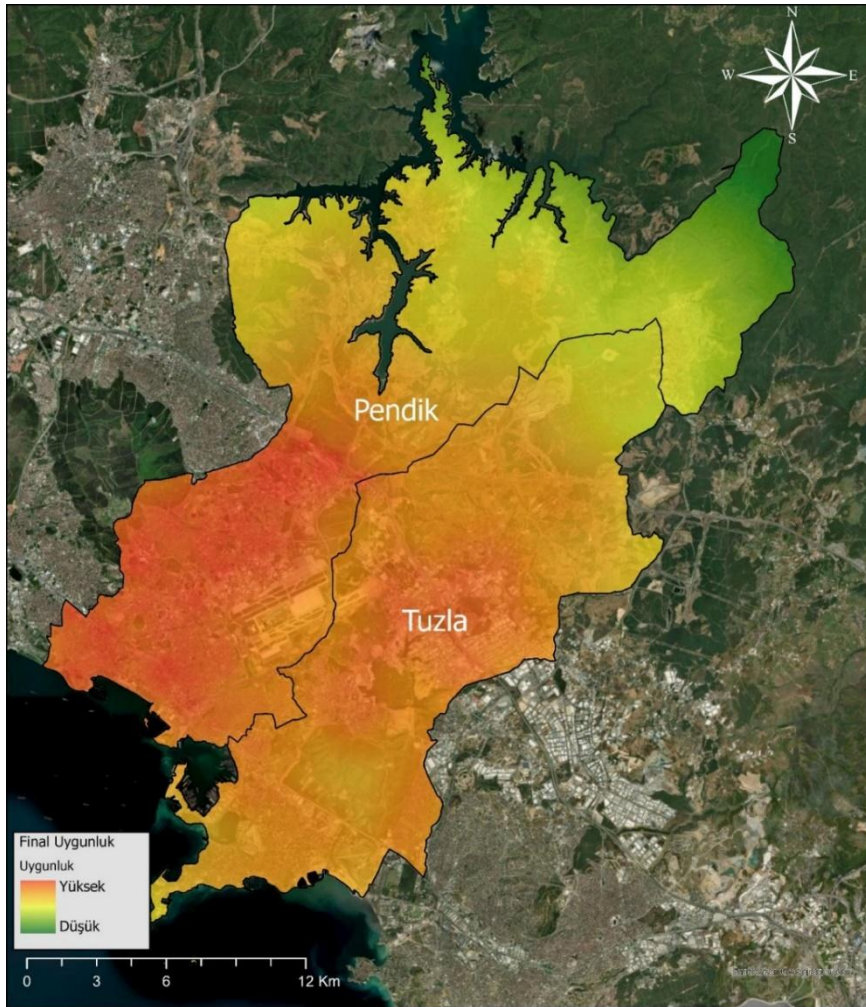
3. Sonuç ve öneriler

Bu çalışmada, iklim değişikliği, sıfır emisyon ve sürdürülebilir ulaşım hedefleri kapsamında önemli bir adım olarak görülen EAŞİ yer seçimine yönelik coğrafi analiz araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, karmaşık analiz süreçlerini otomatikleştirmek, iş akışlarını yönetmek ve tekrarlanabilirliği sağlamak için güçlü bir araçtır. Araçların geliştirilmesi öncesinde, EAŞİ yer seçimini etkileyen kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler, Çevresel, Enerji, Kentsel tesisler, Sosyoekonomik özellikler ve Ulaşım olmak üzere 5 ana kriter çatısı altında 32 kriter olarak tanımlanmıştır. Kriterlerin birbirleriyle olan tercih oranları ve

öncelikleri, 20 karar vericiye uygulanan değerlendirme endeksi sistemi ile belirlenmiş ve BWM kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır.

Geliştirilen araçların test edilebilmesi için İstanbul Pendik ve Tuzla ilçesinde EAŞİ yer seçimi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu pilot alan, hem İstanbul'un diğer ilçeleri hem de diğer bölgeler için referans teşkil edebilecek bir ölçekte bulunmaktadır. Ek olarak, bu ilçeler hem şehir içi hem de şehirler arası ulaşım akslarına ve farklı ulaşım modlarına bağlıdır, bu da elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi için daha kapsamlı ve genel bir araştırma yapılması için uygun bir alan olduğunu göstermektedir.

Uygulama sürecinde, kriter kategorileri için parametrik değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, bu değerler kullanılarak en uygun EAŞİ yerleri belirlenmiştir. Kriterlere yönelik gerçekleştirilen konumsal analizlerin sonuçları, ilgili kriterlerin ağırlıklarına göre birleştirilerek EAŞİ Uygunluk Haritası elde edilmiş ve EAŞİ yerleşimi için ilçelerin kamusal alan yoğunluğu olan bölgelerinin kırsal bölgelerine göre daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Uygulama sonuçları, ilgili kriterleri temsil eden coğrafi veri altlıklarının varlığı durumunda, geliştirilen analitik analiz araçlarının EAŞİ yer seçimi sürecinin otomasyonunda başarıyla kullanılabilceğini göstermektedir.



Şekil 5. EAŞİ yer seçimi için uygunluk haritası.

Bu çalışmada belirlenen kriterler ve geliştirilen analiz araçları, yerel yönetimler, politika yapımcılar ve karar vericiler için sürdürülebilir kentlerin inşası ve elektrikli araç kullanımının teşviki gibi süreçlerde önemli bir kılavuz olacaktır. Örneğin, bir belediye, ilgili hizmet birimlerinden temin ettiği sürekli güncel veriyi erişilebilir kılarak EAŞİ'lerin optimum yerleşimi için analiz yaparken belediye ulaşım dairesi özelinde fizibilite faaliyeti gerçekleştirmiş olur ve yalnızca bugüne göre değil gelecek veri projeksiyonlara göre tahmin yoluyla planlamalar yapabilir. Böylece yerel yönetim, vatandaşların

bireysel elektrikli araç kullanımını desteklerken toplu taşıma hizmetlerinin de elektrikli araçlarla gerçekleştirilmesini sağlayabilir ve ayrıca durak yeri optimizasyonu ile şarj istasyonu yerleşim algoritmasını geliştirilebilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizin farklı ilçelerde yapılacak diğer uygulamalarla karşılaştırılmasıyla ortaya çıkabilecek yeni çalışmalar ve şehirler arası otoyollarda yol ağı dikkate alınarak yapılacak EAŞİ için yer seçimi algoritmalarının geliştirilmesi mümkün görülmektedir.

Bu çalışma, artan elektrikli araç sayısı ile aynı anda ve araç kullanıcılarının şarj etme alışkanlıklarına bağlı olarak öngörülemez zaman dilimlerinde araçların şarj olması sebebiyle elektrik şebekesinin mevcut yükünde oluşacak mevsimsel talep değişkenliği ve şebekede enerji arz güvenliğinde problemleri; hızlı şarj imkanı sunarken şarj istasyonunun yüksek güç talebi nedeniyle elektrik şebekesine ani yük getirme ve dolayısıyla trafo ömürlerinin kısılması, trafo kapasitelerinin yükseltilmesi gibi önemli miktarda maliyet potansiyeli; mevcut elektrik şebeke sistemlerinin ekstra yükleri uzun süre kaldıracak şekilde tasarlanmamış olmasından kaynaklı elektrikli araçlar şarj edilirken faz ve gerilim dengesizlikleri, harmonik akım bozulması, güç kaybı gibi güç sistemlerinde meydana gelebilecek diğer sorunları gibi EAŞİ'lerin elektrik şebekesi üzerine etkilerinin değerlendirilmesiyle şarj istasyonlarının uygun kapasitede ve konumda yerleşimi için yeni stratejilerin geliştirilebilmesi için gelecek motivasyonu oluşturmaktadır.

Elektrikli araçların sayısının hızla artması ve şarj altyapısının gelişmesiyle birlikte, şarj istasyonlarının gelecekte üstleneceği rol daha kritik hale gelmektedir. Örneğin, enerji talebini karşılamak için güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından beslenen şarj istasyonları, daha temiz bir enerji altyapısına katkıda bulunarak karbon emisyonunu düşürülebilir. Şebeke üzerindeki yük yönetimi açısından elektrikli araçların şarj işlemi, yoğun olmayan saatlere göre planlanabilir; bu sayede şebeke dengesi korunarak enerji arz-talep yönetimi daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Örneğin, şarj istasyonlarında akıllı ücretlendirme sistemleri ile belirli saatlerde daha düşük maliyetle şarj yapılması teşvik edilerek kullanıcılar yönlendirilebilir. Ayrıca devlet teşvikleri ile şarj istasyonlarının kurulum ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi hem bireysel hem de toplu taşımada elektrikli araç kullanımını teşvik eden sürdürülebilir bir ulaşım ağına katkıda bulunabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Arif Çağdaş Aydınoglu: Araştırma tasarımı, Metodoloji geliştirilmesi

Tansu Çetin: Literatür araştırması, Makale metni hazırlanması

Abdullah Uğur Topal: Verilerin hazırlanması, veri analizi, görselleştirme

Süleyman Şişman: Verilerin hazırlanması, veri analizi

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma YÖK – ADEP 2024 programı 2024-A-113-09 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

AlosPalsar. (2024). ALOS PALSAR. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar>

Asnaz, M. S. K. ve Özdemir, B. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile optimal konumlandırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 4(2), 175-187. doi: 10.51513/jitsa.1015108.

- Eşarj.** (2024). Eşarj İstasyon Haritası. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://esarj.com/harita>
- AFAD.** (2024). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları. Erişim:15 Ocak 2024, <https://tdth.afad.gov.tr>
- T.C. ÇŞİDB.** (2024). Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://sim.csb.gov.tr/SERVICES/airquality>
- Rezaei, J.** (2015). Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Omega*, 53, 49-57. doi: 10.1016/j.omega.2014.11.009.
- EU.** (2020). *European Electric Vehicle Factbook*. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-EU-Factbook-2020.pdf>
- Guo, S. and Zhao, H.** (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, 158, 390-402. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.082.
- IEA.** (2022). *By 2030 EVs represent more than 60% of vehicles sold globally, and require an adequate surge in chargers installed in buildings*. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://www.iea.org/reports/by-2030-evs-represent-more-than-60-of-vehicles-sold-globally-and-require-an-adequate-surge-in-chargers-installed-in-buildings>.
- Irle, R.** (2023). *Global EV sales for 2023*. Erişim: 10 Ocak 2024, [https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/#:~:text=A%20total%20of%2014%2C2,Range%20Extender%20EVs%20\(EREV\)](https://ev-volumes.com/news/ev/global-ev-sales-for-2023/#:~:text=A%20total%20of%2014%2C2,Range%20Extender%20EVs%20(EREV))
- İBB.** (2024). İBB Açık Veri Portalı. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://data.ibb.gov.tr>
- Kaya, Ö., Alemdar, K. D., and Çodur, M. Y.** (2020). A novel two stage approach for electric taxis charging station site selection. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102396. doi: 10.1016/j.scs.2020.102396.
- Meticulous Market Research.** (2022). *Electric Vehicle Market to Grow at a CAGR of 33.6% from 2020 to Reach \$2,495.4 Billion by 2027 - Market Size, Share, Forecasts, & Trends Analysis Report with COVID-19 Impact by Meticulous Research*. Retrieved January 10, 2024, from [prnewswire.com](https://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicle-market-to-grow-at-a-cagr-of-33-6-from-2020-to-reach-2-495-4-billion-by-2027---market-size-share-forecasts--trends-analysis-report-with-covid-19-impact-by-meticulous-research-301499046.html). <https://www.prnewswire.com/news-releases/electric-vehicle-market-to-grow-at-a-cagr-of-33-6-from-2020-to-reach-2-495-4-billion-by-2027---market-size-share-forecasts--trends-analysis-report-with-covid-19-impact-by-meticulous-research-301499046.html>
- OSM.** (2024). Open Street Map. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://www.openstreetmap.org>
- Sisman, S., Ergul, I., and Aydinoglu, A.C.** (2021). Designing GIS-based site selection model for urban investment planning in smart cities with the case of electric vehicle charging stations. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 515-522. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W5-2021-515-2021.
- Topal, A. U., Sisman, S., and Aydinoglu, A.C.** (2023). Developing An Implementation Approach For Electric Vehicle Charging Station Location Selection For Sustainable Urban Transportation: The Case Of Pendik and Tuzla Districts. *V. International Cappadocia Scientific Research Congress*, Nevşehir, Türkiye, November 5-7, 2023.
- TÜİK.** (2024). Türkiye İstatistik Kurumu İstatistik Veri Portalı. Erişim: 10 Ocak 2024, <https://www.data.tuik.gov.tr>
- UrbanAtlas.** (2024). Urban Atlas. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas>

Url-1 <<https://suvmodelleri.com/elektrikli-araclarin-avantajlari>>, erişim tarihi 10.01.2024.

ZES. (2024). Şarj İstasyonları. Erişim: 15 Ocak 2024, <https://zes.net/sarj-istasyonlari>

Research Article

Smart traffic monitoring with YOLOv9 object detection algorithm

Recep Bilal Sıkar^{1*}, Sinem Bozathı Kartal²

^{1,2} Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Istanbul, TURKİYE

² Yalova University, Faculty of Engineering, Department of Transportation Engineering, Yalova, TURKİYE

*Correspondence: recep.sikar@iuc.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1527571

Abstract: Rapid advancements in artificial intelligence technology have enabled computer vision to be utilized across a wide range of engineering disciplines. This study examines the practical solutions offered by image processing technology in manual counting applications and the accuracy of advanced algorithms. The applicability and performance of the YOLOv9 algorithm in traffic counts have been evaluated. The research shows that the algorithm operates with high accuracy and minimizes human error. The study involves classification and counting operations for three different types of vehicles. According to the results, cars and trucks are detected with over 95% accuracy, while smaller objects like motorcycles have slightly lower accuracy. The successful application of YOLOv9 in vehicle counting and traffic management underscores the significance of object detection technology in intelligent transportation systems. This study illustrates how such technology can enhance traffic management efficiency, offering valuable insights for future implementations. The key role that advanced algorithms like YOLOv9 can play in the development of intelligent transportation systems is an important topic for future researchers and industry professionals.

Keywords: Artificial intelligence, YOLOv9, smart traffic monitoring, vehicle counting

YOLOv9 nesne tespit algoritması ile akıllı trafik izleme

Özet: Yapay zeka teknolojisindeki hızlı gelişmeler, bilgisayarla görmenin geniş bir mühendislik disiplini yelpazesinde kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu çalışma, görüntü işleme teknolojisinin manuel sayım uygulamalarında sunduğu pratik çözümleri ve ileri algoritmaların doğruluğunu incelemektedir. YOLOv9 algoritmasının trafik sayımlarındaki uygulanabilirliği ve performansı değerlendirilmiştir. Araştırma, algoritmanın yüksek doğrulukla çalıştığını ve insan hatasını en aza indirdiğini göstermektedir. Çalışma, üç farklı araç türü için sınıflandırma ve sayım işlemlerini içermektedir. Sonuçlara göre, arabalar ve kamyonlar %95'in üzerinde doğrulukla tespit edilirken, motosiklet gibi daha küçük nesnelere biraz daha düşük doğruluk oranına sahiptir. YOLOv9'un araç sayımı ve trafik yönetiminde başarılı bir şekilde uygulanması, nesne algılama teknolojisinin akıllı ulaşım sistemlerindeki önemini vurgulamaktadır. Bu çalışma, bu tür teknolojilerin trafik yönetim verimliliğini nasıl artırabileceğini göstermekte ve gelecekteki uygulamalar için değerli içgörüler sunmaktadır. YOLOv9 gibi gelişmiş algoritmaların akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesinde oynayabileceği kilit rol, gelecekteki araştırmacılar ve sektör profesyonelleri için önemli bir konudur.

Anahtar Kelimeler: Yapay zeka, YOLOv9, akıllı trafik izleme, araç sayımı

1. Introduction

Smart cities aim to achieve sustainable economic development based on new and smart technologies and to ensure a better quality of life. The purpose of building a smart city is a strategy developed to alleviate problems such as scarce resources, environmental pollution, and traffic congestion (De Paz et al, 2016). In this regard, intelligent transportation systems have become a rapidly developing field to meet the need to cope with the complex transportation systems of cities today. In this transformation, artificial intelligence technologies are pioneering groundbreaking innovations, especially in smart transportation systems. With its capabilities to analyse large data sets, recognize complex patterns, perform predictive analysis, and make fast decisions, artificial intelligence offers revolutionary solutions in several critical application areas, from traffic management to driver safety. For example, object detection algorithms, especially advanced artificial intelligence models such as YOLOv9, are used effectively in real-time vehicle counting, traffic density analysis and route optimization. Applications such as artificial intelligence-supported traffic signal control systems, smart parking management and autonomous vehicle technologies make the vision of making cities' transportation networks more efficient, sustainable, and safe come true. In this context, artificial intelligence technologies, as the cornerstone of smart transportation, play an important role in improving city life and providing solutions to the mobility needs of the future.

There are three methods generally used for traffic control. The first of these is manual control with the traffic police. This method requires a lot of manpower. The other is traditional traffic lights with static timers. Traffic signal timers operate on fixed periods and do not consider real-time traffic density. The last method is electronic sensors. It is the method in which traffic-related data is obtained with the help of detectors and sensors placed on the roads and traffic signals are arranged according to this data. The most important disadvantages of this method are the limited sensor ranges and the need for expensive technologies to collect high-quality information. With the increase in the number of vehicles in recent years, these methods have been insufficient to provide solutions to problems such as traffic congestion, waiting times in traffic, unwanted fuel consumption and therefore air pollution, rule violations, and accidents caused by driver stress. This situation increases the need for intelligent transportation systems (Gökcan et al, 2023).

Object detection, a key aspect of computer vision, involves identifying and classifying objects while determining their location within an image by creating bounding boxes. Traditional methods include background subtraction, optical flow, and interframe differences. In contrast, deep learning-based algorithms enhance vehicle detection by training on datasets and extracting relevant features, leading to more accurate and efficient object recognition (Gökcan et al, 2023).

Convolutional neural networks (CNNs) have made a breakthrough in computer vision tasks and have achieved great success in traffic signs classification. YOLO (You only look once) has become a central real-time object detection system for robotics, driverless cars and video surveillance applications. Literature studies conducted in this context Terven et al. provide a comprehensive analysis of the evolution of YOLO by examining the innovations and contributions in each iteration from the original YOLO to YOLOv8 (2023). In another study, Kırak & Gürbüz (2023) conducted a case study on various YOLO models to determine the best performing version. Their research focused on vehicle classification, emphasizing the importance of accurate and efficient classification methods for transportation applications. The study also provides insights into the development of new algorithms and methods for improving vehicle classification. Zhang et al. (2017) introduced a Chinese traffic sign detection algorithm utilizing a deep convolutional network. They developed an end-to-end network, inspired by YOLOv2, to achieve real-time detection of Chinese traffic signs. As research in this field has advanced, newer versions of YOLO have been developed, building upon these initial methods to improve detection accuracy and efficiency. Yang optimized the YOLOv3 network to improve road traffic sign recognition. By improving the original FPN structure and using techniques such as color enhancement, the modified YOLOv3 achieves better accuracy, speed and efficiency in recognizing traffic signs compared to the traditional YOLOv3 algorithm (Yang, Z. 2022). Onar et al. (2023) investigated the effectiveness of various image enhancement algorithms in improving low-light images. In their work, they evaluate the effects on object detection using the YOLOv3 computer vision

algorithm. Huang et al. (2023) proposed the YOLOv8 method, a version of YOLO developed as a solution to the low accuracy problem in detecting traffic signs.

YOLOv9 is an object detection model that pushes the boundaries of both speed and accuracy. Developed by Chien-Yao Wang, I-Hau Yeh and Hong-Yuan Mark Liao, this algorithm offers innovative techniques to increase efficiency and precision. Wang et al (2024) designed generalized ELAN (GELAN) based on ELAN. This design enables users to select computation blocks tailored to different inference devices. The integration of PGI and GELAN led to the creation of the YOLOv9 object detection system, which was tested on the MS COCO dataset. The results showed that YOLOv9 outperformed previous models across all benchmarks. The source code for YOLOv9 was later made publicly available, allowing users to train their own models.

With developing technology, artificial intelligence-based solutions in the fields of traffic management and city planning play an important role in managing traffic efficiently and increasing the safety of drivers. In this context, the YOLOv9 algorithm, which has an important place in the field of object detection, exhibits superior performance, especially in tasks such as vehicle counting and traffic density detection. In this article, we will focus on their success in real-time vehicle type detection and vehicle counting using the YOLOv9 algorithm. While the fast and effective object detection capabilities provided by YOLOv9 open new horizons in traffic analysis and management, we will provide an in-depth look at the potential of this technology.

2. Material and Method

2.1. Deep Learning and YOLOv9

Deep learning is a sub-branch of machine learning that uses mathematical model-based algorithms called artificial neural networks. This method is designed to extract meaningful features from large and complex data sets and learn complex tasks automatically. Deep learning is usually achieved through multilayer artificial neural networks, which process information in a way like the neural networks of the human brain.

Deep learning algorithms, designed to mimic the human brain's learning process by extracting features from large datasets, have surpassed human performance in some complex computational tasks. Their success across various domains has led to increased adoption in remote sensing applications (Saraloğlu and Güngör, 2022).

Image processing is a field that involves the ability of computers to extract information and make predictions from images and videos. This technology focuses on the ability of computers to distinguish images with desired characteristics and recognize these images through neural networks. Neural networks significantly improve the image processing capabilities of computers by analyzing complex visual data and being used effectively in tasks such as recognizing patterns, classifying objects, and making predictions.

Stable and efficient system for object detection. Following RCNN, Fast RCNN, and Faster RCNN, YOLO was developed as a new way to solve object detection most simply and efficiently (Sirphy and Revathi, 2023).

YOLO is known as the most common algorithm using CNN for real-time object tracking. The first version was released in 2015, and newer and more advanced models followed in the following years (Wang et al, 2024). In this study, the version called YOLOv9, released on February 21, 2024 was used. YOLO differs from other methods by working faster and providing more accurate results. It also provides flexibility in terms of optimizing between accuracy and speed at any time. Figure 1. demonstrates the architecture of YOLOv9.

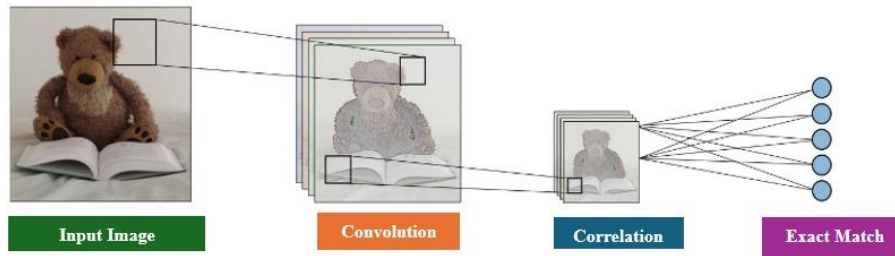


Figure 1. YOLOv9 Model Architecture (Amidi and Amidi, 2019).

YOLO is a real-time object detection algorithm based on a Convolutional Neural Network (CNN). It detects objects with a single pass through the image, treating object detection as a regression task. YOLO divides the image into grids and predicts class probabilities and bounding boxes simultaneously. This approach allows for efficient and accurate object detection in one run. (Sirphy and Revathi, 2023).

The YOLO family, introduced in 2015, is a well-known object detection framework. It stands out for its single-stage approach, which has made it a leading and efficient detection algorithm, quickly becoming a mainstream choice in the field.

The original YOLO, also known as YOLOv1, approaches detection as a regression task. It uses a single convolutional network to simultaneously predict multiple bounding boxes and the corresponding class probabilities for each (Du, 2018). The systematics of CNN is shown in Figure 2.

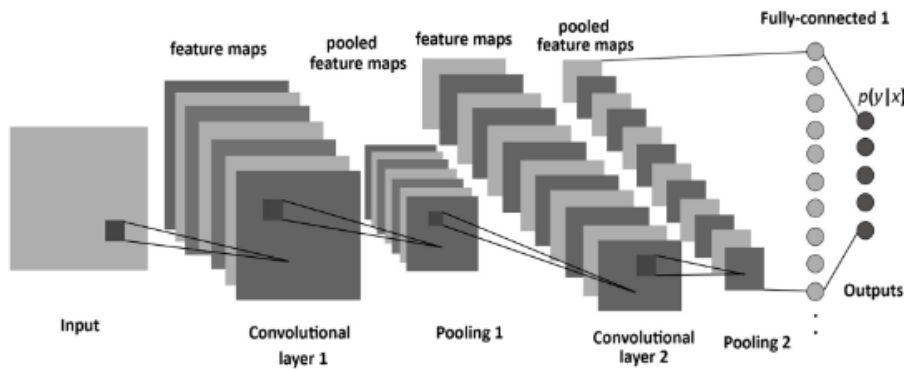


Figure 2. CNN systematics (Albelwi and Mahmood, 2017).

YOLOv9 represents a significant step forward in real-time object detection, offering significant improvements in efficiency, accuracy, and adaptability. Addressing critical challenges with innovative solutions PGI and GELAN, YOLOv9 sets a new example for future research and applications.

YOLOv9 emerges as a powerful model that offers innovative features that will play an important role in further improving object detection and even image segmentation and classification in the future.

In this study, the YOLOv9c model, which was trained on the MS COCO dataset, was utilized. The COCO (Common Objects in Context) dataset is widely used for object detection, segmentation, and captioning tasks, serving as a comprehensive resource for computer vision applications. It was developed to support research across a broad range of object categories and is commonly utilized for benchmarking the performance of computer vision models. As a key dataset, it is indispensable for researchers and developers working on tasks such as object detection, segmentation, and pose estimation.

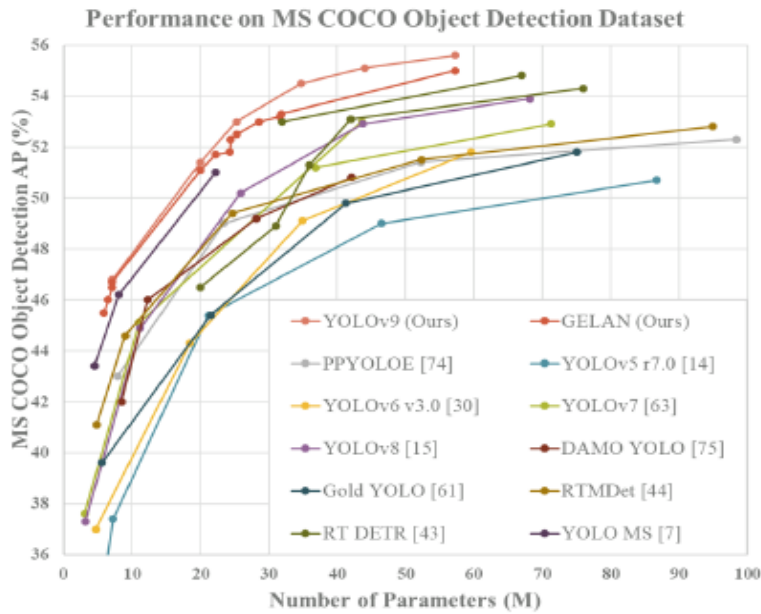
MS COCO is a widely used benchmark dataset for object detection, segmentation, and captioning tasks. It contains over 200,000 labeled images, with more than 80 object categories, and provides rich contextual information about the objects in various real-world scenarios (Lin et al., 2014).

Table 1. presents a comprehensive comparison of state-of-the-art real-time object detectors, illustrating YOLOv9's superior efficiency and accuracy.

Table 1. MS COCO Dataset.

Model	Size (pixels)	mAPval 50-95	mAPval 50	Parameters (M)	FLOPs (B)
YOLOv9t	640	38,3	53,1	2	7,7
YOLOv9s	640	46,8	63,4	7,2	26,7
YOLOv9m	640	51,4	68,1	20,1	76,8
YOLOv9c	640	53	70,2	25,5	102,8
YOLOv9e	640	55,6	72,8	58,1	192,5

The YOLOv9 model architecture outperforms popular YOLO models like YOLOv8, YOLOv7, and YOLOv5 in terms of mAP (mean Average Precision) when evaluated on the MS COCO dataset (Wang et al, 2024). The fact that YOLOv9 is much superior to scratch training methods in terms of computational complexity is revealed in the model performance obtained from the study, seen in Figure 3.

**Figure 3.** YOLOv9 model performance (Wang et al, 2024).

2.2. A Case Study using YOLOv9

This study was carried out on Deniz Street in the Mudanya District of Bursa Province and is based on data obtained from camera recordings. The time examined covers between 18:00 and 19:00. The image of Deniz Street on the map is shared in Figure 4, and the traffic image is shared in Figure 5.

Deniz Street is located geographically close to Mudanya Pier, so the street examined within the scope of the research is a line where vehicle traffic is relatively intense.

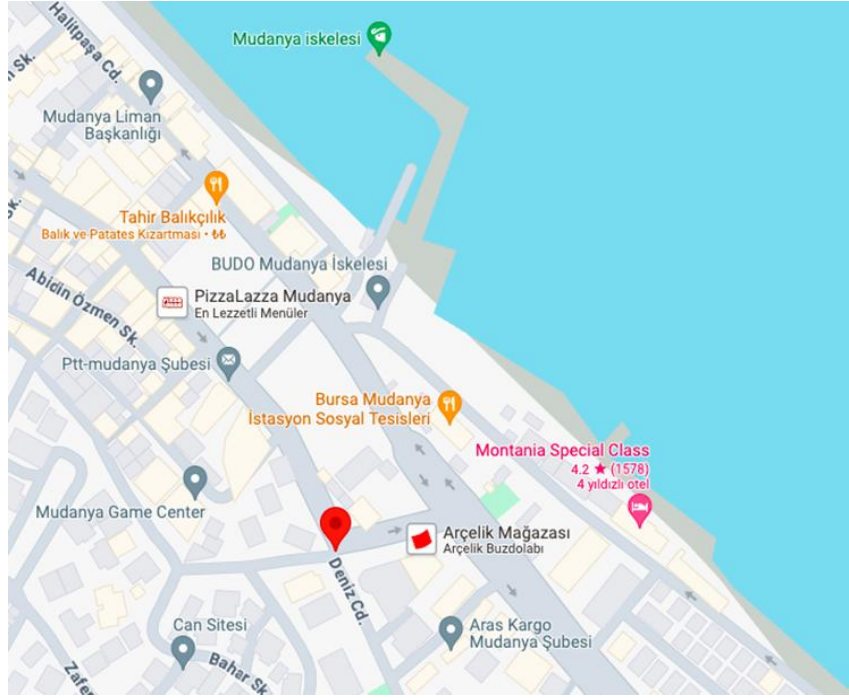


Figure 4. Location of Deniz Street.



Figure 5. Deniz Street.

In the study, the pre-trained YOLOv9c model using the YOLO (You Only Look Once) algorithm from the Ultralytics library was used. This model is a deep learning model that can detect and classify objects in visual data. The prediction was made on the video file. During this process, the input image size of the model was determined as 320 pixels and the confidence threshold of the determinations was determined as 0.5. The predictions made were processed and recorded, including the types and locations of objects on the image. Figure 6 shows that the class is determined for each object and a different identification number is assigned to each object.



Figure 6. Object detection using YOLOv9.

2.2.1. Vehicle counting

This study was carried out on a computer with an i7 processor and a GTX 3050 Ti graphics card. This is very advantageous for YOLOv9's performance. Deep learning-based object detection models such as YOLOv9 accelerate computational operations by leveraging the parallel processing capabilities of GPUs (Graphics Processing Unit). In this case, a computer powered by a powerful graphics card such as a GTX 3050 Ti will enable the YOLOv9 model to run faster and more effectively.

GPU enables parallel calculations in the detection and tracking phases of YOLOv9, providing much faster results. Especially when working with large datasets or high-resolution images, GPU-based computing can be much faster and more efficient compared to the processor.

Therefore, the fact that this study was carried out on a computer with an i7 processor and a GTX 3050 Ti graphics card allows maximum efficiency from the performance of YOLOv9. This combination of hardware can perform complex image processing tasks such as object detection and counting faster and more precisely.

Additionally, the following steps were followed for vehicle counting with YOLOv9:

1. Preparation of Inputs: In the first step, the OpenCV (cv2) library is used to read a video file. This video contains the footage from which to track the vehicles and determine the line. The YOLOv9 model is loaded to be used for detecting and tracking vehicles.
2. Tracking and Detection: Vehicles are detected and tracked using the YOLO model on each frame. This process is applied to determine the types of vehicles (car, truck, motorcycle) and ensure that each vehicle is tracked.
3. Defining the Line: A line is defined to determine the passage of vehicles. This line is used as a visual reference point and a counter is incremented when the line is detected to be crossed.
4. Tracking and Counting: In each frame, the program keeps tracking the detected vehicles and checks whether they cross the designated line. When a vehicle crosses the line, a counter is incremented depending on the vehicle type involved.
5. Visualization of Results: In each frame, detected vehicles and line-crossing states are visually displayed. These are achieved through drawn rectangles and texts.

Figure 7 shows the vehicle counting output for the northbound traffic flow.



Figure 7. Vehicle counting using YOLOv9.

3. Results and Discussion

3.1. Model Performance

As a result of the study, vehicle counts obtained with YOLOv9 were compared with vehicle counts made via video recording by two different observers. Metrics evaluated include the number of cars, trucks, and motorcycles over 15 minutes. The results are seen in Table 2 and Table 3.

Table 2. Vehicle counting results 1.

Duration	YOLOv9			Observer 1		
	Car	Truck	Motor cycle	Car	Truck	Motor cycle
15 min	271	3	13	275	3	18
15 min	267	0	11	278	0	20
15 min	291	2	13	305	2	15
15 min	265	3	8	267	2	9

Table 3. Vehicle counting results 2.

Duration	YOLOv9			Observer 2		
	Car	Truck	Motorcycle	Car	Truck	Motorcycle
15 min	271	3	13	279	3	18
15 min	267	0	11	278	0	19
15 min	291	2	13	307	2	16
15 min	265	3	8	267	2	8

In the context of car detection, YOLOv9 achieves results comparable to human observers, although it shows slight variations in different samples. The algorithm demonstrates its effectiveness by correctly detecting most cars. However, in some cases, differences occurred between the observers and the algorithm.

Equation 1 expresses the ratio of the number of motorcycles detected by YOLOv9 to the number of motorcycles detected by human observers. This ratio shows how accurate the algorithm produces results compared to human observers. This ratio being close to 1 indicates that YOLOv9 produces similar results to human observers. However, if the ratio moves away from 1, it can be understood that the algorithm is experiencing some difficulties or there are areas for improvement.

$$\text{Motorcycle detection ratio} = \frac{\text{YOLOv9 Motorcycle Count}}{\text{Human Observer Motorcycle Count}} \quad (1)$$

$$\text{First 15 minutes for observer 1 and 2 motorcycle detection ratio} = \frac{13}{18} = 0.72 \quad (2)$$

$$\text{Second 15 minutes for observer 1 motorcycle detection ratio} = \frac{11}{20} = 0.55 \quad (3)$$

$$\text{Second 15 minutes for observer 2 motorcycle detection ratio} = \frac{11}{19} = 0.58 \quad (4)$$

$$\text{Third 15 minutes for observer 1 motorcycle detection ratio} = \frac{13}{15} = 0.87 \quad (5)$$

$$\text{Third 15 minutes for observer 2 motorcycle detection ratio} = \frac{13}{16} = 0.81 \quad (6)$$

Regarding motorcycle detection, YOLOv9 shows that it can identify motorcycles and the results closely match human observation. However, as seen in equations 2,3,4,5, and 6 some differences are observed from time to time due to difficulties in accurately detecting smaller objects such as motorcycles in crowded environments.

To improve the performance of the algorithm for motorcycle detection, a deeper and more comprehensive feature extraction process is required. For small objects such as motorcycles, better extraction of salient features is critical for more accurate identification. Additionally, image quality improvement is necessary to improve the performance of the algorithm. Low light conditions or blurry images can make it difficult for the algorithm to detect objects accurately. Therefore, the use of higher resolution and clearer images can contribute to the algorithm producing more reliable results.

Regarding truck identification, YOLOv9 also performs reasonably well and maintains consistency in its detections across experiments. There are very small differences between YOLOv9's counts and those of human observers. These differences are at a margin level and do not affect the overall performance of the algorithm.

3.2. Performance Metrics

As seen in Figure 8., the precision value for each second over 60 seconds was consistently achieved as 1. The model generally operates with high accuracy. Precision measures how many of the model's positive predictions are true positive. Therefore, obtaining a precision value of 1 at every second indicates that the model consistently and accurately detects objects. The fact that the precision value remains stable and high demonstrates that the model performs effectively, regardless of object density or scene conditions.

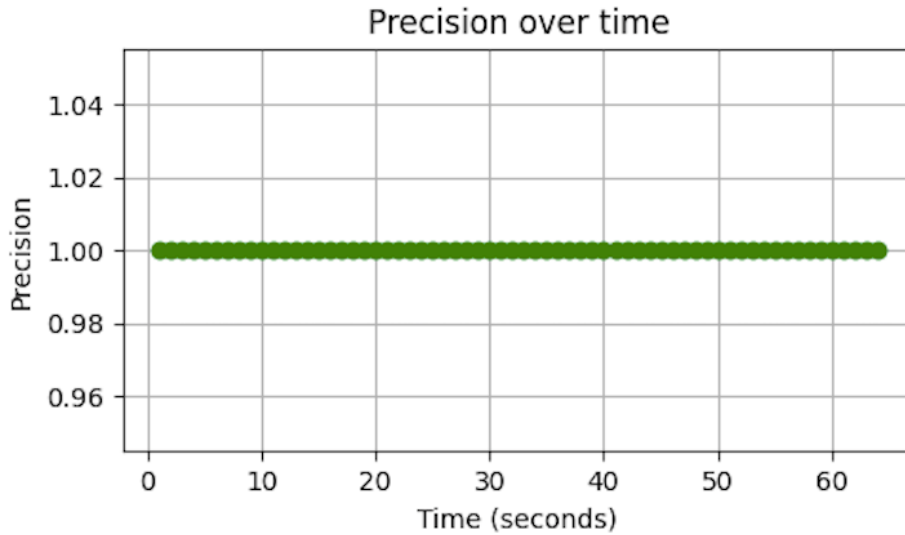


Figure 8. Precision over time

The recall value, calculated for each second over 60 seconds, starts at 0.46 and rises to 0.56, where it stabilizes. This indicates an improvement in the model's detection performance and shows that it can detect a large portion of the positive classes. The model can be further optimized to achieve higher recall values, especially in more complex scenes.

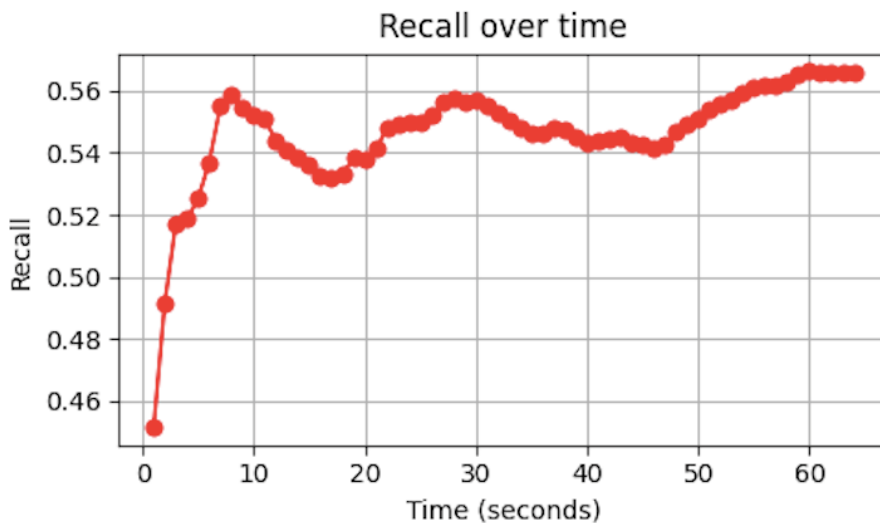


Figure 9. Recall over time

The Intersection over Union (IoU) values obtained over the 60 seconds, ranging between 0.70 and 0.85, indicate that the objects detected by the model are very close to the ground truth. IoU measures how much

the predicted bounding boxes overlap with the actual object. This value represents the ratio between the intersection area and the union area of the detected object and the real object.

The IoU values fluctuating between 0.70 and 0.85 demonstrate that the model accurately detects the position and boundaries of objects in most cases. Particularly, IoU values close to 0.85 suggest that the predicted boxes almost perfectly overlap with the real objects. This shows that the model operates with high precision and performs strongly in object localization, with detected objects being very close to the actual objects.

On the other hand, when IoU drops to around 0.70, it indicates that the model sometimes predicts the boundaries of objects less accurately. Still, an IoU value of 0.70 is considered acceptable in most applications, as it means the model generally provides correct boundaries for the objects. These results suggest that the YOLOv9 algorithm used in the study offers consistent and reliable performance in object detection, especially in real-time applications, and that the errors in object boundary prediction are minimal.

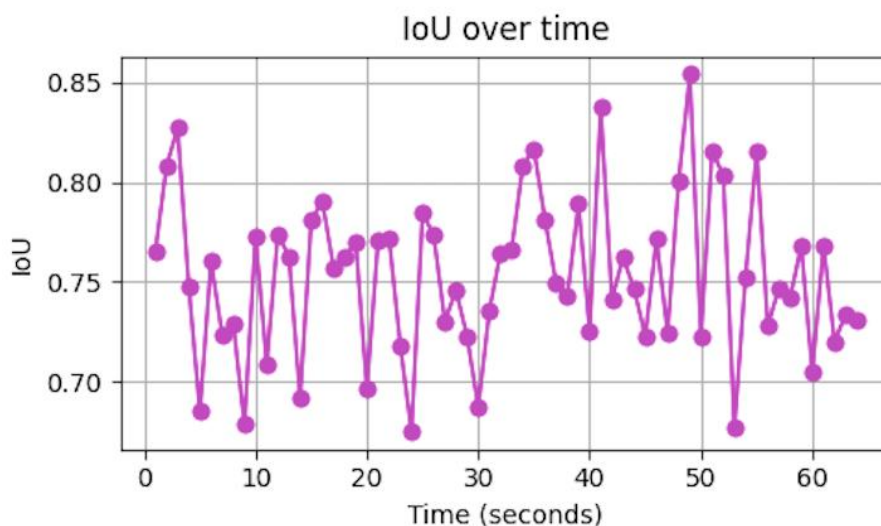


Figure 10. Intersection over Union (IoU) over time

4. Conclusion and Recommendation

Accurate computer-based operations, such as vehicle identification, are crucial due to their wide range of applications in areas like traffic monitoring, autonomous vehicles, and intelligent transportation systems. Various deep mesh-based deformations have been proposed for classifying and identifying vehicles, including convolutional neural networks (CNNs), YOLO runs, template matching, and feature-based techniques. YOLO provides useful information on various options to increase productivity, safety and reliability for real-time monitoring and decision-making possibilities. YOLOv9's object detection and design software is prepared with original software. YOLO's real-time image processing capability makes it ideal for vehicle features and appearances.

In this study, YOLOv9 performed above 95% on car and truck detection tasks, except for small objects such as motorcycles. This demonstrates the usability of the algorithm as a reliable automatic system in real-world applications. Although there are minor differences compared to human observation, the algorithm's ability to consistently detect and classify vehicles highlights its usability in a variety of environments. Additionally, continued advances in deep learning techniques and model improvements are expected to further improve YOLOv9's performance and applicability in various environments, as well as its performance in detecting small objects such as motorcycles.

YOLO outperforms other object detection algorithms by offering faster and more accurate real-time detection. The integration of convolutional neural networks and advanced machine learning techniques has greatly improved the precision and efficiency of vehicle detection and classification, enabling the real-time processing of large datasets. This technology enhances driving safety, optimizes traffic flow, and enables autonomous driving. It is increasingly important to develop models for tracking, identifying, and categorizing vehicles to detect traffic violations and manage congestion. Vehicle counting helps authorities assess traffic conditions, preventing accidents and bottlenecks. This study contributes valuable insights to the literature on these methods.

Researchers' Contribution Rate Statement

He has contributed to the code. She has spent effort on literature search. They have spent effort on determining the conceptual and design processes of the study, management, and other processes.

Acknowledgment and/or disclaimers, if any

There are no acknowledgment and/or disclaimers.

Conflict of Interest Statement, if any

There is no conflict of interests.

References

Albelwi S, Mahmood A. (2017). A Framework for Designing the Architectures of Deep Convolutional Neural Networks. *Entropy*. doi: 10.3390/e19060242

Amidi A. ve Amidi S. (2019, Nisan 30). CS230-Derin Öğrenme, Evrişimli Sinir Ağları El Kitabı. Stanford Üniversitesi (A. Kızrak ve Y. Kömeçoğlu Çev.). <https://stanford.edu/~shervine/1/tr/teaching/cs-230/cheatsheet-convolutional-neural-networks>

De Paz, J. F., Bajo, J., Rodríguez, S., Villarrubia, G., & Corchado, J. M. (2016). Intelligent system for lighting control in smart cities. *Information Sciences*, 372, 241-255.

Du, J. (2018). Understanding of object detection based on CNN family and YOLO. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1004, p. 012029). IOP Publishin'g.

Gökcan, A. O., Çöteli, R., and Avcı D. (2023). DETECTION AND CLASSIFICATION OF VEHICLES BY USING TRAFFIC VIDEO BASED ON YOLOV8. *UMTEB – XIV International Scientific Research Congress*, 14–15 September, ss. 530-538.

Huang, Z., Li, L., Krizek, G. C., & Sun, L. (2023). Research on traffic sign detection based on improved YOLOv8. *Journal of Computer and Communications*, 11(7), 226-232.

Kıvrak, O., & Gürbüz, M. Z. (2022). Performance comparison of yolov3, yolov4 and yolov5 algorithms: A case study for poultry recognition. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (38), 392-397.

Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48

Onar, O., Akkuş, B., and Çavuşoğlu, G. (2023). Düşük Işıklı Görüntüler için Görüntü İyileştirme Algoritmalarının Değerlendirilmesi ve YOLO V3 Kullanılarak Nesne Algılama Üzerindeki Etkisi. 3. *ULUSLARARASI AKILLI ULAŞIM SİSTEMLERİ KONFERANSI ITSC'23*, 15–17 November.

Sarahoğlu, E., & Güngör, O. (2022). Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden daha hızlı bölge tabanlı derin öğrenme modeli ile bina tespiti. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 550-563.

Sirphy, S., & Revathi, S. T. (2023). Adaptive Traffic Control System Using YOLO. *2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)* (pp. 1-5). 23-25 January.

Terven, J., Córdova-Esparza, D. M., & Romero-González, J. A. (2023). A comprehensive review of yolo architectures in computer vision: From yolov1 to yolov8 and yolo-nas. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(4), 1680-1716.

Wang, C.-Y., Yeh, I.-H., & Liao, H.-Y. M. (2024). YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2402.13616>

Yang, Z. (2022). Intelligent recognition of traffic signs based on improved YOLO v3 algorithm. *Mobile Information Systems*, 2022(1), 7877032.

Zhang, J., Huang, M., Jin, X., & Li, X. (2017). A real-time Chinese traffic sign detection algorithm based on modified YOLOv2. *Algorithms*, 10(4), 127.

Araştırma Makalesi

Yapay Zekâ ve Yeşil Ulaşım Birlikteliğinin Kente Etkileri

Berna Mumcu^{1,*}, H. Filiz Alkan Meşhur²

¹ Şehir ve Bölge Planlama ABD, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi,
Konya, Türkiye

² Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi,
Konya, Türkiye

*Correspondence: hfmeshur@ktun.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1529225

Özet: Bu çalışma, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonunun kentlerin sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimliliğe nasıl katkıda bulunduğunu incelemektedir. Ulaşımın enerji tüketimi ve karbon emisyonları üzerindeki etkileri dikkate alındığında, yapay zekâ destekli sistemler şehir içi trafiği yönetme, enerji verimliliğini artırma ve karbon salınımını azaltma potansiyeli sunmaktadır. Yapay zekâ tabanlı akıllı ulaşım sistemleri; trafik sıkışıklığını azaltmak, toplu taşımayı optimize etmek ve çevre dostu ulaşımı teşvik etmek amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmada, Türkiye ve dünya genelinden örnekler üzerinden bu entegrasyonun uygulama biçimleri ve kentlere etkileri analiz edilmiştir. Otonom araç teknolojileri ve akıllı trafik yönetim sistemleri sayesinde trafik kazalarının azalması, enerji tüketiminin optimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması sağlanabilmektedir. Yeşil ulaşım araçları, bireysel araç kullanımına alternatif oluşturarak kentlerin çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır. Bu sistemlerin etkin uygulanabilmesi için Yapay Zekâ Tabanlı Ulaşım Modeli geliştirilmiş ve sistemler arası etkileşim incelenmiştir. Bulgular, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonunun şehirleri daha çevreci, güvenli ve verimli kılabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, yeşil ulaşımın tarihçesi, teknolojik gelişmeler ve toplumsal farkındalığın gelecekteki önemi de ele alınmıştır. Makalenin sonuçları, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonu ile daha sürdürülebilir, verimli ve çevre dostu şehirler yaratılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, yeşil ulaşım, akıllı ulaşım sistemleri

The Impact of the Integration of Artificial Intelligence and Green Transportation on Cities

Abstract: This study examines how the integration of artificial intelligence (AI) and green transportation contributes to the sustainability, safety, and efficiency of cities. Considering the impact of transportation on energy consumption and carbon emissions, AI-supported systems offer potential for managing urban traffic, enhancing energy efficiency, and reducing carbon output. AI-based intelligent transportation systems aim to reduce traffic congestion, optimize public transportation, and promote the use of environmentally friendly transport options. This research analyses how this integration is implemented and its effects on cities through examples from Turkey and around the world. Autonomous vehicle technologies and intelligent traffic management systems contribute to reducing traffic accidents, optimizing energy consumption, and minimizing environmental impacts. Green transportation alternatives provide a substitute for individual vehicle use, thus supporting urban environmental sustainability. To ensure effective implementation, an AI-Based Transportation Model was developed, examining system interactions. Findings indicate that integrating AI and green transportation can make cities more eco-friendly, safer, and more efficient. Additionally, the study discusses the history of green transportation, technological advancements, and the growing importance of public awareness for the future. The results suggest that through AI and green transportation integration, it is possible to create more sustainable, efficient, and environmentally friendly cities.

Keywords: Artificial intelligence, green transportation, smart city

1. Giriş

Kentlerin karşılaştığı sürdürülebilirlik sorunları, gün geçtikçe artan nüfus ve hızla değişen teknolojilerle birlikte daha karmaşık hale gelmektedir. Özellikle ulaşımın gelişimi ile sebep olduğu enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının artması sürdürülebilirlik sorunlarının önemli bir parçası olmaktadır. 2022 yılında Covid-19 pandemisi kısıtlamalarına rağmen, ulaşım sektörü enerji tüketiminin yaklaşık %26'sını oluşturmuştur (Uluslararası Enerji Ajansı 2021). Uluslararası Enerji Ajansının tahminlerine göre bu durumda 2030 yılına kadar karbon emisyonlarının ulaşım sektöründeki payı %50'ye, 2050 yılına kadar %80'e ulaşması beklenmektedir. Karbon emisyonlarının yanında toplu taşıma sorunları, trafik sıkışıklığı, artan kaza sayıları, özel araç kullanımı, kentlerde toplu taşımaya yönelik sürdürülebilirlik politikalarının düzenlenmesine ve iyileştirilmesine yönelik çalışmaların hız kazanmasına neden olmaktadır (Grzelec & Hebel, 2016). Aynı zamanda, 'Yeşil Ulaşım' kavramı daha temiz ulaşımı hedeflemesi ile düşük karbonlu ve daha sürdürülebilir bir ulaşımı şekillendirmektedir. Gelişen teknolojiler ve değişen ulaşım sistemleri ile günümüzde birçok şehir bu bağlamda değişim göstermektedir. Bu sorunlara etkili çözümler bulmak amacıyla, akıllı ulaşım, yapay zekâ ve yeşil ulaşım konuları günümüzde araştırma ve uygulama odaklı çabaların merkezine yerleşmiştir. Yapılan araştırmalarda yeşil ulaşım ve yapay zekâ entegrasyonunun kentlerde karşılaşılan sürdürülebilirlik sorununa çözüm yolları sunacağı belirtilmektedir (Niestadt vd., 2019; Wu vd., 2021; Wang vd., 2019).

Geleneksel ulaşım modelleri, kentlerde trafik sıkışıklığına, hava kirliliğine ve enerji tüketimine neden olmaktadır. Yapay zekâ destekli yeşil ulaşım sistemleri, bu sorunlara etkili çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda, yapay zekânın trafik yönetimi, enerji verimliliği ve ulaşım araçları gibi alanlarda nasıl kullanılabileceğini anlamak, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olabilmektedir. Yeşil ulaşımın temel hedeflerinden biri çevresel etkileri en aza indirirken enerji verimliliğini artırmaktır. Yapay zekâ trafik akışını optimize etme yeteneği ile şehir içi trafiği azaltabilmekte ve böylece karbon emisyonlarını düşürebilmektedir. Aynı zamanda akıllı sensörler ve veri analitiği sayesinde araç yakıt tüketimini analiz ederek enerji tüketimini optimize edebilmektedir. Akıllı ulaşım sistemlerinin gelişmesi ve otonom bağlantılı araçların yaygınlaşması ile daha güvenli, sürdürülebilir ve verimli ulaşım sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın kullanıcı adaptasyonuna ve kentler üzerindeki etkilerine odaklanılmaktadır. Yapay zekâ destekli yeşil ulaşım sistemlerinin kent yaşamını nasıl dönüştürebileceği ve sürdürülebilirlik hedeflerine nasıl katkı sağlayabileceği, dünyadan ve Türkiye'den örneklerle incelenmektedir. Çalışma, nüfus artışına rağmen sürdürülebilir, çevre dostu, hızlı ve etkili ulaşımı sağlamada yeşil ulaşımın rolünü, bu sürecin teknolojik gelişmelerle entegrasyonunu, pratikteki uygulamalarını ve gelecekteki potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Kavramsal ve Kuramsal Arka Plan

Bu bölümde yeşil ulaşım, yapay zekâ ve akıllı ulaşım sistemlerinin teorik temelleri ele alınarak bu kavramların etkileşimi değerlendirilmiştir. Nüfus artışı ve kentleşmenin getirdiği sürdürülebilir, güvenli ve verimli ulaşım gerekliliği ile birlikte, yeşil ulaşım çevresel etkileri azaltırken kaynak verimliliğini teşvik eden bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Yapay zekâ, trafik yönetimi, güzergâh planlaması ve gerçek zamanlı veri analizinde etkin bir rol oynarken, akıllı ulaşım sistemleri, ulaşım altyapılarını optimize ederek trafik akışını iyileştirme, yol güvenliğini artırma ve enerji tüketimini azaltma amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler yapay zekâ algoritmaları ve büyük veri analiziyle desteklenerek, etkili ulaşım çözümleri sunmaktadır. Akıllı ulaşımın bir parçası olarak otonom ve bağlantılı araç teknolojileri, yapay zekâ ile kendi kendine hareket edebilen ve altyapı ile etkileşim sağlayan sistemler üzerinden enerji tasarrufu ve trafik düzenlemesi sağlamaktadır. Bu kavramlar, sürdürülebilir ulaşım çözümlerini destekleyen yenilikçi yaklaşımlar olarak araştırmanın odağındaki sürdürülebilir, güvenli ve verimli ulaşım politikalarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

2.1. Yeşil ulaşım ve yapay zekâ kavramları

Wann Ming (2019)'e göre yeşil ulaşım, kaynakların verimli ve etkili bir şekilde kullanılması, elektrikli araçlar, akıllı ulaşım sistemleri, toplu taşıma, bisiklet ve yürüyüş yolları dahil olmak üzere daha çevreye duyarlı ve bilinçli bir ulaşım sistemini ifade etmektedir. Björklund (2011) yeşil ulaşımı, "mevcut ulaşım

hizmetlerine kıyasla insan sağlığına ve çevreye daha az olumsuz etkisi olan ulaşım hizmeti” olarak tanımlanmaktadır. Wang vd., (2019) trafik sıkışıklığının hafifletilmesi, çevre kirliliğinin azaltılması, sosyal eşitliğin teşvik edilmesi ve kaynakların rasyonel bir şekilde kullanılması gibi kentsel ulaşımın “yeşilliğini” vurgulamaktadır. Yeşil ulaşım bireylerin ulaşım ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde düşük maliyetli ulaşım sağlayarak, trafik verimliliğini artırarak sürdürülebilir bir ulaşım sağlamaktır. (Maheshwari vd., 2016). Yeşil ulaşım yoluyla uygulanan ulaşım, kentsel bir ortamda yaşamın sürdürülebilirliğini varsayar (Todorovic vd., 2019).

Araştırmalar, bireylerin yeşil ulaşımı benimseme eğiliminin bu sistemin gelişimi ve uzun vadeli başarısı için kritik olduğunu, bu eğilimin düşük karbonlu bir topluma geçişi hızlandığını göstermektedir (Hazen vd., 2016). Yeşil ulaşım, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi yaşam ve ekosistemleri ciddi biçimde etkileyen sorunların azaltılmasında önemli bir araçtır; bu nedenle bireylerin yeşil ulaşımı tercih etmesi gerekmektedir (Senin vd., 2021). Ancak, bireylerin çoğu özel araç kullanımına alternatif olarak yeşil ulaşım türlerine geçiş yapmamaktadır (Chen vd., 2016). Bu bağlamda, politika yapımcılar ve ulaşım sektöründeki işletmecilerin, bireylerin yeşil ulaşımı benimsemelerini etkileyen faktörleri belirlemesi önemlidir (Nimako & Winneba, 2012). Enerji tüketimini azaltmak ve ulaşım verimliliğini artırmak amacıyla, yeşil ulaşım çalışmalarında hızlı bir artış yaşanmakta ve bu alandaki en güncel modeller insan yaşamının çeşitli alanlarına uygulanmaktadır (Jiang vd., 2021).

Yeşil ulaşım tarihçesi, insanların çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım seçeneklerine yönelimini özetlemektedir. En eski sürdürülebilir ulaşım biçimi, ilk ulaşım aracı olan yürüyüştür (Transport for London, 2009). 19. yüzyıl sonlarına gelindiğinde elektrikli araçlar ve ilk hibrit modeller geliştirilmiş; bu araçlar, dönemin teknolojik kısıtlamalarına rağmen, benzinli araçlara çevre dostu alternatifler olarak öne çıkmıştır. 1973 ve 1979’daki enerji krizleri, yüksek yakıt maliyetleri ve sınırlı kaynak erişimi nedeniyle toplu ve sürdürülebilir ulaşım arayışlarını hızlandırmıştır (Url-1). Bu dönemde, elektrikli ve alternatif yakıtlı araçlara yönelik araştırmalar ivme kazanmıştır. 2000’lerde elektrikli araçlar ve hibrit teknolojilerde önemli gelişmeler kaydedilmiş; birçok ülke vergi teşvikleri ve düzenlemelerle bu teknolojilerin benimsenmesini desteklemiştir. 2010’larda elektrikli araç pazarı hızla büyürken, Tesla gibi firmalar bu araçların yaygınlaşmasına öncülük etmiştir. Ayrıca şehirler, bisiklet yolları ve toplu taşıma gibi çevre dostu ulaşım altyapılarına yönelik çalışmaları artırmıştır. 2020’ler ve sonrasında ise yeşil ulaşım, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir öncelik haline gelmiştir. Elektrikli araçlar, otonom ulaşım, paylaşımlı araçlar ve akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu, ulaşımın geleceğini şekillendirmektedir. Paris Antlaşması gibi küresel anlaşmalarla birlikte, birçok ülke ve şehir karbon salımlarını azaltmayı ve sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmeyi hedeflemektedir. Artan teknolojik gelişmeler ve toplumsal bilinç, yeşil ulaşımın önemini daha da arttıracaktır.

Yapay zekâ, insan zekâsını taklit etmek veya geliştirmek amacıyla bilgisayar sistemlerini kullanarak akıl yürütme ve deneyime dayalı öğrenme süreçlerini ifade eder. Kushwaha ve arkadaşları (2022), yapay zekânın “akıllı” olmasını sağlayan temel özelliğin, analizler ve çıktılardan elde edilen verileri kullanarak genel süreçleri güncelleme veya iyileştirme yeteneği olduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda, yapay zekâ, analitik, sezgisel ve empatik zekâyı ölçen çeşitli görevleri yerine getirerek insan işlevlerini ifade etme ve insan zekâsının boyutlarını gösterme amacı taşımaktadır (Kushwaha vd., 2022; Jiang vd., 2017). Acemoğlu ve Pascual (2018) ise yapay zekâyı “bir makinenin akıllı insan davranışını taklit etme yeteneği” veya “bir ajanın geniş bir çevrede hedeflere ulaşma potansiyeli” olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlar, bilgisayarların anlam kavramlarını çözümlenme, bilgiyi işleme ve çeşitli görevleri yerine getirme yeteneklerinin temel paradigmasını oluşturmaktadır.

Günümüzde yapay zekâ, ekonomi, sağlık, eğitim, planlama ve ulaşım gibi çeşitli sektörlerde önemli katkılar sağlamaktadır. Kentlerin büyümesi (örneğin, kent nüfus artışı ve bireysel araç kullanımındaki artış) ve teknolojinin gelişimi (otonom araçlar, akıllı ulaşım sistemleri, büyük veri analitiği) ile birlikte yapay zekâ, ulaşım alanında da öne çıkmaktadır. Yapay zekâ algoritmaları, trafik hareketleri, ulaşım modları ve enerji kullanımlarıyla ilgili geniş veri setleri oluşturmakta ve bu veri setlerinin analizi ile daha etkili ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri geliştirmektedir (Nishant vd., 2020).

Yeşil ulaşımın dönüşümünde, yapay zekânın adaptasyon ve öğrenme yeteneği kritik bir rol oynamaktadır. Yapay zekâ, çevresel koşullara ve kullanıcı davranışlarına hızlı bir şekilde uyum sağlayarak, ulaşım sistemlerini sürekli olarak iyileştirme potansiyeli sunmaktadır. Otonom araçlar ve

akıllı ulaşım sistemleri üzerindeki etkisi de önemli olup, bu araçlar yeşil ulaşım anlayışı çerçevesinde karbon salınımını azaltma, enerji tasarrufu sağlama ve güvenli sürüşü teşvik etme amacıyla yaygınlaşmaktadır.

Yapay zekâ, özellikle 2000'lerin sonlarından itibaren hız kazanarak günümüzde önemli bir gelişim süreci içerisinde. Suman (2021), "Yapay zekâ, bilim kurguda bir hayal gücü olmaktan çıkıp modern teknolojinin her yerinde bir gerçeklik haline gelmek için uzun bir yol kat etti" ifadesiyle yapay zekânın tarihsel gelişimini vurgulamaktadır. 1943 yılında, II. Dünya Savaşı sırasında kriptoloji ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilen elektromekanik cihazlar, bilgisayar bilimi ve yapay zekâ kavramlarının doğuşuna zemin hazırlamıştır. 1950 yılında Alan Turing, "Makineler düşünebilir mi?" sorusunu ortaya atarak makine zekâsı tartışmalarını başlatmıştır (Url-2). Bu prensipten yola çıkarak bilgisayar işlemcileri, insan zekâsından ilham alarak gelişim göstermiştir. 1970 ve 1980'lerde bilgi tabanlı uzman sistemler popüler hale gelirken, 1980'lerin sonlarına gelindiğinde yapay zekâ ilk kez trafik kontrol sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1990'larda akıllı ulaşım sistemlerinin gelişimiyle birlikte yapay zekâ teknolojileri ulaşım sistemlerine daha fazla entegre edilmiştir. 2000 yılına kadar yapay sinir ağları ve makine öğrenimi gibi yöntemlerle desteklenen yapay zekâ, örüntü tanıma ve tahmin yeteneklerini geliştirmek için çeşitli algoritmalara sahip olmuştur.

2000'lerin ortalarında araçlar ve ulaşım altyapısında kullanılan sensör sayısındaki artış, yapay zekânın daha karmaşık ve gerçek zamanlı kararlar alabilmesine olanak tanımıştır. Akıllı park sistemleri, trafik tahmin modelleri ve araç trafiği yönetimi gibi uygulamalarda yapay zekânın kullanımı yaygınlaşmıştır. 2010'lu yıllarda otonom araç teknolojilerinin yükselişi, yapay zekânın önemini daha da artırmıştır (Url-2). Otonom araçlar, çevresel koşullara uyum sağlama, trafikle etkileşim kurma ve güvenli sürüş sağlama konusunda kilit bir rol oynamaktadır (Url-3). Sonuç olarak, yapay zekâ, ulaşım sistemlerinde geçmişten günümüze büyük bir evrim geçirerek, ulaşımın daha güvenli, verimli ve çevre dostu olmasını sağlamak adına önemli katkılarda bulunmuştur.

2.2. Akıllı ulaşım sistemleri

Akıllı ulaşım sistemleri, modern teknolojilerin entegrasyonu ile ulaşımın daha etkili, güvenli, sürdürülebilir ve kullanıcı dostu hale getirilmesini amaçlamaktadır. Bu sistemler, genellikle bilgi ve iletişim teknolojileri ile donatılmış altyapı, araçlar ve uygulamalardan oluşmaktadır. Akıllı ulaşım sistemleri, trafik yönetimi, yol güvenliği, toplu taşıma, otopark yönetimi ve yolcular arası iletişim gibi çeşitli ulaşım unsurlarını entegre ederek genel ulaşım deneyimini iyileştirmektedir (Url-4).

Artan nüfus ile kalabalıklaşan kentlerde ulaşım, önemli bir sorun haline gelmiştir. Tek başına sürüş eğilimi, II. Dünya Savaşı sonrası dönemde, özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve diğer ülkelerde hızla yaygınlaşmıştır (Ferguson, 1997). 1973 petrol krizinin patlak vermesi, ulaşımında önemli değişikliklere yol açmıştır. Bu kriz, Hollanda'da bisiklet kullanımının teşvik edilmesine (Rietveld & Daniel, 2004), Amerika Birleşik Devletleri'nde tek başına araç kullanımının caydırılmasına (Ferguson, 1997) ve daha yakıt tasarruflu otomobillerin üretimini artırılmasına neden olmuştur (Bonilla, 2009). Takip eden on yıllar boyunca, hız, trafik sıkışıklığı, kazalar ve iklim değişikliği gibi faktörler, günümüzde akıllı ulaşım sistemleri aracılığıyla ulaşımında yeniliklerin devam etmesini sağlamaktadır. Bu sistemler, sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirerek, trafik akışını optimize etmeye ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Kullandığımız ulaşım araçları, fosil yakıt kaynaklı CO2 emisyonlarının artışıyla önemli bir rol oynamaktadır. Bu araçlar, kentlerde trafik sorunlarına, gürültü kirliliğine, ulaşım zorluklarına ve sosyo-ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, Covid-19 pandemisi sırasında uygulanan kısıtlamalar, ulaşım talebini en düşük seviyeye indirerek hava kirliliğinin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamıştır (WMO, 2020). Bu durum, ulaşım sektöründeki emisyon artışını tersine çevirmiştir. Bu eğilimin devamlılığını sağlamak, düşük karbonlu taşıma modelleri ve bu modellere yönelik yatırım politikaları ile mümkün olacaktır. Enerji verimliliğini artıran teknolojiler ve bu hedeflere yönelik programların geliştirilmesi gerekmektedir (Ebinger & Vandycke, 2015). Günümüzde Türkiye de dahil birçok ülke, iklim değişikliği ile mücadele ve sıfır karbon emisyonu hedeflerine ulaşmak için stratejik yöntemler aramaktadır. Bu stratejiler, yeşil ulaşım türlerine geçişi ve fosil yakıt kullanımını kademeli olarak azaltmayı amaçlamaktadır (UN, 2021).

Bu farkındalık, gelişen teknolojiler ile akıllı ulaşım sistemlerinin kullanımını teşvik etmekte ve ulaşım sektöründe önemli değişikliklere yol açmaktadır. Akıllı ulaşım sistemleri, çeşitli teknolojilerin entegrasyonu ile oluşturulmuş sistemlerdir ve ulaşımın daha etkili, güvenli ve sürdürülebilir olmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Bu sistemler arasında trafik yönetim sistemleri, toplu taşıma sistemleri, otopark yönetim sistemleri, yol güvenliği sistemleri, bisiklet ve yaya ulaşım sistemleri ile bilgi ve iletişim teknolojileri yer almaktadır (Ural-4). Akıllı ulaşım sistemleri, kentlere entegre edilerek, şehirlerin ve bölgelerin ulaşım altyapısını daha akıllı hale getirmeye yönelik kapsamlı çözümler sunmayı hedeflemekte ve günümüzdeki birçok soruna çözüm bulmayı amaçlamaktadır.

2.3. Yapay zekâ destekli ulaşım sistemleri

Yapay zekâ, akıllı ulaşım sistemleriyle entegre edilerek kentler ve kullanıcılar için daha gelişmiş ulaşım olanakları sunmaktadır. Akıllı ulaşım sistemleri, bilgi tabanlı yapıları sayesinde problemleri daha geniş bir perspektiften ele alırken, yapay zekâ insan zekâsını taklit eden bir uygulama alanı olarak devreye girmektedir. Bu süreçte, algoritmalar ve çıkarım mekanizmaları bir araya gelerek bilgiyi işlemektedir (Kastal & Köse, 2009).

Akıllı ulaşım sistemleri, taşımacılık ve trafik yönetimine yönelik yenilikçi hizmetler sunmayı ve kullanıcıların güvenliğini artırmayı hedefleyen ileri düzey uygulamalar olarak tanımlanmaktadır (European Parliament Council, 2014). Bu sistemler, kullanıcılara gelişmiş, konforlu ve güvenli toplu taşıma araçları sağlar. Ayrıca, bireysel araç kullanımı açısından güvenli sürüş, çevre dostu yakıt kullanımı ve zaman tasarrufu gibi olanaklar sunar. Bu bağlamda, trafik yönetimi, otomasyonu, güzergâh planlaması ve verimli ulaşım gibi karmaşık problemlerin çözümünde yapay zekânın gerçek zamanlı veri analizi ve öngörülse modelleri kullanılmaktadır. Bu sayede, trafik akışının optimize edilmesi ve ulaşım süreçlerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

2.3.1. Trafik yönetimi ve optimizasyonu

Günümüzde şehirlerin hızla büyümesi ve nüfusun artmasıyla birlikte, ulaşım sistemlerindeki etkinlik ve verimlilik önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu bağlamda, trafik yönetiminde daha sistematik ve verimli sonuçlar elde etmek amacıyla yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır (Tektaş vd., 2002). Yapay zekâ, trafik verilerini gerçek zamanlı olarak analiz ederek trafik sıkışıklığını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Akıllı trafik sinyalleri, yolcuların seyahat sürelerini kısaltırken trafik akışını optimize etmektedir.

Yapay zekâ destekli trafik yönetim sistemleri, trafik verilerini analiz ederek trafik akışını daha iyi tahmin etmekte ve sıkışıklığın olduğu bölgelere alternatif rotalar önererek yolculuk sürelerini kısaltabilmektedir (Sayed vd., 2023). Trafiğin kontrolü, mevcut kavşaklar, ana bağlantı hatları ve trafik yoğunluğu denetimi ile sağlanmaktadır. Bu bağlamda, hızlı ulaşım, doğru ve planlı altyapı sistemlerinin kullanılması ve ışıklarda bekleme sürelerinin azaltılması gibi trafik sorunlarına çözüm sunulmaktadır.

Bilinen mevcut optimizasyon teknikleri ile çözülemeyen bu tür sorunlar için yapay zekâ teknikleri kullanılmaktadır (Tektaş vd., 2002). Tektaş ve diğerlerine (2002) göre trafik alanında çözülmesi gereken sorunlar şunlardır:

- Kavşak optimizasyonu
- Trafik sıkışıklığı
- Rota seçimi ve sürücünün bilgilendirilmesi
- Ulaşım süresinin tahmini

Bu sorunların çözülmesi ve optimizasyonu sağlamak için yapay zekâ, çeşitli alanlarda etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları ve sensörler kullanılarak trafik ışıklarının kontrolü gerçekleştirilmiş, bu sayede bekleme süreleri kısalmış ve daha verimli bir ulaşım sağlanmıştır. Bekleme sürelerinin azaltılmasının yanı sıra, yol planlaması ve rota optimizasyonu sayesinde en kısa mesafe rotaları belirlenmiştir (Akgüngör & Doğan, 2009). Trafik yönetiminin gelişiminde, başlangıçta sabit-zamanlı kontrol sistemleri kullanılarak eylemler, tarihsel deneyimlere dayanarak önceden tanımlanmıştır. Ancak, sensörlerin entegrasyonu ile birlikte, sensörlerden gelen verilerin işlenmesi, anında tepki veren tepkisel kontrol sistemlerinin kullanımını artırmıştır (Vallati, 2006). Bu yaklaşım, trafik akışını daha dinamik bir şekilde yönetmeyi mümkün kılarak, anlık durum değişikliklerine hızlı

bir şekilde yanıt verilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, trafik yoğunluğu ve bekleme süreleri minimize edilmekte, ulaşım sistemlerinin genel verimliliği artırılmaktadır.

Genel bir perspektiften bakıldığında, trafik modellerinin üç ana sınıfı vardır; mikroskopik, makroskopik ve mezoskopik modeller (Hoogendoorn & Bovy, 2001). Mikroskopik modeller detaylı ve her aracı bireysel olarak tanımlamaktadır. Genellikle daha büyük ağların küçük bölümlerini modellemede kullanılırlar. Makroskopik modeller daha geniş alanları işleyebilir, gruplar halindeki araçların ortalama hareketlerini algılamaktadır. Mezoskopik modeller diğer iki modellerin özelliklerini birleştirir. (Hoogendoorn & Bovy, 2001).

Sonuç olarak, yapay zekâ destekli ulaşım sistemleri, trafik yönetimi ve optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, şehirlerin ulaşım altyapısını daha sürdürülebilir, verimli ve güvenli bir şekilde yönetme potansiyeline sahiptir. Yapay zekâ teknolojisinin bu alandaki ilerlemeleri, gelecekte şehirlerin daha akıllı ve etkili ulaşım sistemlerine sahip olmalarını sağlayabilir. Yapılan araştırmalara göre (Treiber & Kesting, 2013; Hoogendoorn & Bovy, 2001; Vallati, 2006) yapay zekânın trafik yönetimi ve optimizasyonuna sağladığı katkılar Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Yapay zekânın trafik yönetimi ve optimizasyonuna yarar sağladığı alanlar

Trafik Yönetimi	Yapay zekâ destekli ulaşım sistemleri, analitik düşünebilmesiyle gerçek zamanlı veri analizi yaparak trafik yoğunluğunu, kazaları ve diğer olumsuz durumları izlemektedir. Trafik ışıklarının otomatik olarak ayarlanmasını ve trafik akışının yönetilmesini sağlamaktadır.
Akıllı Trafik Işıkları	Akıllı trafik ışıkları anlık trafik durumunu değerlendirerek yeşil ışık sürelerini dinamik bir şekilde ayarlamaktadırlar. Yoğun bölgelerde trafik akışını optimize ederek bekleme sürelerini azaltmakta ve genel ulaşım verimliliğini artırmaktadır.
Trafiği Tahmin Etme ve Yönlendirme	Yapay zekâ geçmiş verileri ve gerçek zamanlı trafik bilgilerini kullanarak trafik akışını tahmin edebilmekte ve kullanıcılara verimli rota oluşturabilmektedir.
Veri Toplama ve Analizi	Yapay zekâ, büyük veri setlerini işleyerek gelecekteki ulaşım ihtiyaçlarını tahmin edebilmekte, altyapı projelerini optimize edebilmekte ve şehir planlamasında daha stratejik kararlar alınmasına yardımcı olabilmektedir.

2.3.2. Güzergâh planlanması ve verimli ulaşım

Günümüzde ulaşım sistemleri giderek karmaşık hale gelmekte, bu da ulaşım planlaması ve yönetimini zorlaştırmaktadır. Kullanıcılar için bu durum, verimsiz ve karmaşık bir ulaşım deneyimi anlamına gelmektedir. Ancak, yapay zekâ algoritmalarının gelişimi, bu zorlukları aşmak ve daha verimli ulaşım sistemleri oluşturmak için yeni fırsatlar sunmaktadır.

Yapay zekâ destekli güzergâh planlaması, trafik yoğunluğunu, sürüş süresini ve harcanan yakıt oranını analiz ederek en etkili rota planlarını belirlemeye yardımcı olmaktadır (Url-5). Bu algoritmalar, gerçek zamanlı verilere dayanarak güzergâhları dinamik bir şekilde hazırlamakta ve trafik sıkışıklığına anında tepki verebilmektedir. Böylece, kullanıcılar zamanlarını daha etkili bir şekilde yönetebilir ve ulaşımını daha düzenli hale getirebilirler (Url-5). Ayrıca, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi faktörler de göz önünde bulundurularak güzergâhlar belirlenmektedir. Bu

yaklaşım, toplu taşıma sistemlerini optimize etme ve karbon emisyonlarını azaltma potansiyelini artırmaktadır. Bu nedenle, yapay zekâ destekli güzergâh planlaması, modern ulaşım sistemlerinin daha sürdürülebilir ve etkili hale gelmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Yapay zekâ ile yapılan güzergâh planlaması, büyük veri analitiği, trafik sıkışıklığı, hava durumu, bireysel kullanıcı ihtiyaçları ve çevre dostu yakıt tüketimi gibi birçok faktörle desteklenerek geleneksel güzergâh planlamasının sunamadığı imkanları sunmaktadır. Bu unsurların entegrasyonu, verimli ulaşımı sağlamak ve ulaşım sistemlerindeki sorunları azaltmaktadır (Url-6). Wilbur vd. (2023) tarafından belirtildiği gibi, verimli ulaşım sistemleri, geniş coğrafi alanlar ve hesaplama açısından karmaşık durumlarda gerçek zamanlı kararlar almayı gerektirmektedir. Geleneksel analitik yöntemlerin bu zorlukları aşmakta yetersiz kalması nedeniyle, toplu taşıma acenteleri, büyük ölçekli verilere dayalı optimizasyonu mümkün kılan hesaplama yaklaşımlarına yönelmektedir.

Özetle, yapay zekâ destekli güzergâh planlaması, ulaşım sistemlerini daha akıllı, verimli ve sürdürülebilir hale getirmek için önemli bir araçtır. Bu teknolojinin kullanımı, kullanıcı deneyimini artırmakla kalmayıp, toplu taşıma sistemlerini daha etkili hale getirerek şehirlerin ulaşım sorunlarına çözümler sunma potansiyeli taşımaktadır.

2.3.3. Gerçek zamanlı veri analizi ve öngörüselleme

Veri biliminde yaygın olarak kullanılan tahmine dayalı analitik, geçmiş verileri yorumlayarak geleceğe yönelik tahminlerde bulunmayı amaçlamaktadır. Bu süreç, veri madenciliği, modelleme, makine öğrenimi, yapay zekâ ve istatistik gibi teknikleri içerir (Chen vd., 2023). Akıllı ulaşım sistemleri, çeşitli sensörlerden elde edilen büyük veri setlerini işleyerek gerçek zamanlı durum analizi gerçekleştirebilmektedir. Trafik yoğunluğu, hava durumu, yol durumu ve araç konumu gibi veriler, sistemlerin anlık olarak şehir içindeki ulaşım durumunu anlamalarına olanak tanır. Bu analizler, trafik akışını yönlendirmek, anlık durum bildirimleri oluşturmak ve trafiği optimize etmek gibi pek çok ulaşım alanında kullanılmaktadır (Chen vd., 2023).

Öngörüselleme, geçmiş verilerin analizi ve gelecekteki olayların tahmini için önemli bir araçtır. Akıllı ulaşım sistemleri, bu modelleme tekniklerini kullanarak gelecekteki trafik durumlarını tahmin edebilmektedir. Makine öğrenimi algoritmaları, büyük veri kümeleri üzerinde eğitilerek olaylar ve diğer değişkenlerle ilişkilendirilebilir. Bu sayede, trafik yönetimi ve ulaşım planlaması alanında daha etkili kararlar alınması sağlanmaktadır (Url-7).

Gerçek zamanlı veri analizi ve öngörüselleme sayesinde akıllı ulaşım sistemleri, şehir trafiğini daha etkili bir şekilde yönetmekte, ulaşım planlamasını optimize etmekte ve kamu taşıma sistemlerini geliştirmektedir. Bu teknolojik yaklaşımlar, şehirlerin sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimlilik hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmaktadır.

2.4. Akıllı ulaşım araçları otonom ve bağlantılı araçlar

Otonom ve bağlantılı araçlar, sürücüsüz, güvenli ve verimli ulaşım sağlamak için çeşitli teknolojileri bir arada barındırmaktadır (Lu vd., 2014). Bağlantı mekanizmaları, araçlar ile altyapı arasındaki iletişimi ve konum, hareket hızı gibi verilerin paylaşımını destekler. Ancak, bu sistemlerin hayata geçirilebilmesi için uygun bir altyapının hazırlanması ve kurulması gerekmektedir. Ayrıca, önemli finansal ve organizasyonel yatırımlar da gerektirir (Sussmann, 2005).

Otonom araçlar, kendi başlarına hareket edebilen ve çevrelerini algılamak için çeşitli sensörler ile yapay zekâ algoritmaları kullanan sürücüsüz araçlardır. Bu araçlar genellikle otonom otomobiller, kamyonlar, otobüsler, dronlar veya insansız hava araçları şeklinde sınıflandırılır. Otonom araçların, trafiği düzenleme, kazaları azaltma ve insanlara daha güvenli bir ulaşım seçeneği sunma gibi avantajları bulunmaktadır (Url-8). Bağlantılı araçlar ise, birbirleriyle ve çevreleriyle iletişim kurabilen araçlardır. Bu araçlar, bir araçtan diğerine, araçtan altyapıya veya araç içindeki cihazlardan dış dünyaya veri transferi yapabilmektedir. Bağlantılı araçlar, trafik akışını iyileştirme, kazaları önleme, araç bakımını optimize etme ve sürücülere daha iyi bilgi sağlama gibi faydalar sunmaktadır. Bu nedenle, otonom ve bağlantılı araçlar birlikte düşünülmekte ve bu birliktelik daha etkili ve güvenli bir ulaşım sistemi oluşturmaktadır (Anonim, 2022).

ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın talebi üzerine 2001 yılında yapılan bir incelemede, 723 kaza vakası analiz edilmiştir ve bu kazaların %99'unun insan hatasından kaynaklandığı belirlenmiştir (Page vd., 2001). Bu bulgu doğrultusunda ulaştırma yatırımları, yol yapımı ve bakımını tamamlayıcı teknolojilere yönlendirilmiştir. Geleneksel olarak, ulaştırma altyapıları genellikle yeni yolların inşası ve mevcut yolların yenilenmesi gibi fiziksel yatırımlarla sınırlı düşünülürken, gelecekte bu sistemlerin teknolojiye dayalı çözümlerle şekilleneceği anlaşılmaktadır.

Farklı teknolojilerin entegre edildiği bir ağ yapısı, ulaşım sistemlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Akıllı trafik yönetim sistemleri, veri analitiği ve bağlantılı araç teknolojileri, ulaşım altyapısının modernizasyonunda önemli unsurlardır (Ezell, 2010). Bu sayede, otonom ve bağlantılı araçlar kaza oranlarını azaltırken, toplu taşıma araçlarının kullanımı hem daha verimli hem de daha güvenli hale gelmektedir. Bu durum, halkın toplu taşımaya olan eğilimini artırarak sürdürülebilir ulaşımın gelişimine katkı sağlamaktadır.

2.4.1. Otonom araç teknolojisinin gelişimi

Otomobil üretiminin tarihi, 1885 yılında ilk seri otomobilin üretilmesiyle başlamıştır (Singh & Saini, 2021). Bu araçlar, içten yanmalı motorlarla fosil yakıt kullanarak çalışmaktaydı. 1920'lerde, radyo teknolojisi ile donatılan "Linriccan Harikası" adı verilen araçlar geliştirilmiştir. Ardından, 1939 yılında saklı devrelerle çalışan elektrikli araçlar piyasaya sürülmüştür (Singh & Saini, 2021). 1980'lerden itibaren, sensörler ve yapay zekâ araçlara entegre edilmeye başlanmıştır; bu dönemin örneklerinden biri, 1980 yılında Mercedes-Benz tarafından üretilen görüş yönlendirmeli robotik minibüstür.

Otonom araçların etkin kullanımı, çeşitli disiplinlerden gelen teknolojilerin etkili bir şekilde entegrasyonunu gerektirmektedir. Teknoloji geliştikçe, 2015 yılında Tesla'nın piyasaya sürdüğü araçlar, üst düzey otonom teknolojiyi kullanan ilk araçlar arasında yer almıştır (Anonim, 2023). Otonom araç teknolojisinin gelişimini takip edebilmek için SAE International, bu araçları belirli seviyelere göre sınıflandırma kararı almıştır. 0 numaralı araçlar otomasyona sahip değilken, 5 numaralı araçlar tam otomasyona sahip araçları ifade etmektedir. Tesla'nın AutoPilot özelliği 2. seviyeye, Audi'nin teknolojisi ise 3. seviyeye karşılık gelmektedir (Yiğit vd., 2020). Bu gelişmeler, ülkeler arasında rekabete yol açmaktadır. Birleşik Krallık'ta 2018 yılında otonom araçları test etmek için sürüş yasaları gözden geçirilmiştir. ABD'de ise otonom araçların test edilmesi ve çalıştırılmasıyla ilgili mevzuatlar geliştirilme aşamasındadır (Url-9). Otonom araçların gelişimi hızla devam ederken, sektördeki tahminlere göre 2040 yılına kadar otomotiv endüstrisinde rekabet avantajı sağlayan temel faktörler bu araçlar olacaktır (Accenture Digital, 2023).

2.4.2. Elektrikli araçlar ve çevre dostu ulaşım

Elektrikli araçlar, bir toplayıcı sistemden sağlanan elektrikle veya otomatik olarak bir pil ile çalışabilen araçlar olarak tanımlanmaktadır (Url-2). Bu araçlar, egzoz dumanı ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Tseng & Wu, 2012). Tamamen elektrikli modeller, karbondioksit (CO₂) ve azot oksit (NO_x) emisyonları olmadan sürüş imkânı sunarak, CO₂ nötr mobiliteye geçişte önemli bir adım teşkil etmektedir. 2020 yılında Consumer Report tarafından ABD'de yapılan anketler, elektrikli araçların tercih edildiğini göstermektedir (Parkinson vd., 2017). Bu durum, daha temiz bir çevre ve sağlıklı bir yaşam alanı sağlamaktadır. Elektrikli araçlar, otonom sistemlerle birlikte günümüzde yeşil ulaşımın temelini oluşturmaktadır.

Elektrikli araçlar, hava kirliliğinin yanı sıra içten yanmalı araçlara göre daha az enerji tüketmektedir bu da daha uzun mesafeler kat etmeye imkân tanımaktadır. Ayrıca, şarj istasyonlarının erişilebilirliği, kullanıcılar için pratik bir avantaj sunarak tercih oranlarını artırmaktadır. Bağlantılı araç sistemlerinde, aracın sürücüsünün davranışlarını ve çevresini algılayarak yapay zekâ algoritmaları ile entegrasyonu hedeflenmektedir. Bu sistemler, araç güvenliğini artırmakta; otomatik kaza algılama, kaza sonrası sağlık kuruluşlarına bildirim yapma ve otomatik arıza bildirimleri gibi işlevsel teknolojiler sunmaktadır (Url-10).

Gelişen teknolojiler doğal kaynakları hızla tüketmekte, bu durum sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir. Elektrikli araçlar, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayan sürdürülebilir bir ulaşım imkânı sunan yenilikçi bir yaklaşımdır. Sürüş ve araç verileri yapay zekâ ile işlenerek hem enerji

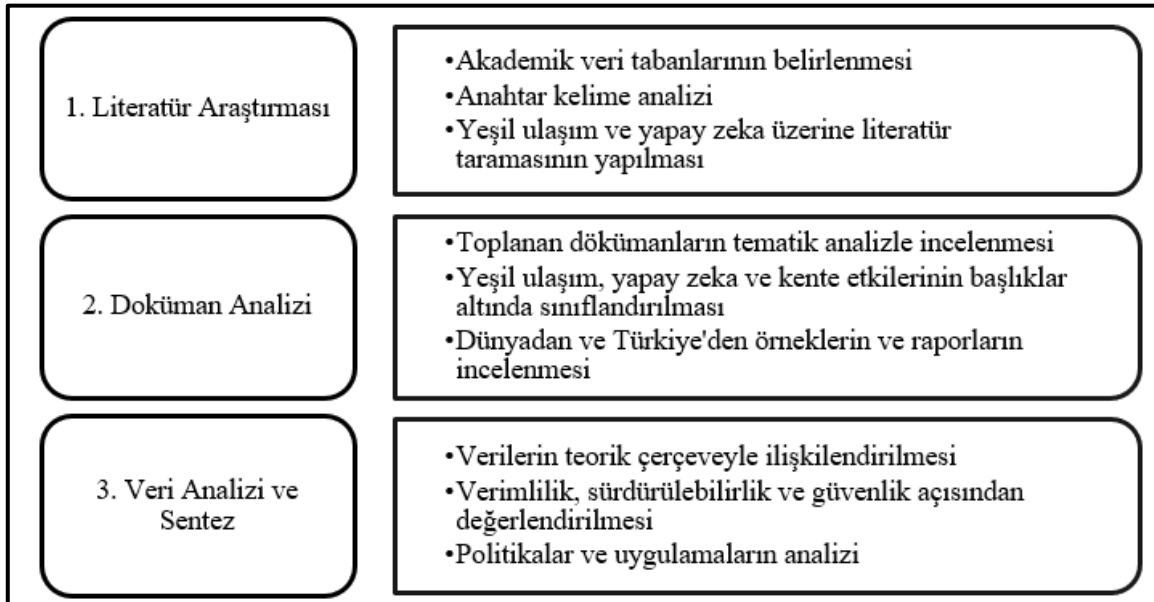
verimliliği hem de güvenilir ulaşım imkânı sağlanmaktadır (Anonim, 2022). Çevre dostu enerji sağlayan bu araçlar, yeşil ulaşımın ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır.

2.4.3. Bağlantılı araçlar ve ulaşım altyapısı

Bağlantılı araçlar, daha önce belirtildiği gibi, sürücü, diğer araçlar ve yol ile etkileşim kurabilen sistemlerdir. Araçların birbirleriyle veya yol ile iletişim kurabilmesi için farklı iletişim mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde bu iletişim mekanizmaları üç geniş sınıflamada toplanmaktadır: araçtan araca iletişim (V2V), araçtan altyapıya iletişim (V2I) ve bulut iletişimi (Parkinson vd., 2017). Bu iletişim sürecinde dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır. Yetersiz ulaşım altyapısı, bu faktörlerin etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Otonom araçların yola uygun şekilde yönlendirilmesi için, yol işaretlerinin varlığı kritik öneme sahiptir. Tünel gibi kapalı alanlarda ise iletişim ve internet bağlantısının kesilmemesi için ek yapılar gereklidir (Lawson, 2018). Şerit genişlikleri, otonom sürüş sistemlerinin etkili bir şekilde çalışabilmesi için önemlidir. Ancak, büyük araçlar (örneğin kamyon ve otobüs) için şeritlerin boyutları buna göre ayarlanmalıdır (Taştan & Kaymaz, 2021). Otonom araçlar arasında koordinasyon sağlanabilirse, gelecekte trafik ışıklarına olan ihtiyaç ortadan kalkabilir (Litman, 2020).

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın etkileşimini incelemektedir. Araştırma, literatür taramasına dayalı olup, akademik yayınlar, raporlar, politik belgeler ve endüstri analizleri gibi birincil ve ikincil kaynaklardan yararlanarak mevcut durumu ve gelecekteki potansiyelleri değerlendirmektedir. Kullanılan yöntem ise, doküman analizi olarak adlandırılan nitel bir tekniktir. Bu kapsamda, uluslararası akademik veri tabanlarından ve bilimsel dergilerden derlenen veriler sistematik bir şekilde incelenmektedir. Şekil 1'de çalışmanın yöntemi ve aşamaları sunulmaktadır.



Şekil 1. Çalışmanın yöntemi ve aşamaları

Öncelikle, yeşil ulaşım, yapay zekâ, akıllı ulaşım sistemleri ve bunların kente etkilerine dair mevcut çalışmalar kapsamlı bir literatür taraması ile incelenmiştir. Google Scholar ve Web of Science gibi akademik veri tabanlarından anahtar kelimeler kullanılarak yayımlanan makaleler, raporlar ve politik belgeler toplanmıştır. Ardından, doküman analizi yöntemiyle literatürdeki kaynaklar tematik analiz yöntemi ile değerlendirilmiş; yapay zekâ ve yeşil ulaşımın kentleşme, çevre ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri belirli başlıklar altında incelenmiştir. Çalışmada öne çıkan temalar arasında çevre dostu teknolojiler (sürdürülebilirlik), akıllı şehir çözümleri (verimlilik), trafik yönetimi (verimlilik ve güvenlik), enerji verimliliği ve sürdürülebilir kent politikaları yer almıştır.

Elde edilen raporlar ve incelenen örnek alanlardan elde edilen somut verilerle ampirik analizler gerçekleştirilmiştir. Verimlilik, güvenlik ve sürdürülebilirlik temaları üzerinde durularak, kente etkileri somut örnekler üzerinden analiz edilmiştir. Toplanan veriler, konuyla ilgili teorik yaklaşımlarla birleştirilmiş ve dokümanlardan elde edilen bulgular sentezlenmiştir. Dünyadan ve Türkiye’den örneklerle desteklenen uygulamaların etkileri analiz edilerek, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonunun kentlere sağladığı faydalar tartışılmış; ayrıca mevcut politika ve uygulama boşlukları üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

4. Yapay Zekâ ve Yeşil Ulaşım Birlikteliğinin Kente Etkileri

Günümüzde kentlerin karşılaştığı en büyük zorluklardan biri, ulaşım sistemlerindeki yoğunluk ve karmaşık ilişkilerdir. Ulaşım ağları, kentlerin bütününe ve çevresine yayılan önemli hareket alanları oluşturmaktadır. Kentlerin gelişimi, artan nüfus ve araç bağımlılığı gibi faktörler, ulaşım sistemlerinin gereksinimlerini de değiştirmektedir. Gelişen teknolojiler, değişen ulaşım imkanları ile dünya genelinde kentleri dönüştürmektedir.

Değişen ulaşım sistemleri, çevreye verdiği zararları en aza indirmeyi hedeflerken, aynı zamanda verimli, güvenilir ve sürdürülebilir çözümler bulmayı amaçlamaktadır. Mohammed vd. (2018) tarafından tanımlandığı üzere, “Akıllı şehir, operasyonel verimliliği en üst düzeye çıkarmak, devlet hizmetlerini ve ulaşım kalitesini artırmak ve bu durumla birlikte yaşam kalitesini iyileştirmek için bilgi ve iletişim teknolojisi ve yapay zekâyı kullanan gelişmiş bir kentsel alanı temsil etmektedir”. Bu entegrasyon sayesinde şehirler, daha güvenli, daha verimli ve daha sürdürülebilir ulaşım sistemlerine sahip olabilir.

Beneicke vd. (2020) ise akıllı şehri, “Verimliliğini ve çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla kritik altyapı bileşenlerini ve hizmetlerini birbirine bağlamak ve izlemek için bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanan, nüfus yoğunluğu yüksek bir coğrafi alan” olarak tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, kentlerin yanı sıra vatandaşlarının yaşam kalitesini de artırmaktadır (Treiblmaier vd., 2020).

Yapay zekâ ve yeşil ulaşım teknolojilerinin birleşimi, karşılaşılan zorluklara çözüm getirme potansiyeli taşımaktadır. Bu teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için akıllı ulaşım sistemleri ile entegrasyonu büyük önem arz etmektedir. Akıllı ulaşım sistemleri, veri toplama, iletişim teknolojileri ve ulaşım yönetim sistemlerini kapsayan geniş bir çerçevede çalışırken, yapay zekâ bu verileri analiz eden ve en uygun kararları veren bir yapı sunmaktadır. Yapay zekâ, akıllı ulaşım sistemlerini daha akıllı, tahmin edilebilir ve öngörülebilir hale getirmektedir.

Örneğin, akıllı trafik yönetim sistemleri çeşitli sensörler ve kameralar aracılığıyla veri toplamakta ve bu veriler yapay zekâ tarafından analiz edilerek gerçek zamanlı trafik düzenlemeleri yapılmaktadır (Sayed vd., 2023). Bu uygulamalar sayesinde trafik yoğunluğu azalmakta ve karbon emisyonları düşmektedir, böylece sürdürülebilir bir çevre sağlanmaktadır. Ayrıca, otonom araçların enerji verimliliğini optimize etmesinde de yapay zekâ önemli bir rol oynamaktadır. Tesla ve Waymo gibi şirketlerin otonom araç sistemleri, bu verimlilik artışını sağlamak için yapay zekâ algoritmaları kullanmaktadır (Tesla, 2022; Schwall vd., 2020).

Özellikle İstanbul’da, yapay zekâ tabanlı akıllı ulaşım sistemleri toplu taşıma araçlarının güzergahlarını optimize etmek ve trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır (ISBAK, 2022). Bu sistemlerin kullanım alanları sayesinde daha verimli ve güvenli ulaşım sağlanmaktadır. Pekin’deki akıllı ulaşım sistemleri ve yapay zekâ destekli akıllı trafik yönetim sistemi, şehirdeki trafik yoğunluğunu %20 oranında azaltmayı başarmıştır (Zhenlin vd., 2012). Türkiye’de ise Konya’da geliştirilen “Akıllı Bisiklet Kiralama Sistemi”, akıllı ulaşım sistemleri ve yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonuna başarılı bir örnek teşkil etmektedir; bu sistem, kullanıcı yoğunluğunu ve trafik akışını optimize ederek çevreye duyarlı ulaşım çözümleri sunmaktadır (Konya Büyükşehir Belediyesi, 2022).

Yapay zekâ destekli akıllı ulaşım sistemleri ve yeşil ulaşımın entegrasyonu, kentlere çeşitli faydalar sunmaktadır. Bu birleşimin olumlu etkileri arasında çevre kirliliğinin azalması, trafik yoğunluğu ve kazaların düşmesi, enerji verimliliğinin artması ve yaşam kalitesinin yükselmesi bulunmaktadır (Pandey, 2023). Ayrıca, yeşil ulaşım ve yapay zekâ kullanımı, kent sakinlerine daha hızlı ve konforlu bir ulaşım deneyimi sunarak şehir içi ulaşımın çekiciliğini artırmaktadır (Treiblmaier vd., 2020). Yapay zekânın yeşil ulaşım ile birleşimi, akıllı ulaşım bağlamında birçok umut verici uygulama ortaya koymakta

ve bu, internetin geleceğinde önemli bir sıçrama potansiyeli taşımaktadır (Chen vd., 2016). Bu entegrasyonun gelecekte şehirlerde ulaşımın daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlaması beklenmektedir. Yapay zekâ ve akıllı ulaşım sistemleri, şehirlerin ulaşım altyapısını sürekli olarak analiz edip geliştirmekte kritik bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, enerji tüketimini azaltma ve karbon emisyonlarını düşürme hedefleri de bu teknolojilerle daha erişilebilir hale gelmektedir.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın kentlere etkisi, sürdürülebilir, güvenli ve verimli ulaşım sistemlerinin oluşturulmasına önemli katkı sunmaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, gelecekte kentlerin daha temiz, verimli ve güvenli hale gelmesine yardımcı olması beklenmektedir. Ancak, uygulanacak sistemlerin belirli bir altyapıya ihtiyaç duyması gerekmektedir. Ayrıca, ülkelerin ekonomik durumu, toplumun bilinç düzeyi ve toplu taşımaya yönelimleri gibi etmenler, uygulama sürecinde karşılaşılabilecek sorunlar arasında yer almaktadır. Yapay zekânın yeşil ulaşım ile entegrasyonu, akıllı ulaşım bağlamında umut verici uygulamaların ortaya çıkmasına olanak tanımakta ve sürdürülebilir bir kent modeli oluşturulmasına önemli katkılar sunmaktadır. Bu teknolojilerin entegrasyonu, gelecekte kentlerin daha temiz, verimli ve çevre dostu olmasına yardımcı olması beklenmektedir.

4.1. Yapay zekâ ve yeşil ulaşım birlikteliğinin kentlere sürdürülebilirlik açısından etkisi

Günümüzde enerji verimliliği ve çevre dostu ulaşım, sürdürülebilir bir geleceğin sağlanmasında kritik öneme sahiptir. Artan enerji talebi ve derinleşen çevresel sorunlar, toplumları enerji verimliliği ve çevre dostu ulaşım çözümleri arayışına yönlendirmektedir. Bu bağlamda, fosil yakıtlar yerine elektrikli ve biyoyakıtlı araçların tercih edilmesi yaygınlaşmaktadır. Akıllı ulaşım sistemlerinin yapay zekâ ile entegrasyonu, otonom araç teknolojileri aracılığıyla enerji verimliliği ve emisyon azaltımı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Otonom araçlar, çevre sensörlerinden alınan verileri işleyerek olası kazaları ve yaralanmaları önleyerek güvenliği artırmaktadır. 2021 yılı itibarıyla dünyada yaklaşık 1,4 milyon otonom aracın aktif olarak kullanıldığı tahmin edilmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2030 yılına kadar yollardaki araçların %25'inin otonom olması beklenmektedir (Garret, 2017). Küresel ölçekte ise 2035 yılı itibarıyla 12 milyon tamamen otonom aracın kullanılacağı öngörülmektedir. Otonom araçlar, daha verimli sürüş algoritmaları ve dur-kalk gerektiren trafik akışının azalması sayesinde enerji tüketimini düşürme potansiyeline sahiptir. Bu optimizasyon, sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır.

Avrupa Birliği, 2020 itibarıyla 200.000'den fazla elektrikli araç şarj istasyonu kurarak, 2030 yılı için bu sayıyı 1 milyonu aşmayı hedeflemektedir. 2019-2024 dönemi için kabul edilen Avrupa Yeşil Mutabakatı, karbon emisyonlarının %90 oranında azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu hedef doğrultusunda, Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi izlenerek bir yol haritası oluşturulmuştur (European Commission, 2019). Demiryolu taşımacılığı da son on yılda önemli gelişmeler kaydetmiştir. Örneğin, Fransız AGV treninde her vagonun kendi motoruyla donatılması, enerji verimliliğinde %20'lik bir iyileşme sağlamaktadır. Japonya'nın Shinkansen adlı yüksek hızlı treni ise ulaşım hızını artırmakla birlikte enerji tüketimini %40 oranında azaltmaktadır (Şekil 2). Ayrıca, bazı havayolları, uçaklarından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını telafi edebilmek için hizmetler sunmakta ve tüm uçuşlardaki CO2 emisyonlarını hesaplayarak yolcuları telafi etmeye teşvik eden internet hizmetleri sağlamaktadır (Url-11).

Çevre dostu ulaşımın bir diğer bileşeni, toplu taşıma sistemleri ve bisiklet kullanımı gibi düşük karbonlu ulaşım yöntemleridir. Toplu taşıma, bireysel araç kullanımını azaltarak trafiği hafifletmekte ve karbon ayak izini minimize etmektedir. Bisiklet kullanımı hem kişisel sağlığı desteklemekte hem de çevre dostu bir ulaşım seçeneği sunmaktadır (Poyet, 2022). Gelişen teknolojiler sayesinde daha iyi toplu taşıma imkânları sağlanmakta ve bireysel araçların hava kirliliği ile enerji kullanımını kontrol etme olanağı artırılmaktadır. Sonuç olarak, sürdürülebilir kentler oluşturmak için enerji verimliliği ve çevre dostu ulaşım sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu durum, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Toplu taşıma, bireylerin hareketliliğini destekleyen ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir seçenek sunan çevre dostu çözümlerden biridir. Toplu taşıma sistemlerinin etkin bir şekilde ön plana çıkarılması ve iyileştirilmesi, yolculara daha verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı ulaşım seçenekleri sunarak bu sistemlerin daha geniş kitleler tarafından benimsenmesini sağlar. Toplu taşıma sistemlerinin tercih edilmesinde etkili olan kritik parametreler arasında:

- **Temizlik:** Araç içi ve durak temizliği, kullanıcıların konforu ve sağlık açısından büyük önem taşır.
- **Konfor:** Koltukların rahatlığı, iç mekân düzenlemeleri ve genel kullanıcı deneyimi, toplu taşımanın cazibesini artırır.
- **Dakiklik:** Zamanında hizmet verme yeteneği, yolcuların güvenilir ulaşım beklentilerini karşılamada kritik rol oynar.
- **Bekleme Koşulları:** Duraklarda ve istasyonlarda bekleme süresinin konforlu ve güvenli olması, kullanıcı memnuniyetini etkiler.
- **Sürücü Davranışları:** Sürücülerin profesyonel ve güvenli davranışları, toplu taşıma deneyiminin kalitesini doğrudan etkiler.

Bu unsurlar, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini ve kullanıcıların bu sistemlere olan bağlılığını artırmada temel faktörlerdir (De Vos vd., 2020; Dell’Olio vd., 2011; De Oña vd., 2012;’den akt. Çapalı vd., 2022).

Yapay zekâ ve yeşil ulaşımın birlikteliği toplu taşımanın önemli ölçüde iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu birliktelik, sürdürülebilir ve akıllı toplu taşıma sistemlerinin geliştirilmesiyle şehirlerdeki ulaşımın daha etkin ve çevre dostu bir hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Dünya genelinde, Finlandiya, Singapur ve Çin gibi çeşitli ülkelerde küçük ölçekli otonom otobüs denemeleri gerçekleştirilmektedir. Otonom ulaşım hizmetleri, Norveç, İsveç ve Fransa’da aktif olarak faaliyet göstermekte ve bu alandaki gelişmeler hızla ilerlemektedir. Örnek olarak, IBM Watson teknolojisi ile desteklenen Local Motors’un geliştirdiği Olli, (Şekil 3) çevresindeki trafiği analiz ederek kararlar alan bir elektrikli otonom mekiktir. Olli, yolcularına aynı zamanda restoran ve hava durumu bilgileri sunma yeteneğine de sahiptir (English, 2016). Singapur, akıllı trafik yönetim sistemine geçiş yaparak, trafik akışını optimize etmiş ve araçların yakıt tüketimini azaltmıştır. Bu sistem, trafik yoğunluğunu azaltmak için veri analitiği ve yapay zekâ kullanarak, trafik akışını dinamik bir şekilde yönetmektedir (Smart Nation Singapore, 2019).



Şekil 2. Japonya Shinkansen treni (Url-12).



Şekil 3. Olli, sürücüsüz minibüs (Url-13).

Yapay zekâ, toplu taşıma sistemlerinin optimizasyonu ve yönetiminde kritik bir rol oynamaktadır. Akıllı sensörler ve veri analizi kullanılarak, taşıma araçlarının güzergahları, sefer sıklıkları ve kapasiteleri daha etkili bir şekilde planlanmakta; bu da boş seferlerin azaltılması, trafik sıkışıklığının önlenmesi ve enerji verimliliğinin artırılması gibi avantajlar sağlamaktadır (İbrahim, 2003). Yeşil ulaşım çerçevesinde, elektrikli otobüsler, tramvaylar ve trenler gibi çevre dostu araçların kullanımı, karbon emisyonlarını azaltarak şehirlerin hava kalitesini iyileştirmekte ve sürdürülebilir bir ulaşım altyapısının oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır (Pocard, 2021).

Sonuç olarak, yapay zekâ destekli çözümler, toplu taşımadaki verimliliği, güvenliği ve konforu önemli ölçüde artırmaktadır. Bu alandaki teknolojik gelişmeler, yapay zekanın ve ulaşım araçlarının yeni uygulamalarının toplu taşımada devrim yaratma beklentisini güçlendirmektedir. Sistemlerin gelişimi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla, yeşil ulaşım da ilerleme kaydetmekte ve yapay zekanın entegrasyonu,

farklı nüfusların ihtiyaçlarını karşılamak için daha akıllı, güvenli ve çevre dostu ulaşım imkânları sunmaktadır.

4.2. Yapay zekâ ve yeşil ulaşım birlikteliğinin kentlere güvenlik açısından etkisi

Yapay zekâ teknolojilerinin yeşil ulaşım sistemlerine entegrasyonu, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik alanlarının yanı sıra şehirlerdeki ulaşım güvenliğinde de önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Hem sürücüler hem de yayalar için yol güvenliği, dünya genelinde ciddi bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre, 2023 yılında karayolu trafik kazalarına bağlı ölümler 1,19 milyona gerilemiştir. Düşük gelirli ülkelerde trafik kazalarından kaynaklanan ölüm oranları oldukça yüksektir; bu ülkeler, toplam trafik ölümlerinin yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (WHO, 2023).

Avrupa Birliği genelinde her yıl yaklaşık 25.300 kişi trafik kazalarında hayatını kaybetmektedir ve bu kazaların %90'ından fazlası insan hatasından kaynaklanmaktadır. En yaygın hatalar arasında alkol veya uyuşturucu tüketimi, yorgunluk, güvensiz yollar, kırmızı ışıkta geçiş ve yanlış sollama yer almaktadır (European Commission, 2019). Otonom sürüş teknolojileri, akıllı sensörler ve trafik yönetim sistemleri gibi yapay zekâ destekli uygulamalar, şehirlerde kazaların önlenmesi ve trafikte güvenliğin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. McKinsey & Company'nin raporuna göre, otonom araçlar küresel ölçekte trafik kazalarını %90 oranında azaltma potansiyeline sahip ve her yıl 585.000 hayat kurtarabilmektedir. Ayrıca, otonom araçların yaygınlaşmasıyla kaza kaynaklı maliyetlerin 190 milyar dolar azalabileceği öne sürülmektedir. Tesla'nın otonom araçlarla gerçekleştirdiği denemeler de kaza oranlarının %40 oranında azaldığını göstermektedir (NHTSA, 2017).

Ancak Kalra ve diğerleri (2016), güvenlik ölçütlerinin belirlenmesi için gerçek trafikte test edilmesi ve elde edilen sonuçlara dayalı istatistiksel verilerin oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu süreç, bazen onlarca yıl sürebilecek testleri gerektirebilir. Ayrıca, otonom araçlar için etik kuralların oluşturulması, ilgili politikaların geliştirilmesi ve bu politikaların toplumsal etkilerinin incelenmesi gerekmektedir (Lin, 2016; Milakis vd., 2017). Özellikle Japonya gibi ülkelerde G7 zirvelerinde güvenlik düzenlemeleri üzerinde çalışılmaktadır (Walker, 2015).

Otonom araç teknolojileri, kazaların en yaygın nedeni olan insan hatasını en aza indirerek şehir içi güvenliği artırmaktadır. Yapay zekâ ile donatılmış bu araçlar, gelişmiş çevresel algılama sistemleri kullanarak sürüş sırasında trafik işaretleri, diğer araçlar ve yayalarla etkileşimlerini sürekli izlemekte ve buna göre gerçek zamanlı kararlar vermektedir. Örneğin, Tesla ve Waymo gibi önde gelen otonom araç üreticileri, sürüş sırasında meydana gelebilecek potansiyel tehlikeleri analiz eden ve çarpışmaları önleyici sistemler geliştirmiştir (Şekil 4). Bu sistemler, saniyeler içinde binlerce farklı senaryoyu değerlendirerek sürücü veya aracın en güvenli hamleyi yapmasını sağlamaktadır (Schwall vd., 2020).

Yapay zekâ ayrıca, trafik kazalarını ve olası güvenlik risklerini öngörebilen ve bunlara proaktif olarak müdahale edebilen akıllı trafik yönetim sistemlerini desteklemektedir. Bu sistemler, şehir genelinde kurulu sensörler ve kameralar aracılığıyla toplanan verileri analiz ederek trafik yoğunluğu, hız limitleri ve yol koşulları gibi faktörlere göre trafik akışını optimize etmektedir.

Çin, yapay zekâ ve yeşil ulaşım alanında hızla gelişmektedir; birçok şehirde otonom araçlar üzerinde geniş ölçekli denemeler yapılmaktadır. Örneğin, Baidu'nun geliştirdiği Apollo platformu, pek çok şehirde otonom taksi hizmeti sunmaktadır. Baidu, 2020 itibarıyla, otonom araçların güvenliğini artırmak amacıyla 3 milyon kilometre test sürüşü gerçekleştirmiştir (Baidu, 2020).

Yapay zekâ, yeşil ulaşım çözümlerinin şehir içi güvenliği önemli ölçüde artırmasını sağlamaktadır. Artan bisiklet yolları ve akıllı trafik ışıkları, bisiklet kullanıcılarının güvenliğini artırmak için sensörler ve veri tabanlı analizler kullanmaktadır. Örneğin, Avrupa'da bazı şehirlerdeki akıllı bisiklet yolları, yoğun trafikli bölgelerde bisikletlilerin öncelik kazanmasını sağlayarak kazaların önüne geçmektedir. Bu sistem, yapay zekâ algoritmaları ile yolların trafik yoğunluğunu analiz ederek bisiklet kullanıcılarına güvenli geçiş imkânı sunmaktadır (Pocard, 2021). Amsterdam, Rotterdam ve Utrecht gibi şehirlerde akıllı şehir uygulamaları hızla yaygınlaşmaktadır. Amsterdam'daki Smart Mobility programı, araçların, bisikletlerin ve yayaların etkileşimini artırarak trafik akışını optimize etmekte ve çevresel etkileri azaltmaktadır (Şekil 5). Bu proje, trafik verilerini gerçek zamanlı analiz eden yapay zekâ teknolojilerini

kullanmakta olup, 2020 yılı itibarıyla Amsterdam'da bisiklet kullanımının %70 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Amsterdam Smart City, 2019).



Şekil 4. Waymo (Schwall vd., 2020).



Şekil 5. Akıllı bisiklet hareketi (Amsterdam Smart City, 2019).

Yapay zekanın şehir içi toplu taşıma sistemlerine entegrasyonu da güvenliği artırmaktadır. Örneğin, akıllı otobüsler ve trenler, sürüş güvenliğini artırmak ve yolcuların güvenliğini sağlamak için çeşitli güvenlik önlemleri almaktadır. Yüz tanıma sistemleri ve güvenlik kameraları gibi yapay zekâ tabanlı teknolojiler, toplu taşıma araçlarındaki olası tehditleri ve suçları tespit ederek yetkililere gerçek zamanlı bildirimler göndermektedir. Seul, bu teknoloji üzerinde çalışmalara başlayarak toplu taşımada anormal davranışları tespit eden gerçek zamanlı izleme ve takip sistemleri geliştirmektedir (Url-14). Ayrıca, yapay zekâ destekli sürücü destek sistemleri, toplu taşıma araçlarının yol koşullarına göre hızını ve hareketlerini optimize ederek güvenli bir seyahat deneyimi sunmaktadır. Singapur'da temassız bilet sisteminin kullanılması, özellikle çocuklu aileler, yaşlılar ve engelliler için kolaylık sağlayarak ulaşımı hızlandırmakta ve toplu taşımada kartlarla uğraşma süresini azaltmaktadır (Zhang, 2021).

Sonuç olarak, yapay zekâ ile bütünleşmiş yeşil ulaşım çözümleri, çevresel sürdürülebilirliği artırmakla kalmayıp, şehir içi güvenliğin de önemli bir unsuru haline gelmiştir. Gelişen teknolojilerle birlikte, yapay zekâ tabanlı trafik ve ulaşım sistemleri, gelecekte şehirlerde daha güvenli ve güvenilir ulaşım imkânları sunmaya devam edecektir. Bu gelişmeler, kazaların azaltılması, güvenli sürüş deneyimlerinin sağlanması ve toplu taşıma sistemlerinde yolcu güvenliğinin artırılması gibi alanlarda olumlu sonuçlar doğuracaktır.

4.3. Yapay zekâ ve yeşil ulaşım birlikteliğinin kentlere verimlilik açısından etkisi

Yapay zekâ teknolojilerinin yeşil ulaşım sistemleriyle entegrasyonu, kentlerde ulaştırma sistemlerinin verimliliğini artırmada önemli katkılar sağlamaktadır. Ulaşım verimliliği, enerji tüketiminin optimize edilmesi, seyahat sürelerinin kısaltılması ve kaynakların etkin kullanımı gibi unsurları içermektedir. Bu bağlamda, yapay zekâ destekli akıllı ulaşım sistemleri, şehirlerin ulaşım altyapısını daha verimli hale getirerek hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunmaktadır.

Yapay zekâ destekli ulaşım çözümleri, toplu taşıma ve bireysel ulaşımında verimliliği artıran çeşitli teknolojileri kapsamaktadır. Akıllı trafik yönetim sistemleri, yapay zekâ ile çalışan araç filoları ve veri tabanlı analizler sayesinde trafik sıkışıklığı önemli ölçüde azaltılmakta ve sürücülerin seyahat süreleri optimize edilmektedir. Örneğin, Çin'in Hangzhou şehri, trafik yönetiminde yapay zekâ kullanımında dikkat çekmektedir. Şehir, gerçek zamanlı trafik verilerini analiz eden bir sistemle araç akışını yönetmekte ve 2021-2035 yılları için yapay zekâ ve yeşil ulaşımı kentlere entegre etme hedefleri üzerinde çalışmalar yürütmektedir (Hangzhou Municipal Government, 2021). Bu sistemler, trafik sinyallerini dinamik olarak ayarlayarak araç akışını optimize etmekte ve şehir içi trafik akışının sürekli kontrolünü sağlamaktadır. IBM de akıllı şehir çözümleri kapsamında Watson platformunu kullanarak şehirlerin ulaşım verimliliğini artırmaya yönelik projeler geliştirmektedir (English, 2016).

Otonom araç teknolojileri, ulaşım verimliliği açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Yapay zekâ ile donatılmış otonom araçlar, daha verimli sürüş algoritmaları ve rota optimizasyonu sayesinde enerji tüketimini azaltmakta ve trafik sıkışıklığını önlemektedir. Bu araçlar, çevresel verileri gerçek zamanlı analiz ederek en kısa ve en az yakıt tüketimi gerektiren yolları seçmektedir. Bu teknolojiler, şehir içi

ulaşımın daha akıcı ve düzenli olmasını sağlarken, araçların boş seferlerle zaman ve yakıt kaybetmelerini de önlemektedir.

Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından geliştirilen SurTrac sistemi, Pittsburgh'ta akıllı trafik sinyal kontrolü için kullanılan bir yapay zekâ çözümdür (Şekil 6). Bu sistem, 9 trafik sinyalini koordine ederek bekleme sürelerini %40, duraklamaları %30 ve emisyonları %20 oranında azaltmıştır. Denemeler sırasında bu sistemin seyahat sürelerini ortalama %25 oranında kısaltması dikkat çekmektedir (Carnegie Mellon University, 2019).



Şekil 6. Surtrac uygulaması çalışma modeli ve trafik sinyal teknolojisinin ilk test alanı Pittsburgh'un East Liberty bölgesi (Carnegie Mellon University, 2019).

Toplu taşıma sistemlerinin verimliliği, yapay zekâ ile önemli ölçüde artırılmaktadır. Akıllı toplu taşıma çözümleri, otobüs, tramvay ve metro seferlerinin daha etkili bir şekilde planlanması ve yolcu kapasitelerinin optimize edilmesi için yapay zekâ algoritmalarını kullanmaktadır. Örneğin, Japonya'daki akıllı sistemler, otobüs ve tren seferlerini yolcu yoğunluğuna göre ayarlayarak boş seferlerin önüne geçmekte ve bu optimizasyon sayesinde enerji verimliliğini artırarak daha az yakıt tüketimi sağlamaktadır (Pocard, 2021). Ayrıca, bu sistemler aracılığıyla bekleme süreleri kısaltılarak yolcuların toplu taşıma tercihleri teşvik edilmektedir.

Yapay zekâ, karayolu ulaşımının yanı sıra demiryolu ve havayolu taşımacılığında da verimlilik sağlamak için kullanılmaktadır. Fransız demiryolu şirketi SNCF, yapay zekâ destekli akıllı demiryolu sistemleri kullanarak enerji tüketimini optimize etmekte ve trenlerin yakıt verimliliğini artırmaktadır. Japonya'da, yüksek hızlı Shinkansen trenleri yapay zekâ sayesinde önemli enerji tasarrufları elde etmektedir (JR-Central, 2020). Havayolu şirketleri de benzer şekilde uçuş rotalarını optimize ederek yakıt tüketimini minimize etmekte; bu sistemler operasyonel maliyetleri azaltmakta ve çevresel etkileri hafifletmektedir.

Bireysel taşıma yöntemleri de yapay zekâ destekli çözümlerle daha verimli hale getirilmektedir. Elektrikli bisiklet ve scooter sistemleri, yapay zekâ tabanlı yazılımlar kullanılarak şehir genelinde en verimli kullanım noktalarına yerleştirilmekte ve bu araçların kullanım sıklığı artırılmaktadır. Bu araçlar, şehir içi kısa mesafeli ulaşımlarda bireysel araç kullanımını azaltarak trafik yoğunluğunu hafifletmekte ve enerji tüketimini düşürmektedir (Konya Büyükşehir Belediyesi, 2022).

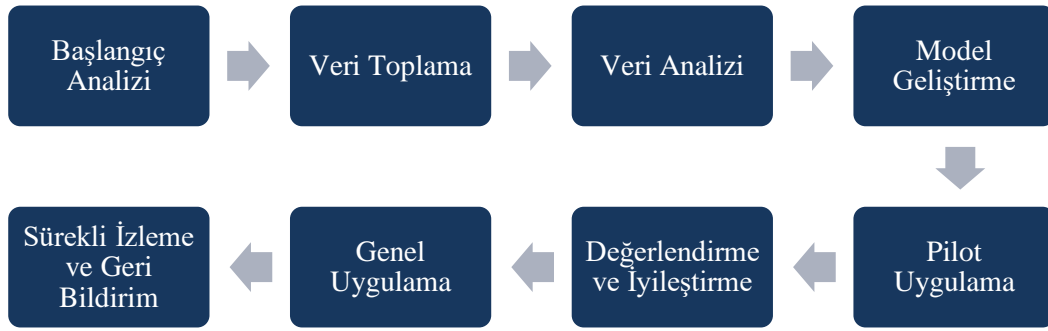
Sonuç olarak, yapay zekâ ve yeşil ulaşım birlikteliği, kentlerde verimlilik açısından birçok avantaj sunmaktadır. Yapay zekâ destekli ulaşım sistemleri, enerji tüketimini azaltmakta, kaynakları daha etkin kullanmakta ve yolculara daha hızlı ve güvenilir ulaşım hizmetleri sunmaktadır. Bu teknolojilerin

yaygınlaşması, şehirlerin gelecekte daha verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım altyapılarına sahip olmasına katkı sağlayacaktır.

4.4. Yapay zekâ tabanlı yeşil ulaşım modelinin oluşturulması

Bu modelin oluşturulmasının temel amacı, kentlerin karmaşık ulaşım sorunlarına gelişen teknolojiler ile yenilikçi çözümler sunmaktır. Her bir bileşen, kentlerin ulaşım sistemlerini daha sürdürülebilir, güvenli ve verimli hale getirmek için entegre bir şekilde çalışmaktadır. Yapay zekâ destekli yeşil ulaşım modelinin geliştirilmesi, birbirini takip eden aşamalardan oluşan sistematik bir süreçtir.

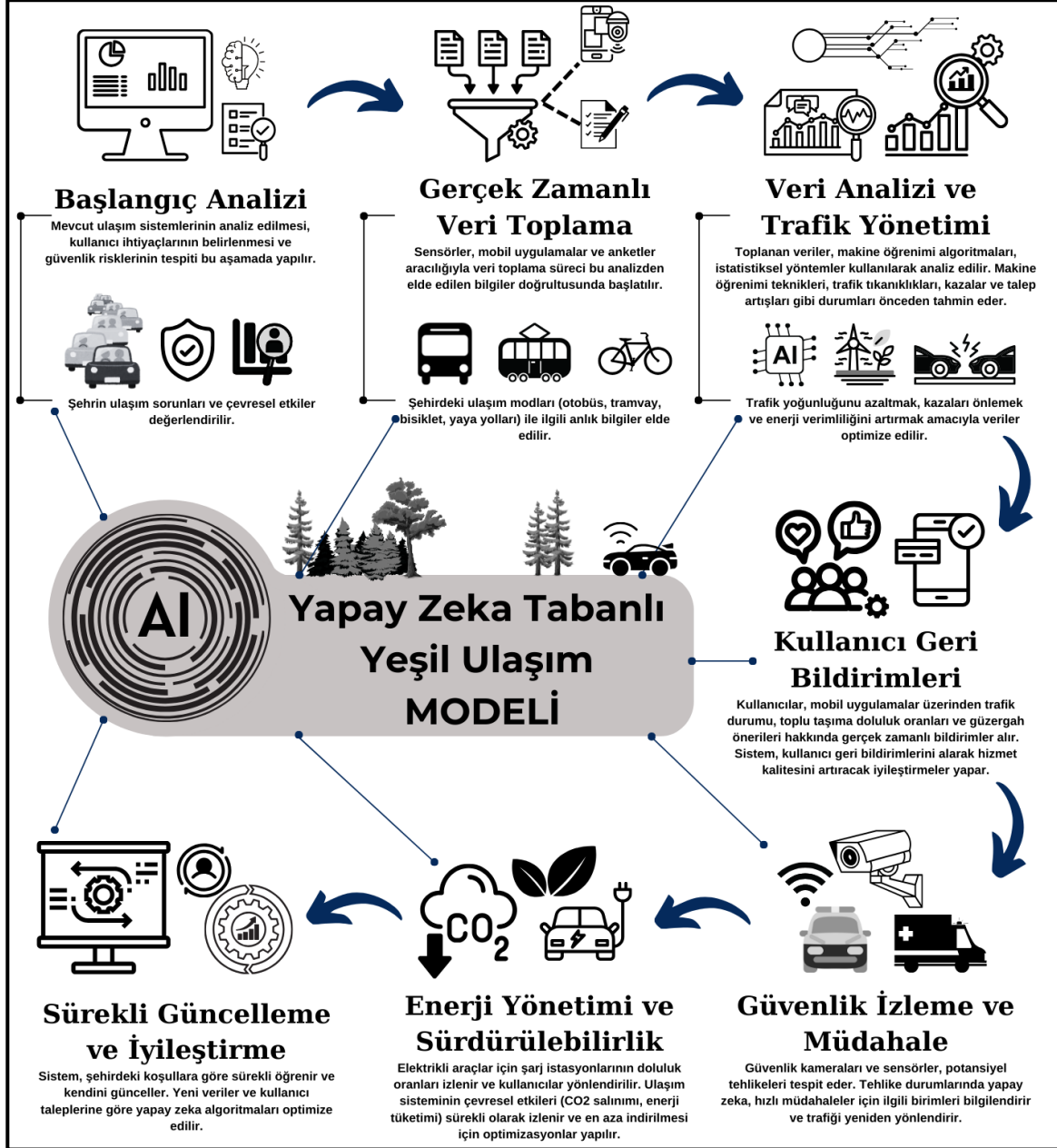
Yapılan araştırmalar neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın kentlere olan etkisini daha iyi anlamak amacıyla kapsamlı bir yönetim modeli oluşturulmuştur. Bu modelin oluşturulma aşamaları, şematik bir anlatımla görselleştirilmiştir (Şekil 7). Modelin ana bileşenleri, veri analizi, teknoloji entegrasyonu, sürdürülebilirlik hedefleri ve güvenlik önlemleri gibi unsurları içermektedir. Her aşama, uygulamaların etkinliğini artırmak ve kentlerin ulaşım sistemlerini geliştirmek için belirli hedeflere yönelik tasarlanmıştır.



Şekil 7. Yapay zekâ tabanlı yeşil ulaşım modeli oluşturma adımları (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

1. **Başlangıç Analizi:** Mevcut ulaşım sistemleri, kullanıcı ihtiyaçları ve güvenlik riskleri detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Bu aşama, mevcut durumu anlamak ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek amacı taşımaktadır.
2. **Veri Toplama:** Sensörler, mobil uygulamalar ve anketler aracılığıyla veri toplama süreci başlatılmaktadır. Bu veriler, ulaşım sistemlerinin performansını ve kullanıcı deneyimlerini değerlendirmek için kullanılacaktır.
3. **Veri Analizi:** Toplanan veriler, makine öğrenimi algoritmaları ve istatistiksel yöntemlerle analiz edilmektedir. Bu aşamada:
 - **Deskriptif Analiz:** Toplanan verilerin temel özelliklerini anlamak için özet istatistikler ve görselleştirmeler kullanılmaktadır.
 - **Korelasyon Analizi:** Farklı değişkenler arasındaki ilişkiler (örneğin, trafik yoğunluğu ile kaza oranları) incelenmektedir.
 - **Tahmin Modelleri:** Gelecek trafik akışını ve kullanıcı talebini tahmin etmek amacıyla regresyon analizi ve diğer makine öğrenimi teknikleri uygulanmaktadır.
4. **Model Geliştirme:** Elde edilen verilerle yapay zekâ algoritmaları kullanılarak yeni bir ulaşım modeli oluşturulmaktadır. Bu model, sistemin verimliliğini ve güvenliğini artırmak için optimize edilmektedir.
5. **Pilot Uygulama:** Geliştirilen model, belirli bir bölgede pilot uygulama ile test edilmektedir. Bu aşamada modelin işlevselliği ve etkinliği değerlendirilmektedir.

6. Değerlendirme ve İyileştirme: Pilot uygulamanın sonuçları değerlendirildikten sonra, verimlilik ve güvenlik açısından analizler ışığında model üzerinde iyileştirmeler yapılmaktadır.
7. Genel Uygulama: Başarılı pilot uygulama sonuçları, şehir genelinde yaygınlaştırılmaktadır. Bu aşama, modelin sürdürülebilirliğini ve ölçeklenebilirliğini sağlamaktadır.
8. Sürekli İzleme ve Geri Bildirim: Sistem, sürekli olarak izlenmekte ve kullanıcı geri bildirimleri doğrultusunda güncellemeler yapılmaktadır. Bu süreç, modelin adaptasyonunu ve iyileştirilmesini sağlar. Modelin bileşenleri ve amaçları, Şekil 8’de görselleştirilmektedir.



Şekil 8. Yapay zekâ tabanlı yeşil ulaşım modelini oluşturan bileşenler (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur).

Bu sistematik yaklaşım, yapay zekâ tabanlı ulaşım modelinin oluşturulmasında temel bir çerçeve sunmaktadır. Her aşama, modelin bileşenlerini güçlendirerek; sürdürülebilir, verimli ve güvenli ulaşım çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Model, çeşitli ulaşım sistemlerinin entegrasyonu, kullanıcı deneyimleri ve çevresel etkilerin azaltılması üzerine odaklanmaktadır.

Veri toplama ve analiz süreci: Modelin temel taşı, şehir içi ulaşım sisteminden sürekli olarak veri toplanmasıdır. Bu veri toplama süreci, sensörler, GPS, mobil uygulamalar ve anketler gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen gerçek zamanlı verileri içerir. Kullanıcı davranışları, trafik akışı, çevresel koşullar ve güvenlik riskleri hakkında bilgi toplama, ulaşım sisteminin mevcut durumunu analiz etmede kritik bir rol oynar. Gerçek zamanlı veri akışı sayesinde, olası sorunlar anında tespit edilir ve hızlı müdahale sağlanır.

Veri işleme ve yapay zekâ kullanımı: Toplanan verilerin ham hali, analiz edilmeden verimli kullanılamaz. Bu aşamada, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları devreye girer. Yapay zekâ, trafiği optimize etmek, talep tahminleri yapmak ve güvenlik açıklarını belirlemek için verileri işler. Bu süreçte:

- Trafik yoğunluğunu azaltmak,
- Enerji tüketimini minimize etmek,
- Kazaları önlemek amacıyla stratejik kararlar alınır.

Ayrıca, çevresel etki ve enerji verimliliği gibi sürdürülebilirlik kriterlerine de dikkat edilerek verilerin işlenmesi sağlanır. Yapay zekâ destekli analizler sonucunda elde edilen veriler, farklı ulaşım modlarının (toplu taşıma, bisiklet yolları, yaya yolları) entegrasyonunu sağlamak amacıyla kullanılır. Bu aşamada, ulaşım modları arasında bir denge kurularak daha verimli bir ulaşım sistemi tasarlanır. Amaç, bireysel araçlara olan bağımlılığı azaltmak ve kullanıcıların sürdürülebilir ve güvenli ulaşım seçeneklerine yönlendirilmesidir.

Ulaşım modları koordinasyonu: Farklı ulaşım araçlarının (otobüs, tramvay, bisiklet) birbiriyle koordineli çalışması, şehirdeki ulaşımın etkinliğini artırır. Veri toplama ve analiz süreçlerinin tamamlanmasıyla birlikte, kullanıcılar için gerçek zamanlı geri bildirim mekanizmaları devreye girer. Kullanıcılara trafik durumu, alternatif güzergahlar ve güvenlik bilgileri anlık olarak iletilir. Bu bilgiler, kullanıcıların daha bilinçli kararlar almasını sağlar. Örneğin, trafik sıkışıklığı olan bölgelerden kaçınmaları veya en hızlı toplu taşıma seçeneğine yönelmeleri için kullanıcılara öneriler sunulur. Bu sayede, şehir içi trafik akışının dengelenmesi sağlanır ve kullanıcı deneyimi iyileştirilir.

Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilirlik: Son aşamada, sürdürülebilirliği artırmak ve güvenliği sağlamak için yenilikçi çözümler uygulanır. Elektrikli araçlar için şarj istasyonları, akıllı trafik ışıkları ve güvenlik kameraları gibi teknolojik yenilikler hayata geçirilir. Bu sistemler, şehirdeki karbon ayak izini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılır. Aynı zamanda, kaza risklerini minimize etmek ve genel güvenliği artırmak için güvenlik inovasyonlarına yatırım yapılır. Bu adımlar, çevresel etkilerin azaltılmasına ve şehirdeki ulaşımın güvenli bir şekilde işlemesine katkı sağlar.

Bu model, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın birlikteliğinin, sürdürülebilirlik, verimlilik ve güvenlik konularını ele alarak kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır. Kullanıcıların deneyimlerini iyileştirirken, çevresel etkileri minimize etmeyi ve ulaşım sistemlerinin genel güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Somut örnekler ile bu modeli destekleyecek olursak; Singapur akıllı trafik yönetim sistemi kullanarak trafik sıkışıklığını azaltmakta ve yol güvenliğini artırmaktadır. Yapay zekâ, trafik akışını optimize ederek sürücülerini alternatif rotalar hakkında bilgilendirmektedir. Amsterdam, Kopenhag ve Barcelona'da bisiklet ve toplu taşıma araçları teşvik edilerek, sürdürülebilir ve güvenli ulaşım seçenekleri sunulmaktadır. Barcelona'da 'Superblocks' projesi ile araç trafiği azaltılarak, yaya ve bisiklet kullanımına yönelik alanlar genişletilmiştir. Seul, akıllı ulaşım sistemleri ile trafik yönetimini optimize etmekte ve toplu taşıma araçlarının enerji verimliliğini artırmaktadır. Şehirde, kullanıcıların toplu taşıma araçlarının doluluk oranlarını ve tahmini varış sürelerini takip edebilecekleri uygulamalar geliştirilmiştir. Bu örnekler, yapay zekâ ve sürdürülebilir ulaşım uygulamalarının nasıl entegre edildiğini ve şehirlerin bu konulardaki başarılı yaklaşımlarını göstermektedir. Bu model kapsamında daha fazla pilot bölge seçilerek gerekli adımlar izlenerek geliştirilmesi hedeflenmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışma, yapay zekâ ve yeşil ulaşımın entegrasyonunun kentlerde sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimlilik açısından kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Sonuçlar, bu teknolojilerin şehir yaşamında kayda değer dönüşümler sağladığını göstermektedir. Özellikle artan nüfus, kentleşme ve enerji tüketimi gibi sürdürülebilirlik sorunlarına karşı yapay zekâ destekli yeşil ulaşım çözümleri, enerji verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarının azaltılması ve trafik yoğunluğunun hafifletilmesi gibi alanlarda önemli kazanımlar sunmaktadır.

Yapay zekâ, trafik yönetimi ve güzergâh optimizasyonundaki gerçek zamanlı veri analizleri ve öngörülerle modellenen yetenekleriyle, şehir içi ulaşımın verimli ve sürdürülebilir olmasını desteklemektedir. Gelişmiş trafik yönetim sistemleri, trafik yoğunluğunu dinamik olarak yönetip alternatif rotalar sunarak trafik sıkışıklığını azaltmakta, sürücü ve çevre açısından faydalar sağlamaktadır. Türkiye ve dünyada, akıllı trafik yönetim sistemleri ve otonom araçlar sayesinde enerji tasarrufu sağlanmakta, daha güvenli sürüş ortamları yaratılmaktadır.

Çevresel etkiler açısından, yapay zekâ destekli yeşil ulaşım sistemleri karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Elektrikli ve otonom araçların yaygınlaşması, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmakta ve enerji verimliliği sağlamaktadır. Avrupa Birliği ve diğer gelişmiş ülkeler elektrikli araç altyapısını güçlendirirken, Türkiye’de de Konya gibi şehirlerde akıllı bisiklet kiralama sistemleri ve İstanbul’da yapay zekâ destekli toplu taşıma projeleri çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir.

Güvenlik açısından, yapay zekâ teknolojileri kentsel ulaşımında trafik kazalarını önlemek için kullanılmakta ve insan hatasından kaynaklanan kazaları büyük ölçüde azaltmaktadır. Tesla, Waymo gibi küresel firmaların yanı sıra Türkiye’deki akıllı şehir projeleri, otonom araçların ve yapay zekâ sistemlerinin güvenliği artırma potansiyelini göstermektedir. Trafik kazalarının büyük oranda insan hatasından kaynaklandığı göz önüne alındığında, yapay zekâ destekli araçların yaygınlaşması şehirlerde güvenliği önemli ölçüde artırmaktadır. Bisiklet ve elektrikli scooter gibi yeşil ulaşım araçlarının güvenliği de akıllı şehir uygulamalarıyla desteklenmiştir; akıllı sensörler ve veri tabanlı analizlerle güvenli bisiklet yolları geliştirilmiştir.

Verimlilik açısından ise yapay zekâ destekli ulaşım sistemleri, enerji tüketimini optimize etme ve kaynak kullanımını daha etkin hale getirmektedir. Güzergâh planlaması ve trafik optimizasyonu gibi yapay zekâ uygulamaları, toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini artırarak yolculuk sürelerini kısaltmaktadır. Çin ve Singapur gibi ülkelerdeki akıllı trafik yönetim sistemleri, şehir içi trafiği %30’a kadar azaltarak şehirlerin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve yeşil ulaşım entegrasyonu şehirler için sürdürülebilir, güvenli ve verimli bir ulaşım altyapısı oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Bu dönüşümün başarılı bir şekilde sağlanması için güçlü altyapı, teknolojik kapasite, toplumsal farkındalık ve politika desteği gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen model ve elde edilen bulguların, kent yönetimleri ve politika yapımcılar için stratejik adımlar atmada rehberlik sağlayacağı düşünülmektedir.

Gelecekte, bu modelin daha geniş bir uygulama alanı bulması, kentlerin altyapı ve politika yapılarıyla desteklenmesi halinde oldukça mümkün görünmektedir. Sürdürülebilirlik, güvenlik ve verimliliği artıran analiz yöntemleri ve başarı ölçütleri, modelin faydalarını somut olarak gözlemlemeye katkı sağlayacaktır. Ayrıca, politik süreçlerin mevcut düzenlemelerle uyumlu şekilde geliştirilmesi, dünya çapında standartlaşmaya katkı sunabilir. Geniş kapsamlı bir vaka çalışması ile de geleneksel ulaşım alışkanlıklarının yerine alternatif sürdürülebilir çözümler önerilmesi, şehirlerin daha yaşanabilir hale gelmesini destekleyebilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Accenture Digital**, (2023). Monetizing Digital Services in Automotive: A wake-up call for automakers to rethink their strategic priorities, 5.
- Acemoglu, D. & Pascual, R.** (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares and employment. *American Economic Review*, 108 (6): 1488–1542.
- Akgüngör, A. & Doğan, E.** (2009). Trafik kazası tahminine yapay zekâ yaklaşımı: Model geliştirme ve uygulama. *Taşıma*, 24 (2): 135-142.
- Amsterdam Smart City**. (2019). (<https://amsterdamsmartcity.com/updates/news/amsterdam-smart-city-mobility-experience-delegati-amsterdam-2019>). 28.09.2024 tarihli erişim.
- Anonim**, (2022). Elektrikli Araçların Çevreye Yararları | Beefull Blog, 08.01.2024 Tarihli erişim.
- Anonim**, (2023). A Brief History of Autonomous Vehicle Technology, [Interactive Override Import / www-wired-com__brandlab__2016__03__a-brief-history-of-autonomous-vehicle-technology / 14/10/2020 15:52 | WIRED](https://www.wired.com/brandlab/2016/03/a-brief-history-of-autonomous-vehicle-technology/), 08.01.2024 Tarihli erişim.
- Baidu**. (2020).(<https://ir.baidu.com/static-files/60164d47-7103-4181-909c-57eea0355d83>). 17.09.2024 tarihli erişim.
- Beneicke, J., Juan, A.A., Xhafa, F., Lopez, D. & Freixes, A.** (2020). Empowering citizens' cognition and decision making in smart sustainable cities. in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, (9): 102-108.
- Bjorklund, M.** (2011). Influence from the business environment on environmental purchasing-drivers and hinders of purchasing green transportation services. *J. Purch. Supply Manag.* (17): 11–22.
- Bonilla, D. & Foxon, T.** (2009). Demand for new car fuel economy in the United Kingdom, *J. Transp. Ekon. Politics*, (43): 55-83.
- Carnegie Mellon University**. (2019). (<https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2019/october/traffic-moves-at-speed-of-technology.html>). 17.09.2024 tarihli erişim.
- Chen, X., Sheng, J., Wang, X. & Deng, J.** (2016). Exploring determinants of attraction and helpfulness of online product review: a consumer behaviour perspective. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 1-19.
- Chen, N., Chen, Y., Song, S., Huang, C. T. & Ye, X.** (2016). Poster abstract: Smart urban surveillance using fog computing. In *Proceedings- 1st IEEE/ACM Symposium on Edge Computing, SEC 2016* (pp. 95-96). Article 7774684 (Proceedings- 1st IEEE/ACM Symposium on Edge Computing, SEC 2016). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Chen, W., Milosevic Z., Rabhi F. & Berry, A.** (2023). Real-Time Analytics: Concepts, Architectures, and ML/AI Considerations. *IEEEAccess*, (11): 71634-71657.
- Çapalı, B., Terzi, S., & Saltan, M.** (2022). Toplu taşıma yolcularının sosyo-demografik özelliklerinin erişilebilirlik, bekleme ve seyahat süresi algısına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(4): 1303-1314.
- De Oña, J., De Oña, R. & Calvo, F.J.** (2012). A classification tree approach to identify key factors of transit service quality. *Expert Systems with Applications*, 39(12).
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P.** (2011). The quality of service desired by public transport users. *Transport Policy*, 18(1), 217–227.
- De Vos, J., Waygood, E.O.D. & Letarte, L.** (2020). Modeling the Desire for Using Public Transport. *Travel Behaviour and Society*, (19): 90–98.
- Ebinger J. ve Vandycke, O.** (2015). Moving toward climate-resilient transport: the world bank's experience from building adaptation into programs, *Washington: World Bank*, 17-35.

- English, T.** (2016). Local Motors Creates Electric Autonomous Car That Drives IBM's Watson. *Interesting Engineering Article*.
- European Commission.** (2019). EU Mobility & Transport achievements 2019-2024. (https://transport.ec.europa.eu/eu-mobility-transport-achievements-2019-2024/sustainable-smart-mobility_en). 22.10.2024 tarihli erişim.
- European Parliament,** (2014). Mapping Smart Cities in The EU Brussels: Policy Department, Economic and Scientific Policy, Directorate-General For Internal Policies.
- Ezell, S.** (2010). Intelligent Transportation Systems. The Information Technology & Innovation Foundation. *Journal of Transportation Technologies*, 4 (3): 196-204.
- Ferguson, E.** (1997). The Rise and Fall of the American Carpool: 1970–1990. *Transportation*, 24(4): 349–376.
- Garret, O.** (2017). 10 million self-driving cars will hit the road by 2020: Here's How to Make a Profit. Forbes. (<https://www.forbes.com/sites/oliviergarret/2017/03/03/10-million-self-driving-cars-will-hit-the-road-by-2020-heres-how-to-profit/>) 10.10.2024 tarihli erişim.
- Grzelec, K. & Hebel, K.** (2016). Instruments shaping sustainable mobility of urban residents. *Torun Business Review*, 15 (3): 33-43.
- Hangzhou Municipal Government.** (2021). Hangzhou Transportation Seepeds Up the Construction of Comprehensive Transportation Network. (<https://www.seetao.com/details/117377.html>). 22.10.2024 tarihli erişim.
- Hazen, B.T., Mollenkopft, D.A. & Wang, Y.** (2016). Remanufacturing for the circular economy: An examination of consumer switching behavior. *Business Strategy and the Enviroment*, (26) 4: 451-464.
- Hoogendoorn, S.P. & Bovy, P.** (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4): 283–303.
- Ibrahim, M.** (2003). Improvements and Integration of a Public Transport System: The Case of Singapore. *Cities*, 20 (3): 205-216.
- ISBAK, (2022).** Akıllı Ulaşım Sistemleri: Trafik Yönetim Sistemleri. 08.01.2024 Tarihli erişim.
- Jiang, F., Jiang, Y., Zhi, H., Dong, Y., Li, H., Ma, S., Wang, Y., Dong, Q., Shen, H. & Wang, Y.** (2017). Artificial Intelligence in Healthcare: Past, Present and Future. *Stroke and Vascular Neurology*, 2 (4): 230–243.
- Jiang, Z., Chen, Y., Li, X. & Li, B.** (2021). A heuristic optimization approach for multi-vehicle and one-cargo green transportation scheduling in shipbuilding. *Advanced Engineering Informatics*, **49**, 101306.
- JR-Central.** (2020). Contribution to Global Environment Preservation (<https://global.jr-central.co.jp/en/company/environment/contribution.html>). 19.09.2024 tarihli erişim.
- Kalra, N. & Paddock, S.M.** (2016). Driving to safety: How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94: 182-193.
- Kastal, A. & Köse, A.O.** (2009). Yapay Zekâ, XIV. Türkiye'de İnternet Konferansı, Bilgi Üniversitesi, Aralık 12-13, 2009.
- Konya Büyükşehir Belediyesi.** (2022). Konya Akıllı Şehir Stratejisi ve Yol Haritası 2022 – 2030.
- Kushwaha, A.K. Pharswan, R., Kumar, P. & Kar, K.A.** (2022). How Do Users Feel When They Use Artificial Intelligence for Decision Making? A Framework For Assessing Users. Perception. Information System Frontier. *Information System Frontiers*, 25-3(17):1260.
- Lawson, S.** (2018). Tackling the Transition to Automated Vehicles, Roads that Cars can Read Report III. European Road Assessment Association.

- Lin, P.** (2016). Why ethics matters for autonomous cars. In: *Autonomous Driving. Springer Berlin Heidelberg*, 69-85.
- Litman, T.** (2020). Autonomous Vehicle Implementation Predictions Implications for Transport Planning. *Victoria Transport Policy Institute*, 24 March 2020.
- Lu, N., Cheng, N., Zhang, N., Shen X. & Mark, J.W.** (2014). Connected Vehicles: Solutions and Challenges. in *IEEE Internet of Things Journal*, (1): 89-299.
- Maheshwari, P., Khaddar, R. & Kachroo, P.** (2016). Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerinin Planlanmasına Yönelik Performans Endekslerinin Dinamik Modellenmesi. 16, 371–393.
- Milakis, D., Arem, B. & Wee, B.** (2017). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 324–348.
- Mohammed, A.A., Burhanuddin, B.A. & Basiron, D.** (2018). Tunggal Key Enablers of IoT Strategies in the Context of Smart City Innovation. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 10(4): 582-589.
- NHTSA.** (2017). NHTSA-IIHS Announcement on AEB. (<https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-iihs-announcement-aeb>). 22.10.2024 tarihli erişim.
- Niestadt, M., Debyser, A., Scordamaglia, D. & Pape, M.** (2019). Artificial Intelligence in Transport: Current and Future Developments, Opportunities and Challenges. European Parliamentary Research Service. EPRS_BRI (2019) 635609_EN.pdf (europa.eu).
- Nimako, S.G. & Winneba, K.G.** (2012). Consumer Replacement Behavior: A Theoretical Review and Research Agenda. *Social Science and Management Research Journal*, 2 (3): 74-85.
- Nishant, R., Kennedy, M. & Corbett, J.** (2020). Artificial Intelligence for Sustainability: Challenges, Opportunities, and a Research Agenda. *International Journal of Information Management*, 53, 102104.
- Page, J.F., Bellis, E.S., Scheifflee, T.G. & Hendricks, S.L.** (2001). The Relative Frequency of Unsafe Driving Acts in Serious Traffic Crashes, Smart Technical Report, U.S. Department of Transportation. The Relative Frequency of Unsafe Driving Acts in Serious Traffic Crashes [Summary Report] (bts.gov).
- Pandey, K.A.** (2023). Development and Deployment of Green Artificial Intelligence. *International Journal of Mathematics and Computer Research*, 11(4): 3328-3332.
- Parkinson, S., Ward, P., Wilson, K. & Miller, J.** (2017). Cyber Threats Facing Autonomous and Connected Vehicles: Future Challenges, in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18, 2898-2915.
- Pocard, N.** (2021). 4 Ways to Improve Public Transport (With Input From the Public), *Clean Energy Fuel Cell Electric Buses*.
- Poyet, P.** (2022). The Rational Climate e-Book, (2nd Edition) (4) (PDF) The Rational Climate e-Book (2nd Edition) (researchgate.net).
- Rietveld, P. & Daniel V.** (2004). Determinants of bicycle use: Do municipal policies matter? *Transp. Res. A*, 38, 531–50.
- Sayed, S., Yasser, A.H. & Hefny, H.** (2023). Artificial intelligence-based traffic flow prediction a comprehensive review. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 10 (1): 42.
- Schwall, M., Daniel, T., Victor, T., Favaro, F. & Hohnhold, H.** (2020). Autonomous Driving Safety Report.
- Senin, S.N., Fahmy-Abdullah, M. & Masrom, M.A.N.** (2021). The implementation of green transportation towards low carbon city, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 736, 012063.
- Singh, S. & Saini, B.S.** (2021). Autonomous cars: Recent developments, challenges, and possible solutions, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1022.

- Smart Nation Singapore.** (2019). National Artificial Intelligence Strategy. *Smart Nation Singapore*. (<https://www.smartnation.gov.sg/files/publications/national-ai-strategy-summary.pdf>).22.10.2024 tarihli erişim.
- Suman, S. (2021).** Artificial intelligence in nuclear industry : chimera or solution. *Journal of Cleaner Production* 278, 124022.
- Sussmann, J.M. (2005).** Perspectives on Intelligent Transportation Systems, Springer, New York.
- Taştan, Y. & Kaymaz, H. (2021).** Otonom Araçların Yaygınlaşmasının Önündeki Zorluklar. International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 33 (2): 195-209.
- Tektaş M., Akbaş A. & Topuz V. (2002).** Yapay Zekâ Tekniklerinin Trafik Kontrolünde Kullanılması Üzerine Bir İnceleme, I. Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi.
- Tesla. (2022).** Tesla Autonomy Day: AI in Sustainable Driving. Tesla Inc. (<https://www.tesla.com/support/autopilot>).
- Todorovic, M. & Simic, M. (2019).** Current State of the Transition to Electrical Vehicles. in Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services. Cham: Springer International Publishing.
- Transport for London, (2019).**
(<https://web.archive.org/web/20140228171902/http://www.tfl.gov.uk/gettingaround/walking/2896.aspx>) 28.12.2023 tarihli erişim.
- Treiber M. & Kesting A. (2013).** Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation, Springer Heidelberg New York Dordrecht, London, Berlin.
- Treiblmaier, H., Rejeb, A. & Strebinger, A. (2020).** Blockchain as a driver for smart city development: Application fields and a comprehensive research agenda. *Smart Cities*, 3(3): 853-872.
- Tseng, H. & Wu, J. (2012).** Affordability of electric vehicles for a sustainable transport system: An economic and environmental analysis. *Energy Policy* 61:441-447.
- Uluslararası Enerji Ajansı, (2021).** Net Zero By 2050, IEA: Paris, France.
- UN. (2021).** The sustainable development goals report 2021. *New York: UN*.
- Vallati, M. (2006).** AI Planning for Urban Traffic Control: Moving from Objects to Flows.
- Walker, J. (2015).** Mobilizing Intelligent Transport Systems (AUS)-Intelligent Transport Systems Report. (<https://www.gsma.com/iot/wpcontent/uploads/2015/09/ITS-report-new.pdf>).15.09.2024 tarihli erişim.
- Wang, J., Chen, R. & He, Z. (2019).** Traffic speed prediction for urban transportation network: A path based deep learning approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 372-385.
- Wann-Ming, W. (2019).** Constructing urban dynamic transportation planning strategies for improving quality of life and urban sustainability under emerging growth management principles. *Sustainability*, 44, 275–290.
- Wilbur, M., Sivagnanam, A., Ayman, A., Samaranayake, S., Dubey, A. & Laszka, A. (2023).** Artificial Intelligence for Smart Transportation. [2308.07457.pdf \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/2308.07457).
- WHO. (2023).** Global status report on road safety 2023.
- WMO. (2020).** United in Science report: Climate Change has not stopped for COVID19.
- Wu, J., Wang, Y., Li, W. & Wu, H. (2021).** Research on Green Transport Mode of Chinese Bulk Cargo Based on Fourth-Party Logistics. *Journal of Advanced Transportation*, 1-16.
- Yiğit, E., Öner, A.E. & Yöntem, O. (2020).** The effects of autonomous vehicles on the automotive industry and the innovations they bring, *International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 181-186.

Zhang, X. (2021). Analysis of Smart Cities in Singapore-Based Artificial Intelligence, *IEEE International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI), Hong Kong*, 73-77.

Zhenlin, W., Peng, Z. & Shulin, A. (2012). Efficiency Evaluation of Beijing Intelligent Traffic Management System Based on super-DEA.

Url-1 <https://tr.wikipedia.org/wiki/Otomobilin_tarihi>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-2 <<https://ev.hedefilo.com/ev-nedir/elektrikli-araclar-hakkinda>>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-3 <<https://www.garantibbva.com.tr/blog/surdurulebilir-ulasim-nedir>>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-4 <<https://www.akillisehirler.gov.tr/akilli-ulasim/>>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-5 <www.upperinc.com>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-6 <<https://fareye.com/resources/blogs/ai-route-optimization>>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-7 <<https://www.akillisehirler.gov.tr/2023/08/14/singapur-otonom-araclar-projesi/>>, erişim tarihi 08.01.2024.

Url-8 <https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car>, erişim tarihi 12.01.2024.

Url-9 <<https://dig.watch/trends/rise-autonomous-vehicles>>, erişim tarihi 02.04.2024.

Url-10 <<https://www.mercedes-benz.com.tr/passengercars/brand/me-time/teknoloji-ve-inovasyon/baglantili-araclar.html>>, erişim tarihi 02.04.2024.

Url-11 <<https://climate-box.com/textbooks/3-how-to-prevent-dangerous-climate-change/3-1-1-what-is-energy/>>, erişim tarihi 02.04.2024.

Url-12 <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokaido_Shinkansen >, erişim tarihi 15.09.2024.

Url-13 <<https://webrazzi.com/2016/06/17/elektrikle-calisan-surucusuz-minibus-olli-yola-cikiyor/>> erişim tarihi 15.09.2024.

Url-14 <<https://www.straitstimes.com/asia/east-asia/seoul-to-use-ai-to-enhance-public-safety-on-subways> > erişim tarihi 14.10.2024.

Araştırma Makalesi

Acil durum araçlarının yönlendirilmesinde akıllı ulaşım çözümleri: Ambulans rota oluşturma optimizasyonu

Ceren Özcan Tatar^{1,2*}, Zahra Khoda Karımı¹, Murat Akın³, Emrah Yılmaz⁴, Ozan Kıvanç², Mehmet Küçükpehlivan²

¹ Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri A.B.D., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.

²Başarsoft Bilgi Teknolojileri A.Ş., Ankara, Türkiye.

³ Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

⁴ Cybertech Ar-Ge LTD. ŞTİ., Ankara, Türkiye.

*Corespondance: ceren.ozcan@basarsoft.com.tr; ceren_ozcan@ogr.eskisehir.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1532308

Özet: Doğal afetler, can ve mal kaybına yol açabilen yıkıcı olaylardır. Deprem, sel, yangın gibi afetlerin yarattığı tahribat, insan hayatının kurtarılması ve maddi zararların önlenmesi için acil durum planlaması ve koordinasyon gerektirir. Afet bölgesindeki insanların güvenli tahliyesi ve acil durum araçlarının etkin yönlendirilmesi hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, Türkiye'nin özgün trafik koşulları ve acil durum araçlarının gereksinimleri dikkate alınarak ambulanslar için bir rota optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu model, mevcut yol ağlarının ambulansların kullanımına uygun hale getirilmesini ve acil durum müdahale sürelerinin iyileştirilmesini hedeflemektedir. Yenilikçi çözümler arasında trafik ışıklarında ambulanslara öncelik verilmesi, gerektiğinde ters yönde seyahat edebilme senaryoları ve zorlu trafik koşullarında etkili rotaların belirlenmesi yer almaktadır. Bu sayede ambulans hizmetlerinin iyileştirilmesi ve müdahale sürelerinin kısaltılmasıyla hasta ve yaralıların hayatta kalma oranlarının artırılması amaçlanmaktadır. Sonuçlar, ambulans hizmetlerinin verimliliğini artırdığını ve müdahale sürelerini azalttığını göstermektedir. Çalışma, Türkiye için ambulans rotası optimizasyonu ve acil durum yönetimi alanında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Acil durum araçları, ambulans, rotalama, akıllı ulaşım sistemleri

Intelligent transportation solutions in the guidance of emergency vehicles: ambulance route optimization

Abstract: Natural disasters are destructive events that can lead to loss of life and property. The devastation caused by disasters such as earthquakes, floods, and fires necessitate emergency planning and coordination to save lives and prevent material damage. The safe evacuation of individuals in disaster-stricken areas and the effective guidance of emergency vehicles are of vital importance. This study presents a route optimization model developed specifically for ambulances, considering Turkey's unique traffic conditions and the requirements of emergency vehicles. The model aims to adapt existing road networks for ambulance usage and to improve emergency response times. Innovative solutions include prioritizing ambulances at traffic lights, scenarios that allow for travel in the opposite direction when necessary and identifying effective routes under challenging traffic conditions. By enhancing ambulance services and reducing response times, the goal is to increase the survival rates of patients and injured individuals. The results indicate an increase in the efficiency of ambulance services and a reduction in response times. This study is considered a significant step towards ambulance route optimization and emergency management in Turkey.

Keywords: Emergency vehicles, ambulance routing, intelligent transportation systems

1. Giriş

Afet ve kriz zamanlarında acil durum araçlarının rotalarının oluşturulması, bu araçların zamanında ve verimli bir şekilde müdahale etmesini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Doğal afetler veya beklenmedik krizler sırasında, yaşamların korunması ve kaynakların etkin şekilde tahsisi için optimize edilmiş bir araç yönlendirme çözümü gereklidir. Bu bağlamda, acil durum araçlarının hızlı ve güvenli bir şekilde yönlendirilmesi hem müdahale sürelerini azaltmada hem de hasta ve yaralıların hayatta kalma şansını artırmada kilit bir rol oynamaktadır.

Acil durum araçlarının rotalarının belirlenmesinde kullanılan çeşitli algoritmalar arasında Dijkstra, A* ve genetik algoritmalar dikkat çekmektedir. Dijkstra algoritması, bir başlangıç noktasından hedef noktaya en kısa yolu bulmada etkin bir yöntem sunarken; A* algoritması, sezgisel bir yaklaşımla bu süreci hızlandırarak zaman kazandırır. Genetik algoritmalar ise, çoklu hedefleri optimize etme ve karmaşık senaryolara uyum sağlama konusundaki esnekliğiyle öne çıkar. Bu çalışmada, Dijkstra algoritmasının yanı sıra A* ve genetik algoritmaların acil durum araçlarının rotalarının optimize edilmesi üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Acil durum müdahalesi sırasında trafik yoğunluğu, yol durumu ve eğim gibi değişkenler, yönlendirme süreçlerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, eğimli güzergahlar ve yoğun trafikten kaynaklanan gecikmeler, müdahale sürelerini uzatabilir. A* algoritması, bu tür dinamik koşulları dikkate alarak daha hızlı ve etkili rotalar sunabilirken, genetik algoritmalar, trafik yoğunluğu ve coğrafi engeller gibi birden fazla faktörü aynı anda optimize etme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, bu çalışmada hem sezgisel hem de evrimsel yaklaşımlar bir arada kullanılarak acil durum araçlarının rotalarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'ye özgü trafik koşulları ve acil durum araçlarının özel ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak bir ambulans rota optimizasyon modeli geliştirmektir. Çalışma, ambulansların trafik ışıklarında geçiş üstünlüğü, ters yön kullanımı ve eğimli güzergahlarda etkili rotaların belirlenmesi gibi faktörlere odaklanmıştır. Ayrıca, kullanılan algoritmaların performanslarının karşılaştırılması, bu alandaki yöntemlerin etkinliğini anlamaya yönelik önemli katkılar sağlamaktadır. Çalışmanın sağladığı katkılar maddeler halinde özetlenirse;

- Türkiye trafik koşullarında henüz uygulanmamış olan ambulanslara ait özel ihtiyaçlarını karşılanacağı bir rota optimizasyon modeli geliştirmek,
- Ambulansların ters yöne giriş yapabilmesi ve trafik ışıklarında geçiş üstünlüğü gibi özellikleri içeren zenginleştirilmiş ağ verisi oluşturmak,
- Eğimli güzergahlarda oluşabilecek trafik yavaşlamalarını dikkate alarak ambulanslara özel hızlı ve etkili rotalar çıkarmak,
- Acil durum müdahale sürelerini kısaltarak, hasta ve yaralıların hayatta kalma şanslarını artırmak hedeflenmiştir.

Çalışmanın 2. Bölümünde literatür çalışmaları özetlenmiş, 3. bölümünde ambulans rotası belirlemede kullanılan veri kümesi ve yöntem açıklanmış, deneysel bulgular 4. bölümde verilmiş ve sonuçlar tartışılmış, son bölümde ise çalışmanın değerlendirilmesi yapılmış ve öneriler sunulmuştur.

2. Literatür Çalışmaları

Acil durum araç yönlendirmesi üzerine olan çalışmalar, acil durum araçlarının zamanında afet bölgesine güvenli ve hızlı ulaşmasını sağlamak için gerekli olan çeşitli uygulamaları ve algoritmaları içerir. Bu uygulamaların ve algoritmaların geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalardan, McDaniel vd. (2023), afetler sırasında zamanında ve verimli araç yönlendirmesi sağlamak için hızlı araç yönlendirme algoritmaları geliştirilmiş ve kıyaslamıştır. Yapılan çalışma ile geliştirilen algoritmalar, acil durum müdahalesinin mevcut durum içerisindeki akışkanlığını ve belirsizliğini ele alarak acil durumlar için hızlı ve etkili araç yönlendirmesi sağlamak üzere tasarlanmıştır. Acil durum araçlarının yönlendirilmesinin bir diğer kritik yönü de kamu hizmeti araçları, acil durum malzemeleri, ilaç, gıda, yakıt ve altyapı onarım malzemeleri gibi kaynakların etkilenen bölgeye hızlı bir şekilde taşınmasıdır (Kula vd., 2012; Rout vd., 2020). Bu ihtiyacı karşılamak üzere, temel kaynakların zamanında teslim

edilmesini sağlamak için verimli rota oluşturma stratejileri geliştirilmiş, Sparse A* ve Dijkstra algoritmaları acil durum rota yol bulma algoritmaları olarak uygulanmış, yangın veya terörizm gibi afetler sırasında kaçış yollarının bulunmasına yardımcı olmak ve güvenli tahliye için etkili rehberlik sağlamak için tercih edilmiştir (Kula vd., 2012; McDaniel vd., 2023). Bu çalışmalarda odaklanılan ve dikkat çeken konulardan biri de sosyal mesafenin tahliye zaman çizelgeleri ve gerekli acil durum araçlarının sayısı üzerindeki etkisidir. Tsai vd. (2021) acil durumlarda tahliyeler sırasında sosyal mesafenin yarattığı zorlukları ele almış, derin sinir ağı (Deep Neural Network- DNN) tabanlı araç yönlendirmesi de dahil olmak üzere yönlendirme algoritmalarını incelemişlerdir.

Acil durum araç yönlendirmenin özelleşmiş bir konusu olarak ele alınan ambulans rotasının oluşturulması, acil durum müdahalesinin kritik yönüyle ve ilgili zorluklarıyla ele alınarak çözülmeye çalışılmaktadır. Araştırmalar, ambulans rota problemi (ARP) ve ambulans konumu ile ilgili son gelişmeleri incelemek için kapsamlı literatür taramalarını içermekte, rota optimizasyonunun önemini ve hastalar için kaliteli sağlık hizmeti sonuçları sağlamada algoritmaların rolünü vurgulamaktadır (Tassone & Choudhury, 2020; Darwassh Hanawy Hussein vd., 2022; Sutherland & Chakraborty, 2023). Ek olarak, çalışmalar afet müdahale operasyonlarında ambulansların yönlendirilmesine odaklanmış ve yaralıların verimli bir şekilde alınıp hastanelere ulaştırılmasının önemini vurgulamıştır (Kula vd., 2012). En yaygın kullanılan algoritmalarından biri, graf yapısındaki iki düğüm arasındaki mesafeleri komşuluk matrisinde güncelleyerek en kısa yolu bulan Dijkstra'nın algoritmasıdır (Sayed vd., 2018). Ayrıca akıllı şehirlerde ambulans araç yönlendirmesi için Yarasa Algoritması Tabanlı Evrimsel Sinir Ağı Algoritmasının (Bat Algorithm Based Convolutional Neural Network - BA-CNN) kullanımını araştırmıştır (Darwassh Hanawy Hussein vd., 2022). BA-CNN algoritması, gerçek dünya kısıtlamalarını dikkate alarak ve yanıt süresini en aza indirerek ambulans rota oluşturma problemini optimize etmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, simülasyon tabanlı modeller geliştirilmiş ve gerçek dünya kısıtları göz önünde bulundurularak birden fazla ambulans, sevk yeri ve hastane için en uygun yolu çizmek için kullanılmıştır (Darwassh Hanawy Hussein vd., 2022; Sutherland & Chakraborty, 2023). Ayrıca, araştırmalarda ambulans rota oluşturma sırasında, özellikle de tesisler arası hastane transferi sırasında güvenlik ölçütlerinin dahil edilmesinin önemini vurgulamıştır (Sayed vd., 2018; Tikani & Setak, 2019).

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı ambulans rotalama işleminin amacı, etkili acil durum müdahalesi için ambulans rotalarını optimize etmek üzere CBS teknolojisini ve altyapısını kullanmaktır. CBS kullanımının önemi düşük ve yüksek öncelikli çağrılar arasında ayırım yapmanın kritik olduğu acil durum yönetimi ortamlarında ortaya çıkmaktadır (Aringhieri vd., 2017). CBS teknolojisi, ambulans konuşlandırma planlamasına yardımcı olan zaman bazlı coğrafi modellerin sunulmasına olanak tanımaktadır (Ong vd., 2009). Buna ilaveten, CBS altyapısı kent içi acil durum müdahale altyapısının erişilebilirlik ve işlerlik derecesini değerlendiren bir modelle entegre olarak değerlendirilebilmekte ve CBS'nin sel gibi bir afet durumunda acil durum müdahalesini arttırabilmektedir (Albano vd., 2014).

Acil durum rota oluşturma esnasında hız sınırları, trafik koşulları ve sel nedeniyle yol ağının su altında kalması gibi acil durum hizmetlerinin kullanılabilirliği ve müdahale süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan faktörlerin dikkate alınması önemlidir. Bu sorunu çözebilmek adına, ulaşılabilirliği ölçmek, yol kısıtlamalarını dikkate alarak hizmet hacmini tahmin etmek ve engelleri göz önünde bulundurularak en hızlı rotalama algoritmasını seçmek esastır (Johnson & Yu, 2020). En hızlı rota oluşturma için çalışmalarda sıklıkla yol ağları üzerinde A* algoritması kullanılmakta olup rota optimizasyonunda gelişmiş algoritmaların kullanımı oldukça önemlidir (Mohd Nordin vd., 2011).

Şehir trafiğin yoğun olduğu bölgelerde acil sağlık hizmetlerinin önemli bir bileşeni, ambulans araçlarının emniyet şeritleri boyunca yönlendirilmesidir. Acil sağlık hizmetleri için etkili bir karar destek sağlama amacıyla, şerit önü temizleme ve hastane öncesi tarama gibi en son teknolojiler kullanılmaktadır (Zeng vd., 2021) ve ambulans rotası, belirlenmiş şeritlerin, maksimum hız sınırlarının ve trafik yönetim sistemlerinin kullanılmasıyla büyük ölçüde desteklenmektedir (Abdeen vd., 2022).

Şehir içi kalabalık trafikte ise ambulans ve normal araç sürüşü arasında ayırım yapmak, trafik koşullarına bağlı olarak şerit çizgileri için uyarlanabilir potansiyel işlevlerin geliştirilmesini gerektirmektedir (Zong vd., 2021). Bu ayırımın yapılması ve uyarlanabilir işlevler geliştirilmesi ambulans rotalama işleminin güvenliğini ve verimliliğini arttırıcı unsurlardır. Ek olarak acil durum araçlarına yönelik rotalama

çözümlerinde yol genişliği, viraj dönüş açıları ve geçiş hakkı gibi unsurlar da ambulans araçlarının rotalarının oluşturulmasında dikkate alınması gereken unsurlardır (Ozcan-Tatar vd., 2023).

Ambulansların etkin bir şekilde yönlendirilmesini sağlamanın ve acil müdahale sürelerini kısaltmanın en önemli yollarından biri, ambulans araçlarının rotaları için trafik sinyallerinde geçiş hakkının tanınmasıdır ve bu konuyu çok sayıda araştırma farklı açılardan ele almıştır. Örneğin; Amr vd. (2021), acil durumlarda gecikme sürelerini kontrol etmek amacıyla, acil durum araçlarının izleyeceği sürüş rotası planlamasını ve dağıtılmış acil durum kaynaklarının dağıtımını içeren bir Dağıtılmış Acil durum Ambulansı (DAA) yönlendirme modeli önermiştir. Bu modelin amacı, trafik kaynaklı insan muhakemesi zayıflatan koşullara bağımlı kalmadan rota belirleme ve acil durum ambulansının ulaşması için gereken sürenin kısaltılmasıdır. Benzer şekilde, afet müdahalesi için etkili bir rota oluşturmanın önemini vurgulayan Talarico vd. (2015) ambulans rotasının belirlenmesini, belirli bir hasta grubuna hizmet verecek bir ambulans kümesi içinden araç rotalarının belirlenmesi sorunu olarak tanımlamıştır.

Feroz vd. (2021) ise acil durum araçlarının yolunu açacak bir trafik sinyalizasyon modeli geliştirmiş, acil durum aracının kullandığı rota için yeşil sinyalin etkinleştirilmesini ve acil durum aracı rotadan çıkana kadar kırmızı sinyalin yanmamasını garanti edecek bir sistem önermiştir. Mascarenhas vd. (2013) de ambulanslar gibi acil durum araçlarına kesintisiz ve düzenli bir şekilde geçiş hakkı verirken müdahale sürelerini azaltmaya yardımcı olmak için sinyal önceliğini değerlendirmiştir.

Sarı (2017) yaptığı çalışmayla trafik sinyalleri, kasisler ve park durumu gibi acil durum araçlarını yavaşlatan ve müdahale sürelerini uzatan engelleri belirlemeye odaklanmıştır. Bu sayede acil durum araçları için mümkün olan en hızlı tepki süresi elde edilmiştir. Bu, ambulans yönlendirmesini en üst düzeye çıkarmak için trafik sinyal düzenlemeleriyle ilgilenmenin ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Acil sağlık hizmetlerinin önemli bir yönü de coğrafi eğiminin ambulansa özel yönlendirmedeki etkisidir. Ambulans yönlendirmesi, trafik, hasarlı altyapı ve eğim gibi topografik özellikler de dahil olmak üzere bir dizi değişkeni dikkate alarak hastanın bulunduğu yerden hastaneye giden en hızlı güzergahın belirlenmesini gerektirmektedir. Hem hasta sonuçları hem de ambulans taşıma süreleri eğim etkisinden büyük ölçüde etkilenebilir. Araştırmalara göre, ambulans yönlendirmesi, eğim gibi topografik özellikler, trafik düzenleri ve altyapısal bozulma gibi bir dizi değişkenden etkilenen karmaşık bir konudur (Talarico vd., 2015).

Ayrıca, ambulans görevlileri tarafından acil servise nakil ihtiyacını değerlendirmek için kullanılan ölçümlerin duyarlılığı ve özgüllüğü vurgulanarak, alternatif tedavi rotalarından faydalanabilecek hastaların etkili bir şekilde tespit edilmesindeki zorluklar ortaya konmuştur (Blodgett vd., 2021). Bunun yanında, bir çalışmada daha düşük rakımlı rotaların olduğu günlerde acil ambulans sevkiyatlarında daha yüksek rakımlı rotaların olduğu günlere göre daha büyük bir artış olduğu tespit edilmiş ve topografik faktörlerin ambulans sevkiyatları üzerindeki öneminin altı çizilmiştir (Ueda vd., 2012).

3. Materyal ve yöntem

Bu bölümde acil durum araçlarının yönlendirilmesinde akıllı bir ulaşım çözümü olarak ambulans araçlarının rotasının oluşturulması için geliştirilen optimizasyon modelinde kullanılan veri kümesi ve rota oluşturma algoritması anlatılmıştır.

3.1. Veri kümesi

T.C. Sağlık Bakanlığı ile ortaklaşa yürütülen proje kapsamında hazırlanan bu çalışmada 29 Mayıs Hastanesi ve Liv Hastanesi'ne ait ambulans araç takip verisi, hastanelerin konum bilgisi ve Başarsoft Bilgi Teknolojileri AŞ'ye ait yol ağı verileri ve hipotetik olarak oluşturulan hasta noktaları kullanılmıştır.

Araç takip verisi kapsamında ambulanslara ilişkin kimlik numarası, enlem, boylam, açısız yön, anlık hız, yükseklik ve araca ait hız sınırı bilgisi kullanılmıştır. Tablo 1'de veriler ilişkin detay belirtilmiştir.

Tablo 1. Araç Takip Verisi

DeviceId	Lat	Lng	Direction	Speed	Altitude	SpeedLimit
16S1***	40.21334	29.01428	91.33	67.94	112	82
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Enlem	Boylam	Açısal Yön	Anlık Hız	İrtifa	Araç Hız Limiti

Başarsoft Bilgi Teknolojileri AŞ'nin ürettiği yol ağı segment ve düğüm noktalarına ait kimlik numarası, yol adı, trafiğin akış yönü (DF), yol genişliği (WD), yol segmentinin tipi (TIPI), araç yasakları (VTR), yol segmentinin maksimum hız sınırı (HIZLIMIT) ve türetilmiş yaklaşık ortalama sürüş hızı (ORTALAMAHIZ) verileri kullanılmıştır. Tablo 2'de verilere ilişkin örnek ve detaylar belirtilmiştir.

Tablo 2. Yol Ağı Segment Bilgileri

ID	ADI	DF	WD	TIPI	VTR	HIZLIMIT	ORTALAMAHIZ
985764***	XYZ	1	2	Cadde	YYYYNYYN	90	70
		↓	↓	↓	↓		
		1: Trafik her iki yönde de akıyor 2: Trafik yol segmentinin çizim yönünün tersine tek yönlü akıyor 3: Trafik, yol segmentinin çizim yönünde tek yönlü akıyor 4: Yol segmenti araç trafiğine kapalı	Boş: Normal yol 1: Dar yollar (Tek Şeritli – İki araç yan yana geçemeyebilir) 2: Dik Yol 3: Dar ve Dik yol	Otoyol Devlet Yolu İl Yolu Bulvar Cadde Sokak İç Yol	N:Yasak yok, İlgili araç türü girebilir Y: Yasak var, İlgili araç türü giremez 1: Araba 2: Kamyon 3: Taksi ... 9: Ambulans - İtfaiye Aracı		

Hastane ve hipotetik hasta konumlarına ait veriler ise enlem ve boylam olarak hazırlanmıştır.

3.2. A* Algoritması

A* algoritması, yönlü veya yönsüz bir graf üzerinde başlangıç noktasından hedef noktaya en kısa yolu bulmak için kullanılan sezgisel bir algoritmadır (Hart vd., 1968). Dijkstra algoritmasından farklı olarak, A* algoritması yalnızca en kısa yolu değil, aynı zamanda belirli bir sezgisel fonksiyonu $h(n)$ kullanarak daha hızlı arama yapar. Bu fonksiyon, düğümden hedefe olan tahmini maliyeti ifade eder ve arama sürecini hızlandırır.

A* algoritması aşağıdaki adımları izler:

- Başlangıç düğümü seçimi:** Başlangıç düğümü açık listeye eklenir ve bu düğümün toplam maliyeti $f(n)=g(n)+h(n)$ olarak hesaplanır. Burada:
 - $g(n)$: Başlangıç düğümünden mevcut düğüme kadar olan gerçek maliyet,
 - $h(n)$: Mevcut düğümden hedef düğüme olan tahmini maliyettir.

2. **En düşük maliyetli düğümün seçimi:** Açık listedeki düğümler arasında $f(n)$ değeri en düşük olan düğüm seçilir.
3. **Komşuların değerlendirilmesi:** Seçilen düğümün komşuları incelenir ve her bir komşunun $g(n)$ ve $f(n)$ değerleri güncellenir. Eğer komşu düğüm daha iyi bir yolla keşfedilmişse, açık listeye eklenir.
4. **Hedefe ulaşma:** Hedef düğüme ulaşıldığında arama işlemi durdurulur ve en kısa yol belirlenir.

A* algoritmasının en önemli avantajı, kullanılan sezgisel fonksiyon sayesinde arama alanını daraltarak daha hızlı sonuç vermesidir.

3.3. Genetik Algoritmalar

Genetik algoritmalar (GA), doğal seçim ve genetik mekanizmaları temel alan bir meta-sezgisel optimizasyon yöntemidir (Holland, 1975). Karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bu algoritma, büyük bir çözüm uzayında iyi sonuçlar sağlayabilir.

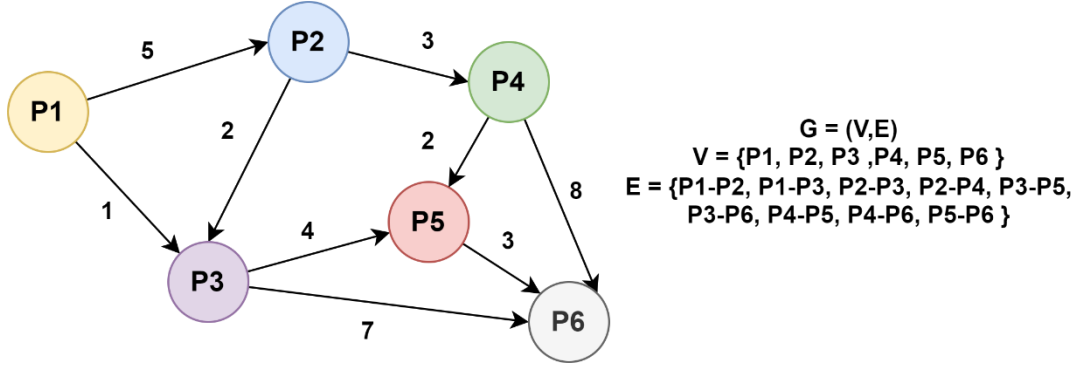
Genetik algoritmanın temel adımları şunlardır:

1. **Başlangıç popülasyonunun oluşturulması:** Olası çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu rastgele veya belirli bir yöntemle oluşturulur.
2. **Uygunluk değerlendirmesi (fitness):** Her bir çözüm, belirlenen hedef fonksiyona göre değerlendirilir. Daha uygun çözümler daha yüksek bir fitness değerine sahiptir.
3. **Seçim (selection):** Daha yüksek fitness değerine sahip çözümler, bir sonraki nesli oluşturmak için seçilir.
4. **Çaprazlama (crossover):** Seçilen çözümler arasında bilgi değişimi yapılarak yeni bireyler oluşturulur.
5. **Mutasyon (mutation):** Çeşitliliği artırmak ve yerel maksimumlara takılmayı önlemek için rastgele değişiklikler yapılır.
6. **Yeni nesil oluşturulması:** Yeni bireylerden oluşan bir popülasyon oluşturulur ve bu süreç belirli bir kriter karşılanana kadar tekrar edilir.

3.4. Dijkstra Algoritması

Dijkstra algoritması, graf teorisinde bir düğümden diğer bir düğüme en kısa yolu bulmak için kullanılan bir algoritmadır (Dijkstra, 1959). Dijkstra algoritmasında her bir nokta bir graf düğümü olarak adlandırılır ve graflar arası mesafeyi bulmak için arama sürecinde, herhangi bir yola bağlı olan düğümler ve gezinme düğümleri geçici olarak işaretlenmiş düğümler olarak ele alınır. Her arama döngüsünde bir başlangıç noktasından hedef noktaya en kısa yol uzunluğu, geçici olarak işaretlenmiş düğümlerden kalıcı olarak işaretlenmiş düğümler bulunacak şekilde aranır (Ngo vd., 2021).

Dijkstra algoritması etiketleme algoritması da olarak bilinen aç gözlü bir algoritmadır (Qing vd., 2017). Algoritma yönlü bir graf probleminde çalışır ve bu yönlü grafa $G = (V,E)$ olarak temsil eden bir düzlemde düğümlerin kümesi V , düğümler arası yol kümesi de E ile ifade edilmekte olup yönlü bir graf örneği de Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Örnek bir yönlü graf

Dijkstra algoritmasında en kısa yolu bulmak için algoritmada öncelikle bir başlangıç düğümü seçilmelidir. Başlangıç düğümü olarak seçilen A düğümü ile B düğümü arasındaki “ağırlık” olarak ifade edilen C (A, B) mesafe değeri komşuluk matrisinde güncellenmeli eğer bir bağlantı yok ise $C(A, B) = \infty$ olarak belirlenmelidir. Sonraki adımda başlangıç düğümüne komşu düğüm ele alınır ve komşu düğüm üzerinden A düğümü ile mesafesi ölçülerek komşuluk matrisi tekrar güncellenir. Bu işlem tüm düğümler arası en kısa mesafe bulununcaya kadar devam eder.

Dijkstra algoritmasında bir v düğümünden X düğümüne en kısa mesafe $DIST(X)$ örnek olarak şu şekilde bulunur:

1. Başlangıç adımında çıkış düğümü A olarak belirlenir ve en kısa yol matrisi sadece A düğümünü içerecek küme $S \cup \{A\}$ şeklinde oluşturulur.
2. V-S düğümleri arasında çıkış “v” noktasına en yakın “i” düğümü bulunur, en kısa maliyete sahip yol hesaplanarak “i” düğümü S kümesine eklenir.
3. Yeni çıkış noktası “i” düğümü olarak belirlenir ve “j” düğümüne uzaklık ölçülür ve eğer $DIST(j) > DIST(i) + C(i,j)$ ise $DIST(j) = DIST(i) + C(i,j)$ şeklinde komşuluk matrisi güncellenir.
4. 2. Ve 3. Adımda olan işlemler (n-1) kez tekrar edilir. Böylece ilk başlangıç düğümünden, ara düğümlere ve son düğümüne kadar graf üzerindeki en kısa mesafeler hesaplanmış olur.

Detayları yukarıda açıklanan A*, genetik ve Dijkstra algoritmalarını içeren ambulans rota optimizasyon modelimize ait ilgili senaryolar ve bulgular bir sonraki başlıkta açıklanmış ve tartışılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada ambulans rotası oluşturma için A*, Genetik ve Dijkstra algoritmaları kullanılmış, 3 farklı senaryo için rota oluşturulmuştur.

Bu senaryolar:

- Geçiş üstünlüğü
- Ters yön
- Eğimli yol senaryolarıdır.

Geçiş üstünlüğü senaryosunda ambulans gibi acil durum araçlarının trafik ışıklarında bekleme zorunluluğu olmaması, dolayısıyla yolun mevcut trafiğinden etkilenmemesi senaryosu üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda, 29 Mayıs Hastanesi’nden seçili noktaya (Hoşdere Cd. No:206) gidiş ve dönüş rotası normal bir araç rotası ile kıyaslanmıştır. A* algoritması ile elde edilen örnek rota Şekil 2’de gösterilmektedir.

Yapılan kıyaslama sonucunda; geçiş üstünlüğü olan aracın Dijkstra algoritması ile oluşturulan rotası için toplamda 19 dakikalık bir seyahat süresi ve 5.8 km’lik bir mesafe hesaplanmıştır. A* algoritması ile bu süre 17 dakikaya, genetik algoritma ile ise 18 dakikaya düşmüştür. Standart araç rotalaması için

ise Dijkstra algoritması ile 42 dakikalık bir seyahat süresi ve 10.9 km'lik bir mesafe hesaplanmış olup, A* algoritması ile bu süre 40 dakikaya, genetik algoritma ile ise 41 dakikaya indirilebilmiştir. Trafik ışıklarında bekleme yapmama durumu yalnızca acil durum araçları için geçerli olduğundan, Dijkstra algoritmasına göre acil durum aracının 23 dakikalık bir kazanç olduğu görülmüştür. A* algoritması ile bu kazanç 25 dakikaya, genetik algoritma ile ise 24 dakikaya yükselmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Geçiş üstünlüğü senaryosu kıyaslaması

		Standart Araç	Ambulans	Mesafe
A*	Hastaneden seçili noktaya	22 dk	8 dk	5,8 km
	Seçili noktadan Hastaneye	16 dk	9 dk	5,1 km
	Toplam	38 dk	17 dk	10,9 km
Genetik	Hastaneden seçili noktaya	23 dk	8.5 dk	5,8 km
	Seçili noktadan Hastaneye	17 dk	9.5 dk	5,1 km
	Toplam	40 dk	18 dk	10,9 km
Dijkstra	Hastaneden seçili noktaya	24 dk	9 dk	5,8 km
	Seçili noktadan Hastaneye	18 dk	10 dk	5,1 km
	Toplam	42 dk	19 dk	10,9 km

Bir diğer senaryo olan Ters Yön senaryosunda acil durum araçlarının gerekli durumlarda ters yöne girebilmesi senaryosu işlenmiştir. Bu kapsamda, Liv Ankara Hastanesi'nden seçili noktaya (Bestekar Sk. No.61) gidiş ve dönüş, normal bir aracın ters yön kullanmadığı senaryo ile kıyaslanmıştır A* algoritması ile elde edilen örnek rota Şekil 3'te gösterilmektedir.

Acil durum araçlarının ters yön kullanma iznini göz önünde bulundurularak çalışılan senaryoda, standart araç için Dijkstra algoritması ile toplamda 24 dakikalık bir seyahat süresi ve 2.55 km'lik bir mesafe hesaplanmıştır. A* algoritması kullanıldığında bu süre 22 dakikaya, genetik algoritma ile ise 23 dakikaya düşmüştür. Ambulans için ise Dijkstra algoritmasına göre toplamda 16 dakikalık bir seyahat süresi ve 1.46 km'lik bir mesafe hesaplanmıştır. A* algoritması ile bu süre 14 dakikaya, genetik algoritma ile ise 15 dakikaya indirilebilmiştir. Acil durum aracının ters yöne girebilme yetkisine göre hazırlanan rota, Dijkstra algoritmasına göre toplamda 8 dakikalık bir kazanç sağlarken; A* algoritması ile bu kazanç 10 dakikaya, genetik algoritma ile ise 9 dakikaya yükselmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Ters yön senaryosu kıyaslaması

		Standart Araç	Ambulans	Mesafe
A*	Hastaneden seçili noktaya	16 dk	9 dk	1,82 km/0,73 km
	Seçili noktadan Hastaneye	5 dk	5 dk	0,73 Km
	Toplam	21 dk	14 dk	2,55/1,46 Km
Genetik	Hastaneden seçili noktaya	17 dk	9.5 dk	1,82 km/0,73 km
	Seçili noktadan Hastaneye	5.5 dk	5.5 dk	0,73 Km
	Toplam	22.5 dk	15 dk	2,55/1,46 Km
Dijkstra	Hastaneden seçili noktaya	18 dk	10 dk	1,82 km/0,73 km
	Seçili noktadan Hastaneye	6 dk	6 dk	0,73 Km
	Toplam	24 dk	16 dk	2,55/1,46 Km

Son olarak eğimli yol senaryosunda acil durum araçlarına sunulan yol ortalama hızının, normal araçlardan farklı olması, mevcut yol trafiğinde karşılaşılan toplu taşıma aracı ve büyük araçların sebep

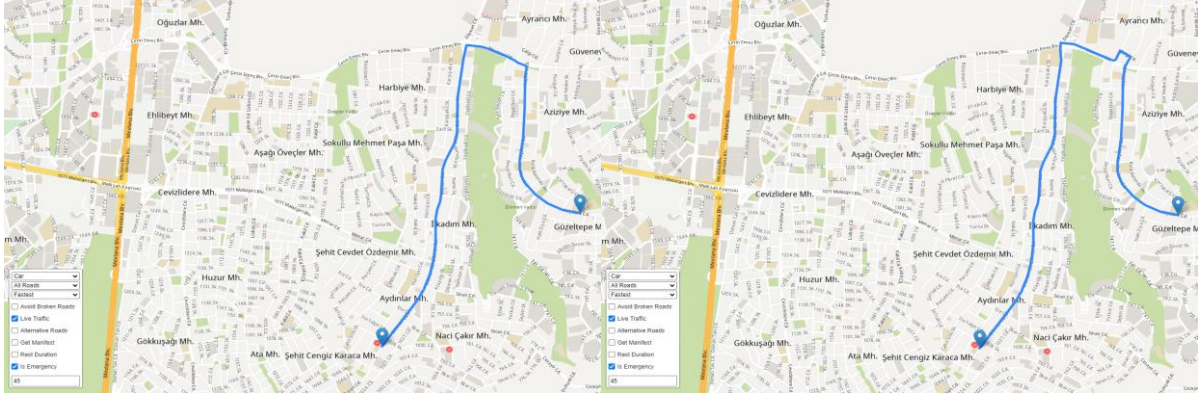
olduğu yavaşlamadan etkilenmediği durum çalışılmıştır. Senaryoda 29 Mayıs Hastanesi'nden seçili noktaya (Oğuzlar Mah. 1395 Sk. No:10) gidiş ve dönüşü standart bir araç ile kıyaslanmıştır. A* algoritması ile elde edilen örnek rota Şekil 4'te gösterilmektedir.

Eğimli yol çalışılan senaryoda, standart araç için Dijkstra algoritması ile aynı rotada 32 dakikalık bir seyahat süresi ve 9.1 km'lik bir mesafe hesaplanmıştır. A* algoritması kullanıldığında bu süre 30 dakikaya, genetik algoritma ile ise 31 dakikaya düşmüştür. Acil durum aracı için türetilmiş, trafikten arındırılmış yolda Dijkstra algoritması ile 15 dakikalık bir seyahat süresi ve 9.1 km'lik bir mesafe hesaplanmıştır. A* algoritması ile bu süre 13 dakikaya, genetik algoritma ile ise 14 dakikaya indirilebilmiştir. Toplamda, acil durum aracı için Dijkstra algoritmasına göre 17 dakikalık bir kazanç sağlanırken; A* algoritması ile bu kazanç 19 dakikaya, genetik algoritma ile ise 18 dakikaya çıkarılmıştır.

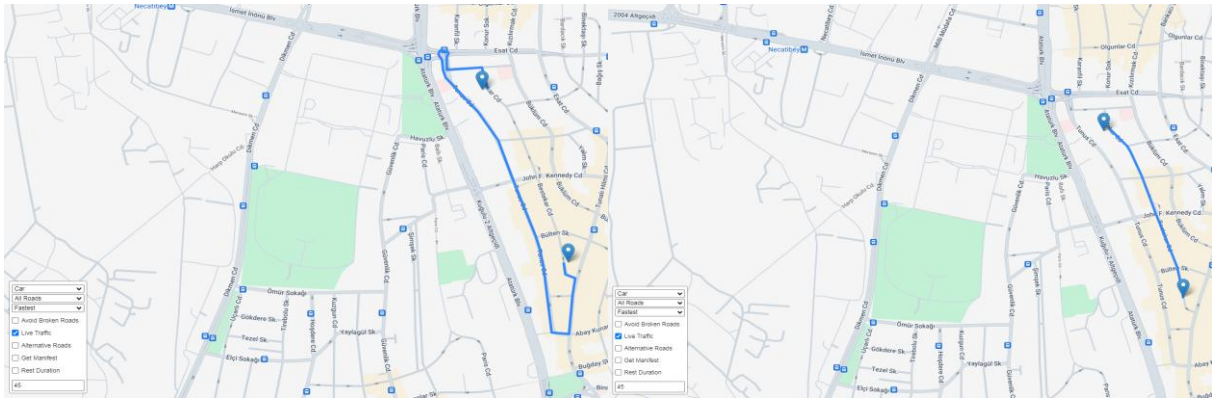
Tablo 5. Eğimli yol senaryosu kıyaslaması

		Standart Araç	Ambulans	Mesafe
A*	Hastaneden seçili noktaya	16 dk	5 dk	4,4 km
	Seçili noktadan Hastaneye	12 dk	8 dk	4,7 km
	Toplam	28 dk	13 dk	9,1 km
Genetik	Hastaneden seçili noktaya	17 dk	5.5 dk	4,4 km
	Seçili noktadan Hastaneye	13 dk	8.5 dk	4,7 km
	Toplam	30 dk	14 dk	9,1 km
Dijkstra	Hastaneden seçili noktaya	18 dk	6 dk	4,4 km
	Seçili noktadan Hastaneye	14 dk	9 dk	4,7 km
	Toplam	32 dk	15 dk	9,1 km

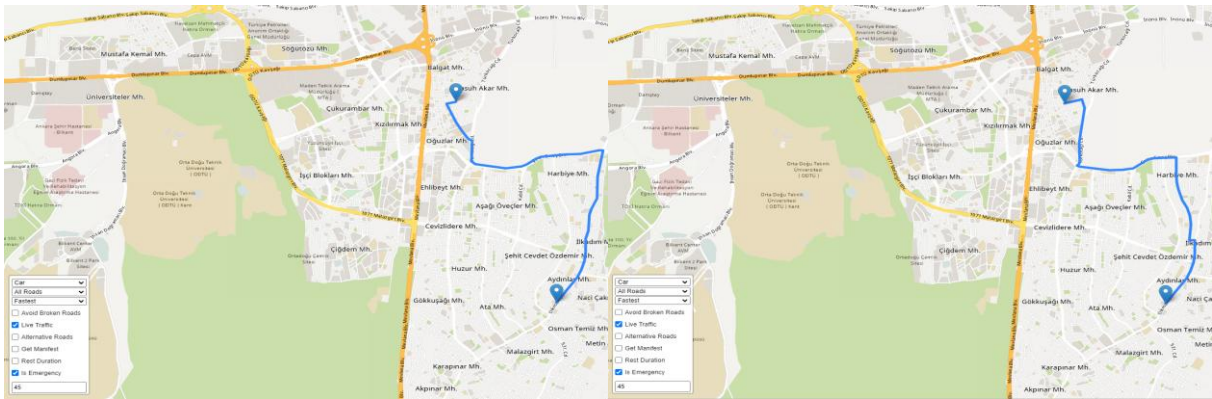
Çalışmada kullanılan Dijkstra, A* ve genetik algoritmaların farklı sonuçlar üretmesi, algoritmaların maliyet fonksiyonlarında kullanılan ağırlıklar ve parametre ayarlarından kaynaklanmaktadır. Dijkstra algoritması, yalnızca mesafe odaklı statik bir yaklaşım sunarken, A* algoritması, sezgisel bir fonksiyon kullanarak arama alanını daraltmış ve %10'a kadar daha hızlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Örneğin, geçiş üstünlüğü senaryosunda Dijkstra algoritmasıyla 19 dakika olarak hesaplanan ambulans seyahat süresi, A* algoritmasıyla 17 dakikaya düşmüştür. Genetik algoritmalar ise çoklu hedefleri optimize etme esnekliğiyle dikkat çekmiş, ancak Dijkstra'ya göre %5 oranında daha iyi sonuçlar sunarak A* kadar hızlı olamamıştır. Bu farklılıklar, algoritmaların çözüm uzayına yaklaşım biçimlerinden kaynaklanmaktadır. A* algoritmasının sezgisel maliyet fonksiyonu, dinamik faktörler (örneğin trafik yoğunluğu ve yol durumu) dikkate alındığında daha hızlı çözümler sunarken; genetik algoritmalar, parametre ayarlarının (fitness fonksiyonu, mutasyon oranı ve popülasyon boyutu gibi) doğru yapılandırılmasına bağlı olarak geniş ve karmaşık problem uzaylarında etkili olmuştur. Sonuçlar, her üç algoritmanın da acil durum senaryolarında uygulanabilir olduğunu, ancak senaryonun dinamik özelliklerine ve optimizasyon hedeflerine bağlı olarak performanslarının değişebileceğini göstermiştir.



Şekil 2. Geçiş Üstünlüğü Senaryosu: 29 Mayıs Hastanesi – Hoşdere Cd. No.206 Gidiş ve Dönüş Güzergâhı, A* Algoritması Örnek Gösterimi



Şekil 3. Ters yön senaryosu: Liv Ankara Hastanesi – Bestekar Sk. No:61 Standart ve Acil Durum Araç Rotaları, A* Algoritması Örnek Gösterimi



Şekil 4. Eğimli yol senaryosu: 29 Mayıs Hastanesi – Oğuzlar Mah. 1395 Sk. No:10 Gidiş ve Dönüş Güzergâhı, A* Algoritması Örnek Gösterimi

Bu çalışma, Türkiye'deki trafik özelliklerini ve acil durum araçlarının özel ihtiyaçlarını dikkate alarak, ambulansların kullanımına özel olarak tasarlanmış bir rota optimizasyon modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Geliştirilen model, ambulansların trafik ışıklarında geçiş üstünlüğü, ters yöne giriş yapabilme ve eğimli güzergahlar gibi zorlu koşulları dikkate alarak, farklı algoritmalarla acil durum müdahale sürelerini önemli ölçüde kısaltmayı hedeflemiştir. Özellikle, Dijkstra algoritmasıyla belirlenen sürelerin A* algoritması kullanılarak %10'a kadar iyileştirilebildiği, genetik algoritmalarla

ise %5'lik bir iyileştirme sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, A* algoritmasının daha hızlı sonuçlar üretebilme yeteneğini, genetik algoritmaların ise farklı kısıtlarla başa çıkabilme esnekliğini ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen araştırmalarda, acil durum araç yönlendirmesi ve ambulans rotalarının optimizasyonu konusunda mevcut çalışmaların geniş bir yelpazede ele alındığı görülmüştür. Özellikle, McDaniel vd. (2023) tarafından geliştirilen hızlı araç yönlendirme algoritmaları, afetler sırasında zamanında ve verimli araç yönlendirmesi sağlamak için önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir (McDaniel vd., 2023). Bu çalışmalar, acil durum müdahalesinin mevcut durum içerisindeki akışkanlığını ve belirsizliğini ele alarak, acil durumlar için hızlı ve etkili araç yönlendirmesi sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Ayrıca, Sparse A* ve Dijkstra algoritmalarının acil durum rota bulma algoritmaları olarak uygulanmış, yangın gibi afetler sırasında kaçış yollarının bulunmasına yardımcı olmak ve güvenli tahliye için etkili yönlendirme sağladığı ifade edilmiştir (Rout vd., 2020; McDaniel vd., 2023). Bu gibi önemli algoritmaların uygulanması, zorlu trafik koşullarında ambulansların daha hızlı ve güvenli bir şekilde yönlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada ise A* algoritmasının sezgisel yapısı sayesinde Dijkstra'ya kıyasla daha hızlı sonuçlar sağladığı, genetik algoritmaların ise çoklu hedef optimizasyonunda etkili olabileceği görülmüştür.

Bu çalışmanın literatürdeki önceki çalışmalardan ayıran önemli bir yönü, Türkiye trafik koşullarında ambulanslara yönelik özel ihtiyaçları karşılayacak bir rota optimizasyon modelinin geliştirilmesidir. Yapılan çalışmayla ambulansların ters yöne girebilmesi ve trafik ışıklarında geçiş üstünlüğü gibi özellikleri içeren zenginleştirilmiş ağ verisi oluşturulmuş ve acil durum müdahale sürelerinin hem Dijkstra, hem A*, hem de genetik algoritmalarla kıyaslanarak kısaltıldığı gösterilmiştir. Bu yaklaşım, ambulans hizmetlerinin etkinliğini artırmak için trafik sinyallerinde geçiş hakkının tanınmasının önemini de ortaya koymaktadır.

Ayrıca, sunulan model ile acil durum müdahale sürelerini kısaltarak hasta ve yaralıların hayatta kalma şanslarının artırılması hedeflenmiş ve Türkiye'deki ambulans hizmetlerinin verimliliğini artırmak için pratik ve yenilikçi çözümler önerilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli, acil sağlık hizmetlerinin kalitesini artırarak toplum sağlığı üzerinde olumlu bir etki yaratma potansiyeline sahip olup, gelecekteki araştırmalara yönelik bir temel oluşturarak, ambulans rotası optimizasyonu ve acil durum yönetimi alanında daha ileri çalışmalar için önemli bir kaynak olacaktır.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, Türkiye'deki trafik özelliklerini ve acil durum araçlarının özel ihtiyaçlarını dikkate alarak, ambulansların kullanımına özel olarak tasarlanmış bir rota optimizasyon modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmanın sonuçları, ambulansların trafik ışıklarında geçiş üstünlüğü ve ters yöne giriş yapabileme gibi özelliklerle donatılmasını sağlayarak, acil durum müdahale sürelerini önemli ölçüde kısaltmayı hedeflemiştir. Özellikle, Dijkstra algoritmasıyla belirlenen sürelerin A* algoritması kullanılarak %10'a kadar iyileştirilebildiği, genetik algoritmalarla ise %5 oranında iyileştirilebildiği görülmüştür. Bu iyileştirmeler, kullanılan algoritmaların çeşitli trafik senaryolarında sunduğu avantajları ve modelin esnek yapısını ortaya koymaktadır. Ayrıca, eğimli güzergahlarda oluşabilecek trafik yavaşlamalarını dikkate alarak ambulanslara özel hızlı ve etkili rotalar çıkarmak, çalışmanın önemli sonuçlarından biri olarak öne çıkmıştır.

Ancak, modelin gerçek dünya trafik koşullarında ve farklı türde acil durum senaryolarında nasıl performans göstereceği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu çalışma, belirli bir coğrafi bölge ve trafik koşulları dikkate alınarak geliştirilmiştir; dolayısıyla, modelin farklı coğrafi bölgelerde uygulanabilirliği ve etkinliği konusunda ek çalışmalar gerekmektedir. A* algoritmasının hızlı çözüm üretme kabiliyeti ve genetik algoritmaların çoklu hedef optimizasyonundaki başarısı, gelecekteki model geliştirme çalışmalarında önemli bir temel oluşturabilir.

Gelecek çalışmalarda, modelin genel geçerliliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için daha geniş ve çeşitli veri setleri kullanılabilir. Ayrıca, modelin farklı trafik koşulları ve acil durum senaryoları altında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek için kapsamlı simülasyon çalışmaları yapılabilir. Modelin

farklı coğrafi bölgelerdeki uygulanabilirliğini test etmek amacıyla, farklı ülkelerin trafik özellikleri ve acil durum yönetim ihtiyaçları göz önünde bulundurularak adaptasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Bunun yanı sıra, gelecek çalışmalar, trafik sinyalizasyon sistemleri, yol ağının dinamik özellikleri ve acil durum araçlarının öncelikli geçiş hakları gibi faktörleri daha detaylı bir şekilde inceleyerek, modelin optimizasyonunu ve etkinliğini artırabilir. Ayrıca, yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin modelin geliştirilmesi sürecine entegrasyonu, rota optimizasyonunun daha dinamik ve adaptif hale getirilmesine olanak sağlayabilir. A* algoritmasının sezgisel yapısının bu süreçte etkili olabileceği, genetik algoritmaların ise karmaşık ve çok boyutlu optimizasyon problemlerine çözüm sunabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgular ve öneriler, acil durum yönetimi ve ambulans hizmetlerinin etkinliğinin artırılması konusunda politika yapımcılar ve ilgili kurumlar için değerli bilgiler sunmaktadır. Gelecek çalışmalar, bu çalışmanın sonuçlarını temel alarak, acil sağlık hizmetlerinin kalitesini ve toplum sağlığı üzerindeki olumlu etkilerini artırmaya yönelik politikaların ve uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Sorumlu yazar, ikinci ve üçüncü yazar tarafından araştırmanın ilk versiyonu hazırlanmış, tüm yazarlar tarafından düzenlenerek gözden geçirilmiştir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2244 programı tarafından 119C200 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Bu çalışma, 2-4 Mayıs 2024 tarihlerinde Ankara’da gerçekleşen SUMMITS’24 Uluslararası Akıllı Ulaşım Sistemleri Zirvesi’nde bildiri olarak sunulmuş, bildiriler kitabına ise bildiri özeti gönderilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Referanslar

Abdeen, M. A. R., Ahmed, M. H., Seliem, H., Sheltami, T. R., Alghamdi, T. M., & El-Nainay, M. (2022). A Novel Smart Ambulance System—Algorithm Design, Modeling, and Performance Analysis. *IEEE Access*, *10*, 42656-42672. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3168736>

Alamri, A. (2023). A Smart Spatial Routing and Accessibility Analysis System for EMS Using Catchment Areas of Voronoi Spatial Model and Time-Based Dijkstra’s Routing Algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031808>

Albano, R., Sole, A., Adamowski, J., & Mancusi, L. (2014). A GIS-based model to estimate flood consequences and the degree of accessibility and operability of strategic emergency response structures in urban areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *14*(11), 2847-2865. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2847-2014>

Amr, M. F., Elgarej, M., Benmoussa, N., Mansouri, K., & Qbadou, M. (2021). Towards a Distributed SMA-based Solution for the Interoperability of Hospital Information Systems for Better Routing of Emergency Ambulances. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, *17*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i12.25455>

Aringhieri, R., Bruni, M. E., Khodaparasti, S., & van Essen, J. T. (2017). Emergency medical services and beyond: Addressing new challenges through a wide literature review. *Computers & Operations Research*, *78*, 349-368. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.09.016>

Blodgett, J. M., Robertson, D. J., Pennington, E., Ratcliffe, D., & Rockwood, K. (2021). Alternatives to direct emergency department conveyance of ambulance patients: A scoping review of the evidence.

Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine, 29(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s13049-020-00821-x>

Darwassh Hanawy Hussein, T., Frikha, M., Ahmed, S., & Rahebi, J. (2022). BA-CNN: Bat Algorithm-Based Convolutional Neural Network Algorithm for Ambulance Vehicle Routing in Smart Cities. *Mobile Information Systems*, 2022, e7339647. <https://doi.org/10.1155/2022/7339647>

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>

Feroz, B., Mehmood, A., Maryam, H., Zeadally, S., Maple, C., & Shah, M. A. (2021). Vehicle-Life Interaction in Fog-Enabled Smart Connected and Autonomous Vehicles. *IEEE Access*, 9, 7402-7420. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3049110>

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press.

Johnson, S., & Yu, D. (2020). From flooding to finance: NHS ambulance-assisted evacuations of care home residents in Norfolk and Suffolk, UK. *Journal of Flood Risk Management*, 13(1), e12592. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12592>

Kula, U., Tozanli, O., & Tarakcio, S. (2012). *Emergency Vehicle Routing in Disaster Response Operations*. 23rd Annual Conference of the Production and Operations Management Society.

Mascarenhas, N., G, P., Agrawal, M., P, S., & A, A. (2013). A Proposed Model for Traffic Signal Preemption Using Global Positioning System (GPS). *Computer Science & Information Technology (CS & IT)*, 219-226. <https://doi.org/10.5121/csit.2013.3423>

McDaniel, E. L., Akwafuo, S., Urbanovsky, J., & Mikler, A. R. (2023). Benchmarking a fast, satisficing vehicle routing algorithm for public health emergency planning and response: “Good Enough for Jazz?”. *PeerJ Computer Science*, 9, e1541. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1541>

Mohd Nordin, N. A., Kadir, N., Zaharudin, Z. A., & Nordin, N. A. (2011). An application of the A* algorithm on the ambulance routing. *2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering*, 855-859. <https://doi.org/10.1109/CHUSER.2011.6163858>

Ngo, T.-G., Dao, T.-K., Thandapani, J., Nguyen, T.-T., Pham, D.-T., & Vu, V.-D. (2021). Analysis Urban Traffic Vehicle Routing Based on Dijkstra Algorithm Optimization. İçinde H. Sharma, M. K. Gupta, G. S. Tomar, & W. Lipo (Ed.), *Communication and Intelligent Systems* (ss. 69-79). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1089-9_7

Ong, M. E. H., Ng, F. S. P., Overton, J., Yap, S., Andresen, D., Yong, D. K. L., Lim, S. H., & Anantharaman, V. (2009). Geographic-time distribution of ambulance calls in Singapore: Utility of geographic information system in ambulance deployment (CARE 3). *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 38(3), 184-191.

Ozcan-Tatar, C., Tukel, E., Yilmaz, E., Cabuk, S. N., & Ozturk, G. (2023). Routing and Navigation Solutions for Emergency Vehicles in Urban Emergency Management. *Resourceedings*, 3(1), 75-80. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v3i1.946>

Qing, G., Zheng, Z., & Yue, X. (2017). Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 7138-7143. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978471>

Rout, R. R., Vemireddy, S., Raul, S. K., & Somayajulu, D. V. L. N. (2020). Fuzzy logic-based emergency vehicle routing: An IoT system development for smart city applications. *Computers & Electrical Engineering*, 88, 106839. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106839>

Sari, F. (2017). A GIS Based New Navigation Approach for Reducing Emergency Vehicle's Response Time. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.69>

Sayed, S., Ibrahim, R., & Hefny, H. (2018). *An Efficient Ambulance Routing System for Emergency Cases based on Dijkstra's Algorithm, AHP, and GIS.*

Sutherland, M., & Chakraborty, R. K. (2023). An optimal ambulance routing model using simulation based on patient medical severity. *Healthcare Analytics*, 4, 100256. <https://doi.org/10.1016/j.health.2023.100256>

Talarico, L., Meisel, F., & Sörensen, K. (2015). Ambulance routing for disaster response with patient groups. *Computers & Operations Research*, 56, 120-133. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.11.006>

Tassone, J., & Choudhury, S. (2020). *A Comprehensive Survey on the Ambulance Routing and Location Problems* (arXiv:2001.05288). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.05288>

Tikani, H., & Setak, M. (2019). Ambulance routing in disaster response scenario considering different types of ambulances and semi soft time windows. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1), 95-128.

Tsai, Y.-L., Rastogi, C., Kitanidis, P. K., & Field, C. B. (2021). Routing algorithms as tools for integrating social distancing with emergency evacuation. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98643-z>

Ueda, K., Shimizu, A., Nitta, H., & Inoue, K. (2012). Long-range transported Asian Dust and emergency ambulance dispatches. *Inhalation Toxicology*, 24(12), 858-867. <https://doi.org/10.3109/08958378.2012.724729>

Zeng, Z., Yi, W., Wang, S., & Qu, X. (2021). Emergency Vehicle Routing in Urban Road Networks with Multistakeholder Cooperation. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147(10), 04021064. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000577>

Zong, F., Zeng, M., Cao, Y., & Liu, Y. (2021). Local Dynamic Path Planning for an Ambulance Based on Driving Risk and Attraction Field. *Sustainability*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su13063194>

Araştırma Makalesi

Demiryolu araçları için radyo frekans haberleşmeli çarpışma uyarı sistemi kavramsal tasarımı

Mehmed Akif Özkaya^{1,*}, Ekrem Çağlar²

^{1,2} TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Teknopark İstanbul, İstanbul, Türkiye

*Correspondence: akifozkaya@gmail.com

DOI: 10.51513/jitsa.1551510

Özet: Demiryolu ulaşım ve taşımacılık sistemlerinde emniyetli işleyişi sağlamak ve kazaları önlemek amacıyla geliştirilmiş demiryolu sinyalizasyon sistemleri, yüksek emniyet standartları ve kurallarıyla insan hatalarını minimize ederek kaza riskini önemli ölçüde azaltan Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) unsurlarıdır. Ancak, bu sistemlerin yüksek maliyetleri, ekipman kurulumu ve bakım gereksinimleri gibi zorluklar, demiryolu ağlarının tamamına uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Özellikle yüksek yolcu ve sefer trafiğine sahip bölgelerde, kaza riskinin belirgin şekilde yüksek olduğu durumlarda sinyalizasyon sistemleri kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, sefer yoğunluğunun düşük olduğu, günde sadece birkaç araç hareketinin gerçekleştirildiği ve elektrik altyapısı tesis edilmemiş bölgelerde sinyalizasyon sistemlerinin kurulumu, ek zorluklar getirir. Bu tür bölgelerde, kazaları önlemek amacıyla çeşitli destek sistemleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Bu çalışma, hava araçlarında kullanılan radyo frekans tabanlı Trafik Uyarı ve Çarpışma Önleyici Sistem (TCAS)'in demiryolu araçlarına uyarlanmış bir modelinin kavramsal tasarımını sunmakta olup, düşük maliyetli ve kolay kurulum seçenekleri ile ilgili önerilerde bulunmaktadır. Ayrıca düşük bant genişliği ve veri iletim kısıtları nedeniyle kullanılması tercih edilmeyen LoRa kablosuz haberleşmesinin ihtiyaca uygun bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın sonuçları, sistemin pratik uygulanabilirliği için öneriler sunarak, demiryolu emniyetinde yenilikçi çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, demiryolu sinyalizasyonu, tren çarpışma önleme sistemi

Radio frequency communication based railway vehicles collision avoidance system

Abstract: Railway signaling systems, developed to enhance safety and prevent accidents in rail transportation and logistics, are among the key components of Intelligent Transportation Systems (ITS). With high safety standards and regulations, these systems significantly reduce the risk of accidents by minimizing human errors. However, the high costs of these systems, as well as the requirements for equipment installation and maintenance, limit their applicability to entire railway networks. Signaling systems become critical technologies in areas with high train traffic where the risk of accidents is notably high. Conversely, in regions with low train frequencies, where only a few trains operate daily and there is no electrical infrastructure, the installation of signaling systems poses significant challenges. In such areas, various support systems are developed and utilized to prevent accidents.

This study presents a conceptual design of a model adapted from the Radio Frequency-based Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) used in aircraft for railway vehicles, offering suggestions for low-cost and easy installation options. In addition, it has been shown that LoRa wireless communication, which is not preferred due to low bandwidth and data transmission limitations, can be used as needed.

The results of the study aim to contribute to the development of innovative solutions in railway safety by providing recommendations for the practical applicability of the system.

Keywords: Intelligent transportation systems, railway signalization, train collision avoidance system

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı özellikle büyük miktardaki yüklerin transferi için kullanılan, ekonomik ve çevre dostu bir taşıma sistemidir. Dünya genelinde demiryolu taşımacılığı yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamadan önce, kısa ve ayrı hatlarla kendini kanıtlamış ancak zamanla kesişen yolların ve trafiğin artmasıyla tehlikeli durumları ve kazaları beraberinde getirmiştir. Kazaların önlenmesi için 1800'lü senelerden itibaren çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bunların ilk örnekleri zaman paylaşımı kurallarıyla başlamış, sonrasında ise telgraf sistemleri ile entegre edilerek daha ileri seviyeye taşınmıştır (Liffen, 2013). 1990'lı yılların sonlarına gelindiğinde ise sabit blok ve hareketli blok raylı sistem sinyalizasyon sistemleri geliştirilerek, daha emniyetli, daha konforlu ve insan hatasını sifıra indirgeyecek teknolojiler kullanılmıştır. Erken dönem demir yolu sinyalizasyon sistemleri, hat kenarı sinyalleri, kilitleme mekanizmaları ve blok bölümleri gibi sabit altyapıya büyük ölçüde bağımlıydı. Dönemlerinde etkili olsalar da bu sistemler, kapsam, esneklik ve insan hatası ile ekipman arızalarına karşı dayanıklılık açısından çeşitli kısıtlamalar barındırıyordu (Strang ve diğerleri, 2006). Henüz yük taşımacılığı için kullanılmaları da günümüzde sürekli haberleşmeli ve sürücüsüz raylı sistem ulaşım araçları, güvenilirliğini kanıtlamış bir şekilde yolcu taşımacılığında kullanılmaktadır (Divya ve diğerleri, 2023).

Demiryolu sinyalizasyon sistemleri yüksek emniyet kriterlerinin sağlanması gereken, kullanılan ekipmanların uzun süre hatasız çalışması esasıyla, yedekli olarak tasarlanan ve hata durumlarında dahi sistemi emniyetli bir şekilde sürdüren veya kaza olmadan durduran sistemlerdir. Bu sistemler için uygulanan emniyet standartları havacılık sektöründe uygulanan kurallara benzerdir. Farklı derecelendirme isimlendirmeleri kullanılsa da olasılık ve şiddet hesaplamaları iki sektör için de hemen hemen aynıdır (Machrouh ve diğerleri, 2012). Ayrıca, bu sistemlerde kullanılan yedeklilik ve hata toleransı, yüksek emniyet gereksinimlerini karşılamak amacıyla sürekli olarak güncellenir ve iyileştirilir. Böylece, operasyonel süreklilik sağlanırken, emniyetli işletme önlemleri her durumda geçerli olacak şekilde tasarlanır (Fatima & Aarti, 2023).

Emniyet standartlarını uygulamak için iki sektörde de sistem tasarımları yoğun ve zorlu süreçlerle yapılmaktadır. Sistematik olarak, gereksinimlerin belirlenmesi, analiz edilmesi, belirlenen aksiyonun uygulanması, bu aksiyonun doğrulanması, her koşulun testi, testlerde belirlenen hata durumlarının tespiti ve tüm bu hata senaryolarında sistemin hatada emniyetli (fail-safe) olduğunun ispatıyla, süreçler adım adım onaylanır ve kullanılabilir seviyeye getirilir. Bu emniyet kriterleri, sistem ana bilgisayarları, araç-üstü ekipmanları, saha-hattı (ray-üstü) ekipmanları, iletişim ekipmanları gibi sistemin her unsuru için gerçekleştirilmelidir. Sonuç olarak tam emniyetli bir sistem kurulumu ve idamesi yüksek maliyetlerle elde edilebilmektedir.

Uygulamada işletmeler, sistem kurulumlarını, maliyet ve kullanım dengesine göre belirler. Demiryolu ağlarında, yolcu taşıması yapılan, yoğun trafiğe sahip, kaza riskinin yüksek olduğu kısımlarda, sinyalizasyon sistemlerini tesis ederken, düşük sefer yoğunluğu olan, günde birkaç tren hareketinin olduğu veya sadece yük taşımacılığı yapılan kısımlarda ise tam emniyetli sistem yerine, belirlenen diğer kural setleri ile işleyişlerini sürdürme kararı alabilirler. Bu kural setleri, kazaları engellemek için belirlenmiş olsalar da insan faktörü ve çevre unsurlarının dahiliyle kazaların olmasını tamamen yok edememektedir (Welch & Orlando, 1983).

Tablo 1'de Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarının (TCDD), 2003 ve 2024 yıllarındaki, sinyalizasyon sistemli ve elektrik tesisli ağlarının tüm demiryolu ağlarına oranları verilmiştir (TCDD, 2024). Bu tabloya göre TCDD'nin demiryolu ağının %43'ü sinyalizasyon sistemine sahip değil ve bu değer üzerinde bir alanın ise elektrik hattına sahip olmadığı görülmektedir.

Tablo 1 – TCDD'ye ait demiryolu ağı, sinyalli ve elektrikli hat uzunluğu

	2003	2024	Tüm Ağa Oranı
Toplam Demiryolu Ağı	10.959 km.	13.919 km.	
Sinyalli Hat Uzunluğu	2.505 km.	8.046 km.	%57
Elektrikli Hat Uzunluğu	2.082 km.	7.142 km.	%51

Bu bilgilerin ışığında düşük maliyete sahip, kolay uygulanabilir yardımcı sistemler, kaza ihtimallerini en aza indirmek için işletmelerin tercih etmesi gereken çözümlerdir. Bu sayede halihazırda

kullanılmakta olan demiryolu ağ kısımlarındaki istenmeyen kaza ihtimalleri düşük seviyelere inecek aynı zamanda can ve mal güvenliği artırılabilecektir. Tablo 2’de günümüzde demiryollarında sıklıkla kullanılan çarpışma önleme sistemleri ile bu çalışmada kavramsal tasarımı yapılan sistemin, uygulama süresi, kurulum ve bakım maliyetleri, emniyet seviyesi ve enerji ihtiyacı kriterlerine göre karşılaştırması sunulmuştur. Bu kriterlere göre tasarlanan sistem, hem enerji ihtiyacı ve maliyet kısıtları nedeniyle çarpışma önleyici sistem tesisi yapılamamış, kırsal bölgelerdeki demiryolu ağları için hem de görecelik sürüş prensibiyle, düşük hızla işletme yapılan şehir içi hafif raylı sistem ağları için kolayca uygulanabilir olduğu gösterilmektedir.

Tablo 2 – Demiryollarında kullanılan çarpışma önleyici sistemler ile karşılaştırma

	Aks/Teker Sayıcı	Ray Devresi	Tasarlanan Sistem
Uygulama Süresi	Uzun	Uzun	Kısa
Kurulum Maliyeti	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük
Bakım Maliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük
Emniyet Seviyesi	Yüksek	Yüksek	Düşük
Enerji ihtiyacı	Var	Var	Yok

Bu çalışmada TCDD gibi farklı tipte trenleri, çeşitli ray-üstü taşıtları ve bakım araçları bulunan işletmelerin kullanabileceği, bir kaza uyarı sisteminin tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarımda, hava araçlarında kullanılan, transponder olarak bilinen kaza önleme sistemi (TCAS - Traffic Alert and Collision Avoidance System) referans olarak alınmıştır. TCAS, pilotların potansiyel hava çarpışmalarını önlemelerine yardımcı olmak için tasarlanmış önemli bir hava ulaşımı emniyet sistemidir. Sistem, yakınlardaki uçakları izleyerek çalışır ve TCAS ile donatılmış uçaklara sinyaller gönderir. TCAS, pilotlara potansiyel çarpışma risklerine karşı uçuş rotalarını nasıl ayarlamaları gerektiği konusunda tavsiyelerde bulunur; örneğin, uçağın tırmanmasını veya alçalmasını önerir. TCAS, uçağın kontrolünü almaz, ancak uçaklar arasındaki emniyetli mesafelerin korunmasında kritik bir rol oynar (Welch & Orlando, 1983).

TCAS’in kaideleri temel alınarak demiryolu araçları için çarpışma önleyici olarak tasarlanan ekipman, farklı tipte tren ve araçlara uygulanabilmesi için sade bir yapıda düşünülmüştür. Sadece enerji beslemesi ile araçlara uygulanarak tüm ihtiyaç duyulan çevre birimlerini kendi kontrol ünitesi ile yönetebilecek şekilde planlanmıştır. Bu ekipman araç sürücüsüne algılanan tehlikeyi sesli ve görüntülü bir şekilde ikaz ederek, oluşması muhtemel kazanın önlenmesine destek sağlayacaktır. Tasarlanan ekipman, radyo frekans iletişimi için; düşük güçlü, uzun menzilli kablosuz haberleşme sistemi olan LoRa (Long Range) kablosuz haberleşme ve ray-üstü aracın konumunun belirlenmesi için RFID (Radio Frequency Identification) teknolojilerini kullanacaktır.

RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) teknolojileri, ray-üstü araçların (örneğin trenlerin) konumlarının belirlenmesinde oldukça etkili bir yöntem sunar. Bu teknoloji, her araç üzerinde bulunan RFID etiketleri ve raylara yerleştirilen okuyucular sayesinde, araçların anlık konumunu izlemeyi mümkün kılar. Gerçek zamanlı veri ile araçların güzergahı takip edilirken, bakım gereksinimleri de kolayca izlenebilir. RFID sistemleri, ayrıca demiryolu ağındaki emniyeti artırır ve trafik yönetimini optimize eder. Bu sayede, demiryolu taşımacılığı daha emniyetli, verimli ve hatasız hale gelir (Zhang & Tentzeris, 2011).

LoRa (Long Range), IoT uygulamaları için düşük güç tüketimli, uzun menzilli kablosuz iletişim sağlayan bir teknolojidir. 2-5 kilometreye kadar şehir içinde, 15 kilometreye kadar ise kırsal alanlarda veri iletimi yapabilir. Özellikle düşük veri hızı ve nadiren iletişim gerektiren cihazlar için uygundur, LoRa, düşük enerji tüketimi ve zorlu ortamlarda çalışabilme avantajı ile geniş IoT ağlarında kullanımda artış göstermektedir (Augustin ve diğerleri, 2016).

1.1. Referans sistem: TCAS

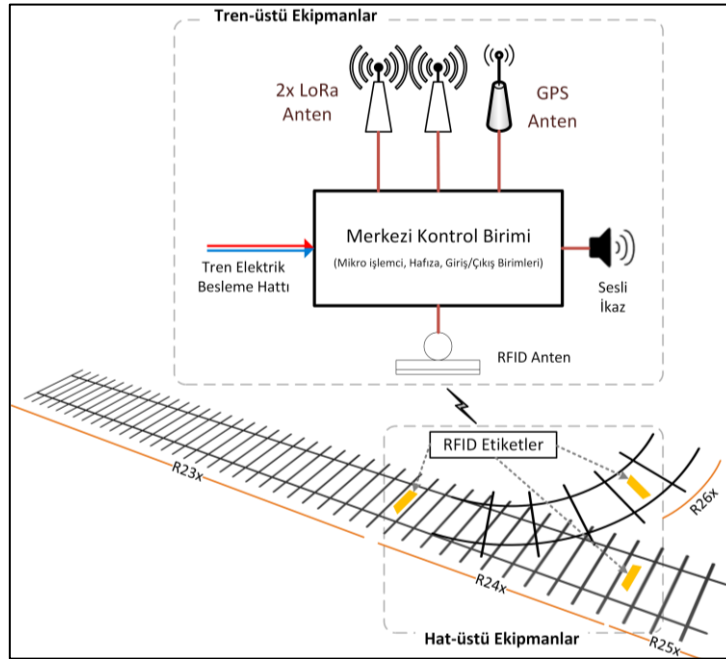
TCAS trafik uyarı ve çarpışma önleyici sistemi (Traffic Alert and Collision Avoidance System), uçaklarda bulunan çarpışma önleyici sistemidir. Sistemin sadece uyarı yapan ilk versiyonu TCAS-I, 1950’li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu versiyon belirlenen mesafelerde bir hava aracı varlığını pilota bildirmede kullanılmıştır. Günümüzde tüm hava yolu araçlarında bulundurulması zorunlu olan

ikinci versiyon TCAS-II ise uyarının yanında pilotlara dikey yönde yükselme ve alçalma yönlendirmesi yapmaktadır. TCAS-II periyodik olarak, saniyede 2 kere, çeşitli modlara göre, uçağın konumunu pozisyonunu ve hızını kablosuz haberleşmeyle diğer hava araçlarına iletmektedir (Burgess ve diğerleri, 1994). Dairesel olarak uçağın etrafındaki 14 millik bir mesafede algılama yapar. Mesafe 6 mil seviyesine indiğinde pilotlara uyarı verir ve yaklaşma sürüyorsa pilotlara dikey olarak yükselme veya alçalma yönlendirmesini yapar (Abdushkour ve diğerleri, 2018). Tasarım çalışmalarının devam ettiği TCAS-III, dikey yönde uyarılarla birlikte, sağa dön ve sola dön yönlendirmelerini de pilotlara iletacaktır.

Çalışmamız hava araçlarında bulunan TCAS sisteminin demiryolu araçlarında, sinyalizasyon sistemine sahip olmayan demiryolu kısımlarında sürücülerin uyarılması ve kaza önleme sisteminin tasarımını barındırır.

2. Materyal ve Metot

Giriş bölümünde belirtildiği üzere raylı sistemlerde sinyalizasyon sistemleri oldukça karmaşık ve maliyetli sistemlerdir. Farklı tren ve araç tiplerinin olduğu, çoğu kısmında elektrik ve hatta iletişim hatlarının kapsama alanında olmayan alanlarda ise sistemlerin kurulması mümkün olmayan seviyelere inmektedir. Bu çalışmada, enerji hatlarının olmadığı, iletişim hatlarının kapsama alanı dahilinde olmayan, farklı tren, ray-üstü araç ve bakım cihazlarına kolaylıkla uyarlanabilecek bir çarpışma uyarı sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 1 - Demiryolu araçları için radyo frekans haberleşmeli kaza önleme sistemi

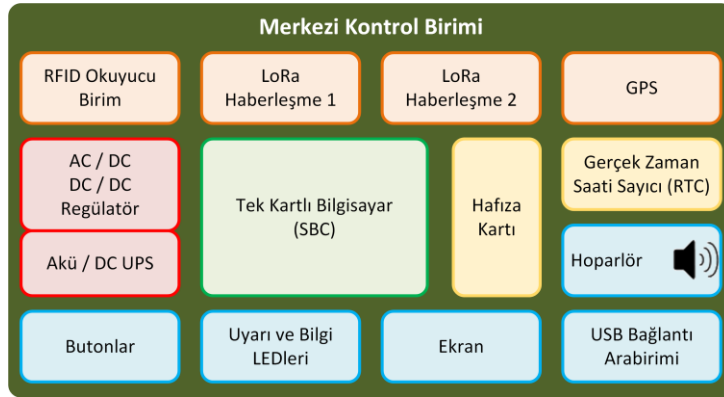
Sistemin genel tasarım şeması Şekil 1’de gösterilmiştir. Burada belirtilen her kısım aşağıdaki bölümlerde detaylandırılacaktır. Gösterilen sistem genel olarak incelendiğinde, hat-üstü ve tren-üstü olarak iki ana grupta incelenebilir. Hat-üstü ekipmanlar sadece ray bölgelerini belirlemek için kullanılan enerji gerektirmeyen (pasif) RFID etiketlerden oluşmaktadır. Sistemin tren-üstü ekipmanları ise kendi kontrol birimine bağlı olan, yedekli olarak kullanılabilir kablosuz haberleşme antenleri, RFID okuyucu birim, sesli ve görsel ikaz birimidir. Bu ekipmanlar farklı tipteki araçlara uygulanabilmesi için sadece enerji beslemesi ve kendi antenlerinin bağlantısıyla montaj edilecek şekilde tasarlanmıştır.

2.1. Merkezi Kontrol Birimi

Merkezi kontrol birimi, sistemin tüm elektronik donanımı içinde barındıran kısımdır. Bu ünite giriş çıkış portları ile tek bir noktadan tüm sistemi yönetecek şekilde tasarlanmıştır. Tren veya ray-üstü aracının sürücü kabinine montajı yapılacak olan sistem için bakır kablo ile enerji girişi ve üç adedi tavan kısmında bir adedi de araç-altı olmak üzere 4 anten için koaksiyel bağlantı birimi olacaktır. Bu bağlantılar dışında kayıt dosyalarını almak yeni versiyon yükleme gibi işlemler için bir adet, toza karşı

muhafaza kapaklı USB giriş portu da yer alacaktır. Merkezi kontrol biriminin çevre birimlerle bağlantısı bu belirtilenlerdir.

Bu birimde bulunan alt sistemler Şekil 2’de belirtilmiştir. Alt başlıklarda bu birimlerin detaylarına yer verilmiştir.



Şekil 2 - Merkezi kontrol birimi blok diyagramı

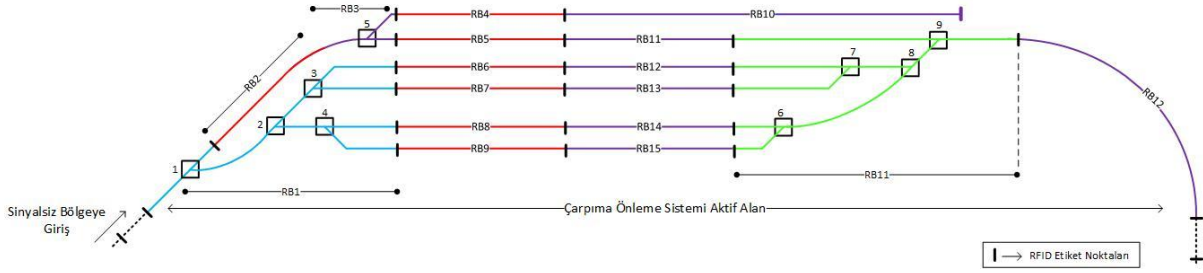
2.2. Güç Katı ve Akü Beslemesi

Merkezi kontrol birimi ve yan birimleri enerjilendirmek için bir güç devresini üzerinde barındırır. Güç devresi sistemin çeşitli platformlara uyarlanabilir olması gerekliliğinden dolayı AC ve DC geniş aralıklı kaynaklardan beslenebilir şekilde tasarlanmıştır. Güç katı girişe uygulanan gerilime göre önce 24V DC bara gerilimini sağlar ve sonrasında sistemde bulunan tüm ekipmanlara gerekli DC-DC gerilim dönüşümlerini gerçekleştirir. Aynı zamanda sistemdeki enerji kesintilerine karşı mevcut bulunan akü grubunu da kontrol eder. Enerji beslemesi sağlanıyorken aküleri şarj eder ve kesinti anında sistemin çalışmasını durdurmadan akülerde depolanan enerjiyi sisteme iletir. Bu özelliği ile bir DC kesintisiz güç kaynağı (UPS Uninterruptible Power Supply) işlevini yerine getirir. Güç katı sistem üzerinde bulunan bilgi Ledleri aracılığıyla sistemin enerji besleme girişi durumunu ve aküden beslenme durumlarını gösterir. Akü doluluk oranını ise ekran üzerinde bilgi simgesi olarak belirtmesi uygun görülmüştür.

2.3. RFID Okuyucu Birimi

RFID okuyucu birim tren veya ray-üstü araçlarının alt kısmına yerleştirilecek olan RFID anten yardımıyla, rayların arasına monte edilen RFID etiketlerini okuma görevini üstlenecektir. Bu ekipman bir okuyucu ünite ve antenden oluşmaktadır. Okuyucu ünite, merkezi kontrol birimi içinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede araçlar üzerinde minimum sayıda ekipman montajı ve kablolama ihtiyacı ergonomisi değişmemiş olacaktır. Ünite, merkezi işlem biriminden enerjisini alacak ve seri haberleşmeyle veri aktarımı yapacaktır. Bu ünite için tek kablolama ihtiyacı, araç altına montajı yapılan, RFID antene yapılacak bir koaksiyel kablo olacaktır. Koaksiyel kablo seçimi, radyo frekans sinyallerini iletme kabiliyeti yüksek olması nedeniyle önemlidir. Kabloların ekran adı verilen sinyal gürültüsünden korunma zırhları aşınmamış ve kablo kırılmamış olmalıdır. Sinyal kazancının kablo üzerinde azalacağı bilindiğinden en fazla 5 m’lik bir kablo ile bağlantı sağlanmalıdır. RFID Okuyucu anteninin araç altında belli bir açı ile montajı ray-üstü ekipman olan etiketleri okuma performansını artıracaktır (Akçil ve diğerleri, 2014). Bunun için üreticinin sağladığı dokümanlar veya ilgili konudaki yayınları incelenmelidir.

RFID etiketleri ray bölgelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Tüm demiryolu ağı düşünülerek tasarım yapıldığında RFID etiketlerle ayrılmış olan ray bölgeleri aralık bırakmaksızın birbiri ardına gelmektedir. Yan yana demiryollarında araç gabarilerinin mesafeyi kırtarmadığı alanlar tek ray bölgesi olarak belirlenir. Şekil 3’te örnek bir demiryolu ağ kesiti bulunmaktadır. Bu resimde ray bölgeleri ayrı renk ve isimlerle belirtilmiştir.



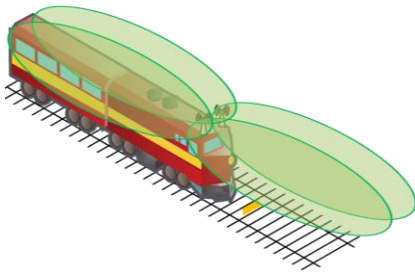
Şekil 3 - Örnek demiryolu ağ kesiti, ray bölgeleri ve RFID etiket yerleşimi

2.4. Kablosuz Haberleşme (LoRa) Birimleri

Kablosuz haberleşme için LoRa haberleşme donanımları seçilmiştir. LoRa düşük güç enerji gereksinimi olan ve yüksek iletim menziline sahip bir haberleşme ortamıdır. LoRa kablosuz haberleşmesi ülkelerin belirlemiş olduğu lisanssız frekans bantlarını kullanmaktadır. Ülkemizde, Avrupa standartlarına uygun olarak 863 – 870 MHz frekansları arasında çalışmaktadır. LoRa düşük güç tüketimi ve yüksek menzil iletim imkanını, iletim hızı ve bant genişliği kabiliyetlerini düşük tutarak sağlamaktadır (Erkan ve diğerleri, 2022). Lora ile yapılan çalışmalar kontrol edildiğinde şehir içi alanlarda 2-3 km'lik menzillerde iletişim kurabilmektedir. Şehir dışı alanlarda ise veri hızı kademeli olarak düşerek 10 km'nin üzerinde çıkmaktadır (Villarim ve diğerleri, 2019). Bant genişliği iki anten arası en uzak mesafelerde, saniyede 290 bit, yakın mesafelere ise saniyede 50 kilobitler seviyesine veri iletimi yapmaktadır. İletişim hesaplaması yapılırken bu bant genişliği değerlerine, iletilecek olan gerçek mesaj (payload), mesaj başlangıç ve mesaj bitiş kodlamaları, mesajın şifrelenmesi için gerekli bitler ve mesajın doğru şekilde iletilmişinin kontrolü için kullanılan bitler dahil edilmeli, zaman ekseninde uygun bir planlamayla haberleşmenin sağlanması gerekir.

Kavramsal tasarımı yapılan sistemde, haberleşmenin sürekliliği için iki adet LoRa haberleşme birimi kullanılmıştır. Bu haberleşme birimlerinden biri sürekli dinleme yaparken diğeri de periyodik olarak oluşturulan mesajı yayın yapacak şekilde kurgulanmıştır. Aynı araçta bulunan sistemin kendi yayın anteninden gönderdiği mesajı kendi dinleme anteni ile almasıyla sistemin çalışma sağlık durumunun kontrolü de sağlanmış olacaktır. Tasarımda ray-üstü araçların tümünde kullanılacak iki-yönlü (bi-directional) yayın yapan antenler seçilecektir. Bu iki-yönlü yayın tipiyle

Şekil 4'te gösterildiği gibi, ray hattı doğrultusunda iletim sağlanması hedeflenmiştir. Araç üstü montajın en aza indirilmesi için antenlerden biri tek kılıf içinde iki adet anten bulunan ürünlerden tercih edilecektir. Bu antenler uygun frekans bantlarına göre tasarlanır ve Şekil 5'te gösterilen şekilde ayrı koaksiyel kablolarla kendi sistemlerine bağlanır. Araç üstünde bir anten sadece LoRa sinyalleri için kullanılacakken (Şekil 6), diğeri hem LoRa hem GPS sinyalleri için kullanılacaktır (Şekil 5).



Şekil 4 - İki yönlü antenlerin kapsama alanı doğrultuları



Şekil 5 - LoRa, GPS bütünlük anten



Şekil 6 - LoRa, anten

LoRa haberleşmesi, lisanssız frekans bandını kullandığı için birtakım kurallara göre kullanılması gerekmektedir. Bu bandı kullanmak isteyen kullanıcılar için hattın meşgul edilme oranı %1 (duty cycle) olarak belirlenmiştir. Bu, bir birim süre boyunca iletim yapan bir haberleşme noktasının 99 birim süre boyunca yayın yapmadan beklemesi anlamına gelir (Carlsson ve diğerleri, 2018). Bu durumda yayın yapılacak verinin boyutu havada iletilme zamanını belirleyeceği için önemli hale gelecektir. LoRa, düşük güçte uzun menzille haberleşme imkanını düşük bant genişliğiyle sağladığını belirtmiştik. LoRa

arabirim ile iletilecek verinin boyutunu, olması gereken en küçük yapıda tasarlayarak mesaj iletim periyodunu sıklaştırmak hedeflenmiştir. Tablo 3'te belirtildiği üzere LoRa ile iletilecek mesaj yapısı toplam 10 Byte olarak belirlenmiştir. İletilecek bu 10 Byte veri payload olarak isimlendirilmektedir.

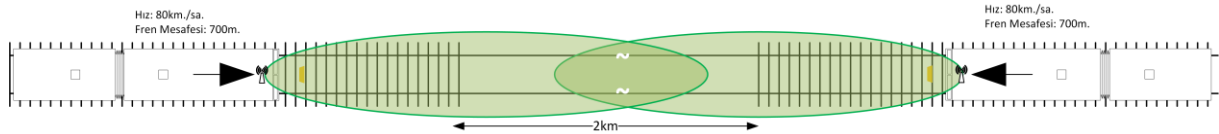
Tablo 3 – Kablosuz haberleşme mesaj yapısı

Payload				
Tren No	Ray Bölgesi	Geçilen Ray Bölgesi	Rezerve	Veri Kontrol
2 Byte	2 Byte	2 Byte	2 Byte	2 Byte
10 Byte				

Bu veriye LoRa haberleşme altyapısı gereği başlangıç ve bitiş bitleri, iletilecek kanal numarası, iletim yapılacak hedef adresleri gibi 5 Byte'lık bir veri eklemesi daha yapılır. Bu şekilde toplamda 15 Byte'lık verinin iletim süresinin hesaplanması gerekir. Hesaplama için internet üzerinden oluşturulmuş hesaplama araçları kullanılmıştır.

Demiryollarında sinyalizasyon sistemlerine sahip olmayan kısımlarında daha çok şehir merkezlerinden uzak, nüfusun ve dolayısıyla kablosuz haberleşme trafiğinin az olduğu bölgeler olacağı varsayılarak, yayılma faktörü yüksek veri taşıma kapasitesine sahip, SF7 (Spreading Factor) 250Khz bant genişliği olarak seçilmiştir (Yasintimur & Tavas, 2021). Hesaplama aracı kullanılarak Toplam 15 Byte verinin havada iletilme süresi 23 ms olarak bulunur (Arjan, 2024). Bu da %1 hat meşguliyeti oranıyla, 2,3 saniyede bir veri iletimi yapılabilmesi anlamına gelir.

Raylı sistemlerde araçların ve özellikle yük trenlerinin durma mesafeleri, yol eğimi, frenleme ivmeleri, katar ağırlıkları hesaplanarak, o yol için yapılabilecek en yüksek hız limiti belirlenir. Sinyalizasyon sistemine sahip olmayan hatlar için duruş mesafesi en yüksek 700 metre olarak belirlenmiştir (Raylı Sistem Teknolojisi, 2013). Aynı zamanda demiryolu ağlarında sinyalizasyon sistemi olmayan bölgelerde uygulanabilecek en yüksek hız 80 km/saat olarak belirlenmiştir.



Şekil 7 – Uyarı senaryosu örneği: karşılıklı yaklaşma

En kötü durum senaryosu olarak, Şekil 7'deki gibi karşılıklı olarak birbirlerine yaklaşmakta olan iki aracın çarpışma senaryosu ele alınmıştır. Bu senaryoda yine en kötü durum koşulları olarak maksimum sürat ve frenleme mesafesi yukarıda belirtildiği gibi en yüksek limitlerde seçilmiştir. Ele alınan senaryodaki verilerle, sistemdeki kablosuz haberleşmeden ve insan faktöründen kaynaklanabilecek tüm gecikmeleri hesaplayarak araçların kapsama alanı içince kaza meydana gelmeden araçların emniyetli bir şekilde durdurulması incelenmiştir.

LoRa haberleşmesiyle coğrafi engelleri de göz önünde bulundurarak ray hattı doğrultusunda en az 2 km'lik kapsama alanı oluşmaktadır. LoRa haberleşmesinin 2,3 saniyede bir yapılabilmesi ve tehlike algılandığı anda ikazla birlikte sürücünün reaksiyon süresinin 3 saniye olarak kabul edilmesiyle toplamda 5,3 saniyelik gecikmenin olabileceği ön görüşmüştür. En fazla 80 km/saat hızla gidilebilecek bir aracın 5,3 saniyelik sürede yaklaşık, 118 metre yol kat edeceği hesaplanmış olur. Bu uzunluğa yol eğimi ve katar ağırlığı ile belirlenmiş olan en çok 700 metrelik frenleme uzunluğu da eklendiğinde toplamda 818 metrelik bir mesafe ortaya çıkar. En kötü senaryo olarak iki aracın da aynı şekilde karşılıklı olarak yaklaşma durumu için bulunan değer ikiyle çarpılır. Hesaplamalar sonucunda 1636 metrelik bir yaklaşım bulunur. Bu mesafe hesaplama yaptığımız şehir içinde olabilecek en dar kapsama alanı olan 2 km'lik alanın, yeterli ve emniyetli bir şekilde çarpışma önlemeyi başarabileceğini belirtmiş olur.

2.5. GPS ve Gerçek Zaman Sayacı

Küresel konumlama sistemi (GPS – Global Positioning System) içeriğindeki çok kanallı kablosuz haberleşme ile dünya etrafında dolaşmakta olan uydulardan birkaç tanesi ile haberleşerek bulunduğu konumu yüksekliği ve zaman bilgilerini tayin eder. GPS en az 3 uydu ile haberleşerek x, y, z eksenlerindeki konumunu tayin eder. Bağlandığı uydu sayısının artması konumunun doğruluğunun artması için ihtiyaç duyulan bir durumdur (Özbulat ve diğerleri, 2022). Tasarımını yapmış olduğumuz sistemde, GPS teknolojisinin sadece zaman verisini kullanarak, gerçek zaman sayacı biriminin düzeltme işlemi yapılacaktır. Bu sayede titreşim ve elektronik gürültü kaynaklı saat sapmalarının düzeltilmesi sağlanacaktır. Sistemin uygulandığı tüm tren ve araçlarda aynı zaman değerinin olması, veri kayıtlarındaki hata takibi açısından çok önemlidir. Sistem periyodik olarak GPS uydularından aldığı zaman bilgisiyle dahili gerçek zaman sayacı verisini eşitleyerek düzeltmeyi uygular. Günümüzde ticari olarak kullanılan GPS ürünlerinin hata oranı nedeniyle bu birim kullanılarak araç konumunun tayin edilmesi istenmemiştir. GPS'in diğer kabiliyetleri ile tasarlanan sistem için ek özelliklere çalışmamızın, 3. Bulgular ve Geliştirme Alanları başlığında değinilmiştir, Merkezi kontrol birimi elektronik kartı üzerinden bir modül olarak tasarlanmıştır. Bu modülün düzgün çalışması gerekli olan GPS anteni, araç üstüne monte edilmelidir. Bu kısımda da araç üzerine en az sayıda montaj ergonomisi nedeniyle, Başlık 2.4'de belirtildiği ve Şekil 5'te gösterilen, tek kılıf içerisinde bütünleşik RF – GPS anten ürünü seçilmiştir.

2.6. Sesli ve Görsel İkaz Birimi

Sesli ve görsel ikaz birimi, merkezi kontrol birimiyle bütünleşik olarak tasarlanmıştır. Bu kısımda ses şiddeti artan bir hoparlör, tehlike hakkında bilgi veren ekran ve LED aydınlatma bulunmaktadır. Arıza durumunu onaylamak ve ikazı sonlandırmak için cihaz üzerindeki butonlardan biri kullanılacaktır. Bilgi ekranı, uyarı durumu olmadığında geçilmiş ve girilmiş olan ray bölgesi kodlarını ekranda gösterecektir. Her bir ray bölgesi geçişinde ekran aydınlatması bir süre tam parlaklıkta yanacak ve sonrasında tekrar kısık olarak beklemeye girecektir. Ekran üzerinde verilen bu bilgilerle sürücüye, sistemin sağlık durumu da bildirilmiş olmaktadır.

2.7. Tek Kartlı Bilgisayar, Hafıza Kartı ve USB Bağlantı Arabirimi

Tek kartlı bilgisayar (SBC – Single Board Computer), üzerinde işlemci, giriş çıkış portları, geçici hafıza birimlerinin bulunduğu bir donanımdır. Sistemimizde Linux işletim sistemini kullanan bir SBC seçilmiştir. Program giriş-çıkış portlarını sürekli dinleyerek verileri toplar, almış olduğu verileri algoritmasına göre işler ve çıkış üretir. Birden fazla seri haberleşme kanalları ile, RFID okuyucu ünite, LoRa haberleşme modülleri, GPS, gerçek zaman sayacı, hafıza kartı, ekran ve USB bağlantı arabirimiyle iletişimi sağlar. Butonlardan veri okuma ve LED'leri yönetme işlemini paralel portları üzerinden gerçekleştirir. Ek olarak analog çıkış portu üzerinden de sistem hoparlörüne ses çıkışı verir.

2.8. RFID Etiketler

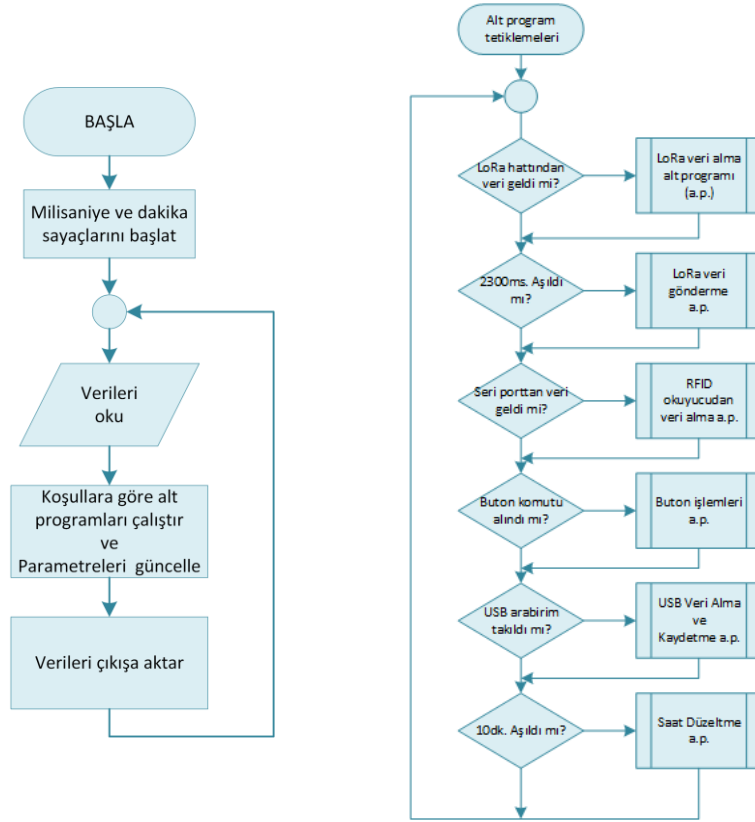
Tasarlanan sistemin ray-üstü ekipman tarafında bulunan tek unsuru RFID etiketlerdir. Özellikle demiryolu ağının elektrik altyapısına sahip olmayan kısımları hesap edilerek, enerji ihtiyacı olmayan, pasif RFID etiketler seçilmiştir. Bu etiketlerin her biri kendine özgü tanımlama (ID) numaralarını barındırmaktadır. Aynı zamanda belli bir hafıza bölgesine sahip olan etiketlere veri yazıp okuma imkânı da bulunmaktadır. Bu özellik sistemin geliştirmeye açık kısımlarında ele alınacaktır. RFID etiketler bir düzen dahilinde demiryolu ağına uygulanarak sinyalizasyona sahip olmayan bölgelere girişte, bu bölgelerde seyir esnasında ray bölgeleri değişimlerinde, makas bölgelerinde, tekrardan sinyalizasyona sahip bölgelere girişte olmak üzere montaj edilir.

Sistem LoRa haberleşme yayını da bu etiketlerin başlangıç ve bitiş durumlarına göre yapacaktır. Hat başlarında ve sonlarında veya çok uzun ray bölgelerinde tekrarlayıcı etiket konularak sistem hassasiyeti artırılır. Şekilde örnek etiketler ile ray bölgeleri dağılımı numaralandırılması gösterilmiştir.

2.9. Program Modülleri ve Yazılım Akış Şeması (Algoritma)

Sisteme ait yazılım tasarımı, tek katlı bilgisayar birimi üzerinde çalışacak ve tüm giriş çıkış birimlerini yönetecektir. Tek kartlı bilgisayarlarda kullanılan işlemci birimleri çok hızlı işlem yapma kabiliyetine sahiptir. Bu işlemler hızlıca yapıp kullanılmak üzere parametrelere kaydedilir. Ana program periyodik

olarak her döngüde parametreleri okur, koşullara göre alt programları işler ve çıktı üretmek üzere parametreleri günceller, son adımda ise parametrelere göre çıkış işlemleri gerçekleştirilir. Program yapısında, tetiklenen ve kendi fonksiyonlarından çağrılan olmak üzere iki farklı tipte alt programlardan oluşmuştur. Sayaç aşımaları ve dış dünyadan tetiklenerek işlenen alt programlar sürekli olarak takip edilir. Yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlar sayesinde tüm program akışı mikro saniyeler içinde tamamlanmaktadır. Şekil 8’de ana program ve alt program tetikleme akış diyagramları (algoritma) gösterilmiştir.



Şekil 8 – Ana program ve alt program tetikleme akış diyagramı (algoritma)

Algoritmada belirtilen alt programlar ise Şekil 9’de gösterilmiştir. Yazılım modüllerine ait gereksinimler ve çalışma mantığı bu bölümde detaylandırılmıştır.

Saat Düzeltme	Veri Kodlama ve Kod Çözme	Ekran Yenileme
İşlem, Komut ve Olayları Kaydetme	RFID Okuyucudan Veri Alma	Dahili Test
Lo-Ra Veri Gönderme	Buton İşlemleri	USB Veri Alma ve Kaydetme İşlemleri
LoRa Veri Alma	Uyarı ve İkaz İşlemleri	Demiryolu Araçları Çarpışma Uyarı Sistemi

Şekil 9 – Sisteme ait program modülleri

- **Saat düzeltme;**

Saat bilgisi GPS modülü üzerinden alınmış olan saat bilgisi ile sistemde bulunan gerçek zaman sayacının saatinin düzeltilmesiyle olacaktır. Sistem aktif olduğunda 10 dakikalık aralıklarla GPS sinyalindeki saat

verisini gerçek zaman saati verisi üzerine kaydeder. Yapılan üzerine yazma işlemi veri kayıt fonksiyonu ile kayıt defterine eklenir.

- **Veri Kodlama ve Kod Çözme;**

Antenden alınan veriler öncelikle paket bütünlüğü kontrolünden geçer, bu aşamadan doğru bir şekilde geçen veriler için bir şifreleme anahtarı aracılığıyla kod çözüm işleminden geçer. Bu şifreleme anahtarı sisteme yapılması muhtemel yetkisiz müdahaleleri engellemek içindir. Kod çözme işlemi sonrada veri bütünlüğü ve alınan mesajın kaynağı doğrulanmış olur. Veri bütünlüğünün sağlanmadığı ve şifreleme anahtarı ile kod çözme işlemi başarısız olan paketler kabul edilmez ve işleme dahil edilmez.

- **Ekran Yenileme;**

Sistemin hazırda bekleme durumunda ekranında, sağlık durumu, batarya doluluk oranı, enerji besleme veya bataryadan çalışma durumu, geçilmiş ve içinde bulunulan ray bölgesi bilgileri bulunur, Aynı zamanda sistem butonlarına atanmış olan görevler ekranda kısaltma şeklinde gösterilerek kullanıcıya yönlendirme yapar.

- **İşlem, Komut ve Olayları Kaydetme;**

Sistemdeki her olay, veri alma, veri yazma, buton işlemleri, saat düzenleme işlemleriyle birlikte veri kayıt fonksiyonu çalıştırılır. Bu kayıtlar sistemde bulunan sd kart üzerine text dosyası olarak kaydedilir. İhtiyaç halinde veri kayıtları USB birim üzerinden dışarıya aktarılabilir.

- **RFID Okuyucudan Veri Alma;**

Sisteme seri haberleşme arabiriminden bağlı olan RFID okuyucu birim, üzerinden geçilen ve ray bölgelerini belirleyen RFID etiket bilgisini gönderir. Bu bilgi alındıktan sonra işlemci birim kendi program rutinini uygulamaya devam edecektir.

- **Dahili Test;**

Dahili test sistemde bulunan butonları, LED ışıklarını, ekranı, LoRa Haberleşme birimini RFID okuyucu birimi ve sesli uyarı birimlerini kontrol eder. Test modu bir buton komutu ile başlatılır, Butonların test edilmesi için her butona basılmasını bekler ve ekrandaki yönlendirmeler ile sürdürülür.

- **LoRa Veri Gönderme;**

Bu modül gönderilecek veri paketinin oluşturulmasını sağlar. Veri paketi, sistemin çalışması, veri bütünlüğünün kontrolü, veri kaynağının analiz edilmesi gibi nedenlerden dolayı bir sistematığe göre oluşturulmalıdır. Detaylandırmak gerekirse iletilecek mesaj verilerin yan yana dizilmesiyle oluşturulur. Mesaj için belirli boyut sınırları koymak iletim hızı için önemlidir. Mesaj şifreleme anahtarıyla şifrelenir. Şifrelenmiş olan mesaj yapısının başına ve sonuna ilaveler yapılır. Bu ilaveler mesajın hedefini, boyutunu ve doğruluğunu kontrol etme amacıyla yapılır. Mesajın bozulmadan doğru şekilde iletilmesi ve alıcılara ulaşmasında güvenlik kavramı, donanım ve yazılım olarak bir bütün olarak ele alınmalıdır (Avcı ve diğerleri, 2022).

- **LoRa Veri Alma;**

Veri alma kısmında ise LoRa modülü çalışma frekansı ve kanalındaki tüm verileri dinler. Almış olduğu mesaj paketini önce veri doğrulama eklerini hesaplayarak verinin tam ve doğru olarak alındığını tespit eder. Sonra mesajın başına ve sonuna eklenmiş olan kısımlarında ayırma ve gerçek mesajın kod çözme adımlarını işletir. Alıcı ve vericide önceden belirlenmiş, aynı anahtar kullanılarak kodlama ve kod çözme işlemleri yapılır. Bu sayede alınan veri sadece gerçek vericiden çıktığında ve gerçek alıcıya ulaştığında anlamlı bir mesaj ortaya çıkar.

- **Buton İşlemleri;**

Cihaz üzerinde ekranın alt kısmına konumlandırılan butonlara ait eylemler, değişken olarak ekranın alt satırında belirtilecektir. Butonlar kullanılarak; ikaz onaylama, alarm susturma, dahili test başlatma, sistemi yeniden başlatma, USB arabirim ile verileri dışarı aktarma ve şifreleme anahtarını değiştirme eylemlerini gerçekleştirecektir.

- **İkaz ve Alarm İşlemleri;**

Sistemde bulunan hoparlör aracılığıyla iki ayrı tonda ikaz ve alarm verilebilecek şekilde tasarlanmıştır. İkaz uyarı sesi ilk verildiği anda kısık seviyeden başlayarak ikaz onaylama butonuna basılmadığı sürece ses şiddeti artacak şekilde kurgulanmıştır. Alarm uyarısı ise en yüksek ses şiddeti ile sürücünün anında eyleme geçmesini sağlayacak şekilde planlanmıştır.

- **USB Veri Alma ve Kaydetme İşlemleri;**

USB bellek ile USB arabirim üzerinden veri alma ve yeni şifreleme anahtarı kaydetme işlemleri yapılması planlanmıştır. USB Bellek cihaz üzerindeki USB arabirime takıldığında ekran üzerinde iki buton için eylemler değişerek, “Dışa Aktar”, “Şifre Değiştir” yönlendirmeleri yer alır. Kullanıcı bu butonlar yardımıyla yapmak istediği işlemi seçer ve sonraki aşamalar için ekran üzerinden yönlendirmeler devam ettirilir.

3. Bulgular ve Geliştirme Alanları

Çalışmada gerçekleştirilen sistem tasarımı kolay ve hızlı şekilde üretilmesi ve kullanılması için, emniyet kriterlerini göz ardı etmeksizin en sade şekliyle planlanmıştır. Kullanıma başlanması ardından sistemde geliştirilmesi mümkün olacaktır. Sistem hesaplamalar ile doğruluğunu kanıtlaya da belli bir süre kullanılarak, sorun yaşamaksızın elde edilen sonuçlarla “Kullanımda Kanıtlanmış” (Proven in Use) seviyesine erişecektir.

Sistemde bulunan bazı ekipmanların tüm işlevleri kullanılmamıştır. Bunlar ileride ihtiyaç durumunda kullanılması amacıyla bu başlık altında derlenmiştir.

GPS biriminin sadece zaman bilgisinin kullanıldığı sistemde, geliştirme imkânı olarak kat edilen mesafe ve hız bilgilerinin kullanılması olabilir. Hata oranları nedeniyle konumlama amacıyla kullanılması uygun olmayan sistemin hız bilgisi ve yer değişiminin hesaplanmasıyla girilen ray bölgesinden kaçınıcı metrede olduğu bilgisi de kablosuz haberleşme ile iletilmesi çarpışma ihtimali algılanan durumlarda sürücülere çeşitli seviyelerde ikaz verebilir. Yine hız bilgisi kullanılarak tutulan kayıt defteri incelemelerinden, hattın hız sınırı ihlalleri raporlanabilir.

RFID etiketlerinin ise sadece kendilerine özgü numaraları kullanılarak ray bölgeleri tayin edilmiştir. Bu etiketlerin aynı zamanda küçük hafıza alanları da mevcuttur. Bu alanlar üzerinden geçen trenler veri olarak mevcut tren numarasını ve anlık saati kaydedebilir. Bu sayede bir sonraki araç üzerinden geçtiği etiketteki bu bilgileri okuyarak bir önceki aracın numarasını ve geçiş saatini öğrenmiş olur. Aynı zamanda kendinden sonraki tren için de kendi bilgilerini etikete kaydeder.

Sistemin geliştirme yönleri için kullanılması amacıyla mesaj yapısına 2 Byte’lık veri alanı rezerve olarak eklenmiştir.

4. Sonuçlar

Çalışmamızda demiryolu ağlarında kullanımı kolay ve hızlı uygulanabilir bir çarpışma uyarı sistemi kavramsal tasarımı yapılmıştır. Bu sistem ray üzerinde giden her türlü araca uygulanabilir şekilde tasarlanmıştır. Donanıma ait tüm bileşenler tek bir kasa içerisinde olacak şekilde düşünülmüştür ve farklı tipte araçlara rahatça uygulanabilmesi hedeflenmiştir. Sisteme ait antenlerin araç üzerinde montajını kolaylaştırmak için bütünsel anten ürünleri kullanılmıştır.

Sistem, RFID, LoRa, GPS, RTC, gibi farklı teknolojik bileşenleri bir uyum içerisinde yöneterek ileriye dönük geliştirilebilir bir ortam oluşturmuştur.

LoRa kablosuz haberleşme protokolü düşük bant genişliği ve lisanssız frekansları kullanmasından ötürü, iki veri iletimi arasında beklenmesi gereken sürenin uzun olması nedeniyle periyodik iletişimi gerektiren uygulamalardan kullanılmamaktadır. Bu protokolün yer aldığı sistemler genellikle günde birkaç veri iletimi yapan sistemlerdir. Bu şekilde kullanım da veriler, gün boyu toplanarak depolanır ve mesaj boyutu yüksek olsa da bir seferde büyük veriyi iletmeyi amaçlarlar. Çalışmamızda ise, ihtiyaç duyulan sistem oldukça sade düşünülmüş, veri boyutu küçük tutulmuş, iletim için gerekli süre hesaplanarak %1’lik hat meşgulliyet oranına göre en kötü senaryodaki, en fazla sürat yapan iki aracın birbirine doğru yaklaşma durumu hesaplanarak, sistemin uyarısı sonucunda, çarpışmadan en az 300 metre mesafe kalacak şekilde araçların emniyetli bir şekilde durdurulmasını sağlamıştır. Bu kullanım şekliyle LoRa

haberleşmesi adil kullanım kurallarını ihlal etmeden istenilen verileri iletebilecektir ve sistemde uzun mesafeli kablosuz iletişim ihtiyacını sorunsuz karşılayacaktır.

Tasarlanan bu ilk model kullanıcılar tarafından kolay kullanılabilir şekilde tasarlanmış ve yazılımı da bu hedef doğrultusunda oluşturulmuştur. Bu çalışma doğrultusunda ön prototip tasarımı yapılabilecektir. Prototip sistemin kullanıcılar tarafından test edilmesi ve beğenilmesi durumunda, sahadan gelecek geliştirme talepleriyle, geliştirilmesi ve tüm araçlara uygulanması mümkündür.

Çalışmamız kapsamında tasarlanan çarpışma uyarı sistemi, yalnızca teorik bir çözüm sunmakla kalmamış, aynı zamanda mevcut teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılmasıyla pratik bir uygulama zemini oluşturmuştur. Elde edilen bu sistem kullanılarak, demiryolu ağlarında sinyalizasyon sistemine sahip olmayan ve hatta elektrik tesisi yapılmamış tüm alanlarda işletmenin emniyetli bir şekilde yapılması, can ve mal güvenliği korunması sağlanacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışmada herhangi bir destek alınmamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

Abdushkour, H., Turan, O., Boulougouris, E., & Kurt, R. E. (2018, 08 22). Denizcilik ve Havacılıkta Çarpışma Önleme Sistemlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *GMO-Shipmar*(212), 20-32.

Akçil, L., Kurtkaya, M., Dağlı, M. A., & Özmal, K. (2014). An RFID Supported Train Tracking System for Tram Lines. *IFAC Proceedings*, 46(25), 129-132. <https://doi.org/10.3182/20130916-2-TR-4042.00024>

Arjan, a. (2024, 09 02). *Airtime calculator for LoRaWAN*. GitHub. <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868/10,5>

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466-1473. <https://doi.org/10.3390/s16091466>

Avcı, İ., Özarpa, C., Özdemir, M., Kınacı, B. F., & Kara, S. A. (2022). Akıllı ulaşım araçlarında siber güvenlik ve çok katmanlı güvenlik önlemi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(1), 22-35. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1034370>

Burgess, D. W., Altman, S., & M.L., W. (1994). TCAS: Maneuvering Aircraft in the Horizontal Plane. *The Lincoln Laboratory Journal*, 7(2), 295-312.

Carlsson, A., Kuzminykh, I., Franksson, R., & Liljegren, A. (2018). Measuring a LoRa Network: Performance, Possibilities and Limitations. *NEW2AN ruSMART 2018*. St.Petersburg, Russia: Springer, Cham. https://doi.org/doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_11

Divya, A. L., Kumar, P. R., & Krishna, R. (2023). Revolutionizing the train collision avoidance system- An Indigenous practical implementation System. *Industrial Engineering Journal*, 52(6), 231-239.

Erkan, E., Fidan, Ş., & Oğraş, H. (2022). LoRa Modulation based Soccer Pitch Lighting System Application. *Gazi University Journal of Science*, 10(2), 203-215. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1031783>

Fatima, M., & Aarti, R. (2023). Train Collision Avoidance System (TCAS) for Safety Enhancement in Indian Railways. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 10(10), d562-d566.

Liffen, J. (2013). Telegraphy and Telephones. *Industrial Archaeology Review*, 35(1), 22-39. <https://doi.org/10.1179/0309072813Z.00000000014>

Machrouh, J., Blanquart, J.-P., Baufreton, P., Boulanger, J.-L., Delseny, H., Gassino, J., Ladier, G., Ledinet, E., Leeman, M., Astruc, J.-M., Quéré, P., Ricque, B., & Deleuze, G. (2012). Cross domain comparison of System Assurance. *Embedded Real Time Software and Systems (ERTS2012)*. Toulouse, France: Embedded France. https://www.researchgate.net/publication/228446034_Cross_domain_comparison_of_System_Assurance

Özbulat, Ö., Yaşar, Ş. Ş., & Tiryakioğlu, İ. (2022). Hassas Nokta Konumlama Yönteminde GNSS Ölçü Süresi-Konum Doğruluğu İlişkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 814-823. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1105538>

Raylı Sistem Teknolojisi. (2013). *Fren Dinamiği ve Seyir Süresi*. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.

Strang, T., Meyer zu Hörste, M., & Gu, X. (2006). A Railway Collision Avoidance System exploiting Ad-hoc Inter-Vehicle Communications and GALILEO. *13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services (ITS 2006)*. London. <https://elib.dlr.de/44434/>

TCDD. (2024, 08 05). *TCDD - Hakkında*. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları. <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/hakkinda>

Villarim, M. R., Luna, J. V., Medeiros, D. d., Pereira, R. I., Souza, C. P., Baiocchi, O., & Martins, F. C. (2019). An Evaluation of LoRa Communication Range in Urban and Forest Areas: A Case Study in Brazil and Portugal. *Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. Vancouver, BC, Canada: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936194>

Welch, J., & Orlando, V. (1983). *Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS): A Functional Overview of Minimum TCAS II*. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute Of Technology Lexington. https://archive.ll.mit.edu/mission/aviation/publications/publication-files/atc-reports/Welch_1983_ATC-119_WW-15318.pdf

Yasintimur, S., & Tavas, V. (2021). *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(2), 297-313.

Zhang, X., & Tentzeris, M. (2011). Applications of Fast-Moving RFID Tags in High-Speed Railway Systems. *International Journal of Engineering Business Management*, 3(1), 27-31. <https://doi.org/10.5772/45676>

Research Article

Benchmarking Intelligent Transportation Systems Performance of Urban Public Transportation Operations

Tugay Çelik^{1*}, Soner Haldenbilen², Halim Ceylan³

^{1,2,3} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, Denizli, Türkiye

*Correspondence: tcelik@pau.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1572364

Abstract: Urban transportation problems have been increasing in developing and developed countries around the world and traditional planning approaches have started to be obsolete in regards to come forward with the solutions to these problems. Planning paradigm shifted from infrastructure development and expansion to look for innovative, sustainable and urban life focused solutions. With this paradigm shift, Intelligent Transportation Systems (ITS) have emerged as a growing and developing phenomenon in means of reaching sustainable urban mobility goals. Many ITS technologies have been integrated with public transportation systems in urban areas which are used for purposes such as monitoring, data collection and informing. Although implementation of the technologies into the urban transportation systems are beneficial for the quality of urban transportation, monitoring and evaluation is essential for ensuring the continuous improvement of these systems and their positive impacts. With this purpose a benchmarking framework is developed in this study, subjecting transit agencies to comparative analyses amongst its peers. 7 transit agencies from metropolitan areas of the United States have been chosen for the study, to be benchmarked in the base of 24 performance indicators in 5 performance categories. A performance index is calculated using these indicator values and several sensitivity analyses are carried out to determine the strengths and weaknesses of transit agencies compared to each other. It is aimed by the study to provide a benchmarking tool for ITS performance assessment.

Keywords: Benchmarking, Intelligent Transportation Systems, Public Transportation

Toplu Taşıma Organizasyonlarında Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirme Yöntemi ile Performans Analizi

Özet: Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde kentsel ulaşım problemleri artış göstermekte, geleneksel planlama yöntemleri bu problemlere çözüm üretme konusunda yetersiz kalmaktadır. Planlama yaklaşımları ulaşım altyapılarının geliştirilmesi ve kapasitesinin artırılması gibi geleneksel çözümlerden yenilikçi, sürdürülebilir ve kentsel yaşam odaklı çözümlerin tercih edildiği çözümlere doğru değişim göstermiştir. Planlama yaklaşımlarındaki bu değişim ile birlikte Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), sürdürülebilir kentsel hareketlilik hedeflerine ulaşmada büyüyen ve gelişen bir olgu olarak ortaya çıkmıştır. Gözlemlene, veri toplama ve etkili yönetim amaçları ile kullanılan bir çok AUS teknolojisi kentsel toplu taşıma sistemlerine entegre edilmiştir. Bu teknolojilerin kentsel ulaşım sistemlerinde uygulanması kentsel ulaşımın kalitesi açısından her ne kadar fayda sağlasa da, bu sistemlerin sürekli gelişiminin ve olumlu etkilerinin devamlılığının sağlanması açısından izleme ve değerlendirme çalışmaları gereklidir. Çalışmanın amacı AUS uygulamaları üzerinden sistem performansı ölçümü için “karşılaştırmalı değerlendirme aracı” üretmek ve toplu taşıma organizasyonlarının performansları analiz etmektir. Çalışma için Amerika Birleşik Devletleri'nin metropolitan bölgelerinden 7 toplu taşıma işletmesi, 5 performans kategorisi altında 24 performans göstergesi üzerinden değerlendirilmek üzere seçilmiştir. Toplu taşıma işletmelerinin birbirlerine göre güçlü ve zayıf özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bu göstergelerin değerleri ile toplu taşıma işletmelerinin performans endeksleri hesaplanmış ve çeşitli duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karşılaştırmalı Değerlendirme, Akıllı Ulaşım Sistemleri, Toplu Taşıma

1. Introduction

Accelerated growth of population and urbanization, increase in the number of vehicles, expansion of urban economic activities and transition of needs and demands of urban citizens are the main causes of urban transportation problems of today's world. Traditionally, developed and developing countries have been focused on infrastructure investments which mostly favor private transportation in their transportation planning processes to overcome the emerging transportation problems in urban areas. Observing that traditional planning approaches seem not to be the solution to solving the problems and mitigating the outcomes of the problems, it instigated the authorities to take a paradigm shift in transportation planning concept. With the emergence of Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP) in the last 20 years, the focus of local authorities switched from expanding the infrastructure to improving the quality of urban life, ensuring economic and environmental efficiency, and resorting to innovative solutions. Although first appearance of ITS, in global scale, date back to 1970s (Wootton et al., 1995), use of ITS in urban traffic and integration of ITS in urban transportation planning have gained a great deal of importance with this paradigm shift. ITS are useful tools in monitoring and managing the urban traffic flow, mitigating the congestion, route planning of the urban citizens, improving transportation safety and overall betterment of the urban transportation system management (Singh & Gupta, 2015).

Though it's plausible to categorize in reviewing and evaluating the ITS; such as the technologies used in certain systems (communication technologies, sensing technologies etc.), objective of the usage of certain systems (data collection, monitoring, informing etc.); one way of assessing ITS is to focus on transportation modes affected by and are integrated with the systems. Implementation and integration of ITS in public transportation operations have been an essential component in reaching the sustainable mobility goals in urban transportation planning, furthermore is a still improving planning factor with the emerging technologies. Automated Vehicle Location (AVL), Computer Aided Dispatch and Scheduling (CADS), Mobile Data Computers (MDCs), Automatic Passenger Counters (APC), Maintenance Management Systems (MMS) , Transit Signal Priority (TSP) are some of the ITS equipments used to better manage the public transportation operations. Although the implementation of such equipments to the urban transit systems improves the efficiency of the system management; as it is in all transportation planning processes aligned with sustainable development, post-implementation monitoring and evaluation of the implemented systems is essential to ensure the continuing efficiency and improvement of the whole transportation system and to assess the current situations considering the strategic goals. Turkey prepared its first Intelligent Transportation Action Plan in 2014, covering the 2014-2016 period. The action plan consisted of 5 strategic goals, 21 objectives and 38 actions. Completing the period, in 2020 a new and updated action plan was developed covering 2020-2023 period. In 2020-2023 ITS Strategic Action Plan, defined 5 strategic goals have been aimed to be achieved by monitoring and evaluating the implemented systems through SEPSIS (Strategy and Action Plan Monitoring and Evaluation System) (National Intelligent Transportation Systems Strategy Document and 2020-2023 Action Plan, 2020). Explained monitoring and evaluation system in the action plan is seen in Figure 1.

Assessment of the sustainability of transportation systems and operations have been the objective of governmental bodies, NGOs and academics. In United States, ITS Joint Program Office (ITS JPO) have been conducting deployment tracking surveys since 1999 every 2 to 3 years to monitor and evaluate the intelligent transportation system deployments. The assessment of ITS deployment is investigated in 3 main areas that are transit management, arterial management and highway management. The deployment tracking surveys are conducted in 108 metropolitan areas in the United States (Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, n.d.-b). In 1994, in order to evaluate the performance of metro systems of the metropolitan cities by benchmarking; by cooperation of Hong Kong, London, Paris, New York and Berlin metro operations, Community of Metros Benchmarking Group (CoMET) have been founded. Currently, CoMET have 45 member metro systems from 41 cities worldwide (Community of Metros (CoMET), n.d.). Benchmarking European Service of Public Transport (BEST) have been founded in 1999 in order to promote the usage of public transportation in European cities. Led by Scandinavian countries, currently BEST have 11 member cities (Benchmarking European

Service of Public Transport (BEST), n.d.). Benchmarking European Sustainable Transport project have been established by European Commission in 2000. With this project, it has been aimed to improve

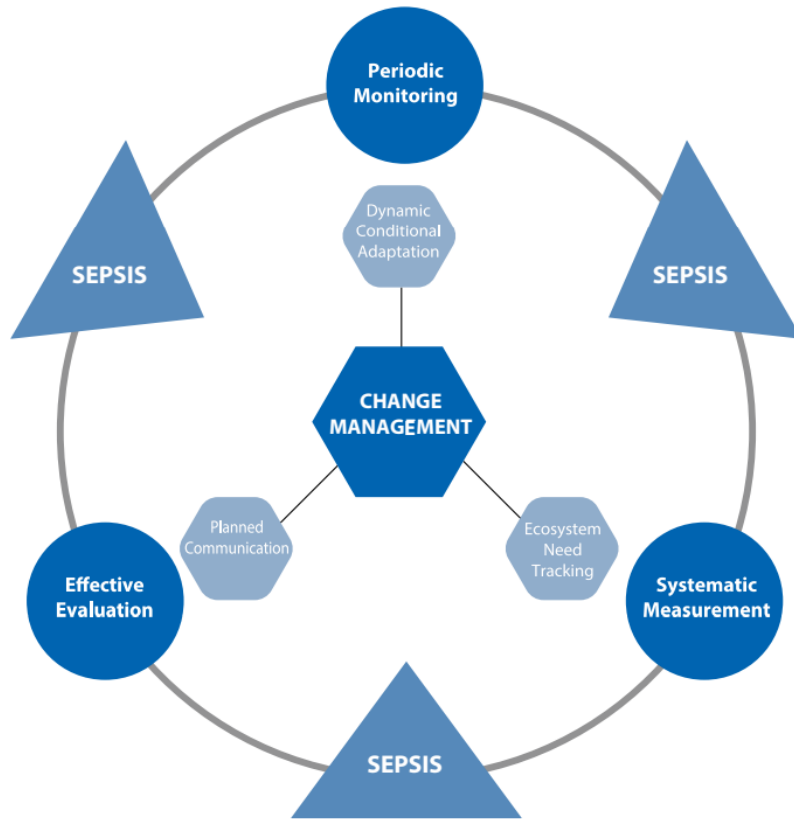


Figure 1. Monitoring and Evaluation System in 2020-2023 Action Plan of Turkey (National Intelligent Transportation Systems Strategy Document and 2020-2023 Action Plan, 2020)

benchmarking strategies and bring awareness to importance of benchmarking in assessment of sustainability transportation systems (Benchmarking European Sustainable Transport, n.d.). The Urban Transport Benchmarking Initiative has been started in 2003 as a European Union Project. Benchmarking framework have been structured with 25 indicators under 5 themes. 39 cities have been selected for the case study of the project (The Urban Transport Benchmarking Initiative, n.d.).

In addition to evaluation strategies of authorities, aiming to assess the sustainability of transportations systems and efficiency and performance of ITS also academic literature presents studies as well. Choosakun and Yeom (Choosakun & Yeom, 2021) developed an evaluation framework for assessment of ITS in public transport. They used Fuzzy AHP method in their study to rank the priority level of indicators that are representing the ITS projects in order to enlist a decision making mechanism. Pindarwati and Wijayanto (Pindarwati & Wijayanto, 2015) measured the performance of ITS in 5 metropolitan cities in Indonesia and produced smartness indicators for the cities in the base of 60 indicators. Cheng et al. (Cheng et al., 2020) investigated the role of ITS in mitigating the traffic congestion in their study. They have used the data between 1994 and 2014 for 101 metropolitan areas in United States and developed models that explains the mitigation of traffic congestion taking pre-implementation congestion rates into account.

Many studies in the literature present evaluation strategies for assessing the sustainability of urban transportation systems, which studies enlist a broader point of view rather than solely focusing on ITS (Miranda & Rodrigues da Silva, 2012), (Perra et al., 2017), (da Silva et al., 2008), (Henning et al., 2011).

Zope et al. (Zope et al., 2019) selected 8 performance indicators to evaluate the sustainability of urban transportation systems of 7 metropolitan areas in India. Assessing the sustainability of the study areas, indicators have been gathered under economic, social and environmental dimensions. By selecting the upper and lower threshold values for the indicators, sustainability indexes of the areas have been calculated. Debnath et. al. (Debnath et al., 2014) developed a methodology to assess the sustainability of smart transport cities. 26 cities worldwide have been selected for the case study and smart city indexes of the cities have been calculated. Stone et. al. (Stone et al., 2012) evaluated the efficiency of public transportation operations in the cities of New Zealand by benchmarking. 14 quantitative performance indicators have been selected for the study including modal share of certain modes, public transport service-km, subsidy per boarding, car travel cost index. (Alkharabsheh et al., 2021) evaluated the quality of public transportation services in Amman, Jordan on the base of several indicators which are related to service quality, transport quality, tractability and faring. In the study the areas which need improvement are detected. (Moslem, 2024) evaluated the supply quality of bus transportation in Dublin Ireland with fuzzy AHP method, using a set of criterias which are gathered under transport quality, service quality and tractability categories. In the study features of the bus transportation such as approachability, directness, speed, comfort, information services are evaluated. (Kakati et al., 2024) developed a model for estimating the sustainable urban transportation solutions for Mersin City, Turkey by detecting the possible issues of the public transportation system. In their study they have found that reducing the fares is the most feasible option for public transportation system sustainability. Additionally, academic literature presents studies which focuses on integration of benchmarking methodologies in transportation planning and strategy development (Awasthi et al., 2018; Kiba-Janiak & Witkowski, 2019; Luque-Martínez & Muñoz-Leiva, 2005).

Although there are many performance and sustainability assessment studies in the literature, there are very few studies which encompass ITS and public transportation system assessment collectively, in the last years. The objective of this study is to develop a benchmarking framework to assess the performance of ITS in public transportation of the cities, transit agencies or metropolitan areas. With this purpose a set of performance indicators have been selected and performance indexes of the transit agencies have been calculated. It is aimed to produce a beneficial tool for decision making processes in monitoring and evaluation phases of ITS implementations by putting forward the strengths and weaknesses of ITS amongst peer transit agencies, operations or study areas.

2. Manuscript Content

The method used in this paper consists of determining the performance indicators for evaluating the performance of ITS implementations and applications in public transportation, determining the study areas and calculating the performance indexes of the study areas in order to prepare a benchmarking framework. 24 performance indicators are used in the study to benchmark 7 metropolitan area transit agencies in the United States. Sensitivity analyses are carried out to understand the strengths and weaknesses of the systems in different conditions.

2.1. Performance Indicators and Available Data

To assess the performance level of public transportation operations in study areas, 24 indicators in the performance categories of Transit Vehicle ITS Technology Adoption, Traveler Information Technology Adoption in Vehicles, Traveler Information Technology Adoption in Transit Stations, Travel Demand and Real Time Data Collection were determined. The data were collected from 2020 Deployment Tracking Survey of ITS JPO of the Department of Transportation in United States (Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, n.d.-a). Reviewing the survey of 36 questions, data is examined and processed into indicators of this study. The survey was conducted for 136 transit agencies in metropolitan areas of United States. The performance indicators can be seen in Table 1. Determining the performance indicators two main criterias have been considered. These criterias are: data must be quantitative and the survey must have been answered by all or majority of transit agencies. Another criteria that is considered is that the indicators must have the worth and benefit of comparison. To set an example; while having a larger transit vehicle fleet might not define superiority of one transit agency to another, percentage of transit vehicles in the fleet which are equipped with several ITS technologies is a more meaningful comparison.

Transit Vehicle ITS Technology Adoption category covers the equipment rates of different ITS technologies in public transport fleets. Since transit Signal Priority is not an equipable technology for all public transport modes, calculating the rate only the number of fixed route bus, light rail and streetcar vehicles have been taken into consideration. Traveler Information Technology Adoption in Vehicles category covers the equipment rates of number of vehicles which are equipped with the traveler information technologies to the number of all transit vehicles of the agency. Traveler Information Technology Adoption in Stations category indicators covers the rate of public transport stations which are equipped with these technologies to all public transport stations of the agency. Since electronic signage and displays are not expected to be common for fixed route bus stations, this variable was calculated neglecting the fixed route bus stations in order to prevent a unnecessary low scoring of the performance index. A set of multiple choice questions from the survey which covers the category of travel demand performance indicators was selected for the travel demand category. In this category, it is investigated if transit agencies provide several services to better manage the travel demand in their operation areas. For real time data collection 8 indicators were determined from the survey, in which category it is analyzed what kind of real time data are collected by the agencies.

2.2. Study Areas

Evaluating and examining the data, investigating the lack of responses to the survey questions for some of the transit agencies and taking availability of data into consideration from the survey for all the study areas, considering the transit mode diversity (considering some transit agencies only operate single type of transit modes) 7 transit agencies which have the largest transit fleet numbers have been selected for the case study of this paper. The selected transit agencies are Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority (MARTA) from the metropolitan area of Atlanta-Sandy Springs-Marietta, GA; Massachusetts Bay Transportation Authority (MBTA) from the metropolitan area of Boston-Cambridge-Quincy, MA-NH; Regional Transportation District (RTD) from the metropolitan area of Denver-Aurora, CO; Phoenix

Table 1. Performance Indicators

<i>Performance Category</i>	<i>Performance Indicator</i>	<i>Description</i>
<i>1. Transit Vehicle ITS Technology adoption</i>	1.1 Automated Vehicle Location (AVL)	Rate of number of AVL adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	1.2 Computer Aided Dispatch and Scheduling (CADS)	Rate of number of CDS adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	1.3 Mobile Data Computers (MDCs)	Rate of number of MDCs adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	1.4 Automatic Passenger Counters (APC)	Rate of number of APC adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	1.5 Maintenance Management Systems (MMS)	Rate of number of MMS adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	1.6 Transit Signal Priority (TSP)	Rate of number of TSP adopted transit vehicles to all transit vehicles which are equipable with TSP (%)
<i>2. Traveler Information Technology Adoption in Vehicles (%)</i>	2.1 Automatic Voice Announcement (AVA)	Rate of number of AVA adopted transit vehicles to all transit vehicles of the system (%)
	2.2 Dynamically Updating Passenger Information Displays	Rate of number of transit vehicles which are equipped with Dynamically Updating Passenger Information Displays to all transit vehicles of the system (%)
	2.3 Dynamically Triggered Automated Announcements	Rate of number of transit vehicles which are equipped with Dynamically Triggered Automated Announcements to all transit vehicles of the system (%)

Table 1. (Continued)

<i>Performance Category</i>	<i>Performance Indicator</i>	<i>Description</i>
<i>3. Traveler Information Technology Adoption in Stations</i>	<i>3.1 Electronic Signage or Displays</i>	Rate of number of rail and multi-modal stations in which Electronic Signage or Displays are provided to all rail and multi-modal stations (%)
	<i>3.2 Mobile Application</i>	Rate of number of public transport stations in which information through mobile application is provided to all public transport stations (%)
<i>4. Travel Demand</i>	<i>4.1 Travel Management Coordination Center (TMCC)</i>	Does the agency operate a Travel Management Coordination Center (TMCC) which works for the coordination of mobility needs of transportation disadvantaged? (Yes = 1, No = 0)
	<i>4.2 Integrated Corridor Management (ICM)</i>	Has the agency deployed Integrated Corridor Management (ICM) to actively manage travel demand and capacity? (Yes = 1, in planning process = 0.5, No = 0)
	<i>4.3 Route and service planning</i>	Does the agency currently use ITS data for route and service planning? (Yes = 1, Only in certain modes = 0.5, No = 0)
	<i>4.4 Passenger transfers</i>	Does the agency employ vehicle monitoring and communication technologies to facilitate the coordination of passenger transfers between vehicles or between transit systems? (Yes = 1, no =0)
	<i>4.5 Dynamic assignment of assets</i>	Does the agency dynamically assign the vehicles based on real-time demand to cover the most overcrowded sections of the network? (yes =1, No = 0)
<i>5. Real Time Data Collection</i>	<i>5.1 Vehicle time and location</i>	Vehicle time and location data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.2 Vehicle monitoring status (i.e., vehicle diagnostics and health)</i>	Vehicle monitoring status data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.3 Passenger count</i>	Passenger count data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.4 Trip itinerary planning records</i>	Trip itinerary planning records data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.5 Passenger information (e.g., fare transactions, trip origin/destination location)</i>	Passenger information data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.6 Emergency vehicle signal preemption events</i>	Emergency vehicle signal preemption events data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.7 Transit vehicle signal priority events</i>	Transit vehicle signal priority events data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)
	<i>5.8 Incidents</i>	Incident data collection in real time by the agency (Is collected = 1, Is not collected =0)

Transit System (PTS) from the metropolitan area of Phoenix-Mesa-Scottsdale, AZ; TriMet Transit Agency from the metropolitan area of Portland-Vancouver-Beaverton, OR-WA; San Francisco Municipal Transportation Agency (SFMTA) from the metropolitan area of San Francisco-Oakland-Fremont, CA; Dallas Area Rapid Transit (DART) from the metropolitan area of Dallas-Fort Worth-Arlington, TX.

2.3. Method

The survey data is used by the ITS JPO to internally benchmark the ITS with the agency's numbers from the surveys. In this study it is aimed to develop a peer comparison benchmarking method which compares the ITS performance indexes of several transportation operations on the base of their score in 24 performance indicators from 5 performance categories. After enlisting the data and determining the study areas, performance indexes of the transit agencies are calculated. Since all the values for indicators vary between 0 and 1, normalization of the indicator values is not needed. All the indicators are in direct proportion with the performance of the ITS, also consideration of the negatively affecting indicators are not needed. Intelligent Transportation System Performance Index ITSPI is calculated by the formula given in Equation (1);

$$ITSPI = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ij}}{\sum_{j=1}^J I_j} \quad (1)$$

where j = number of a certain category from 5 categories

i = number of a certain indicator in any category j

x_{ij} = the value of indicator i of the jth category,

I_j = the amount of indicators in the category j.

To evaluate the performance of ITS according to different conditions and point of views, sensitivity analyses will be performed. Sensitivity analyses will be carried out by assigning different weights to performance categories as seen in Equation (2):

$$ITSPI_{S_k} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{w_j * x_{ij}}{I_{S_j}} \quad (2)$$

where k = sensitivity analysis number k

w_j = the weight of the jth category.

I_{S_j} = the amount of indicators in only the considered and weighted (0 weight appointed categories excluded) categories for the analyses.

An example calculation is provided below to make the method more descriptive. For the example calculation, ITS Performance Index of PTS will be calculated. Performance Indicator Scores of PTS for 5 categories are given in Table 2.

ITS performance index of PTS is calculated as follows;

$$\begin{aligned} & ITSPI_{PTS} \\ & \frac{(1.00 + 1.00 + 1.00 + 0.8429 + 1.00 + 0.0605) + (1.00 + 1.00 + 1.00) + (0.00 + 1.00) + (1.00 + 0.00 + 0.50 + 0.00 + 0.00) + (1.00 + 1.00 + 0.00 + 1.00 + 1.00 + 0.00 + 0.00 + 1.00)}{6 + 3 + 2 + 5 + 8} \\ & = 64.18\% \end{aligned}$$

Table 2. Performance Indicator Scores of Example Transit Agencies

<i>Transit Agency</i>	<i>Performance Category</i>	<i>Performance Indicator</i>	<i>Scores</i>
PTS	1. Transit Vehicle ITS Technology adoption	1.1 Automated Vehicle Location (AVL)	100.00%
		1.2 Computer Aided Dispatch and Scheduling (CADS)	100.00%
		1.3 Mobile Data Computers (MDCs)	100.00%
		1.4 Automatic Passenger Counters (APC)	84.29%
		1.5 Maintenance Management Systems (MMS)	100.00%
		1.6 Transit Signal Priority (TSP)	6.05%
	2. Traveler Information Technology Adoption in Vehicles (%)	2.1 Automatic Voice Announcement (AVA)	100.00%
		2.2 Dynamically Updating Passenger Information Displays	100.00%
		2.3 Dynamically Triggered Automated Announcements	100.00%
	3. Traveler Information Technology Adoption in Stations	3.1 Electronic Signage or Displays	0.00%
		3.2 Mobile Application	100.00%
	4. Travel Demand	4.1 Travel Management Coordination Center (TMCC)	100.00%
		4.2 Integrated Corridor Management (ICM)	0.00%
		4.3 Route and service planning	50.00%
		4.4 Passenger transfers	0.00%
		4.5 Dynamic assignment of assets	0.00%
	5. Real Time Data Collection	5.1 Vehicle time and location	100.00%
		5.2 Vehicle monitoring status (i.e., vehicle diagnostics and health)	100.00%
		5.3 Passenger count	0.00%
		5.4 Trip itinerary planning records	100.00%
		5.5 Passenger information (e.g., fare transactions, trip origin/destination location)	100.00%
		5.6 Emergency vehicle signal preemption events	0.00%
		5.7 Transit vehicle signal priority events	0.00%
		5.8 Incidents	100.00%

In the case of each category considered to have the same impact for sensitivity analysis, 0.2 weight is appointed to each category, since there are 5 categories. In this case, the performance index of PTS is calculated as follows;

$$\begin{aligned}
 & ITSPI_{PTS_1} \\
 & 0.2 * \frac{(1.00 + 1.00 + 1.00 + 0.8429 + 1.00 + 0.0605)}{6} + 0.2 * \frac{(1.00 + 1.00 + 1.00)}{3} + \\
 = & 0.2 * \frac{(0.00 + 1.00)}{2} + 0.2 * \frac{(1.00 + 0.00 + 0.50 + 0.00 + 0.00)}{5} + \\
 & 0.2 * \frac{(1.00 + 1.00 + 0.00 + 1.00 + 1.00 + 0.00 + 0.00 + 1.00)}{8} \\
 = & 64.84\%
 \end{aligned}$$

In the case of only 1st category is considered for sensitivity analysis, the performance index of PTS is calculated as follows;

$$ITSPI_{PTS_2} = \frac{(1.00 + 1.00 + 1.00 + 0.8429 + 1.00 + 0.0605)}{6} = 81.72\%$$

3. Results And Discussion

Calculated performance indicators of the 7 transit agencies can be seen in Figure 2. DART comes forward as the best performing transit agency in ITS integration in its operations. Lowest performing transit agency is MARTA. While second lowest performing transit agency is MBTA with the performance index of 54.98%, MARTA has a performance index of 32.95% which is significantly lower.

DART outranks its peers due to its strength in traveler information technology adoption in stations and travel demand category indicators. MARTA's weaknesses stem from the lack of ITS technology adoption in transit vehicles compared to its peers, insufficient real time data collection and lack of the usage of ITS technologies in travel demand supply.

Performance indexes are calculated assuming all the indicators regardless of the performance category have the same level of importance and same effect on the system, in this case each of the indicators have the weight of 1/24 since there are 24 performance indicators. To better understand the effectiveness of the intelligent transportation system operations of the agencies, sensitivity analyses must be conducted. 6 sensitivity analyses have been conducted. For the first sensitivity analysis, same importance is considered to be given to each category; therefore since there are 5 categories, 1/5 weight is appointed to each category. In remaining sensitivity analyses; each category is considered individually, meaning considered category is weighted 1 and remaining categories are weighted 0. The calculated performance indexes according to the weights assigned to the categories by sensitivity analyses is given in Table 2.

DART comes forward in the first sensitivity analysis with 85.32% in which same importance is given to all categories. The strongest performances shown by DART is observed in the fourth and fifth sensitivity analyses with the indexes of 100%, which takes into consideration only "Traveler Information Technology Adoption in Stations" category and only "Travel Demand" category, respectively. Lowest performance shown by DART is in the 6th sensitivity analysis, which takes only real time data collection into consideration.

TriMet has the second highest performance index amongst all transit agencies in the "equal weight for each category" sensitivity analysis with the performance index of 76.66%. TriMet's strengths mostly stem from its success in traveler information technology adoption in stations in which it ranks the 2nd and real time data collection in which it ranks the 1st amongst all agencies. TriMet performs the lowest

considering only traveler information adoption technologies in the vehicles with the score of 59.53% behind PTS and DART which have the performance indexes of 100% and 85.59% respectively.

SFMTA ranks the third in the first sensitivity analysis which weighs each category equally with performance index of 69.04% . SFMTA performs the best amongst all agencies considering only ITS technology adoptions in transit vehicles, which 2nd sensitivity analysis shows it has the 96.85%. All other performance indicators of SFMTA varies between 60% and 70% showing a above average performance.

PTS ranks the fourth with performance index of 64.84% in the “all categories weighted equal” sensitivity analysis. It shows the strongest performance and ranks the highest amongst all in third sensitivity analysis with performance index of 100% which considers only traveler information adoption technologies in the vehicles. Lowest performance index produced by PTS is in 5th sensitivity analysis which considers only travel demand category.

RTD has the 5th strongest performance with the index of 60.58% amongst all transit operations when all categories are considered in the same importance. RTD performs the best in fourth sensitivity analysis with performance index of 100%, which takes only “Traveler Information Technology Adoption in Stations” category into consideration. Lowest performance index of RTD is observed in “consider only traveler information adoption technologies in the vehicles” category, in which RTD ranks the lowest among all.

MBTA ranks the 6th amongst all transit agencies with the performance index of 56.35%. It performs the best in the 4th sensitivity analysis, where only “Traveler Information Technology Adoption in Stations” are considered and ranks 3rd amongst all transit agencies. It performs poorly as RTD does in the fourth sensitivity analysis with 29.55% performance index.

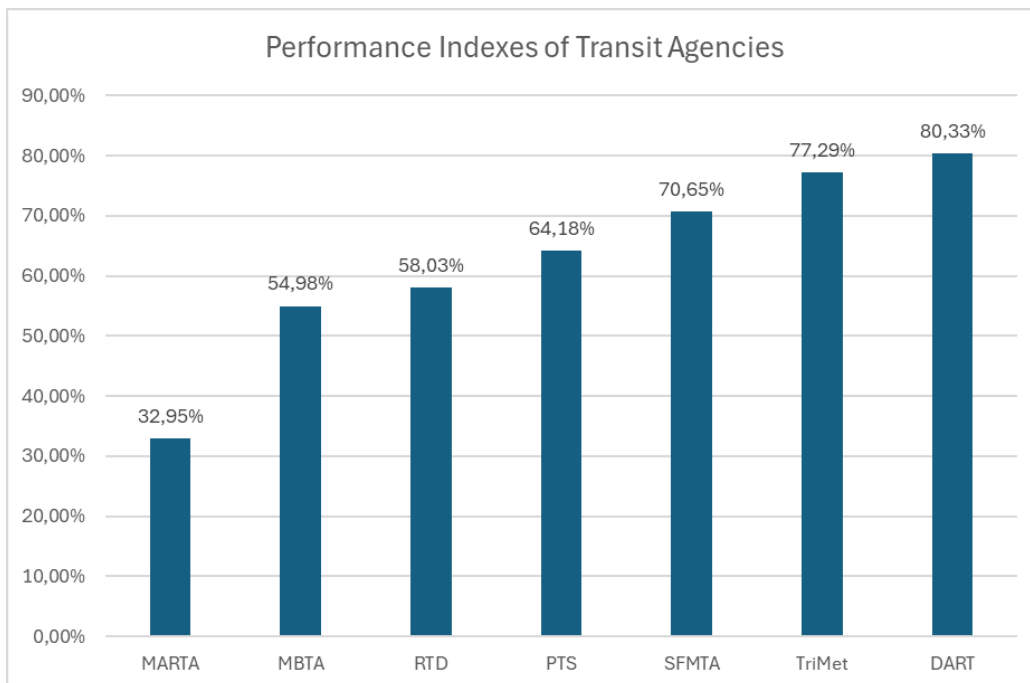


Figure 2. Performance Indexes of Transit Agencies

Table 3. Sensitivity Analysis Results

Sensitivity Analyses	Performance Indexes						
	MARTA	MBTA	RTD	PTS	TriMet	SFMTA	DART
$W_j=0.2$ for each category	45.33%	56.35%	60.58%	64.84%	76.66%	69.04%	85.32%
$W_1 = 1,$ $W_2, W_3, W_4, W_5 = 0$	48.97%	65.40%	84.73%	81.72%	73.46%	96.85%	78.51%
$W_2 = 1,$ $W_1, W_3, W_4, W_5 = 0$	66.67%	29.55%	28.15%	100.00%	59.53%	62.70%	85.59%
$W_3 = 1,$ $W_1, W_2, W_4, W_5 = 0$	98.51%	94.29%	100.00%	50.00%	92.80%	63.17%	100.00%
$W_4 = 1,$ $W_1, W_2, W_3, W_5 = 0$	0.00%	30.00%	40.00%	30.00%	70.00%	60.00%	100.00%
$W_5 = 1,$ $W_1, W_2, W_3, W_4 = 0$	12.50%	62.50%	50.00%	62.50%	87.50%	62.50%	62.50%

MARTA has the lowest overall performance index value of 45.33%. Although it has the second highest performance index when Traveler Information Technology Adoption in Stations are considered only, MARTA has the lowest performance index values of fifth and sixth sensitivity analyses with 0.00% and 12.50% which shows important weaknesses in those areas.

4. Conclusion and Recommendations

This study provided a benchmarking framework for comparing the performance levels of intelligent transportation system operations of public transport agencies in metropolitan areas based on performance indicators. 7 transit agencies in the United States were chosen for the case study. Data were collected from the 2020 deployment tracking survey, latest of the surveys that are conducted every 2 to 3 years by the ITS JPO. After the collection of the data performance indexes of the transit agencies have been calculated and strengths and weaknesses of the agencies compared to each other came forward. In provided literature, several benchmarking studies and initiations have been referred to in order to present the practicability of benchmarking in transportation system development and improvement. One of the main goals of the study is to narrow down the focus of benchmarking strategies to ITS development. Existing monitoring and evaluation initiations which are mentioned in the study such as SEPSIS and ITS JPO Deployment Tracking Surveys deems these studies to be applicable for ITS development for local and national authorities, considering that they provide the data background. The conclusions of such studies can benefit the agencies, local and national authorities in noticing the overall situation of the development of ITS in operation areas and provide a domain for planning the future scenarios in preparation of action plans. With the conclusions of the study, it is aimed:

- For the results of the study to put light on the development needs of transit agencies,
- To produce a beneficial tool in decision-making phase in monitoring and evaluation processes of ITS,
- To develop a different benchmarking framework for ITS where peer comparison is applied instead of internal benchmarking with the systems own development in a certain period of time.

Recommendations can be listed as:

- Resorting to expert opinions in weighting the indicators to assign the importance of each indicator in contributing to overall system performance.
- Investigating the surveys from past years and measuring the growth and development of the systems in its own would provide the ability to develop models which explains the changes in congestion, emissions and traffic safety in the study area during the period between two surveys, via the measured growth of the systems.
- Need for development of benchmarking strategies and methodologies is essential in reaching the strategic goals of 2020 ITS Action Plan.

Researchers' Contribution Rate Statement

All authors contributed equally in preparation of the paper.

Conflict of Interest Statement, if any

The authors certify that they have NO affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest (such as honoraria; educational grants; participation in speakers' bureaus; membership, employment, consultancies, stock ownership, or other equity interest; and expert testimony or patent-licensing arrangements), or non-financial interest (such as personal or professional relationships, affiliations, knowledge or beliefs) in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

5. References

- Alkharabsheh, A., Moslem, S., Oubahman, L., & Duleba, S. (2021).** An Integrated Approach of Multi-Criteria Decision-Making and Grey Theory for Evaluating Urban Public Transportation Systems. *Sustainability*, 13(5), 2740. <https://doi.org/10.3390/su13052740>
- Awasthi, A., Omrani, H., & Gerber, P. (2018).** Investigating ideal-solution based multicriteria decision making techniques for sustainability evaluation of urban mobility projects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.06.007>
- Benchmarking European Sustainable Transport.** (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <https://trimis.ec.europa.eu/project/benchmarking-european-sustainable-transport>
- Cheng, Z. A., Pang, M., Pavlou, P. A., Cheng, Z. A., Pang, M., & Pavlou, A. (2020).** *Mitigating Traffic Congestion : The Role of Intelligent Transportation Systems Mitigating Traffic Congestion : The Role of Intelligent Transportation Systems.* May.
- Choosakun, A., & Yeom, C. (2021).** Developing Evaluation Framework for Intelligent Transport System on Public Transportation in Bangkok Metropolitan Regions Using Fuzzy AHP. *Infrastructures*, 6(12), 182. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/infrastructures6120182>
- da Silva, A. N. R., da Silva Costa, M., & Macedo, M. H. (2008).** Multiple views of sustainable urban mobility: The case of Brazil. *Transport Policy*, 15(6), 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2008.12.003>
- Debnath, A. K., Chin, H. C., Haque, Md. M., & Yuen, B. (2014).** A methodological framework for benchmarking smart transport cities. *Cities*, 37, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.11.004>
- Henning, T. F. P., Muruvan, S., Feng, W. A., & Dunn, R. C. (2011).** The development of a benchmarking tool for monitoring progress towards sustainable transportation in New Zealand. *Transport Policy*, 18(2), 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.10.012>
- Intelligent Transportation Systems Joint Program Office.** (n.d.-a). *2020 ITS Deployment Tracking Survey (DTS).*
- Intelligent Transportation Systems Joint Program Office.** (n.d.-b). *ITS Deployment Tracking Survey Data Repository.* <https://www.itskrs.its.dot.gov/deployment/surveys>
- Kakati, P., Senapati, T., Moslem, S., & Pilla, F. (2024).** Fermatean fuzzy Archimedean Heronian Mean-Based Model for estimating sustainable urban transport solutions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107349>
- Kiba-Janiak, M., & Witkowski, J. (2019).** Sustainable urban mobility plans: How do they work? *Sustainability (Switzerland)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174605>
- Luque-Martínez, T., & Muñoz-Leiva, F. (2005).** City benchmarking: A methodological proposal referring specifically to Granada. *Cities*, 22(6), 411–423. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2005.07.008>
- Miranda, H. de F., & Rodrigues da Silva, A. N. (2012).** Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil. *Transport Policy*, 21, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.03.009>

Moslem, S. (2024). A Novel Parsimonious Spherical Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Sustainable Urban Transport Solutions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128, 107447. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107447>

National Intelligent Transportation Systems Strategy Document and 2020-2023 Action Plan. (2020).

Perra, V.-M., Sdoukopoulos, A., & Pitsiava-Latinopoulou, M. (2017). Evaluation of sustainable urban mobility in the city of Thessaloniki. *Transportation Research Procedia*, 24, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.103>

Pindarwati, A., & Wijayanto, A. W. (2015). Measuring Performance Level of Smart Transportation System in Big Cities of Indonesia. *2015 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICITSI.2015.7437716>

Singh, B., & Gupta, A. (2015). Recent trends in intelligent transportation systems: a review. *Journal of Transport Literature*, 9(2), 30–34. <https://doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n2a6>

Stone, J., Mees, P., & Imran, M. (2012). Benchmarking the Efficiency and Effectiveness of Public Transport in New Zealand Cities. *Urban Policy and Research*, 30(2), 207–224. <https://doi.org/10.1080/08111146.2012.666210>

The Urban Transport Benchmarking Initiative. (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <https://trimis.ec.europa.eu/project/urban-transport-benchmarking-initiative>

Wootton, J. R., García-Ortiz, A., & Amin, S. M. (1995). Intelligent transportation systems: A global perspective. *Mathematical and Computer Modelling*, 22(4–7), 259–268. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(95\)00137-Q](https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00137-Q)

Zope, R., Vasudevan, N., Arkatkar, S. S., & Joshi, G. (2019). Benchmarking: A tool for evaluation and monitoring sustainability of urban transport system in metropolitan cities of India. *Sustainable Cities and Society*, 45, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.011>

Araştırma Makalesi

Türkiye’de Yenilikçi Bir Adım: Aksaray CFI Kavşak Tasarımı

Sefa Gündoğdu^{1*}, Cemal Önal²

^{1,2} Karayolları Genel Müdürlüğü, Etüt, Proje ve Çevre Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye

*Correspondence: sefa.gundogdu@kgm.gov.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1509023

Özet Karayolları, tarih boyunca yerleşim alanlarını birbirine bağlayarak bilim, kültür ve ticaretin gelişimine katkı sağlamıştır. Ancak artan nüfus ve araç sahipliği ile birlikte geleneksel kavşaklar, yoğun trafik talebine yanıt vermekte yetersiz kalmaktadır. Bu durum, seyahat sürelerini uzatırken yakıt tüketimi ve çevresel etkileri artırmaktadır. Son yıllarda bu sorunlara çözüm olarak alternatif yenilikçi kavşak tasarımları öne çıkmaktadır. Türkiye’de ilk kez Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından uygulanan Sürekli Akış Kavşağı (CFI - Continuous Flow Intersection), bu kapsamda önemli bir örnek oluşturmaktadır. Bu çalışmada, Aksaray Küçük Sanayi Sitesi girişinde yer alan CFI kavşağının mikro simülasyon tabanlı analizi gerçekleştirilmiş, farklı trafik senaryoları altında kapasite ve performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, mevcut durumda kavşağın hizmet seviyesi (LOS) B olup, ortalama gecikme süresi 12,44 saniyedir. Trafik hacminin %50 artması durumunda gecikme süresi 15,99 saniyeye çıkarken, hizmet seviyesi B olarak kalmıştır. %100 artış senaryosunda ise gecikme süresi 21,72 saniyeye ulaşarak hizmet seviyesi C’ye düşmüştür. Yakıt tüketimi mevcut durumda 121 litre iken, %50 ve %100 trafik artışında sırasıyla 196 litre ve 308 litreye yükselmiştir. Karbon monoksit (CO) emisyonu da mevcut 2231 g seviyesinden %100 artış durumunda 5697 g seviyesine çıkmıştır. Sonuçlar, CFI kavşak tasarımının yüksek hacimli sola dönüş taleplerini daha etkin yönettiğini ve trafik akışını iyileştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, Türkiye’de ilk defa uygulanan bir CFI kavşağının performans analizini sunarak literatürde önemli bir boşluğu doldurmakta ve gelecekte benzer kavşak uygulamaları için bilimsel bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hemzemin kavşak, sürekli akış kavşağı, kapasite, trafik yönetimi, trafik simülasyonu

Innovative Step in Türkiye: Aksaray CFI Intersection Design

Abstract: Highways have contributed to the development of science, culture and commerce by connecting settlements throughout history. However, with increasing population and vehicle ownership, traditional intersections are inadequate to respond to heavy traffic demand. This increases travel times, fuel consumption and environmental impacts. In recent years, alternative innovative intersection designs have come to the forefront as a solution to these problems. The Continuous Flow Intersection (CFI), implemented for the first time in Turkey by the General Directorate of Highways (KGM), constitutes an important example in this context. In this study, a microsimulation-based analysis of the CFI intersection located at the entrance of Aksaray Small Industrial Zone was carried out, and capacity and performance evaluations were carried out under different traffic scenarios. According to the findings, the current level of service (LOS) of the intersection is B and the average delay is 12.44 seconds. In the case of a 50% increase in traffic volume, the delay increases to 15.99 seconds, while the level of service remains at B. In the 100% increase scenario, the delay increases to 21.72 seconds and the level of service drops to C. Fuel consumption increased from 121 liters in the current case to 196 liters and 308 liters in the 50% and 100% traffic increase scenarios, respectively. Carbon monoxide (CO) emissions also increased from the current level of 2231 g to 5697 g with a 100% increase. The results show that the CFI intersection design manages high-volume left-turn demands more effectively and improves traffic flow. This study fills an important gap in the literature by presenting the performance analysis of a CFI intersection implemented for the first time in Turkey and provides a scientific basis for similar intersection applications in the future.

Keywords: Grade intersection, continuous flow intersection, capacity, traffic management, traffic simulation

1. Giriş

Trafik, yayaların, hayvanların ve motorlu taşıtların karayolları üzerindeki hareket ve davranışlarını ifade etmektedir (Aydın, 2017). Kamunun kullanımına açık olan yollar, köprüler ve alanlar karayolu olarak tanımlanmaktadır. İki yönlü ve tek yönlü yollar, bölünmüş yollar, erişim kontrollü yollar, geçiş yolları, bağlantı yolları, ana yollar, tali yollar, taşıt yolları, yaya yolları, bisiklet yolları ve yaya geçitleri gibi çeşitli bileşenlerin kesiştiği yerlerde kavşak gereksinimi ortaya çıkmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 1983). Kavşak iki veya daha fazla yolun kesişmesinden meydana gelen ve trafik hareketleri için gerekli şartları kapsayan bir alanı ifade etmektedir. Kavşakların temel işlevi, trafiğin yön değiştirmesini sağlamaktır. Bir yolun en önemli kısmını teşkil eden kavşaklar, yolun emniyetine, hızına, işletme maliyetlerine ve kapasitesine doğrudan etki etmektedirler. Bu nedenle kavşakların projelendirilmeleri, yolun ekonomik çalışmasını temin edecek şekilde yapılmalıdır (Yaman & Kaman, 1979). Bir kavşak genel olarak, onun fiziksel ve işlevsel alanlarıyla belirlenmektedir. Kavşak tasarımında yolların kesiştiği nokta fiziksel alanı tanımlamaktadır. İşlevsel alan ise bu fiziksel bölgeyi içine almakta ve kavşak sebebiyle yol platformunun değiştiği, giriş ve çıkış arasındaki tüm alanları (örneğin, ek şeritler, adalar) kapsamaktadır. Kavşakların işlevsel alanları temel olarak üç ana kısma ayrılmaktadır: algı-tepki mesafesi, manevra mesafesi ve bekleme mesafesi (Koç, 2010).

Kavşak tasarımı yapılırken hızın kontrol edilmesi, sürekliliğin sağlanması, güvenliğin artırılması, gecikmelerin azaltılması, hizmet seviyesinin iyileştirilmesi ve taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması hedeflenmektedir. Söz konusu amaçlara ulaşmak için ekonomik ve fiziksel sınırlar çerçevesinde tasarımlar oluşturulmaktadır. Kavşaklar, tasarım özelliklerine göre eş düzey kavşaklar ve katlı (farklı seviyeli) kavşaklar olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Bu ayrım, kavşakların fiziksel yapısına dayanmaktadır. Eş düzey kavşaklar, kendi içinde kontrolsüz kavşaklar, sinyalize kavşaklar ve dönele kavşaklar olarak üç ana gruba ayrılmaktadır (Koç, 2010). Sinyalize kavşaklarda kullanılan kontrol teknikleri, temel olarak iki ana başlıkta toplanmaktadır: izole kontrol sistemleri ve koordineli kontrol sistemleri. İzole sinyalizasyon kontrol sistemleri; sabit zamanlı kontrol, trafik uyarmalı kontrol, yaya uyarmalı kontrol ve adaptif kontrol sistemlerinden oluşmakta, koordineli kontrol sistemleri ise; senkronize, alternatif ve progresif kontrol sistemlerinden oluşmaktadır (KGM, 2019).

Etkili trafik yönetimi için sinyal sistemlerinin doğru planlanması ve işletilmesi büyük önem taşımaktadır. Projenin geçerliliği ve sürdürülebilirliği açısından, tasarım aşamasında kullanılan yöntemlerin ve onaylanan parametrelerin ülke koşullarını tanımlaması ve sürücü ile yolcu profilini doğru temsil etmesi gerekmektedir. Değişken trafik taleplerini yönetebilmek amacıyla, akıllı ulaşım sistemlerinin gelişmesiyle birlikte trafik uyarmalı sinyalizasyon yöntemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sinyalize kavşağın optimize edilmesi, anlık verilere dayalı olarak faz düzenini belirlenmesi gibi parametreler; taşıt gecikme süresini, seyahat süresini, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltırken, kavşağın hizmet seviyesini yükseltmektedir. Tali yol trafik taleplerinin düşük olduğu bölgelerde, yarı uyarmalı sinyalizasyon sistemleri kullanılarak kavşakların yönetimi sağlanmaktadır. Bu bölgelerde ana yol, sürekli yeşil ışık ile planlanmakta olup tali yollar, sensörlerden alınan taleplere bağlı olarak yeşil faza geçebilmekte ve talep yoğunluğuna göre maksimum minimum sınırlar çerçevesinde faz süresi uzatılabilmektedir (KGM, 2019).

Ulaştırma sistemlerinin analiz edilmesi, tasarlanması ve iyileştirilmesi amacıyla sanal ikiz ve simülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Sanal ikiz olarak tanımlanabilecek modellerin oluşturulması sayesinde projelere ait senaryolar test edilebilmekte, mevcut problemler tespit edilmekte, çözüm önerileri geliştirilebilmekte ve gerekli değişiklikler yapılabilmektedir. Performans kriterleri mukayese edilerek kapsamlı değerlendirmeler gerçekleştirilmekte ve bu doğrultuda karar alma süreçleri kolaylaştırılmaktadır. Bu yöntem ile geri dönüşü mümkün olmayan ya da yüksek maliyetli hataların sahada ortaya çıkmasının önüne geçilerek, olası sorunların en aza indirilmesi sağlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019).

Trafik akımlarının modellenmesinde genel olarak analitik, makroskobik, mikroskobik ve mezoskobik benzetim teknikleri kullanılmaktadır. Otoyol ve kent içi ulaşım sistemlerinde, mevcut trafik koşullarının ve önerilen projelerin performansını değerlendirmek amacıyla mikro simülasyon teknikleri uygulanabilmektedir. Bu teknikler, saniyeden daha kısa zaman dilimlerinde bireysel araç hareketlerini modelleyerek kapsamlı analizler gerçekleştirilmektedir. Bir aracın hareketinin tahmin edilmesi sürecinde,

sürücünün farklı davranış modellerinden kaynaklanan çeşitli değişkenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Söz konusu değişkenler arasında ön önemli parameter, birbirini takip eden araçlar arasında süredir. Ardışık araçlar arasındaki aralık, mesafe ve zaman cinsinden olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Güler, 2016).

Çalışma kapsamında, birden fazla karayolunun kesişmesi, birleşmesi veya ayrılması sonucu oluşan kavşak alanları incelenmiştir. Hız kontrolünün sağlanması, güvenliğinin artırılması ve hizmet seviyesinin yükseltilmesi gibi amaçlarla düzenlenen kavşaklarda, tasarımı etkileyen faktörler detaylı olarak ele alınmıştır. İnsan, trafik, fiziksel, ekonomik ve sosyal faktörler ölçeğinde tasarlanan geleneksel kavşak uygulamalarının yetersiz kaldığı durumlarda kullanılacak yenilikçi alternatif hemzemin kavşak tasarımlarına yönelik literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Akıllı ulaşım sistemlerinin sinyalizasyon alanındaki gelişmeleri takip edilerek, trafik uyarımlı sinyalizasyon sistemlerinin kullanımı incelenmiştir. Benzetim modeli ve ilgili modüller kullanılarak kavşak ve sinyalizasyon sistemi modellenmiş olup, modellenen kavşak bölgesindeki trafik hacimleri %50 ve %100 oranında artırılarak kavşağın kapasitesi analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın literatürdeki benzerlerinden ayrılan yönleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Trafik yoğunluğunun, özellikle de sola dönüş hacimlerinin yüksek olduğu bölgelerde, farklı seviyeli kavşaklardan önce uygulanabilecek yenilikçi hemzemin kavşak tasarımlarının etüt edilmesi,
- Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) değerleri referans alınarak tercih edilebilecek alternatif kavşak türlerinin belirlenmesi,
- Türkiye’de ilk kez oluşturulan bir kavşak tasarımı ile uygulanabilirliğin ortaya konulması ve bu doğrultuda farkındalık sağlanması,
- Optimize edilmiş ve koordine şekilde işletilen sinyalizasyon sistemleri ile elde edilen kazanımların bütüncül olarak değerlendirilmesi,
- Simülasyon tekniklerinin kullanımıyla, karar alma süreçlerinde hız ve doğruluk unsurlarının önemine vurgu yapılması.

Bu çalışmanın kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, alternatif yenilikçi kavşak tasarımları ve uyarımlı sinyalizasyon sistemlerine ilişkin literatür araştırması sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan materyal ve metotlar özetlenmiş olup bu kapsamda çalışma alanı, veri toplama süreci, benzetim modelinin geliştirilmesi ve kalibrasyon aşamaları detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, analiz sonuçları ve bulgular yer almaktadır. Beşinci ve son bölümde ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile birlikte öneriler sunulmuştur.

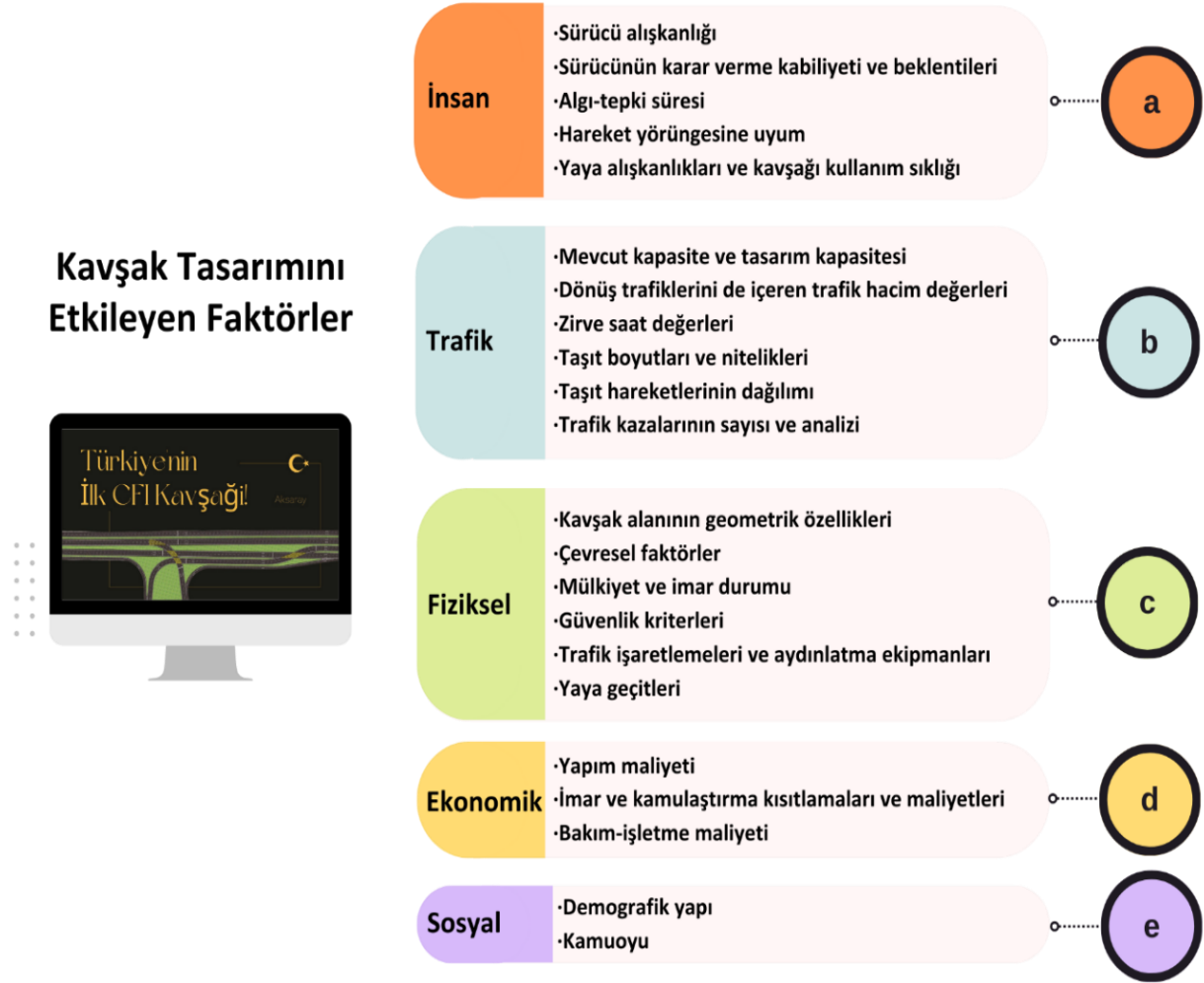
2. Literatür Taraması

2.1. Kavşak tasarımı

Yayla (2015), farklı yönlerde akan trafiğin ortak olarak kullandığı yol alanlarının hemzemin (eş düzey) kavşaklar olarak tanımlandığını ifade etmiştir. Yapılan istatistiksel analizlere göre, neredeyse tüm ülkelerde şehir içi ve kırsal yollarda meydana gelen trafik kazalarının %40 ila 60'ının, birden fazla yolun birleştiği veya kesiştiği hemzemin kavşaklarda gerçekleştiği belirtilmiştir. Öte yandan, özellikle şehir içi trafik akışında yaşanan gecikmelerin yüzde 70'ten fazlasının, bu kavşak bölgelerindeki duraklamalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu iki temel husus, hemzemin kavşakların dikkatle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Kazalara ve gecikmelere neden olan bu noktaların, titizlikle planlanması ve kapsamlı teknik analizlere dayalı olarak tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Karayolları Genel Müdürlüğü (2022), kavşak bölgelerinin yol altyapısının en önemli bileşenlerinden biri olduğunu belirtmiştir. Bunun temel nedeni, yolun verimliliği, güvenliği, hızı, işletme maliyetleri ve kapasitesi gibi kritik unsurların kavşak tasarımına doğrudan bağlı olmasıdır. Kavşaklar, iki veya daha fazla yol üzerindeki doğrusal veya kesişen trafik akışlarını ve bu yollar arasındaki dönüş hareketlerini içermektedir. Bu hareketler, kavşak türüne bağlı olarak farklı geometrik düzenlemeler ve trafik yönetimi uygulamaları ile gerçekleştirilmektedir. KGM Karayolu Tasarım El Kitabı'na göre, kavşak tasarımını

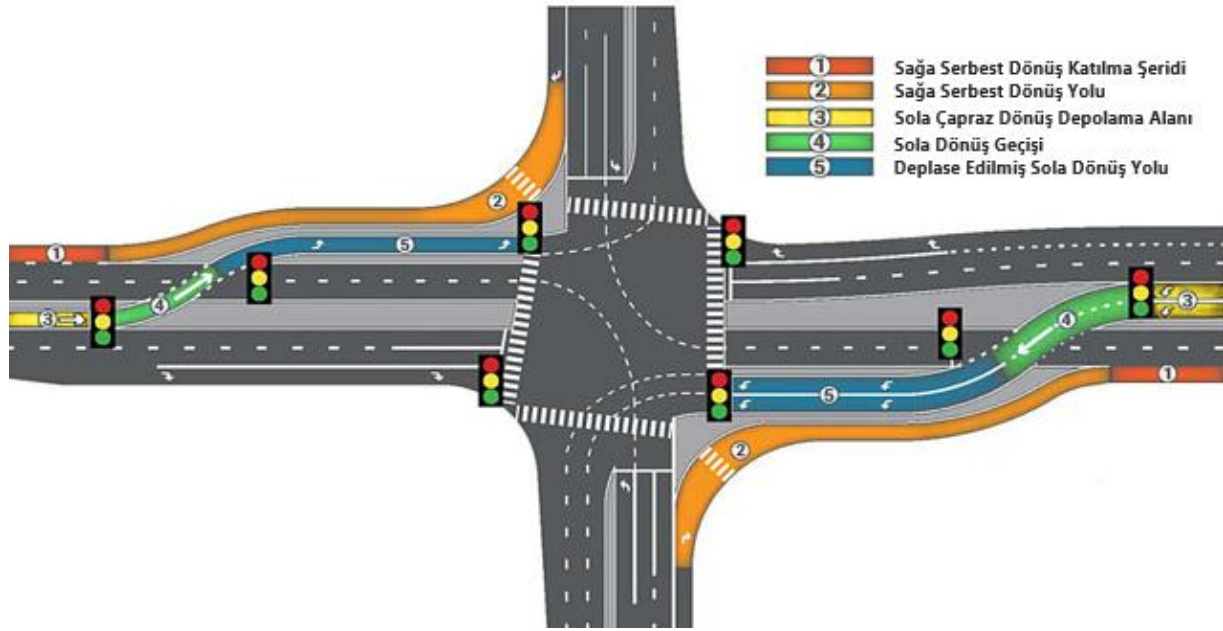
etkileyen faktörler beş ana başlık altında sınıflandırılmıştır: insan, trafik, fiziksel, ekonomik ve sosyal faktörler. Bu faktörlerin detaylı sınıflandırması Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1. Kavşak tasarımını etkileyen faktörler.

Sesli (2017), kent içi kavşak düzenleme çalışmalarında taşıt ve yaya trafiği ihtiyaçlarına cevap verilmesini amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaç doğrultusunda, bölgesel faktörler (sosyo-ekonomik, kültürel, demografik) dikkate alınarak saha verileri ile mevcut durum simülasyonu yapmış ve kaza envanterleri incelemiştir. Çalışmada, kontrol ve kavşak sayımları, mevcut trafik akışının analizi, yol sınıflandırmaları, yaya yollarının incelenmesi, otopark analizleri, sinyalizasyon sistemlerinin değerlendirilmesi, kaza envanterlerinin analizi ve toplu taşıma verilerinin incelenmesi gibi yöntemler kullanılmıştır. Kastamonu ilindeki 25 kavşak incelenmiş olup, özellikle Cumhuriyet Meydanı ve Sunta Kavşağı detaylı analizlere tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, kavşaklardaki sorunların belirlenmesinde geniş alanlı incelemelerin önemi vurgulanmış ve tasarımın uzun vadeli planlamalarla uyumlu olması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca, kavşak sayımları, sinyalizasyon analizleri ve kaza değerlendirmeleri ile toplu taşıma araçlarının da göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir.

FHWA (2010), tarafından yapılan gözleme göre, günümüz ulaştırma uzmanları, sınırlı kaynaklarla artan nüfusun hareketlilik ihtiyaçlarını karşılamakta zorluk yaşamaktadır. Birçok karayolu kavşağındaki trafik sıkışıklığı giderek artmaktadır. Sürücüler, yayalar ve bisikletliler, bu artan gecikmeler nedeniyle daha fazla riskle karşı karşıya kalmaktadır. Günümüzün trafik hacimleri ve seyahat talepleri genellikle geleneksel kavşak tasarımlarının etkişi bir şekilde ele alamayacağı kadar karmaşık güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle, daha fazla mühendis bu karmaşık sorunlara çözüm ararken, çeşitli yenilikçi uygulamaları göz önünde bulundurmaktadır.



Şekil 3. CFI kavşak tasarımı (Url-1)

DLT ve CFI olarak adlandırılan tasarımlar, çapraz yer değiştirilmiş sola dönüş kavşağı (XDL; Crossover Displaced Left Turn) olarak da bilinmektedir. XDL, bir veya daha fazla sola dönüş hareketini, karşı trafik akışının diğer tarafına yeniden konumlandırarak bir kavşak formunu ifade etmektedir. Bu özellik, sola dönüş hareketlerinin ana akım hareketi ile eş zamanlı ilerlemesine imkân tanımaktadır. Dolayısıyla, ana kavşaktaki sola dönüş aşaması ortadan kaldırılmış olur. XDL kavşağı ile sinyal fazı ve çakışma noktalarının sayısı azaltılarak trafik operasyonlarında ve güvenlik performanslarında iyileştirme sağlanmaktadır. Geleneksel kavşakta sola dönüş için tahsis edilen yeşil sürelerden elde edilen kazanım ile, yaya geçişlerinin kolaylaştırılması ve araçların kavşaktaki bekleme sürelerinin azaltılması hedeflerine ulaşılabilmektedir (FHWA, 2014).

Yılmaz (2024), artan kent nüfusu ve bununla birlikte ortaya çıkan trafik sorunlarına çözüm üretmek amacıyla yenilikçi sinyalizasyon kavşak tasarımlarını araştırmayı ve mikro simülasyon yöntemleriyle analiz etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, geleneksel olmayan kavşak tasarımlarından biri olan Yerinden Edilmiş Sola Dönüş (DLT) kavşağı, aynı zamanda CFI olarak da bilinen kavşak tasarımına alternatif olarak sunulmuş ve yeni bir kavşak tasarımı oluşturmuştur. Bu alternatif tasarım, geleneksel sinyalizasyon kavşak tasarımı ile beş ayrı araç hacmi senaryosunda PTV Vissim simülasyon programı kullanılarak karşılaştırılmış ve Synchro programı üzerinden hesaplanan sinyal süreleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, alternatif DLT tasarımının ortalama gecikme süresinde %61.54, ortalama hızda %101.70, toplam seyahat süresinde %33.82 ve toplam gecikme süresinde %51.74 oranında iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, alternatif DLT tasarımının, DLT tasarımına kıyasla daha küçük kavşak alanlarında uygulanabilir olması sebebiyle, dar kentsel alanlarda çözüm olarak uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

2.2. Uyarımalı sinyalizasyon çalışmaları

Duraku ve Boshnjaku (2024), sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün (FTSC) sınırlamalarını aşmak amacıyla tasarım mantık kontrolüne dayalı bir algoritma önermiştir. Endüktif dedektörlerden alınan verileri kullanarak sinyal planlarını optimize etmiş ve PTV Vissim simülasyonlarıyla test etmişlerdir. Önerilen sistem, trafik akışına bağlı olarak yeşil süresini dinamik şekilde ayarlayarak döngü süresini kısaltmıştır. Gerçek bir kavşakta yapılan testlerde, sabit zamanlı kontrole kıyasla kuyruk uzunluklarını %39,6, araç gecikmelerini ise %51,3 oranında azaltarak daha verimli ve sürdürülebilir bir trafik yönetimi sağladığı gösterilmiştir.

Guo ve Ma (2016), trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla, gerçek zamanlı trafik akışına göre faz değiştiren bir uyarımalı sinyal kontrol modeli önermiştir. VISSIM simülasyonlarıyla test edilen model, seyahat süresi ve gecikmeyi azaltırken, faz geçişlerinde bekleme süresi ve kuyruk uzunluğunu dikkate alarak trafik talebine uyum sağlamıştır. Sonuçlar, geliştirilen uyarımalı sinyal kontrolünün sabit zamanlı ve standart uyarımalı sinyal kontrolüne kıyasla daha verimli olduğunu göstermektedir.

Koukol ve Pribyl (2013), PTV VISSIM'de bulanık kontrol algoritmasının değerlendirilmesini amaçlamıştır. Mikro simülasyon yöntemiyle, VisVAP kullanılarak trafik kontrol stratejileri oluşturulmuş ve trafik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Trafik detektörlerinden alınan verilerle yeşil süreyi hesaplayan bulanık çıkarım sistemi, sabit zamanlı kontrole kıyasla gecikmeyi %35.59, duruş sayısını %32.55 oranında azaltmıştır. Çalışma, VISSIM içinde bulanık kontrol sistemlerinin uygulanabilirliğini ve VisVAP'ın gelişmiş kontrol sistemleri için potansiyelini ortaya koymuştur.

Pandza vd. (2015), trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla VISSIM'de kooperatif rampa ölçümünü (RM) simüle eden bir çerçeve geliştirmiştir. Otoyol modeli oluşturularak, VisVAP ile trafik kontrol algoritmaları uygulanmış ve ALINEA tabanlı yerel RM stratejileri test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, kooperatif RM'nin ortalama hızı artırarak seyahat süresini azalttığını göstermektedir. Çalışma, RM sistemlerinin simülasyonla analiz edilerek gerçek dünya uygulamalarına katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Mitkas ve Politis (2020), otoyol rampalarında alternatif rampa ölçüm senaryolarını değerlendirmek amacıyla PTV Vissim kullanarak akıllı bir sinyal kontrol cihazı geliştirmiştir. Selanik Ring yolundaki bir kavşakta drone ile trafik hacimleri ölçülmüş ve farklı senaryolar simüle edilmiştir. Sabit zamanlı ve araçla çalışan sinyal sistemleri karşılaştırılmış, VisVAP kullanılarak akış şemasıyla dinamik sinyal kontrolü uygulanmıştır. Sonuçlar, rampa ölçerin trafik akışını iyileştirdiğini ve çevresel faydalar sağladığını göstermektedir.

Dadashzadeh (2019), karma trafik akışında otobüs önceliği yöntemlerinin etkilerini incelemiş ve Vissim'de İstanbul'daki Yıldız rampasını modellemiştir. Otomatik kalibrasyon için genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemlerinden oluşan hibrit GAPSO ve PSOGA algoritmaları geliştirilmiş, MATLAB-Vissim entegrasyonu kullanılmıştır. Entegre değişken hız sınırı (DHS) ve ALINEA modeli (DHS+ALINEA/O) VisVAP ile kodlanarak uygulanmış ve otobüs gecikmesini azaltırken karma trafik akışını iyileştirdiği bulunmuştur.

Usta (2023), akıllı ulaşım sistemlerinin (AUS) tarihsel gelişimini ve trafik ile çevre üzerindeki etkilerini incelemiştir. İstanbul'daki Fehim Şanlı Kavşağı'nda PTV Vissim kullanılarak adaptif trafik kontrolü ve parklanma düzenlemelerini içeren iki farklı senaryo modellenmiştir. Sonuçlar, adaptif kontrolün her durumda hizmet seviyesini iyileştirmediğini, ancak parklanma sorunlarının çözülmesinin trafik akışını olumlu etkilediğini göstermiştir. Çalışma, AUS çözümlerinin yerel koşullara göre uyarlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Yaman (2024), sabit süreli ve tam trafik uyarımalı sinyalizasyon kavşakları PTV Vissim kullanarak karşılaştırmıştır. Gerçek saha verileriyle kalibre edilen simülasyonlarda, farklı kavşak türleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, tam trafik uyarımalı sistemlerin gecikme süresi, durma sayısı, yakıt tüketimi ve emisyon değerlerinde iyileşme sağladığını, özellikle dört kollu sinyalizasyon kavşaklarda ve kısa döngü süreli dönel adalı kavşaklarda daha etkili olduğunu göstermiştir.

Çakıcı vd. (2022), dört kollu sinyalizasyon bir kavşak için VISVAP kullanılarak araçla harekete geçirilen yeni bir yönetim sistemi (VAM4) geliştirmiştir. Sistem, 20 farklı trafik senaryosunda gecikme, yakıt tüketimi ve emisyon açısından VISSIM'de test edilmiştir. Sonuçlar, VAM4'ün trafik taleplerindeki dalgalanmalara uyum sağlayarak performans göstergelerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Modelde, 14 şerit için 14 dedektör kullanılarak kuyruğun tespiti ve araç varış aralıklarının belirlenmesi sağlanmış, kavşak dört fazlı olarak uygulanmıştır.

3. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında, Aksaray ili hudutlarında ve Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü sorumluluğundaki yol güzergahında bulunan Aksaray Küçük Sanayi Sitesi girişindeki kavşak incelenmiş ve mikro simülasyon programı ile modellenmiştir. Modelleme sürecinde, zirve saat taşıt hacimleri saatlik sayım değerlerine dayalı olarak belirlenmiştir. Üç kollu T kavşağına ait geometrik veriler (uzunluk, şerit vb.), kontrol verileri (sinyalizasyon tipi, katılım kontrolü vb.), talep verileri (giriş hacimleri, dönüş yüzdeleri vb.) ve kalibrasyon verileri (hız, kuyruklanam vb.) PTV (Planung Transport Verkehr) Vissim (Verkehr In Städten-Simulationsmodell) mikro simülasyon programına aktarılmıştır. Sinyalizasyon aşamasında, Vissim programının VISSIG (Vissim Signal) ve VISVAP (Vissim Vehicle Actuated Programming) modülleri bir arada kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

3.1. Çalışma Alanı

Aksaray, İç Anadolu'nun orta Kızılırmak bölgesinde, kuzey ve güney Anadolu dağlarının birbirinden uzaklaştığı bir alanda yer almaktadır. Şehir, kuzey yarımkürede 37-38 enlemleri ile doğu yarımkürede 33-35 boylamları arasında konumlanmaktadır. Aksaray, doğusunda Nevşehir, güneydoğusunda Niğde, batısında Konya, kuzeyinde Ankara ve kuzeydoğusunda Kırşehir illeriyle komşudur. 7997 km² yüzölçümüne sahip olan Aksaray'ın 2021 yılı nüfusu; şehir merkezinde 350.783 kişi, köylerinde ise 78.286 kişidir (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2024). Ülkemizde doğu ile batının, kuzey ile güneyin bağlantısını sağlayan Aksaray, yatırımcılar tarafından ilgi gören önemli illerimizden biridir. Aksaray'da şehir merkezinde dar bir alana sıkışmış eski sanayi sitesini daha modern altyapıya sahip hale getirmek, ekonomik kalkınmayı teşvik etmek ve halkın refahını arttırmak amacıyla yeni bir sanayi sitesi kurulmuştur. KGM tarafından D750-12 olarak adlandırılan Aksaray-Adana yolunun 6. km'sinde yapılan yoğun kapasiteye sahip sanayinin yüksek hacimli olacağı tahmin edilen sola dönüş talebini karşılamak amacıyla yenilikçi kavşak tasarımı yapılmıştır (Şekil 4).

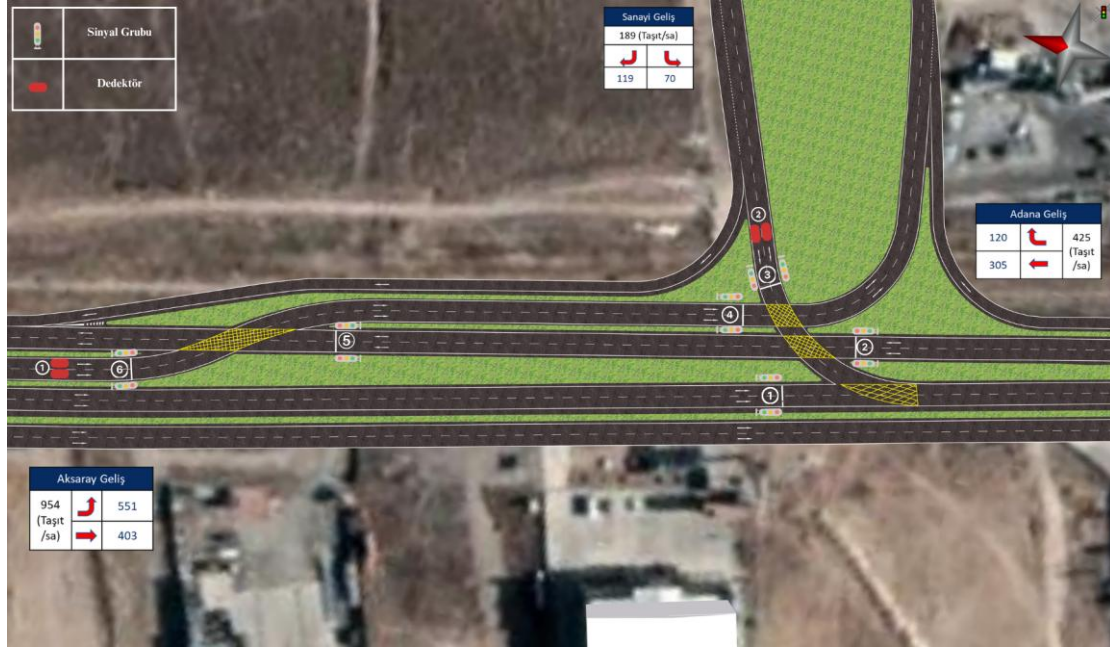


Şekil 4. Aksaray küçük sanayi sitesi kavşağı drone görüntüleri

3.2. Verilerin Elde Edilmesi

Trafik sayımları, yol üzeri ve yol kenarı olarak adlandırılan iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Yol üzeri sayımlarda kullanılan sistemler arasında pnömatik hortumlu sistemler, piezoelektrik sensörler, endüktif halka dedektörleri ve manyetik sensörler örnek olarak verilebilir. Yol kenarı sayım sistemleri ise mikrodalga radarları, aktif/pasif kızılötesi sensörler, ultrason/lazer destekli algılayıcılar ve manuel sayımlar gibi yöntemleri içermektedir. Kamera ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle, bu sistemlerin tümü, kameralardan alınan video kayıtlarının görüntü işleme ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak sayısallaştırılmasını içerecek şekilde genişletilebilir (Karagöz ve Akalın, 2017). Bu çalışma

kapsamında, Küçük Sanayi Kavşağı'nda bulunan sabit kameradan elde edilen görüntüler, 21.02.2024 tarihinde 08:30 ile 09:30 saatleri arasında kaydedilerek trafik sayımı yapılmıştır (Şekil 5). Kavşağı kullanan araçlar, otomobil, orta yüklü ticari taşıt (OYTT), otobüs ve ağır taşıt olmak üzere dört kategoriye ayrılmıştır. Zirve saatteki taşıt hacimleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 5. Taşıt hacimleri ve sinyalizasyon krokisi

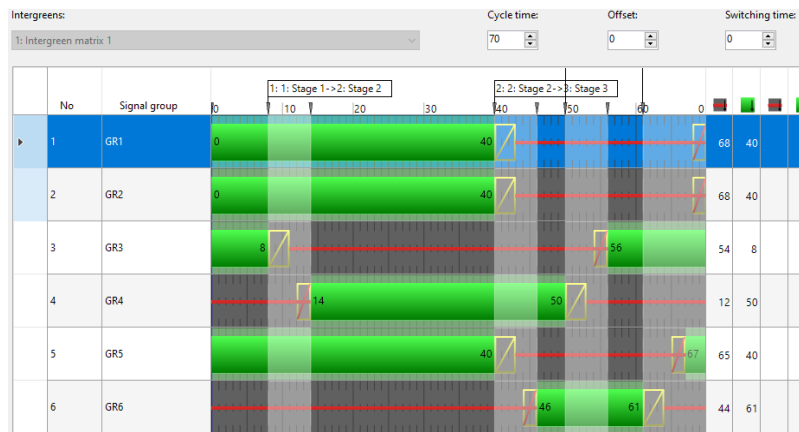
Tablo 1. Zirve saat taşıt hacimleri

Geliş Yönü	Otomobil	OYTT	Otobüs	Ağır Taşıt	Toplam (taşıt/sa)
Aksaray	553	87	9	305	954
Adana	222	39	7	157	425
Sanayi	136	25	-	28	189
Toplam	911	151	16	490	1568

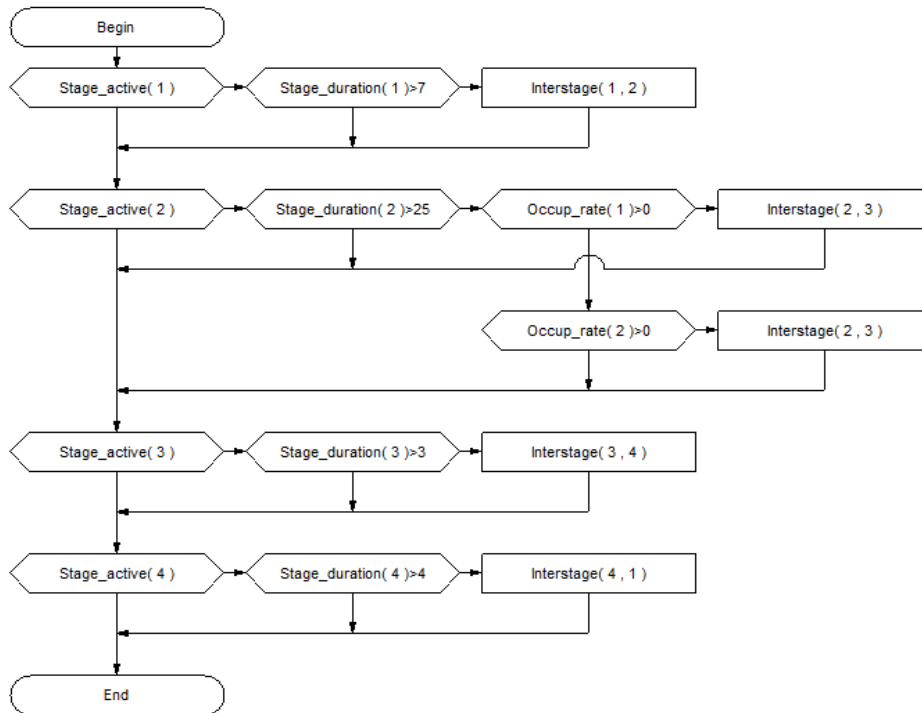
Yenilikçi alternatif kavşaklar tasarlanırken dikkate alınması gereken en kritik unsurlardan biri sinyal planıdır. Uygun bir sinyal planı, kavşak kapasitesini en üst düzeye çıkararak sıklığı azaltacak ve güvenliği artıracaktır. CFI, DLT gibi kavşak tasarımlarında, sola dönmek isteyen araçlar, deplase edilmiş yeni yola geçmek için sinyalize bir kavşaktan geçmektedir. Bu tür kavşaklar, genellikle tali kavşak olarak adlandırılmakla birlikte, bazı çalışmalarda çapraz kavşak olarak da tanımlanmaktadır. Sola dönecek araçlar, deplase edilmiş yola geçtikten sonra ana trafik akımıyla eş zamanlı hareket edebilmektedir. Dolayısıyla, bu tasarımda geleneksel dört fazlı kontrol edilebilen dört kollu kavşak, iki fazlı olarak çalıştırılabilir hale gelmektedir. Bu sayede, kavşağın kapasitesi ve işletme verimliliği önemli ölçüde iyileşirken, çakışma noktalarının azalması ile kavşak güvenlik performansında da iyileşmeler gözlemlenmektedir (Qi vd., 2020).

Kavşak bölgesinde, trafik hacmi, dönüş oranları ve geometrik tasarım esas alınarak sinyalizasyon sistemi tasarlanmıştır. Döngü ve yeşil süreleri, faz planı ve sırası, kavşak geometrisine uygun şekilde VISSIG'de hazırlanmıştır (Şekil 6). Ardından, yarı uyarmalı bir VISVAP kontrol modeli oluşturulmuştur. Bu modelin temel amacı, kavşak yaklaşımlarındaki dalgalanan trafik taleplerine adaptasyon sağlayarak ortalama araç gecikmelerini minimize etmek, yakıt tüketimini ve egzoz

emisyonlarını azaltmak ve tali yollarda araç olmadığı zamanlarda gereksiz beklemleri önlemektir. Kavşakta tanımlanan altı hareket grubunun her biri, farklı trafik akımlarını temsil etmektedir. Aksaray yönünden gelen sola dönüşler ve sanayi yönünden gelen sola dönüşler için, yaklaşım şeritlerinin her birine ayrı ayrı yerleştirilen dedektörler aracılığıyla anlık araç varış bilgisi alınarak yeşil ve kırmızı sinyal süreleri dinamik olarak ayarlanmaktadır. Geliştirilen VISVAP modelinde, esnek faz geçişi özelliği sayesinde, herhangi bir yaklaşımda talep algılanmadığı takdirde ana yolun akışı kesintisiz bir şekilde sağlanabilmektedir. Ana yol fazı olan Stage 2 (GR1, GR2, G4, G45) için minimum yeşil süre 25 saniye olarak belirlenmiş olup, bu sürenin sonunda Dedektör 1 ve Dedektör 2 periyodik olarak sorgulanmakta ve talep durumunda uygun faz geçişi gerçekleştirilmektedir. Aksi takdirde, her döngüde dedektör kontrolü yapılarak ana yolun yeşil süresi uzatılmaktadır. Geliştirilen kontrol mantığının karar süreçleri ve faz geçişleri, Şekil 7’de sunulan akış çizelgesinde detaylandırılmaktadır. Literatürdeki genel uygulamalar doğrultusunda, trafik hacmi ile ilişkili olarak dedektörler genellikle dur çizgisinden 15 m ile 45 m mesafede konumlandırılmakta olup (Çakıcı vd., 2022), bu çalışmada dedektörler dur çizgisinden 20 metre geriye yerleştirilmiştir. Yerleştirilen dedektörler sayesinde taşıtların geçiş öncelikleri ve süreleri tespit edilmekte ve geliştirilen algoritma ile kavşak koordineli bir şekilde yönetilmektedir.



Şekil 6. VISSIG’de oluşturulan sinyalizasyon faz diyagramı



Şekil 7. VISVAP’da oluşturulan yarı uyarımlı sinyalizasyon algoritması

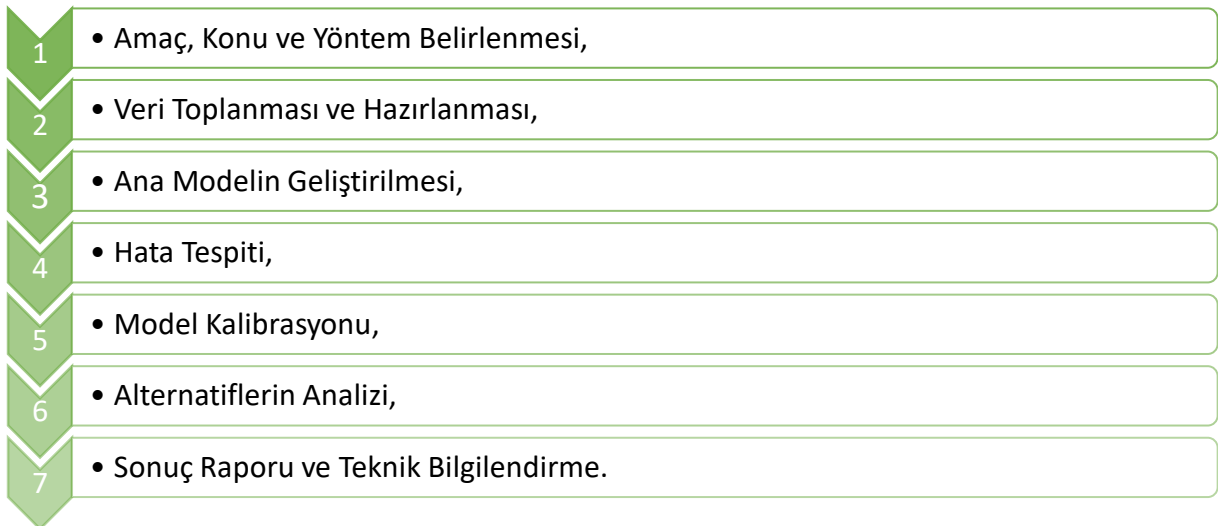
3.3. Benzetim Modelinin Geliştirilmesi

Söz konusu çalışmada, benzetimlerin gerçekleştirilmesi için Almanya menşeli PTV Grup tarafından üretilen VISSIM programının Corridor 2022 sürümü kullanılmıştır. VISSIM, özel araç trafiği, lojistik hizmetleri, toplu taşıma, yayalar ve bisikletliler gibi tüm yol kullanıcılarını ve bunların etkileşimlerini birleşik bir modelde entegre eden mikro ölçekli bir simülasyon yazılımıdır (PTV, 2024). Program, saniyeden daha kısa zaman aralıklarıyla bireysel taşıt hareketlerinin benzetimine imkân sağlayarak mikro ölçekte stokastik bir modelin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. VISSIM programının kullanım alanları, Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 8. PTV vissim kullanım alanları

Çalışmada, problemlerin belirlenmesi, önerilerin geliştirilmesi ve üzerinde denemelerin yapılabilmesi için gerekli parametrelerle birlikte modelleme yapılmıştır. Model oluşturulurken izlenen adımlar, Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 9. Modelleme süreci

3.4. Kalibrasyon

Simülasyon sonuçlarının doğruluğu, mevcut trafik koşullarını doğru bir şekilde temsil etme yeteneklerine bağlıdır. Ölçülen trafik sayım değerlerinin simülasyondan elde edilen değerlerle uyumluluğu, ancak kalibrasyon ile sağlanabilir. Kalibrasyon, simülasyon sonuçlarının saha koşullarıyla uyumlu olmasını sağlamak amacıyla simülasyon modeli parametrelerinin ayarlanması sürecidir. Simülasyonda kullanılan değerler ve sahada elde edilen sayım verileri, Geoffrey E. Havers istatistiği (GEH) adı verilen ki-kare istatistiğiyle karşılaştırılmalıdır. GEH istatistiği, ulaştırma mühendisliğinde trafik modellemelerinde iki değerin mukayesesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Adını ulaşım plancısı Geoffrey E. Havers'den alan GEH istatistiği, trafik mühendisliğinde sıkça başvurulan ampirik bir formüldür (Koç, 2010).

Model oluşturulduktan sonra, simülasyonun kavşağın gerçek durumunu mümkün olduğunca doğru yansıtabilecek şekilde kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işlemi, yaygın yöntemlerden Denklem (1)'deki GEH istatistiği formülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (1)$$

Denklemden M harfi simülasyonda ölçülen trafik hacmini, C harfi ise sahada yapılan ölçüm değerlerini temsil etmektedir. GEH değeri 0-5 veya 5-10 arasında olmalıdır. Ancak geçerli kural, tüm GEH değerlerinin %80-85'inin 5'in altında olmasıdır (Yiğit, 2019). Hesaplanan GEH değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. GEH istatistiği çıktılarına göre kalibrasyonun sonucunda, tüm aksların istatistiksel değeri 5'in altında çıkmıştır.

Tablo 2. GEH değerleri

Yönler	Model (Taşıt/sa) (M)			Ölçüm (Taşıt/sa) (C)			GEH		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Senaryo									
Aksaray Geliş	920	1388	1854	954	1431	1908	1,1	1,2	1,3
Adana Geliş	472	710	943	425	638	850	2,2	2,8	3,1
Sanayi Geliş	174	245	341	189	284	378	1,1	2,4	2,0

4. Analiz ve Bulgular

Bu çalışmada, araçların geometrik tasarım, sinyalizasyon ve diğer trafik yönetimi faktörleri gibi unsurlar nedeniyle maruz kaldığı gecikmeler ve beklemler dikkate alınarak toplam kavşak geçiş süreleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Gecikme, bir aracın ideal koşullar altında (hiçbir bekleme olmadan) kat etmesi gereken süre ile, gerçekte o aracın kat ettiği süre arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (TRB, 2010). Bu gecikmeler, trafik akışının verimliliğini ve yol kullanıcılarının deneyimini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olup, kavşaklardaki verimli yönetim açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, Highway Capacity Manual (HCM) standartları çerçevesinde tanımlanan gecikme süreleri, kavşağın hizmet seviyesinin belirlenmesinde kullanılan temel kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. HCM kriterlerine göre gecikme süreleri, kavşağın trafik performansını anlamak ve farklı trafik yükleri altında hizmet seviyesini tespit etmek için önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Elde edilen gecikme süreleri, kavşağın trafik kapasitesine, sinyalizasyon stratejilerine ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermekte, bu da kavşağın farklı senaryolarda nasıl performans gösterdiği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda, gecikme sürelerinin analizi, trafik akışını daha verimli hale getirebilmek için potansiyel iyileştirme alanlarının tespit edilmesine yardımcı olmaktadır.

Mevcut trafik sayımları ile yapılan analiz sonucunda, söz konusu kavşak tasarımında ölçülen ortalama gecikme süresi 12,44 saniye olarak belirlenmiş ve bu değer Hizmet Seviyesi (LOS) B olarak sınıflandırılmıştır. Trafik hacminde %50 oranında bir artışın simüle edildiği ikinci senaryoda ise ortalama gecikme süresinin 15,99 saniyeye yükseldiği gözlemlenmiş olup, bu durum da Hizmet Seviyesi B aralığında kalmıştır. Ancak, trafik hacminde %100 oranında bir artışın öngörüldüğü üçüncü senaryoda ortalama gecikme süresi 21,72 saniyeye ulaşmış ve hizmet seviyesi C olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, artan trafik yoğunluğunun gecikme sürelerini kademeli olarak artırdığını ve hizmet seviyesinin belirli bir noktaya kadar istikrarlı bir şekilde sürdüğünü göstermektedir.

Trafik akışındaki bozulmanın bir diğer göstergesi olan seyahat süreleri de analiz edilmiştir. Mevcut trafik koşullarında toplam seyahat süresi 65 saat olarak tespit edilirken, trafik hacimlerinde %50 oranında bir artışın öngörüldüğü senaryoda bu değer 101 saate yükseldiği belirlenmiştir. Trafik hacminde %100 oranında bir artışın simüle edildiği senaryoda ise toplam seyahat süresi 148 saat olarak hesaplanmıştır. Bu durum, gelecekte yapılacak iyileştirmeler ve optimizasyonlarla trafik akışının daha verimli hale getirilebileceğini ve seyahat sürelerinin azaltılabileceğini göstermektedir. Yapılacak iyileştirmeler, trafik yoğunluğunun yönetilmesine ve kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

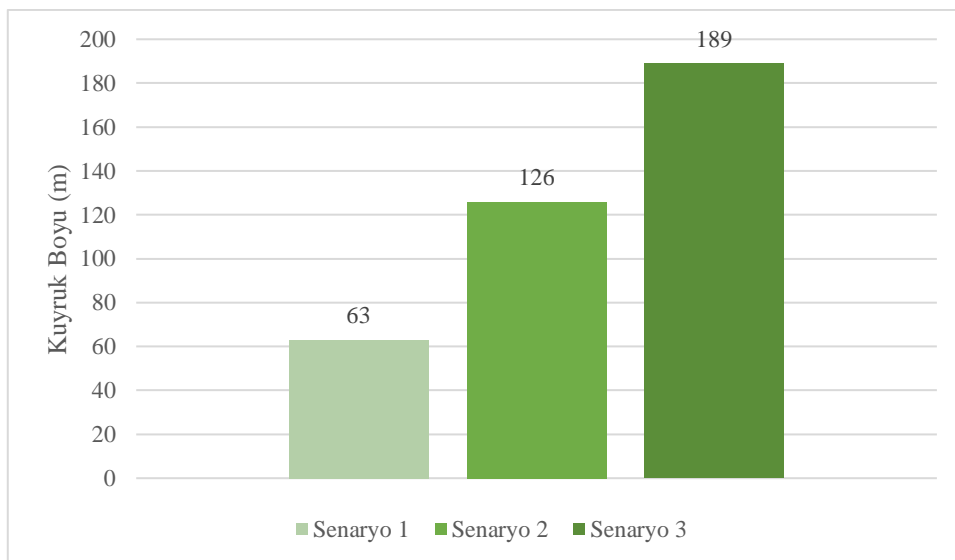
Ortalama hız değerleri, trafik yoğunluğundaki artıştan etkilenmiştir. Mevcut trafik koşullarında (birinci senaryo) ortalama hız 65 km/saat olarak ölçülmüş olup, trafik hacminde %50 artışın olduğu ikinci senaryoda bu değer %5 azalarak 62 km/saat olarak tespit edilmiştir. Trafik hacminde %100 artışın öngörüldüğü üçüncü senaryoda ise %12 oranında azalarak 57 km/saat seviyesine düşmüştür. Elde edilen bulgular, trafik hacminin artmasıyla birlikte ortalama hızlardaki düşüşün, gelecekteki kavşak tasarımları ve trafik yönetimi stratejileriyle daha verimli ve sürdürülebilir bir trafik akışının sağlanması için önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Bu durum, verimliliği artırmak ve trafik akışını iyileştirmek adına yapılan planlamaların daha etkili hale getirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Araçların yakıt tüketim değerleri analiz edilmiş ve trafik hacmindeki artışla birlikte yakıt sarfiyatında da belirgin bir yükseliş olduğu tespit edilmiştir. Mevcut durumda toplam yakıt tüketimi 121 litre olarak hesaplanmış olup, trafik hacminde %50 oranında bir artış yaşandığında bu değer 196 litreye yükselmiştir. Trafik hacmindeki %100'lük artış senaryosunda ise toplam yakıt tüketiminin 308 litreye ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 3). Bu bulgular, artan trafik hacminin enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması gerektiğini ve gelecekteki trafik yönetimi stratejileri ile yakıt tüketiminin daha optimize edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu sonuçlar, daha sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmek ve enerji verimliliğini artırmak adına önemli fırsatlar sunmaktadır.

Tablo 3. Simülasyon sonuçları

Parametre	Birim	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Gecikme Süresi	Saniye	12,44	15,99	21,72
Seyahat Süresi	Saat	65	101	148
Ortalama Hız	Km/h	65	62	57
Yakıt	Litre	121	196	308
Hizmet Seviyesi	HCM	B	B	C

Kavşak performans analizinde maksimum araç kuyruk boylarının, trafik yükündeki artışa paralel olarak belirgin bir yükseliş gösterdiği tespit edilmiştir. Senaryo 1'de (mevcut trafik) en uzun kuyruk 63 metre olarak ölçülmüşken, trafik hacminin %50 arttığı Senaryo 2'de bu değer 126 metreye ulaşmıştır. Trafik hacminde %100'lük bir artışın öngörüldüğü Senaryo 3'te ise maksimum kuyruk boyunun 189 metreye yükseldiği belirlenmiştir (Şekil 10). Bu bulgular, artan trafik yoğunluğunun kavşak kollarındaki araç birikimini artırdığına işaret etmekle birlikte, aynı zamanda bu durumun daha etkin trafik yönetim stratejileri ve iyileştirmeler için fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Özellikle, araç birikimindeki artış, kavşağın kapasitesinin sınırlarını test etmekte ve gelecekteki optimizasyon çalışmalarının öncelikli alanlarını belirlemektedir. Bu sayede, trafik akışını daha verimli hale getirecek çözümler ve tasarım düzenlemeleri için önemli veriler sağlanmaktadır. Önemli bir tasarım özelliği olarak, sola dönecek araçlar için ayrılmış depolama cepleri, ana trafik akışının kesintiye uğramasını etkili bir şekilde önlemektedir. Bu tür özel şeritler, sola dönüş yapacak araçların ana yol üzerinde bekleyerek akışı engellemesini önleyerek, trafik akışının sürekliliğini ve verimliliğini artırmaktadır. Böylece, gecikme sürelerinin azaltılmasına katkı sağlanmakta ve aynı zamanda olası trafik kazalarının önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır.

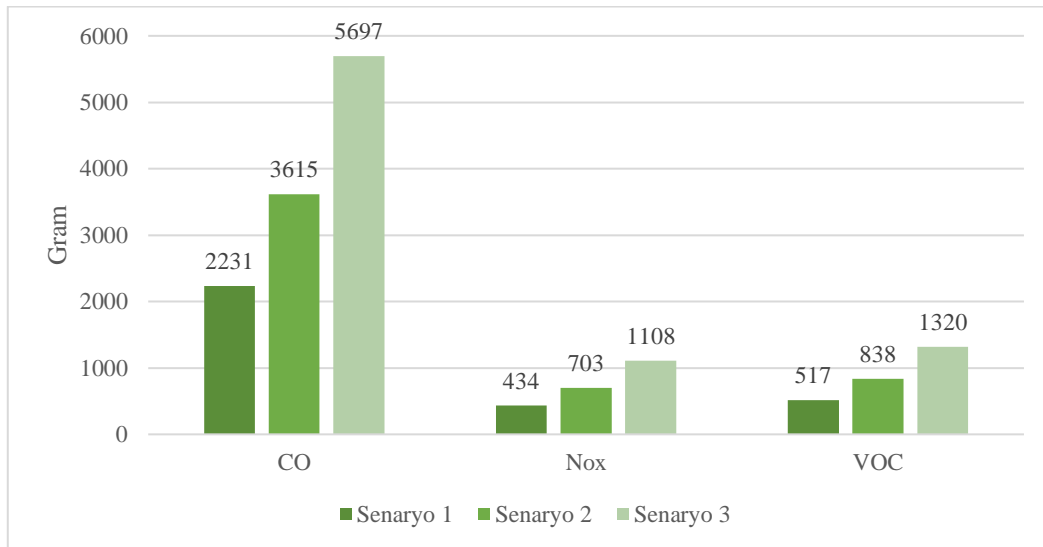
**Şekil 10.** Maksimum kuyruk boyları

Araç başına durma sayısının ölçülerek azaltılması, yakıt tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının en fazla olduğu durma ve kalkış anlarının en aza indirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece, bölgenin olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması sağlanırken, trafik sıkışıklığının ve beklemelerin düşürülmesi ile gürültü kirliliğinin de azaltılması mümkün hale gelmektedir. Bu durum, bölgede yaşayan sakinlerin trafikten kaynaklanan olumsuz etkilerinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019). Bu çalışmada araç başına saniye cinsinden durma gecikmesi ve araç başına durma sayısı incelendiğinde, bu değerler sırasıyla Senaryo 1’de 4,48 saniye ve 0,30, Senaryo 2’de 5,53 saniye ve 0,36, Senaryo 3’te ise 8,82 saniye ve 0,51 olarak tespit edilmiştir. Modelde bulunan araçların toplam durma sayıları ise sırasıyla 474, 861 ve 1699 olarak belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Durma gecikmesi ve sayısı

Parametre	Birim	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Durma Gecikmesi	Saniye	4,48	5,53	8,82
Araç Başına Durma Sayısı	-	0,30	0,36	0,51
Toplam Araç Durma Sayısı	-	474	861	1699

Kavşak tasarımları oluşturulurken, çevresel etkilerin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Taşıt trafiğinin ve gecikmelerin azaltılması ile kavşağın hizmet seviyesinin iyileştirilmesinin yanı sıra, çevre dostu planlamaların hayata geçirilmesiyle doğal çevrenin korunması da sağlanmalıdır. Bu çalışmada, taşıtlardan kaynaklı emisyonlar incelendiğinde, Senaryo 1’de karbon monoksit (CO; Carbon Monoxide), nitrik oksit (NOx; Nitric Oxide) ve uçucu organik bileşikler (VOC; Volatile Organic Compound) emisyon değerleri sırasıyla 2231 g, 434 g ve 517 g olarak tespit edilmiştir. Trafik hacminin %50 artırıldığı Senaryo 2’de ise bu değerler 3615 g, 703 g ve 838 g olarak belirlenmiştir. %100 trafik artışının simüle edildiği Senaryo 3’te ise emisyon miktarları sırasıyla 5697 g, 1108 g ve 1320 g seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 11). Bu bulgular, trafik hacmindeki artışın çevresel etkilerini yönetmenin ve hava kalitesini iyileştirmeye yönelik sürdürülebilir ulaşım çözümleri geliştirmenin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Emisyon değerleri

Maryland eyaletinde gerçekleştirilen bir araştırmada kullanılan CFI kavşak tasarımlarının kaza sıklığı, kaza şiddeti, durma gecikmesi ve kuyruk boylarında azalmalar sağlandığı belirlenmiştir. Bu tasarımın, trafik güvenliğini artırdığı ve sürücülerin tedirginliğini azalttığı ortaya konmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, CFI tasarımlarının ana yol geçişleri ve sola dönüş hareketlerindeki gecikmeleri önemli ölçüde azalttığı, aynı zamanda çakışma noktalarını belirgin bir şekilde iyileştirdiği tespit edilmiştir (Kim vd., 2007). Kavşaklardaki ayrılma, katılma, kesişme ve örülme gibi farklı trafik hareketlerinin gerçekleştiği noktalar, güvenlik açısından kritik alanlar olarak değerlendirilmektedir. Literatürde yapılan araştırmalara göre, geleneksel üç kollu bir kavşakta toplam 9 çakışma bulunduğu tespit edilmiştir (Ordu ve Kırbaş, 2021). Araç etkileşimlerinin yoğunlaştığı bu bölgelerde, çarpışma riski de artmaktadır. Ancak, CFI kavşak tasarımında çakışma noktaları birbirinden uzaklaştırılarak trafik akışının daha düzenli hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bu düzenleme, trafik güvenliğini önemli ölçüde artırmakta ve çakışma risklerini minimize etmektedir. Çakışma noktalarının dağınık bir şekilde konumlanması, sürücüler için daha az tedirgin edici bir sürüş deneyimi sunarken, geleneksel üç kollu kavşaklarda çakışma noktalarının belirli alanlarda yoğunlaşması güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir. CFI modeli, bu sorunu ortadan kaldırarak daha güvenli ve akıcı bir trafik akışı sağlamaktadır (Şekil 12).



Şekil 12. Kavşak kesişme noktaları

5. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, sanayiye girişin daha fazla olduğu sabah zirve saatindeki trafik yoğunluğu dikkate alınarak kavşaklar simülasyon programı ile analiz edilmiştir. Simülasyonda, kavşağın performans kriterlerinden gecikme süresi, toplam seyahat süresi, ortalama hız değeri, yakıt tüketimi, maksimum ve ortalama kuyruk boyu, araç başına durma gecikmesi, araç başına durma sayısı, toplam durma sayısı, CO, NO_x ve VOC emisyon değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, kavşağın performansının değerlendirilmesinde gecikme süresi kullanılarak hizmet seviyesi tespit edilmiş ve geometrik tasarımdan hareketle çakışma noktası analizi gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre;

- Kavşak bölgesindeki sola dönüş talebinin %58 mertebelerinde olduğu tespit edilirken, bölgedeki ağır taşıt hacminin yaklaşık %31 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Ortalama gecikme süresi Senaryo 1’de 12,44, Senaryo 2’de 15,99 ve Senaryo 3’de ise 21,72 saniye olarak tespit edilmiştir.
- HCM kriterleri çerçevesinden bakıldığında Senaryo 1’de 12,44 sn’lik gecikme süresi ile kavşağın hizmet seviyesi B, Senaryo 2’de 15,99 ile B ve Senaryo 3’de 21,72 ile C olarak tespit edilmiştir.
- Trafik hacmindeki artış, toplam seyahat sürelerinde de belirgin bir artışa neden olmaktadır. Mevcut koşullarda toplam seyahat süresi 65 saat olarak ölçülürken, %50 trafik artışında 101 saate, %100 trafik artışında ise 148 saate çıkmıştır.

- Artan trafik yoğunluğu, araçların ortalama hızlarını düşürmektedir. Mevcut durumda 65 km/saat olan ortalama hız, %50 trafik artışında 62 km/saate (%5 düşüş), %100 trafik artışında ise 57 km/saate (%12 düşüş) gerilemiştir
- Senaryo 1’de 121 litre, Senaryo 2’de 196 litre ve Senaryo 3’de 308 litre yakıt tüketimi tespit edilmiştir.
- Senaryo 1’de maksimum kuyruk boyu 63 m iken Senaryo 2’de 126 m, Senaryo 3’de ise 189 m mertebesinde gözlemlenmiştir.
- Araç başına saniye cinsinden durma gecikmesi ve araç başına durma sayısı sırası ile Senaryo 1’de 4,48 sn ve 0,30, Senaryo 2’de 5,53 sn ve 0,36, Senaryo 3’de ise 8,82 sn ve 0,51 olarak tespit edilmiştir. Toplam durma sayısı ise sırası ile 474, 861 ve 1699 olarak tespit edilmiştir.
- CO, NO_x ve VOC gibi zararlı gaz salınımlarının sırası ile Senaryo 1’de 2231 g, 434 g, 5517 g, Senaryo 2’de 3615 g, 703 g, 838 g, Senaryo 3’de ise 5697 g, 1108 g, 1320 g mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Trafik güvenliğini doğrudan etkileyen kavşak bölgesindeki çakışmaların bir birinden uzaklaştırıldığı ve bu sayede sürücü tedirginliklerinin azaltılarak trafik güvenliğinin artırıldığı tespit edilmiştir.

CFI kavşak tasarımı, kavşak kapasitesini artırmak için sağa ve sola dönüşler hareketlerine ilave yollar eklenmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu tasarım, yolların fiziksel olarak ayrılması sayesinde ana yol ile sola dönüşlerin birbirini etkilememesini sağlamaktadır. Ayrıca, kesişim noktalarının uzak mesafelerde yer alması, çakışma olasılıklarını azaltarak kaza riskini önemli ölçüde düşürmektedir. Çalışmada, kavşak bölgesindeki durma sayısının, gecikme süresinin ve trafik akışındaki kesintilerin azaltılmasıyla birlikte, yakıt tüketimi ve zararlı gaz salınımının da önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çevreye verilen zararların azaltılması açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır. Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinin entegrasyonu ile trafik güvenliğinin artırılması, seyahat sürelerinin azaltılması, yol kapasitelerinin ve enerjinin verimli kullanılması gibi hedeflere ulaşılması amaçlanmıştır. Bu sayede, hem çevre dostu bir yaklaşım benimsenmiş hem de taşıma sistemlerinin verimliliği artırılmıştır.

Ülkemizde ilk defa Aksaray’da uygulanan ve yüksek verimlilikle çalışan CFI kavşağı, kısa sürede diğer şehirlerde de uygulanarak geniş bir alanda fayda sağlamıştır. Karabük Kardemir, Bingöl Düzağaç (Gündoğdu), Kütahya Germiyan ve Zafertepe kavşaklarında da bu tasarım başarıyla hayata geçirilmiştir. Bu kavşak tasarımı, dünyada CFI, DLT ve XDL olarak adlandırılmakta olup, ülkemiz literatürüne “Deplase Sola Dönüş Kavşağı (DSD)” adıyla eklenmesi önerilmektedir. Gelecekteki çalışmalar, farklı trafik yönetim stratejilerinin (adaptif sinyalizasyon, dinamik yönlendirme vb.) CFI kavşaklarının performansına olan etkilerini incelemeye yönelik olabilir. Ayrıca, uzun vadeli veri analizleriyle kavşağın operasyonel verimliliği değerlendirilmeli ve alternatif geometrik düzenlemelerle optimizasyon çalışmalarına gidilmelidir. Çevresel etkilerin daha kapsamlı şekilde ele alınabilmesi için hava kalitesi, gürültü kirliliği gibi parametrelerin de detaylı bir şekilde analiz edilmesi önerilmektedir. Bu sayede, kavşak tasarımının çevresel sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi sağlanabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışmada herhangi bir destek alınmamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Aydın, M. M.** (2017). *Şehirçi Kavşaklardaki Geometrik Disiplinsizliğin Optimize Edilerek İrdelenmesi* [Doktora Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi.
- Al-Omari, M.** (2021). *Evaluation of Unconventional Signalized Intersections on Arterial Roads and a Proposition for a Novel Intersection Design*.
- Cakici, Z. , Murat Y. S., Aydın, M. M.** (2022). *Design of an efficient vehicle-actuated signal control logic for signalized intersections*. *Scientia Iranica*, 29(3), 1059-1076. doi: 10.24200/sci.2021.57231.5126
- Dadashzadeh, N.** (2019). *Effects of Bus Priority Methods on Adjacent Mixed Traffic* [Ph.D. Thesis]. Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University.
- Duraku, R., Boshnjaku, D.** (2024). *Enhancing Traffic Sustainability: An Analysis of Isolation Intersection Effectiveness through Fixed Time and Logic Control Design Using VisVAP Algorithm*. *Sustainability*, 16,2930. <https://doi.org/10.3390/su16072930>.
- Guo, Y., Ma, J.** (2016). *An Improved Actuated Signal Control of Intersection Based on VISVAP*. *6th International Conference on Sensor Network and Computer Engineering (ICSNCE 2016)*. Xi'an, China, 8–10 July 2016; Atlantis Press: Dordrecht, TheNetherlands, 2016; pp. 123–128.
- Güler, H.** (2016). *Trafik Simülasyon Teknikleri – 1. Hafta Ders Notları*.
- Karagöz, Ö., & Akalın, K. B.** (2017). Kent içi Trafik Sayımlarında Düşük Maliyetli Kameraların Performansının Araştırılması. *Transist Uluslararası İstanbul Ulaşım Kongresi ve Fuarı*.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2019). *Karayolu Sinyalizasyon Sistemleri*. Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı.
- Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2022). *Karayolu Tasarım El Kitabı*. Etüt, Proje ve Çevre Dairesi Başkanlığı.
- Khliefat, I., Deeb, A., Mubarak, M., & Naser, M.** (2021). The effect of modifying double continuous flow intersections layout geometric features on their operation. *The Open Transportation Journal*, 15(1).
- Kim, M., Chang, G.-L., & Rahwanji, S.** (2007). *Unconventional arterial intersection designs initiatives*. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Seattle*.
- Koç, H.** (2010). *Eşdüzey Kavşaklardan Katlı Kavşaklara Geçiş Örnekleri ve Uygunluklarının Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Koukol, M., Pribyl, O.** (2013). *Design Methodology of a Fuzzy Control System in PTV VISSIM*. *Transactions on Transport Sciences*. 6, 4. DOI: 10.2478/v10158-012-0045-9.
- Mitkas, D., Politis, I.** (2020). *Evaluation of alternative Ramp Metering scenarios on freeway on-ramp with the use of microscopic simulation software Vissim*. *AIIT 2nd International Congress on Transport Infrastructure and Systems in a Changing World (TIS ROMA 2019)*, 23rd-24th September 2019, Rome, Italy.
- North Dakota Department of Transportation (NDDOT).** (2023). *NDDOT Programming Division Traffic Operations Section, Traffic Operations Manual*.
- Ordu, H., Kırbaş, U.** (2021). *Dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımlara bir çözüm önerisi olarak kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar: Bir literatür araştırması*. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 10(2), 674-683.

Pandza, H., Ivanjko, E., Vujic, M. (2015). *A Vissim Based Framework for Simulation of Cooperative Ramp Metering*. In *Proceedings of the International Scientific Conference ZIRP 2015: Cooperation Model of the Scientific and Educational Institutions and the Economy*, Zagreb, Croatia, 12 May 2015; pp. 151–162.

PTV Group. (2024, Mayıs 14). *Multimodal Traffic Simulation Software*. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>.

Qi, Y., Zhao, Q., Liu, S., & Azimi, M. (2020). *Signal Timing Strategy for Displaced Left Turn Intersections*. University of North Carolina at Charlotte.

Sesli, G. (2017). *Kent İçi Kavşak Tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019). *Akıllı Şehir Rehberlik Uygulamaları Projesi-Ulaşımında Sanal İkiz ve Simülasyonu Uygulaması*. Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü.

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2024, Haziran 8). *Aksaray İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü*. <https://aksaray.ktb.gov.tr/#>.

T.C. Resmî Gazete. (1983). 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu. *Resmî Gazete*. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.2918.pdf>

Transportation Research Board (TRB). (2010). *Chapter 18 Signalized Intersections*. *HCM2010 Highway Capacity Manual* (pp. 18-6).

Usta, D. (2023). *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Çevreye Etkisi:Kavşak Çalışması* [Yüksek Lisans Tezi]. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi.

U.S. DOT Federal Highway Administration (FHWA). (2010). *Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report (AIIR)*.

U.S. DOT Federal Highway Administration (FHWA). (2014). *Displaced Left Turn Intersection, Informational Guide (C.3)*.

Yaman, T. (2024). *Farklı Trafik Uyarmalı Sinyalize Kavşakların Performanslarının Karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.

Yaman, N., & Kaman, F. (1979). *Orta Dereceli Endüstriyel Teknik Öğretim Okulları Yol Bilgisi Temel Ders Kitabı*. Milli Eğitim Basımevi.

Yayla, N. (2015). *Karayolu Mühendisliği*. Birsen Basımevi. Birsen Basımevi.

Yılmaz, H. (2024). *Yenilikçi Sinyalize Kavşak Tasarımlarının Araştırılması ve Mikro Simülasyon İle Analiz Edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

Yiğit, H. İ. (2019). *Koordine Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modellemesi: Ulus Bulvarı Örneği, Denizli* [Yüksek Lisans Tezi]. T.C. İstanbul Ticaret Üniversitesi.

Url-1 <<https://mix106radio.com/continuous-flow-intersection-on-eagle-road-canceled>>, erişim tarihi 13.05.2024.

Araştırma Makalesi

Akıllı kent donatılarının ulaşım sistemlerindeki rolü ve etkileri

Rukiye Gizem ÖZTAŞ KARLI*

¹Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye

*Correspondence: roztaş@bartin.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1559067

Özet: Akıllı kent donatılarının kentsel alanlarda yaygın olarak kullanıldığı alanlar arasında ulaşım sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Akıllı kent donatısı, geleneksel kent donatılarının dijitalleşme ve teknolojik entegrasyon yoluyla geliştirilmiş halidir. Bu donatılar; akıllı bank, akıllı kiosk, akıllı çöp kutusu, akıllı park, akıllı çeşme, akıllı otobüs durağı, akıllı trafik lambası ve akıllı sokak aydınlatması olmak üzere geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu çalışma, akıllı kent donatılarının şehirlerdeki ulaşım sistemlerine sağladığı katkıları, bu donatıların etkin kullanımı ve karşılaşılan zorlukları kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, literatür taraması ve uzmanlarla yapılan yarı yapılandırılmış görüşmeler sonucu elde edilen veriler tematik analiz yöntemiyle incelenmiştir. Bulgular, akıllı kent donatılarının trafik yönetimi, toplu taşıma hizmetleri, yaya güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi alanlarda önemli faydalar sağladığını göstermektedir. Ancak veri güvenliği, yüksek kurulum maliyetleri ve teknolojik uyumluluk gibi zorluklar da bulunmaktadır. Çalışma, akıllı kent donatılarının şehirlerde daha etkin ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturulmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma akıllı kent donatılarının pratikte nasıl daha etkin kullanılabileceğine dair öneriler sunmaktadır. Gelecek araştırmaların, kullanıcı deneyimi ve politik-yasal engellerin aşılması gibi konulara odaklanması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, akıllı kent donatısı, tematik analiz

The role and impact of smart urban infrastructure in transportation systems

Abstract: Smart urban infrastructure plays a significant role in urban transportation systems. It refers to the enhancement of traditional urban facilities through digitalization and technological integration. These infrastructures encompass a wide range of elements, including smart benches, smart kiosks, smart waste bins, smart parks, smart fountains, smart bus stops, smart traffic lights, and smart street lighting. This study comprehensively examines the contributions of smart urban infrastructure to urban transportation systems, their effective utilization, and the challenges encountered. The study employs a thematic analysis method, analyzing data obtained from a literature review and semi-structured interviews with experts. The findings indicate that smart urban infrastructure provides substantial benefits in areas such as traffic management, public transportation services, pedestrian safety, and environmental sustainability. However, challenges such as data security, high installation costs, and technological compatibility remain. The study demonstrates that smart urban infrastructure plays a vital role in fostering more efficient and sustainable urban transportation systems. Finally, the study offers recommendations on how these infrastructures can be more effectively utilized in practice. Future studies should focus on user experience and strategies to overcome political and legal obstacles.

Keywords: Intelligent transportation systems, smart urban infrastructure, thematic analysis

1. Giriş

Günümüz şehirlerinin karşılaştığı en büyük zorluklardan biri, hızla artan nüfus ve kentleşmenin getirdiği karmaşık ulaşım ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bu bağlamda, şehirlerin ulaşım sistemlerini daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir hale getirme amacıyla dijitalleşme ve teknoloji alanında önemli adımlar atılmaktadır. Akıllı kent kavramı, bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) kent yaşamına entegrasyonu ile bu sorunlara çözümler üretmeyi hedeflemektedir (Aithal, 2022; Şenyıl ve Büyükaşın, 2021).

Akıllı kentler, teknolojik yeniliklerin kentsel alanların planlanması, işletilmesi ve yönetilmesi süreçlerine entegre edildiği, sürdürülebilir kalkınma ve yüksek yaşam kalitesi hedeflerine ulaşmayı amaçlayan modern şehircilik anlayışını temsil etmektedir (Cavlak, 2022). Bu kentler, BİT'leri kullanarak enerji kullanımını optimize etmekte, kent içi hareketliliği düzenlemekte, kamu hizmetlerini iyileştirmekte ve çevresel ayak izini azaltmaktadır (D'Amico vd., 2021; Gabrys, 2022). Böylece, nüfusun yoğun olduğu alanlarda yaşam kalitesini artırarak ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliği desteklemektedir. Akıllı ulaşım sistemleri (AUS), akıllı kent kavramının temel bileşenlerinden biridir. Bu sistemler, geniş çapta veri toplama, işleme ve analiz yetenekleri sayesinde trafik akışını izlemek, yönetmek ve optimize etmek için tasarlanmıştır (Lin vd., 2017; Sussman, 2005). Gerçek zamanlı trafik verisi, yol durumu ve hava koşulları gibi değişkenleri analiz ederek, trafik sıkışıklığını azaltmak, acil durum yönetimini iyileştirmek ve yol güvenliğini artırmak için kullanılmaktadır (Malik vd., 2018; Torbaghan vd., 2022). AUS, ayrıca halka açık taşıma araçlarının takibini sağlayarak yolculara gerçek zamanlı bilgi sunmakta ve kentsel mobilitiyi daha verimli ve kullanıcı odaklı hale getirmektedir (Öztaş Karlı ve Çelikyay, 2022).

Bu kapsamlı sistemlerin uygulanmasında kilit rol oynayan akıllı kent donatıları ise teknoloji ile güçlendirilmiş altyapı öğeleridir. Örneğin, gerçek zamanlı trafik yönetimi sağlayan akıllı trafik ışıkları, seyahat sürelerini kısaltır ve yakıt tüketimini azaltırken, nesnelerin interneti (IoT) destekli otobüs durakları ve bilgilendirme kioskları, yolculara sefer saatleri ve durak bilgileri gibi önemli verileri sağlamaktadır. Bu donatılar, akıllı ulaşımın somut yansımalarını oluşturmaktadır (Hırçın ve Demir, 2023). Ayrıca bu donatılar enerji verimliliği sağlamak, olumsuz çevresel etkileri azaltmakta ve kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir (Hırçın ve Demir, 2023; Najafi, 2018). Bu sayede, kent içi ulaşım ağlarını daha etkin yönetmeye yardımcı olmakta ve vatandaşların günlük yaşam kalitesini artırmaktadır.

Bu çalışmanın önemi, akıllı kent donatılarının şehirlerdeki ulaşım sistemlerine sağladığı katkıları ve bu donatıların etkin kullanımını değerlendirmesinde yatmaktadır. Akıllı kent donatılarının, ulaşım sistemlerinde verimlilik, güvenlik ve sürdürülebilirlik sağlama potansiyeli yüksek olmasına rağmen, bu teknolojilerin pratikteki etkileri ve karşılaşılan zorluklar hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı, ulaşım sistemlerinde kullanılan akıllı kent donatılarının rolünü ortaya koymak, sağlanan faydaları ve karşılaşılan zorlukları inceleyerek, bu donatıların gelecekteki potansiyelini değerlendirmektir. Bu bağlamda çalışmada nitel yöntem kullanılmıştır.

Araştırma süreci, kapsamlı bir literatür taraması ve uzmanlarla gerçekleştirilen yarı yapılandırılmış görüşmelerle desteklenmiş, elde edilen bulgular tematik analiz ile derinlemesine incelenmiştir. Bu metodolojik yaklaşım, donatıların etkinliklerini ve karşılaşılan zorlukları sistematik bir biçimde ortaya koymak için kullanılmıştır. Böylece, akıllı kent donatılarının ulaşım altyapısına olan katkıları detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu alandaki bilgi boşluğunun doldurulmasına katkı sağlanmıştır. Çalışma, akıllı kent donatılarının pratikte nasıl daha etkin kullanılabilirliğine dair öneriler sunarak, planıcılar ve politika yapıcıları için önemli bir kaynak oluşturmayı hedeflemektedir.

2. Akıllı kent donatıları

Kent donatısı, şehirdeki kamusal alanlarda insanların çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak, sosyal ve ekonomik etkileşimleri kolaylaştırmak amacıyla kurulan altyapı ve ekipmanlardan oluşmaktadır (Aksu, 2012; Hacıhasanoğlu, 1991). Sokak lambaları, otobüs durakları, bisiklet yolları ve otoparklar gibi yapılar bu kategoriye girmektedir. Bu donatılar, yalnızca fiziksel altyapıyı değil, aynı zamanda toplumsal yaşam kalitesini de iyileştirmeyi hedeflemektedir (Demir, 2018). Yerel yönetimler tarafından titizlikle planlanıp kurulan bu altyapılar, hem bireysel kullanıcıların günlük yaşamlarını kolaylaştırmakta hem de genel olarak şehirlerin işleyişini optimize etmektedir (Najafi, 2018). Ayrıca, bu donatılar kentsel alanlara estetik değer katarak, kent dokusunu zenginleştirmekte ve sürdürülebilir

bir yaşam ortamı oluşturmaktadır (Main ve Hannah, 2010). Bu şekilde, kent donatıları şehirlerin hem fonksiyonel hem de sosyal boyutlarını geliştirmektedir.

Akıllı kent donatısı ise geleneksel kent donatılarının dijitalleşme ve teknolojik entegrasyon yoluyla geliştirilmiş halidir. Bu donatılar, sensörler, ağlar, veri analiz sistemleri ve otomasyon teknolojileri gibi ileri teknolojilerle donatılmıştır (Ermiş ve Karatekin, 2019; Najafi, 2018). Bu sayede, kentteki insan hareketliliği, enerji tüketimi ve çevresel veriler gibi bilgileri toplayarak analiz etmektedir. Örneğin, akıllı trafik lambaları gerçek zamanlı trafik verilerini toplarken (Rizwan vd., 2016), akıllı otobüs durakları yolcu hareketliliğini izlemektedir (Yue vd., 2017). Toplanan bu bilgiler, büyük veri analitiği ve yapay zekâ algoritmaları kullanılarak işlenmekte ve yorumlanmaktadır (Rizwan vd., 2016). Sonuç olarak, kent yönetimine dair karar alma süreçleri daha etkili ve verimli hale gelmektedir. Bu teknolojik donatılar, trafik yönetiminden enerji tasarrufuna, kamu güvenliğinden çevresel sürdürülebilirliğe kadar birçok alanda önemli iyileştirmeler sağlamaktadır (Hırçın ve Demir, 2023). Böylelikle, akıllı kent donatıları, şehirlerin daha yaşanabilir, sürdürülebilir ve verimli hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Akıllı kent donatıları; akıllı bank, akıllı kiosk, akıllı çöp kutusu, akıllı park, akıllı çeşme, akıllı otobüs durağı, akıllı trafik lambası ve akıllı sokak aydınlatması olmak üzere geniş bir yelpazeye sahiptir (Demir, 2018; Ermiş ve Karatekin, 2019). Akıllı kent donatıları verimlilik artışı, çevresel sürdürülebilirlik, güvenlik ve güvenilirlik gibi çeşitli alanlarda fayda sunmaktadır. Bu donatılar trafik akışı (Akıllı Şehirler, 2024), otopark yönetimi (Ulaşım Yönetim Merkezi, 2017) ve toplu taşıma sistemlerinin daha etkin (Oemkiosks, 2022) bir şekilde kullanılmasını sağlayarak verimliliği artırmaktadır. Diğer yandan karbon salınımını azaltan ve sürdürülebilir ulaşım modlarını destekleyen çözümler sunarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Baksi, 2024; Bizero, 2024). Aynı zamanda donatılarda yenilenebilir enerjinin kullanımı ve enerji tüketiminin optimize edilmesiyle de enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020). Ayrıca güvenlik kameraları, acil durum sensörleri gibi donatılar ile şehirde güvenliği artırmaktadır (Hırçın ve Demir, 2023). Akıllı kent donatıları ile vatandaşlar bilgiye kolayca erişebilmekte ve ulaşım deneyimlerini geliştirecek hizmetlere sahip olmaktadır (Soofa, 2024).

Bu faydaların yanında, akıllı kent donatıları çeşitli zorluklarla da karşı karşıyadır. Veri güvenliği ve gizlilik, bu donatıların topladığı geniş çaplı verilerin korunması ve yetkisiz erişimlerin önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir (Braun vd., 2018; Zhang vd., 2017). Ayrıca, bu donatıların kurulumu ve bakımı için gereken yüksek maliyetler önemli bir engel teşkil etmektedir (Razmjoo vd., 202). Uyum ve entegrasyon sorunları, mevcut altyapılarla yeni teknolojilerin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için gereken teknik ve operasyonel zorlukları içermektedir (Bakıcı vd., 2013; Gilrein vd. 2021). Erişim eşitsizliği ise akıllı kent teknolojilerinin tüm vatandaşlar tarafından eşit şekilde kullanılabilmesi ve faydalanılabilmesi konusunda karşılaşılan bir başka önemli zorluktur (Öztaş Karlı vd., 2023). Bu zorluklar, akıllı kent donatılarının tam potansiyelini gerçekleştirmesini engelleyebilir ve bu nedenle bu sorunların çözülmesi için stratejik planlamalar yapılması gerekmektedir.

Akıllı kent donatılarının kentsel alanlarda yaygın olarak kullanıldığı alanlar arasında ulaşım sistemleri önemli bir yer tutmaktadır. Ulaşım sistemlerinde akıllı kent donatılarının kullanımı, kent sakinlerine daha güvenli, konforlu ve verimli bir ulaşım deneyimi sunmanın (Gohar ve Nencioni, 2021) yanı sıra şehir yönetimlerine de operasyonel verimlilik ve karar verme süreçlerinde destek sağlamaktadır (Kumar vd., 2020). Tablo 1’de, ulaşım sistemlerinde kullanılan akıllı kent donatı türleri detaylı bir şekilde yer almaktadır. Bu donatılar, şehirlerin ulaşım ağlarını daha akıllı ve entegre hale getirerek, hem kullanıcı deneyimini hem de yönetim süreçlerini iyileştirmektedir.

Tablo 1. Ulaşım sistemlerinde kullanılan akıllı kent donatı türleri

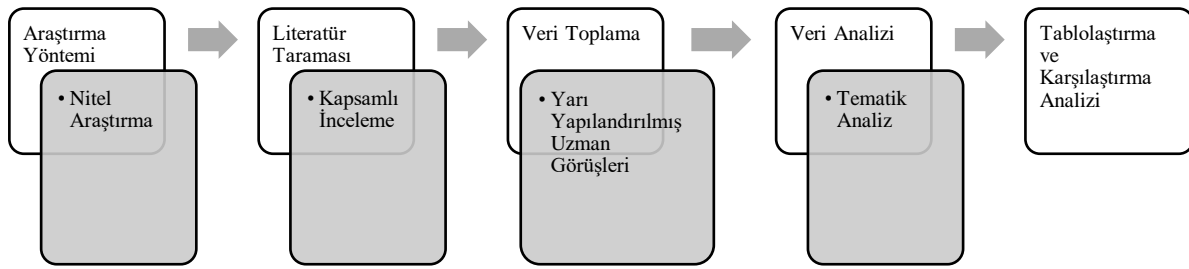
Akıllı Kent Donatı Türü	Açıklama
Akıllı Otobüs Durakları	Yolculara toplu taşıma hakkında anlık bilgi veren ve otobüs hareketlerini dijital ekranlarla gösteren duraklar.
Akıllı Trafik Lambaları	Trafik akışını optimize eden ve acil durum araçlarına öncelik veren adaptif trafik kontrol sistemleri.
Akıllı Yol Çizgileri	Trafik yoğunluğu ve hava koşullarına göre renk ve parlaklık değiştiren, sürücülere daha güvenli bir yol deneyimi sağlayan çizgiler.
Paylaşımlı Mobilite Donatıları	E-scooter, bisiklet paylaşım sistemleri ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi sürdürülebilir mobilite çözümleri.

Tablo 1. Ulaşım sistemlerinde kullanılan akıllı kent donatı türleri (devamı)

Akıllı Kent Donatı Türü	Açıklama
Akıllı Yaya Geçitleri	Yaya hareketlerini algılayan ve trafikte yaya geçiş önceliği sağlamak için aydınlatma veya sesli uyarı veren sistemler.
Akıllı Bisiklet Yolları	Enerji üretebilen veya ışık yayan malzemelerle kaplı, güvenli bisiklet rotalarını destekleyen yollar.
Otonom Araç Altyapısı	Otonom araçlar için geliştirilmiş, araçlar arasında veri paylaşımını kolaylaştıran altyapı sistemleri.
Dijital Bilgilendirme Panoları	Şehirdeki etkinlikler, acil durumlar ve toplu taşıma bilgileri gibi önemli verileri vatandaşlara sunan dijital ekranlar.
Akıllı Otopark Sistemleri	Boş park yerlerini tespit edip sürücülere yönlendiren ve ücretlendirmeyi optimize eden sistemler.
Akıllı Kiosk Kabini	Bilgi sağlama, bilet satışı, kart dolumu, turizm bilgisi, dijital ödeme gibi hizmetleri sunan dokunmatik ekranlı kabinler.

3. Yöntem

Bu çalışmada, ulaşım sistemlerindeki akıllı kent donatılarının rolünü ve etkinliğini anlamak için nitel bir analiz yapılmıştır. Araştırma süreci, her bir akıllı kent donatısının özelliklerini, faydalarını, zorluklarını ve kullanım önerilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymak amacıyla şu adımlarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 1):

**Şekil 1.** Araştırma süreci

Literatür Taraması

İlk olarak, kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu süreçte, dünyadan ve Türkiye’den örnekler incelenmiş ve akıllı kent donatılarının farklı şehirlerdeki uygulamaları üzerine yazılmış, makaleler, raporlar ve web sayfaları değerlendirilmiştir. Literatür taraması, araştırmanın teorik temellerini oluşturmuş ve mevcut bilgi birikimi hakkında genel bir çerçeve sunmuştur.

Uzman Görüşmeleri

Literatür taramasının ardından, beş uzman ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Görüşmelerde uzmanlara, akıllı kent donatılarının önemi, kullanım alanları, avantajları, zorlukları ve gelecekteki uygulama potansiyeli hakkında sorular sorulmuştur. Uzmanlar, farklı disiplinlerden (peyzaj mimarlığı, şehir planlama, ulaşım mühendisliği, sosyal bilimler, çevre bilimleri) alanında en az 10 yıl deneyime sahip kişilerden seçilmiştir. Görüşmeler, ortalama 45 dakika sürmüş ve ses kaydı alınarak daha sonra transkript edilmiştir.

Tematik Analiz

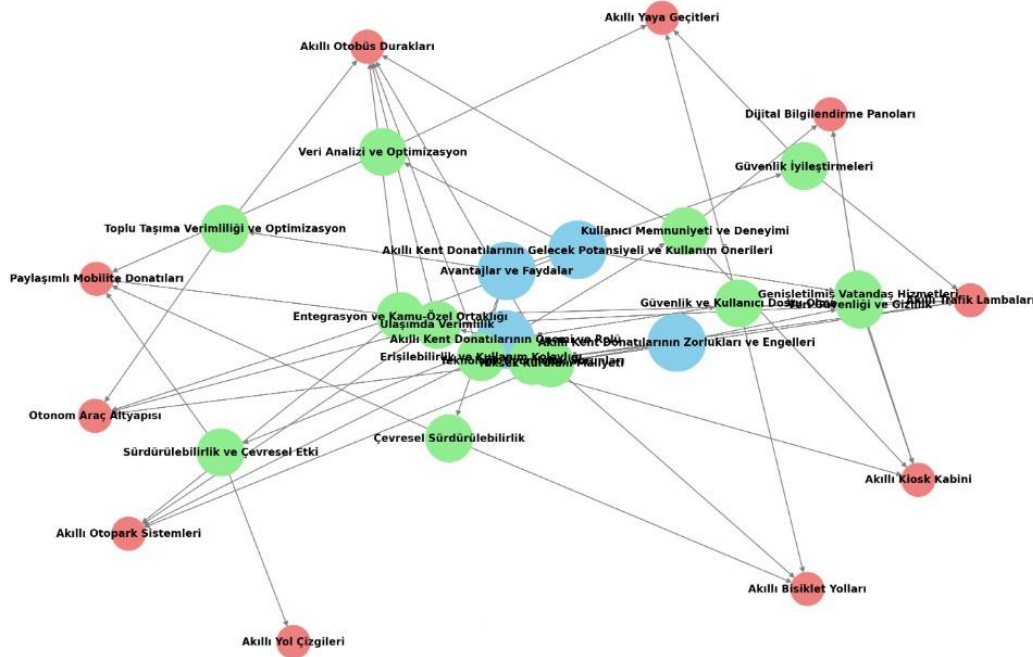
Uzman görüşmeleri sonucunda elde edilen veriler, tematik analiz yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu süreçte, veriler kodlanmış ve ana temalar ile alt temalar belirlenmiştir. Kodlama sürecinde, her bir veri parçası dikkatlice incelenmiş ve ilgili temalar altında gruplandırılmıştır. Bu yöntem, donatıların etkinliklerini ve karşılaşılan zorlukları sistematik bir biçimde ortaya koymak için kullanılmıştır.

Tablolaştırma ve Karşılaştırma Analizi

Son olarak, her bir akıllı kent donatısının özelliklerini, faydalarını ve zorluklarını sistematik bir şekilde karşılaştırmak için tablolar oluşturulmuş ve karşılaştırma analizi yapılmıştır. Bu analiz, donatıların birbirleriyle kıyaslanmasını ve hangilerinin daha etkili olduğunu belirlemeye yardımcı olmuştur.

4. Bulgular

Tematik analiz sonucunda çalışmada dört ana tema ve on dört alt tema ortaya çıkmıştır. Ana temaları (mavi), alt temaları (yeşil) ve akıllı donatı türlerini (kırmızı) gösteren tematik harita Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Akıllı kent donatılarının tematik analizi

4.1. Uzman görüşleri ve tematik analiz

Tema 1: Akıllı kent donatılarının önemi ve kullanım alanları

Alt Tema 1: Ulaşımında verimlilik

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının kent içi ulaşım sistemlerindeki etkinliği artırma potansiyelini içermektedir. Uzmanlar, bu donatıların trafik akışını nasıl optimize ettiği ve ulaşım süreçlerini nasıl iyileştirdiği konusunda değerlendirmelerde bulunmuştur.

Uzman 4: "Akıllı otobüs durakları, toplu taşıma sistemlerinin daha etkin kullanımını teşvik eder."

Uzman 1: "Akıllı trafik lambaları, trafik akışını düzenleyerek şehir içi hareketliliği büyük ölçüde iyileştirir."

Uzman 3: "Trafik lambalarının trafik yoğunluğuna duyarlı olarak ayarlanması, trafiği daha akıcı hale getirir ve emisyonları azaltır."

Uzman 2: "Otonom araç altyapısı, şehirlerde navigasyon ve güvenlik açısından devrim yaratma potansiyeline sahiptir."

Uzman 1: "Otonom araç altyapısı, trafik akışını optimize ederek, yolculuk sürelerini kısaltır ve enerji verimliliğini artırır."

Uzman 2: "Akıllı otopark sistemleri, şehirlerdeki park yeri arayış süresini azaltarak, trafikte geçirilen zamanı önemli ölçüde düşürür. Bu da, özellikle işlek metropol bölgelerinde büyük bir kolaylık sağlar."

Uzman 1: "Akıllı otopark sistemleri, şehir merkezlerinde araç yoğunluğunu azaltarak ve sürücülere boş park yerlerini hızlıca göstererek, trafik akışını düzenlemekte büyük bir rol oynar. Bu sistemler, özellikle yoğun saatlerde ve alışveriş merkezleri gibi kalabalık bölgelerde kullanım kolaylığı sağlar."

Alt Tema 2: Güvenlik ve kullanıcı dostu olma

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının yaya ve bisikletçi güvenliğini nasıl artırdığını ve kullanıcı dostu özellikler sağladığını ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların güvenlik artırıcı yönlerine ve kullanıcı deneyimini nasıl iyileştirdiklerine dair görüşlerini paylaşmıştır.

Uzman 5: "*Akıllı yaya geçitleri, yaya güvenliğini artırarak kazaların önlenmesine yardımcı olur.*"

Uzman 4: "*Akıllı yaya geçitleri, yaya ve sürücü arasında daha iyi bir iletişim sağlayarak kaza oranlarını düşürür.*"

Uzman 2: "*Akıllı bisiklet yolları, bisiklet kullanımını teşvik ederek, trafik sıkışıklığını ve hava kirliliğini azaltmaya yardımcı olur.*"

Uzman 5: "*Güvenli ve aydınlatılmış bisiklet yolları, gece bile bisiklet kullanımını teşvik ederek, şehir içi hareketliliği destekler.*"

Uzman 4: "*Şehir planlamasında bisiklet yollarının akıllı hale getirilmesi, bisiklet kullanımının güvenliğini ve çekiciliğini artırır.*"

Alt Tema 3: Sürdürülebilirlik ve çevresel etki

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini içermektedir. Uzmanlar, bu donatıların çevre üzerinde nasıl olumlu etkiler yaratabileceğini tartışmıştır.

Uzman 3: "*Paylaşımlı mobilite donatıları, şehir içi karbon ayak izini azaltır ve sürdürülebilir ulaşım alternatifleri sunar.*"

Uzman 2: "*Paylaşımlı mobilite donatıları, şehir içi araç kullanımını azaltarak trafiği ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürmeye yardımcı olur. Bu sistemler, kullanıcıların araç sahipliğine olan bağımlılığını azaltır ve daha yeşil, daha sürdürülebilir ulaşım seçeneklerine geçişi teşvik eder.*"

Uzman 1: "*Akıllı yol çizgileri, sürücü güvenliğini artırarak, özellikle zor hava şartlarında ve gece sürüşlerinde yolları daha güvenli hale getirir.*"

Uzman 5: "*Akıllı yol çizgileri, yol güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda trafik akışını optimize ederek yakıt tüketimini azaltır. Dinamik yönlendirme özellikleri sayesinde, trafik yoğunluğuna bağlı olarak yolların kullanımını efektif bir şekilde yönetebilir ve böylece emisyon azaltımına katkıda bulunur.*"

Alt Tema 4: Kullanıcı memnuniyeti ve deneyimi

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının kullanıcı deneyimini nasıl iyileştirdiğini ve memnuniyeti nasıl artırdığını ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların kullanıcılar arasında nasıl pozitif bir algı yarattığını değerlendirmiştir.

Uzman 2: "*Akıllı otobüs durakları, yolcu bilgilendirme sistemleriyle donatılarak, kullanıcı deneyimini artırır ve toplu taşıma kullanımını teşvik eder.*"

Uzman 3: "*Bu teknoloji, trafik yönetiminde büyük bir yenilik sağlayarak, sürüş deneyimini optimize eder.*"

Uzman 5: "*Şehirdeki dijital bilgilendirme panoları, hem yerel halk hem de turistler için anlık bilgi kaynağı olarak hizmet eder, böylece şehir içi navigasyonu kolaylaştırır.*"

Uzman 2: "*Acil durum ve kamu duyurularını yayma konusunda bu panolar, hayati bir rol oynar.*"

Uzman 4: "*Akıllı kiosk kabinleri, çok fonksiyonlu hizmet noktaları olarak, şehir içinde bilgi erişimini ve çeşitli hizmetleri sunar.*"

Uzman 1: "*Bu kabinler, kentsel altyapıyı dijitalleştirerek, vatandaşların yaşam kalitesini yükseltir.*"

Tema 2: Avantajlar ve faydalar

Alt Tema 1: Güvenlik iyileştirmeleri

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının güvenlik üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamaktadır. Uzmanlar, özellikle yaya geçitleri ve trafik lambaları gibi donatıların güvenliği nasıl artırdığını değerlendirmiştir.

Uzman 1: "*Akıllı yaya geçitleri, özellikle trafik yoğunluğu olan saatlerde yaya güvenliğini maksimize eder.*"

Uzman 5: "*Akıllı yaya geçitleri, hareket algılama teknolojisi ve aydınlatma sistemleri ile donatılmıştır, bu sayede yayaların güvenli bir şekilde yolları geçmelerini sağlar. Geçitler, yoğun trafikte bile yayaların güvenliğini maksimize ederek, yaya kazalarını önemli ölçüde azaltabilir.*"

Uzman 4: "*Akıllı trafik lambaları, trafik akışını gerçek zamanlı olarak analiz ederek uyum sağlar. Bu özellik, özellikle yoğun saatlerde ve kritik kavşaklarda kazaları önlemeye yardımcı olur ve genel yollardaki güvenliğini artırır. Ayrıca, acil durum araçlarına öncelik verme yeteneği, yanıt sürelerini iyileştirerek hayat kurtarabilir.*"

Uzman 2: "*Bu lambalar, sürücülerin hızını ve yaklaşma açısını algılayarak anlık uyarılarla sürücülerini bilgilendirir ve kavşaklarda çarpışma riskini azaltır.*"

Uzman 3: "*Akıllı trafik lambaları, yayaların geçişi sırasında daha uzun süre yeşil ışık sağlayarak yayaların güvenli bir şekilde geçmesini sağlar ve böylece özellikle yaşlı ve engelli bireylerin güvenliğini artırır.*"

Alt Tema 2: Erişilebilirlik ve kullanım kolaylığı

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının kullanıcılar için erişilebilirlik ve kullanım kolaylığını nasıl artırdığını ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların günlük yaşamda sağladığı kolaylıkları tartışmıştır.

Uzman 2: "*Akıllı otobüs durakları, gerçek zamanlı bilgi sağlayarak insanların bekleme sürelerini azaltır ve memnuniyetlerini artırır.*"

Uzman 5: "*Akıllı otobüs durakları, entegre Wi-Fi hizmeti ve şarj istasyonları gibi özellikler sunarak yolcuların bekleme süresini daha verimli geçirmelerini sağlar.*"

Uzman 4: "*Bu duraklar, sesli anons sistemleri ile görme engelli bireylerin de toplu taşıma araçlarını rahatça kullanabilmelerine imkân tanır.*"

Uzman 3: "*Akıllı otopark sistemleri, zaman ve yakıt tasarrufu sağlayarak çevresel etkiyi azaltır. Ayrıca, stresi azaltarak sürücü memnuniyetini artırır ve şehir içi hava kalitesine katkıda bulunur.*"

Uzman 1: "*Akıllı otopark sistemleri, dijital ödeme seçenekleri ve rezervasyon hizmetleri sunarak kullanıcıların park yeri bulma ve ödeme işlemlerini hızlı ve sorunsuz bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlar.*"

Uzman 2: "*Bu sistemler, park yerlerinin doluluk durumunu anlık olarak izleyip bildiren sensörlerle donatılmıştır, böylece sürücüler park yeri bulma stresi yaşamadan doğrudan boş alanlara yönlendirilebilir.*"

Uzman 4: "*Wi-Fi erişimi ve şehir rehberi hizmetleri ile kiosk kabinleri, halka açık alanlarda bilgi merkezi işlevi görür.*"

Uzman 3: "*Akıllı kiosk kabinleri, vatandaşlara turistik bilgiler, toplu taşıma güzergahları ve acil durum bilgileri gibi önemli verileri sunarak, şehirdeki bilgiye erişim sürecini kolaylaştırır.*"

Alt Tema 3: Çevresel sürdürülebilirlik

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini içermektedir. Uzmanlar, bu donatıların çevre üzerinde nasıl olumlu etkiler yaratabileceğini tartışmıştır.

Uzman 5: "*Paylaşımli mobilite donatıları, bireysel araç kullanımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliği destekler.*"

Uzman 1: *"Bu donatılar, elektrikli araçların ve e-scooter'ların kullanımını teşvik ederek fosil yakıt kullanımını azaltır ve hava kalitesini iyileştirir."*

Uzman 4: *"Paylaşımlı mobilite sistemleri, toplu taşıma ile entegre edilerek, insanların özel araçlarına olan bağımlılığını azaltır ve böylece trafik sıkışıklığını ve emisyonları önemli ölçüde azaltır."*

Uzman 2: *"Akıllı bisiklet yolları, güneş enerjisi ile çalışan aydınlatma sistemleri ve akıllı sensörler ile donatılarak enerji tasarrufu sağlar ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunur."*

Uzman 3: *"Akıllı bisiklet yolları, sürdürülebilir şehir ulaşımını destekleyerek çevresel ayak izini azaltır. Entegre aydınlatma ve trafik yönetim sistemleri sayesinde, bu yollar bisiklet kullanımını daha güvenli ve cazip hale getirir, böylece daha fazla insanın araç yerine bisiklet kullanmasını teşvik eder. Bu da, şehirlerdeki hava kirliliğini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir."*

Uzman 5: *"Akıllı bisiklet yolları, kullanıcılara güvenli ve rahat bir sürüş deneyimi sunarak bisikletin tercih edilen bir ulaşım aracı olmasını sağlar ve motorlu taşıtlara olan bağımlılığı azaltır."*

Alt Tema 4: Toplu taşıma verimliliği ve optimizasyon

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının toplu taşıma sistemlerindeki verimliliği nasıl artırdığını ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların toplu taşıma kullanımını nasıl teşvik ettiğini ve operasyonel verimliliği nasıl iyileştirdiğini değerlendirmiştir.

Uzman 3: *"Otonom araç altyapısı, araç içi ve dışı sensörlerle çevresel farkındalığı artırarak kazaları önler."*

Uzman 5: *"Otonom araç teknolojisi, toplu taşıma araçlarının enerji tüketimini optimize ederek hem çevresel sürdürülebilirliği destekler hem de operasyonel maliyetleri düşürür."*

Uzman 2: *"Akıllı otobüs durakları gerçek zamanlı trafik ve hava durumu güncellemeleri sunarak, vatandaşların günlük planlamalarını iyileştirir."*

Uzman 4: *"Akıllı otobüs durakları, yolculara anlık otobüs varış bilgileri sağlayarak bekleme sürelerini minimize eder ve toplu taşıma kullanımını teşvik eder."*

Uzman 1: *"Bu altyapı, toplu taşıma araçlarının güzergahlarını ve sefer sıklıklarını gerçek zamanlı olarak ayarlayarak, yolcuların bekleme sürelerini ve seyahat sürelerini azaltır."*

Tema 3: Akıllı kent donatılarının zorlukları ve engelleri

Alt Tema 1: Yüksek kurulum maliyeti

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının yüksek başlangıç yatırım maliyetlerini ve bu maliyetlerin şehir bütçeleri üzerindeki etkisini ele almaktadır. Uzmanlar, maliyetlerin yönetimi ve finansman stratejileri hakkında görüşlerini sunmuştur.

Uzman 1: *"Mevcut altyapı ile entegrasyon, başlangıçta yüksek maliyet ve teknik zorluklar yaratabilir."*

Uzman 4: *"Akıllı otobüs duraklarının kurulumu ve işletimi için önemli sermaye yatırımları gereklidir."*

Uzman 1: *"Akıllı otobüs duraklarının ve otonom araç altyapısının başlangıç yatırım maliyetleri yüksek olabilir, ancak uzun vadede operasyonel verimlilik ve reklam gelirleriyle maliyetler dengelenebilir."*

Uzman 5: *"Akıllı bisiklet yollarının kurulumu, özellikle gelişmiş sensör ve aydınlatma sistemlerini içerdiğinde, önemli maliyetler gerektirebilir. Ancak, bu yatırım bisiklet kullanımını teşvik ederek uzun vadede toplu taşıma sistemlerine olan yükü azaltabilir ve şehir içi trafik sıkışıklığını önemli ölçüde düşürebilir. Yatırım maliyetini dengelemek için yerel yönetimler, hibe programları ve çevre koruma fonlarından yararlanabilir."*

Uzman 4: *"Akıllı otopark sistemlerinin ve akıllı yaya geçitlerinin kurulumu ve bakımı, yüksek maliyetli olabilir ve eski altyapılarla entegrasyon sorunları yaşanabilir. Ayrıca, kullanıcıların yeni teknolojilere adaptasyonu zaman alabilir."*

Uzman 2: "*Akıllı otopark sistemlerinin yüksek kurulum ve bakım maliyetleri, özellikle bütçe kısıtlamaları olan belediyeler için bir engel teşkil edebilir. Ayrıca, bu sistemlerin eski altyapılarla entegrasyonu teknik zorluklar yaratabilir.*"

Uzman 3: "*Akıllı trafik lambaları, yüksek kurulum maliyetlerine rağmen, uzun vadede trafik yönetimindeki verimlilik artışıyla bu maliyetleri amorti edebilir.*"

Alt Tema 2: Veri güvenliği ve gizlilik

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının topladığı verilerin güvenliği ve gizliliği ile ilgili zorlukları vurgulamaktadır. Uzmanlar, veri koruma ve siber güvenlik önlemleri üzerine tartışmıştır.

Uzman 4: "*Dijital bilgilendirme panoları, topladıkları verilerin gizliliği ve güvenliğini sağlamak için gelişmiş şifreleme teknikleri ve sıkı veri koruma politikaları gerektirir.*"

Uzman 1: "*Bu panolar, toplu taşıma bilgilerinden hava durumu güncellemelerine kadar çeşitli verileri işlerken, kullanıcıların kişisel verilerinin korunmasına da özen göstermelidir.*"

Uzman 5: "*Akıllı kioskların topladığı kişisel verilerin korunması, kullanıcıların gizliliğine öncelik veren yasal ve etik standartlara uygun olmalıdır.*"

Alt Tema 3: Teknolojik uyumluluk sorunları

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının mevcut altyapı ve sistemlerle uyumlu hale getirilmesinde yaşanan zorlukları içermektedir. Uzmanlar, entegrasyon sorunları ve teknolojik adaptasyon zorluklarını ele almıştır.

Uzman 2: "*Otonom araç altyapısının entegrasyonu, mevcut yasal ve altyapısal çerçevelerle çatışabilir.*"

Uzman 5: "*Otonom araçlar, mevcut yollar ve trafik sistemleri ile tam uyum sağlamak için karmaşık yazılım ve donanım entegrasyonlarına ihtiyaç duyar.*"

Uzman 3: "*Akıllı trafik lambaları, karmaşık trafik durumlarında yetersiz kalabilir ve sürekli güncellemeler gerektirebilir.*"

Uzman 1: "*Bu lambaların mevcut trafik ışığı altyapısına entegrasyonu, yerel yönetimlerin ve trafik mühendislerinin karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir.*"

Uzman 2: "*Tüm hava koşullarında yüksek performans sağlama gerekliliği, teknolojik zorluklar doğurabilir.*"

Uzman 3: "*Sürekli güncelleme gereksinimi ve siber güvenlik zorlukları, operasyonel karmaşıklığı artırır.*"

Tema 4: Akıllı kent donatılarının gelecek potansiyeli ve kullanım önerileri

Alt Tema 1: Entegrasyon ve kamu-özel ortaklığı

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının mevcut ve gelecekteki teknolojilerle entegrasyonunu ve bu süreçte kamu-özel ortaklıklarının rolünü ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların geliştirilmesi ve genişletilmesi için çeşitli stratejiler önermiştir.

Uzman 5: "*Akıllı otobüs durakları, reklam ve bilgilendirme ekranları ile donatılmalı, bu sayede hem gelir yaratılabilir hem de vatandaşlara önemli bilgiler sunulabilir. Kamu-özel ortaklıkları, bu tür yenilikçi finansman modellerini desteklemek için idealdir.*"

Uzman 4: "*Otonom araç altyapısının, mevcut yollar ve diğer taşıma modları ile entegrasyonu, kentsel mobilitede kesintisiz bir deneyim sağlayabilir. Bu, hem kamu hem de özel sektör tarafından desteklenmeli ve finanse edilmelidir.*"

Uzman 3: "*Trafik yönetim sistemlerine entegre edilerek, trafik lambaları şehir genelinde trafik akışını daha verimli hale getirebilir. Bu entegrasyon için yerel yönetimler ve teknoloji sağlayıcılar arasında stratejik ortaklıklar kurulmalıdır.*"

Uzman 1: "*Akıllı otopark sistemlerinin gelecekte daha da geliştirilerek, otonom araçlarla entegrasyonu sağlanabilir. Bu sayede, araçların kendi kendine park etmesi gibi yenilikçi çözümler sunulabilir, bu da şehir içi ulaşım dinamiklerini kökten değiştirebilir.*"

Uzman 2: "*Gelecekte, akıllı otopark sistemleri, IoT cihazları ve yapay zekâ ile daha da entegre edilebilir, böylece park yerlerinin kullanımı dinamik bir şekilde yönetilebilir ve otomatik ödeme gibi ek hizmetlerle zenginleştirilebilir. Kamu-özel ortaklıkları bu tür projeler için finansman ve inovasyon desteği sağlayabilir.*"

Alt Tema 2: Genişletilmiş vatandaş hizmetleri

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının vatandaşlara sunduğu hizmetlerin nasıl genişletilebileceğini ele almaktadır. Uzmanlar, bu donatıların sunduğu hizmetlerin kapsamını genişletmek için önerilerde bulunmuştur.

Uzman 4: "*Dijital bilgilendirme panoları, etkinlikler ve acil durumlar hakkında vatandaşları bilgilendirme kapasitesini genişletmek için yerel dil desteği ve etkileşimli özellikler eklenerek daha da işlevsel hale getirilmeli.*"

Uzman 5: "*Bilgilendirme panoları, halka açık alanlarda Wi-Fi hotspots olarak da işlev görebilir, böylece insanların bilgiye erişimi artırılır ve dijital bölünme azaltılır.*"

Uzman 2: "*Akıllı kiosk kabinleri, şehir içi önemli noktalara yerleştirilmeli ve vatandaşlara yol tarifi, toplu taşıma bilgileri ve yerel hizmetler hakkında interaktif yardım sunulmalıdır.*"

Uzman 3: "*Bu kiosklar aynı zamanda şehir içindeki büyük etkinlikler sırasında bilgi ve yönlendirme noktaları olarak da kullanılabilir, bu da karmaşıklığı azaltır ve etkinlik deneyimini iyileştirir.*"

Alt Tema 3: Veri analizi ve optimizasyon

Bu alt tema, akıllı kent donatılarının veri toplama ve analiz yeteneklerini ve bu yeteneklerin şehir planlamasında nasıl kullanılabileceğini içermektedir. Uzmanlar, bu donatıların veri analizi ve optimizasyon kapasitesini artırmak için önerilerde bulunmuştur.

Uzman 1: "*Akıllı yaya geçitleri, sensör ve kamera sistemleri ile donatılmalı, bu sayede yaya ve araç trafiği daha etkin bir şekilde yönetilebilir ve analiz edilebilir.*"

Uzman 4: "*Bu teknoloji, trafik yoğunluğu ve yaya akışını analiz ederek, şehir planlamasında kullanılacak verileri sağlar, bu da daha güvenli ve erişilebilir yaya yollarının tasarımına katkıda bulunur.*"

Uzman 5: "*Bu teknoloji, trafik yoğunluğu ve yaya akışını analiz ederek, şehir planlamasında kullanılacak verileri sağlar, bu da daha güvenli ve erişilebilir yaya yollarının tasarımına katkıda bulunur.*"

Uzman 4: "*Paylaşımli mobilite platformları, kullanıcı verilerini toplayarak trafik ve kullanım desenleri üzerinde detaylı analizler yapmalıdır. Bu veriler, şehir içi mobilite stratejilerinin optimizasyonunda kullanılabilir.*"

Uzman 2: "*Sensör ve kamera sistemleri sayesinde toplanan veriler, yayaların ve sürücülerin davranışlarını analiz ederek, eğitim ve farkındalık kampanyaları için önemli bilgiler sunar.*"

4.2. Ulaşım sistemlerinde akıllı kent donatılarının analizi

Her bir akıllı kent donatısı türünün özelliği işlevi, faydaları, engeller ve zorluklar literatür taraması ve uzman görüşüne dayanarak detaylı bir şekilde analiz edilerek aşağıdaki tablolarda sunulmuştur.

1) Akıllı otobüs durakları

Tablo 2. Akıllı otobüs duraklarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Gerçek Zamanlı Bilgilendirme <ul style="list-style-type: none"> Otobüslerin tahmini varış saatlerini, güzergâh bilgilerini ve gecikmeleri gösteren ekranlar. Görme engelli yolcular için otobüs hareketleri ve güzergâh bilgilerini sesli olarak duyuran sistemler.
	2. Wi-Fi ve Şarj İstasyonları <ul style="list-style-type: none"> Yolcuların internete bağlanabilmesi için ücretsiz Wi-Fi hizmeti. Mobil cihazların şarj edilebileceği portlar ve kablosuz şarj alanları.
	3. Çevresel Sensörler <ul style="list-style-type: none"> Hava kalitesi, sıcaklık ve nem gibi çevresel verileri ölçen ve şehir yönetimi ile paylaşan sensörler.
	4. Güvenlik ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Yolcu güvenliğini sağlamak için donatılan güvenlik kameraları ve acil durum butonları.
	5. Enerji Verimliliği <ul style="list-style-type: none"> Enerji ihtiyaçlarının bir kısmını karşılamak için kullanılan güneş panelleri. Enerji tasarruflu LED aydınlatma sistemleri.
	Faydaları
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Teknolojik donanımların maliyeti nedeniyle ilk kurulum giderleri yüksektir.
	2. Veri Güvenliği ve Gizlilik: Toplanan verilerin güvenliği ve yolcu gizliliği sağlanmalıdır.
	3. Bakım ve Onarım: Donatıların sürekli çalışması için düzenli bakım ve onarım gereklidir.

2) Akıllı trafik lambaları

Tablo 1. Akıllı trafik lambalarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Adaptif Trafik Kontrolü <ul style="list-style-type: none"> Trafik yoğunluğunu algılayarak ışıkların yanma süresini otomatik olarak ayarlayan sistem. Önceden belirlenmiş senaryolara göre acil durum araçlarına öncelik tanıyan algoritmalar.
	2. Gerçek Zamanlı Veri Toplama ve İletişim <ul style="list-style-type: none"> Trafik akışı, hız ve araç sayısı gibi verileri toplayarak şehir yönetimine ileten sensörler. Diğer akıllı trafik lambalarıyla iletişim kurarak trafik kontrolü için koordinasyon sağlar.
	3. Enerji Verimliliği <ul style="list-style-type: none"> Enerji tasarrufu sağlamak için kullanılan LED aydınlatma ve güneş panelleri. Trafik yoğunluğuna göre ışık parlaklığını otomatik olarak ayarlayabilen sistem.
	4. Güvenlik ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Güvenlik kameraları ve çevresel sensörlerle trafik kazalarını ve olumsuz koşulları izler.
Faydaları	1. Trafik Akışının İyileştirilmesi <ul style="list-style-type: none"> Adaptif trafik kontrolü sayesinde trafik akışını optimize eder. Yoğun saatlerde trafik sıkışıklığını azaltır ve acil durum araçlarına öncelik tanır.
	2. Enerji Tasarrufu <ul style="list-style-type: none"> LED aydınlatma ve güneş panelleriyle enerji tüketimini azaltır. Trafik yoğunluğuna göre ayarlanabilen ışık parlaklığı ile gereksiz enerji kullanımını engeller.

Tablo 2. Akıllı trafik lambalarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları (devamı)

Faydaları	3. Güvenlik ve Veri Toplama <ul style="list-style-type: none"> Güvenlik kameraları ve sensörlerle trafik kazalarını ve tehlikeli durumları izler. Toplanan verilerle trafik yönetimi ve güvenlik politikaları geliştirilir.
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensörler ve kontrol sistemleri kurulum maliyetlerini artırır. 2. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir. 3. Teknolojik Uyumluluk: Eski trafik lambalarının yeni sistemlerle uyumlu hale getirilmesi zor olabilir.

3) Dijital bilgilendirme panoları

Tablo 3. Akıllı bilgilendirme panolarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Gerçek Zamanlı Bilgilendirme <ul style="list-style-type: none"> Toplu taşıma, etkinlikler ve acil durumlar hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlar. Trafik durumu, hava durumu ve toplu taşıma hareketleri hakkında bilgi sunar. 2. Reklam ve Vatandaş Hizmetleri <ul style="list-style-type: none"> Dijital reklam panoları ile şehirdeki etkinlikler ve hizmetler tanıtılır. Toplu taşıma kart dolun noktaları ve bilet satış hizmetleri sunar. 3. Wi-Fi ve Şarj İstasyonları <ul style="list-style-type: none"> Vatandaşlar için ücretsiz Wi-Fi bağlantısı. Mobil cihazlar için USB şarj portları ve kablosuz şarj istasyonları. 4. Çevresel Sensörler ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Hava kalitesi, sıcaklık ve nem gibi verileri toplayan çevresel sensörler. Toplanan veriler şehir yönetimine gerçek zamanlı olarak iletilir.
Faydaları	1. Gerçek Zamanlı Bilgilendirme ve Vatandaş Hizmetleri <ul style="list-style-type: none"> Trafik durumu, toplu taşıma ve hava durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi sunar. Toplu taşıma kart dolun noktaları ve bilet satış hizmetleri vatandaşlara ek hizmet sağlar. 2. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ve LED teknolojisi ile enerji tasarrufu sağlar. Çevresel sensörlerle hava kalitesi ve sıcaklık verileri toplanır. 3. Reklam ve Ekonomik Kazanç <ul style="list-style-type: none"> Dijital reklam panoları ile şehirdeki etkinlikler ve hizmetler tanıtılır. Reklam geliri ile şehir yönetimi için ek ekonomik kazanç sağlar.
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve aydınlatma teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır. 2. Veri Güvenliği ve Gizlilik: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır. 3. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.

4) Akıllı otopark sistemleri

Tablo 4. Akıllı otopark sistemlerinin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Boş Park Yerlerinin Tespiti ve Yönlendirme <ul style="list-style-type: none"> Sensörlerle boş park yerlerini tespit ederek sürücülerini dijital ekranlarla yönlendirir. Mobil uygulamalar ile gerçek zamanlı park yeri durumu hakkında bilgi verir. 2. Ödeme Sistemleri ve Ücretlendirme <ul style="list-style-type: none"> Dijital ödeme ve QR kod ile hızlı park ücreti ödeme. Talep yoğunluğuna göre ücretlendirmeyi optimize eden algoritmalar. 3. Veri Toplama ve Analiz <ul style="list-style-type: none"> Park yeri doluluk oranı ve kullanım alışkanlıklarını analiz eden sensörler. Toplanan verilerle şehir yönetimi tarafından otopark planlaması yapılır.

Tablo 5. Akıllı otopark sistemlerinin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları (devamı)

Özellikler ve İşlevleri	4. Enerji Verimliliği ve Çevresel Sensörler <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ve LED teknolojisi ile enerji tasarrufu sağlar. Hava kalitesi ve sıcaklık gibi verileri toplayan çevresel sensörler.
Faydaları	1. Boş Park Yerlerinin Tespiti ve Yönlendirme <ul style="list-style-type: none"> Dijital ekranlar ve mobil uygulamalar ile sürücüler boş park yerlerine yönlendirilir. Park yerinin daha verimli kullanılması sağlanır. 2. Ödeme Sistemleri ve Ücretlendirme <ul style="list-style-type: none"> Dijital ödeme ve QR kod ile sürücüler hızlı ve kolay ödeme yapar. Talep yoğunluğuna göre optimize edilen ücretlendirme ile ekonomik kazanç sağlanır. 3. Veri Toplama ve Planlama <ul style="list-style-type: none"> Park yeri doluluk oranı ve kullanım alışkanlıkları analiz edilir. Toplanan verilerle şehir yönetimi tarafından otopark planlaması yapılır.
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve aydınlatma teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır. 2. Veri Güvenliği ve Gizlilik: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır. 3. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.

5) Paylaşımlı mobilite donatıları

Tablo 6. Paylaşımlı mikromobilite donatılarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. E-scooter ve Bisiklet Paylaşım Sistemleri <ul style="list-style-type: none"> E-scooter ve bisikletlerin şehir genelinde paylaşımlı olarak kullanılabilmesi için istasyonlar. Gerçek zamanlı konum takibi ve kullanıcı bilgisi sağlayan uygulamalar. 2. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları <ul style="list-style-type: none"> Elektrikli araçlar için hızlı ve standart şarj istasyonları. Gerçek zamanlı şarj durumu ve konum bilgisi sağlayan dijital panolar. 3. Gerçek Zamanlı Veri Toplama ve İletişim <ul style="list-style-type: none"> Araç ve istasyon verilerini toplayarak şehir yönetimine ileten sensörler. Mobil uygulamalar ve dijital ekranlarla kullanıcıları bilgilendirir. 4. Ödeme Sistemleri ve Üyelik Modelleri <ul style="list-style-type: none"> Kullanıcıların araçları kiralamasını kolaylaştıran dijital ödeme ve üyelik modelleri. QR kod veya NFC teknolojisi ile hızlı ve kolay kiralama
Faydaları	1. Sürdürülebilir Ulaşım <ul style="list-style-type: none"> Karbon emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir ulaşımı destekler. Şehir içi ulaşımda alternatif ve esnek seçenekler sunar. 2. Kullanıcı Deneyimi ve Bilgilendirme <ul style="list-style-type: none"> Mobil uygulamalar ve dijital ekranlarla kullanıcılar gerçek zamanlı bilgi alır. Kolay ödeme ve kiralama sistemleri ile kullanıcı deneyimi geliştirilir. 3. Veri Toplama ve Analiz <ul style="list-style-type: none"> Toplanan araç ve istasyon verileri şehir yönetimi tarafından analiz edilerek planlama yapılır. Kullanıcı alışkanlıkları ve talep analizi ile paylaşım sistemleri optimize edilir.
Engeller ve Zorluklar	1. Araç Dağılımı ve Park Sorunları: Araçların şehir genelinde eşit dağılımı ve park sorunları zorluk yaratır. 2. Vandalizm ve Hırsızlık: Paylaşımlı araçların vandalizm ve hırsızlığa karşı korunması gereklidir. 3. Yüksek Kurulum Maliyeti: Şarj istasyonları ve paylaşım ağının kurulumu maliyetli olabilir.

6) Akıllı yaya geçitleri

Tablo 7. Akıllı yaya geçitlerinin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Sensörler ve Adaptif Aydınlatma <ul style="list-style-type: none"> Yaya hareketlerini algılayan sensörlerle entegre aydınlatma sistemi. Trafik yoğunluğuna göre aydınlatmanın parlaklığı ve renkleri otomatik olarak ayarlanır.
	2. Sesli Uyarılar ve Bilgilendirme <ul style="list-style-type: none"> Görme engelli yayalar için sesli sinyal ve uyarı sistemleri. Trafik ışıkları ile entegre dijital ekranlarda yaya geçidi durumu hakkında bilgi verir.
	3. Güvenlik ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Güvenlik kameraları ve sensörlerle yaya güvenliği sağlanır. Yaya geçitlerindeki trafik kazalarını ve tehlikeli durumları izler.
	4. Enerji Verimliliği ve Güneş Enerjisi <ul style="list-style-type: none"> LED aydınlatma ve güneş panelleri ile enerji tasarrufu sağlar. Trafik yoğunluğuna göre otomatik aydınlatma sistemi.
Faydaları	1. Yaya Güvenliği <ul style="list-style-type: none"> Yaya hareketlerini algılayan sensörler ve adaptif aydınlatma sistemi ile yaya güvenliği sağlanır. Sesli uyarılar ve dijital ekranlarla yayalara bilgi verir.
	2. Enerji Verimliliği <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ve LED teknolojisi ile enerji tüketimini azaltır. Trafik yoğunluğuna göre otomatik ayarlanan aydınlatma sistemi.
	3. Veri Toplama ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Güvenlik kameraları ve sensörlerle trafik kazalarını ve tehlikeli durumları izler. Toplanan verilerle yaya geçitleri optimize edilir.
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve aydınlatma teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır.
	2. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.
	3. Veri Güvenliği: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır.

7) Akıllı yol çizgileri

Tablo 8. Akıllı yol çizgilerinin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Renk ve Parlaklık Değiştirme <ul style="list-style-type: none"> Trafik yoğunluğu ve hava koşullarına göre renk ve parlaklık değiştirebilen malzemeler. Gece veya sisli havalarda görünürlüğü artıran LED ışık entegreli çizgiler.
	2. Çevresel Sensörler <ul style="list-style-type: none"> Sıcaklık, nem ve yol koşullarını izleyen sensörlerle entegre edilmiştir. Sürücülerini olumsuz hava koşulları ve yol durumu hakkında bilgilendirir.
	3. Enerji Üretimi ve Verimliliği <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ile çalışan veya enerji üretebilen yol çizgileri. Düşük enerji tüketimi için LED teknolojisi.
Faydaları	1. Güvenli Sürüş <ul style="list-style-type: none"> Gece ve olumsuz hava koşullarında görünürlüğü artırarak güvenli sürüş sağlar. Trafik yoğunluğuna göre renk ve parlaklık değiştiren çizgiler sürücülerini yönlendirir.
	2. Enerji Verimliliği <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ile çalışan veya enerji üretebilen çizgiler enerji tasarrufu sağlar. LED teknolojisi ile düşük enerji tüketimi.
	3. Veri Toplama ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Çevresel sensörlerle sıcaklık, nem ve yol koşulları hakkında veri toplar. Toplanan verilerle şehir yönetimi, trafik akışını ve güvenliğini iyileştirebilir.

Tablo 9. Akıllı yol çizgilerinin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları (devamı)

Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve LED teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır.
	2. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.
	3. Uyumluluk Sorunları: Mevcut yol altyapısı ile uyumluluğu sağlamak zor olabilir.

8) Akıllı bisiklet yolları**Tablo 10.** Akıllı bisiklet yollarının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. LED Aydınlatma ve Enerji Üretimi <ul style="list-style-type: none"> LED ışıklarla kaplı ve güneş enerjisi üretebilen bisiklet yolları. Gece ve sisli havalarda görünürlüğü artıran ışıklı çizgiler.
	2. Çevresel Sensörler ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Sıcaklık, nem ve hava kalitesi gibi verileri toplayan sensörler. Toplanan veriler şehir yönetimine gerçek zamanlı olarak iletilir.
	3. Veri Toplama ve Bilgilendirme <ul style="list-style-type: none"> Bisiklet yollarındaki yoğunluk ve kullanıcı verilerini toplayan sensörler. Dijital ekranlarla bisiklet yolu durumu hakkında gerçek zamanlı bilgi verir.
	4. Wi-Fi ve Şarj İstasyonları <ul style="list-style-type: none"> Bisiklet kullanıcıları için ücretsiz Wi-Fi bağlantısı. Elektrikli bisikletler için hızlı şarj istasyonları.
Faydaları	1. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik <ul style="list-style-type: none"> Güneş enerjisi ile çalışan bisiklet yolları enerji tasarrufu sağlar. LED aydınlatma ve ışıklı çizgilerle gece görünürlüğü artırılır.
	2. Veri Toplama ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Çevresel sensörlerle hava kalitesi ve sıcaklık verileri toplanır. Bisiklet yolu yoğunluk verileri ile planlama yapılır.
	3. Vatandaş Hizmetleri <ul style="list-style-type: none"> Ücretsiz Wi-Fi ve şarj istasyonları bisiklet kullanıcılarına ek hizmet sunar. Dijital ekranlarla bisiklet yolu durumu hakkında bilgi verir.
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve aydınlatma teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır.
	2. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.
	3. Veri Güvenliği: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır.

9) Otonom araç altyapısı**Tablo 11.** Otonom araç altyapısının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. V2X (Araçtan Her Şeye İletişim) <ul style="list-style-type: none"> Araçlar arasında ve araçlarla altyapı arasında iletişim sağlayan teknoloji. Trafik lambaları, yol kenarı sensörleri ve diğer araçlarla veri paylaşımı.
	2. Gerçek Zamanlı Veri Toplama ve İletişim <ul style="list-style-type: none"> Trafik akışı, yol koşulları ve hava durumu gibi verileri toplayan sensörler. Otonom araçlara anlık bilgi sağlayan altyapı sistemleri.
	3. Enerji Verimliliği ve Çevresel Sensörler <ul style="list-style-type: none"> Sıcaklık, nem ve hava kalitesi gibi verileri toplayan çevresel sensörler. Güneş panelleri ile kendi enerjisini üreten altyapı sistemleri.
	4. Güvenlik ve İzleme <ul style="list-style-type: none"> Güvenlik kameraları ve acil durum butonları ile trafik kazalarını izler. Otonom araçların güvenliğini sağlayan izleme sistemleri.

Tablo 12. Otonom araç altyapısının özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları (devamı)

Faydaları	1. Otonom Araçlar İçin Güvenlik ve Bilgilendirme
	2. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik
	3. Veri Toplama ve Analiz
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: V2X teknolojisi ve çevresel sensörler kurulum maliyetlerini artırır.
	2. Teknolojik Uyumluluk: Eski altyapının yeni sistemlerle uyumlu hale getirilmesi zor olabilir.
	3. Veri Güvenliği ve Gizlilik: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır.

10) Akıllı kiosk kabini

Tablo 13. Akıllı kiosk kabininin özellikleri, işlevleri, faydaları ve zorlukları

Başlık	Açıklama
Özellikler ve İşlevleri	1. Bilgi Sağlama ve Bilet Satışı
	2. Wi-Fi ve Şarj İstasyonları
	3. Reklam ve Vatandaş Hizmetleri
	4. Çevresel Sensörler ve İzleme
Faydaları	1. Bilgi Sağlama ve Vatandaş Hizmetleri
	2. Wi-Fi ve Şarj İstasyonları
	3. Reklam ve Ekonomik Kazanç
Engeller ve Zorluklar	1. Yüksek Kurulum Maliyeti: Gelişmiş sensör ve aydınlatma teknolojileri kurulum maliyetlerini artırır.
	2. Veri Güvenliği ve Gizlilik: Toplanan verilerin güvenliği ve gizliliği sağlanmalıdır.
	3. Bakım ve Onarım: Sürekli çalışmasını sağlamak için düzenli bakım ve onarım gereklidir.

5. Sonuç ve öneriler

Bu çalışma, akıllı kent donatılarının ulaşım sistemlerindeki rolünü ve katkılarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Araştırmada kapsamlı bir literatür taraması ve alanında uzman kişilerle yapılan görüşmelerden yararlanılmıştır. Elde edilen bulgular, tematik analiz yöntemiyle değerlendirilerek akıllı kent donatılarının şehir ulaşım sistemlerine olan etkileri sistematik olarak ortaya konmuştur. Araştırma bulguları, akıllı kent donatılarının şehirlerdeki ulaşım sistemlerine önemli katkılar sağladığını ve çeşitli hizmetler sunduğunu göstermiştir. Tablo 12, her bir akıllı kent donatısının özelliklerini karşılaştırmalı

olarak göstermektedir. Bu özellikler arasında gerçek zamanlı bilgilendirme, enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik, güvenlik, kullanıcı deneyimi, veri toplama ve analiz, adaptif kontrol ve dijital ödeme ve hizmetler bulunmaktadır.

Tablo 14. Akıllı kent donatılarının sunduğu hizmetler

	Gerçek Zamanlı Bilgilendirme	Enerji Verimliliği	Çevresel Sürdürülebilirlik	Güvenlik	Kullanıcı Deneyimi	Veri Toplama ve Analiz	Adaptif Kontrol	Dijital Ödeme ve Hizmetler
Akıllı Otobüs Durakları	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Akıllı Trafik Lambaları	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Akıllı Yol Çizgileri		✓	✓	✓		✓		
Paylaşımlı Mobilite Donatıları	✓	✓	✓		✓	✓		✓
Akıllı Yaya Geçitleri	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Akıllı Bisiklet Yolları		✓	✓	✓	✓	✓		
Otonom Araç Altyapısı	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Dijital Bilgilendirme Panoları	✓	✓			✓	✓		✓
Akıllı Otopark Sistemleri	✓	✓	✓		✓	✓		✓
Akıllı Kiosk Kabini	✓	✓			✓	✓		✓

Tablo 12, bazı özelliklerin birçok donatı türünde yaygın olduğunu, bazılarının ise daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik, gerçek zamanlı bilgilendirme ve veri toplama ve analiz özellikleri birçok donatıda bulunmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirliğin akıllı kent planlamasında ne kadar kritik olduğunu, şehirlerin karbon emisyonlarını azaltma ve çevre dostu ulaşım çözümlerine yönelik çabalarının olduğunu ve şehirlerde bilgi akışının ve veri yönetiminin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Akıllı otobüs durakları, akıllı bisiklet yolları ve dijital bilgilendirme panoları gibi donatılar, kullanıcı deneyimini artıran özelliklere sahiptir. Kullanıcı memnuniyetinin ve deneyiminin önemli bir öncelik olduğu ortaya konmaktadır. Güvenlik özellikleri, akıllı yaya geçitleri, akıllı trafik lambaları ve akıllı bisiklet yolları gibi donatılarda öne çıkmaktadır, bu da akıllı kent donatılarının kullanıcı güvenliğini artırmak için tasarlandığını göstermektedir. Akıllı otobüs durakları, paylaşımlı mobilite donatıları, dijital bilgilendirme panoları, akıllı otopark sistemleri ve akıllı kiosk kabinleri dijital ödeme ve hizmetler özelliğine sahiptir, dijitalleşmenin ve ödeme kolaylıklarının kullanıcılar için sağladığı faydaları göstermektedir. Adaptif Kontrol özelliği ise yalnızca akıllı trafik lambalarında ve otonom araç altyapısında öne çıkmaktadır; çünkü trafik akışını dinamik olarak yönetmek için adaptif kontrol sistemleri gereklidir.

Çalışma kapsamında akıllı kent donatılarının ulaşım sistemlerinde daha verimli, kullanıcı dostu ve sürdürülebilir bir yapı kurmasına ilişkin genel öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Entegrasyon ve İşbirliği: Akıllı kent donatıları, mevcut şehir altyapısı ile tam entegre edilmelidir. Bu entegrasyon için kamu ve özel sektör arasında işbirlikleri teşvik edilebilir ve yenilikçi finansman modelleri geliştirilebilir.
- Kullanıcı Odaklı Yaklaşım: Donatılar, kullanıcı deneyimini merkeze alacak şekilde tasarlanmalıdır. Donatılar, gerçek zamanlı bilgilendirme sistemleri ve kullanıcı dostu arayüzlerle donatılabilir.
- Sürdürülebilirlik ve Çevre Dostu Uygulamalar: Enerji verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılması, tasarımların merkezinde yer almalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma ve çevresel sensörlerle donatılma bu yönde atılacak adımlar olabilir.

- **Veri Güvenliği ve Gizlilik:** Toplanan verilerin güvenliği ve kullanıcıların gizliliği en yüksek standartlarda korunmalıdır. Bu amaçla gelişmiş şifreleme teknikleri ve sıkı veri koruma politikaları uygulanabilir.

- **Sürekli İyileştirme ve Adaptasyon:** Akıllı kent donatılarının performansı sürekli olarak izlenmeli ve yeni teknolojik gelişmelere uyum sağlayacak şekilde güncellenmelidir. Bu süreçte kullanıcı geri bildirimleri ve analiz sonuçlarından yararlanılabilir.

Bu öneriler, akıllı kent donatılarının daha etkin ve verimli kullanılmasını sağlayarak şehirlerde sürdürülebilir ve yüksek yaşam kalitesine katkıda bulunabilir. Akıllı kent donatıları, modern şehircilik anlayışının vazgeçilmez bir parçası olarak, geleceğin şehirlerini şekillendirmede önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

Akıllı kent donatılarının iyileştirilmesine ve yaygınlaştırılmasına ilişkin donatı türüne göre öneriler ise;

- **Akıllı Trafik Lambaları:** Akıllı trafik lambaları, trafik yoğunluğuna göre ayarlanabilir özelliklerle donatılabilir ve acil durum araçlarına öncelik verme yeteneği geliştirilebilir. Ayrıca, bu lambalar şehir genelindeki diğer trafik yönetim sistemleriyle entegre edilerek daha etkin bir trafik akışı sağlanabilir.

- **Akıllı Otobüs Durakları:** Duraklar, gerçek zamanlı bilgilendirme panelleri, Wi-Fi ve USB şarj istasyonları gibi kullanıcı dostu özelliklerle donatılabilir. Ayrıca, bu duraklar şehrin dijital reklam ağlarına entegre edilebilir, böylece hem bilgi sunumu hem de reklam geliri sağlanabilir.

- **Akıllı Yaya Geçitleri:** Yaya güvenliğini artırmak için sensörler ve hareket algılama teknolojileri ile donatılabilir. Gece görüşünü destekleyen aydınlatma sistemleri ve yaya hareketlerine duyarlı ışıklandırmalar eklenebilir.

- **Akıllı Otopark Sistemleri:** IoT teknolojileri ile donatılarak, park yerlerinin dinamik olarak yönetilmesi sağlanabilir. Uygulama tabanlı arayüzler geliştirilebilir ve kullanıcılara boş park yerleri hakkında gerçek zamanlı bilgiler sunulabilir.

- **Akıllı Bisiklet Yolları:** Bisiklet yolları, gece kullanımını desteklemek için otomatik aydınlatma sistemleriyle donatılabilir. Ayrıca, bisiklet trafiğini izleyebilen ve bisiklet kullanımını teşvik edecek promosyonlar sunabilen akıllı sensörler entegre edilebilir.

- **Akıllı Kiosk Kabini:** Kiosklar, yerel bilgilerin yanı sıra toplu taşıma ve etkinlik bilgilerini sunacak şekilde programlanabilir. Ayrıca, halka açık Wi-Fi erişimi sağlamak için hotspot olarak da işlev görebilir.

- **Dijital Bilgilendirme Panoları:** Acil durumlar ve toplum bilgilendirme için kullanılan dijital panolar, çoklu dil desteği ve etkileşimli ekran özellikleri ile güncellenebilir. Bu panolar ayrıca çevresel koşullara göre adaptasyon sağlayacak şekilde tasarlanabilir.

Bu öneriler her bir donatının potansiyelini en üst düzeye çıkaracak ve kullanıcılar için daha işlevsel ve memnuniyet verici bir deneyim sağlayacaktır. Akıllı kent donatıları, teknolojik inovasyonlar ve kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda sürekli olarak geliştirilmeli ve adapte edilmelidir. Gelecek çalışmalarda, kullanıcıların ihtiyaç ve beklentilerini daha iyi anlayabilmek için akıllı kent donatılarının kullanıcı deneyimi ve memnuniyeti üzerindeki etkileri incelenmelidir. Nicel yöntemler kullanılarak çalışma daha geniş bir bağlamda ele alınabilir. Diğer yandan, akıllı kent donatılarının ulaşım sistemlerindeki rolü, dünya ve Türkiye örnekleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenebilir. Son olarak donatıların daha sorunsuz ve etkin bir şekilde hayata geçirilmesi için akıllı kent donatılarının uygulanmasında karşılaşılan politik ve yasal engellerin aşılmasına yönelik stratejiler üzerine çalışmalar yapılabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Tek yazarlı çalışmadır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Aithal, P. S.** (2022). ICT and Digital Technology Based Solutions for Smart City Challenges and Opportunities. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML)*, 6(1), 1-21.
- Akıllı Şehirler.** (2024). Akıllı kavşak. Erişim: 15 Ağustos 2024, <https://www.akillisehirler.gov.tr/proje-envanteri/konya-akilli-kavsaklar/>
- Aksu, Ö. V.** (2012). Kent Mobilyaları Tasarımında Özgün Yaklaşımlar. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 2(6), 373-386.
- Avrupa Komisyonu.** (2020). Polonya'dan güneş enerjisiyle çalışan bir akıllı otobüs durağı. Erişim: 13 Ağustos 2024, https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/Poland/a-smart-solar-powered-bus-shelter-from-poland
- Bakıcı, T., Almirall, E. & Wareham, J.** (2013). A Smart City Initiative: The Case of Barcelona. *Journal of the Knowledge Economy*, 4, 135-148. <https://doi.org/10.1007/s13132-012-0084-9>.
- Baksi.** (2024). Paylaşımlı bisiklet. Erişim: 18 Ağustos 2024, <https://www.baksi.com.tr/>
- Bizero.** (2024). Paylaşımlı mikromobilite. Erişim: 18 Ağustos 2024, <https://bizero.bike/hakkimizda/>
- Braun, T., Fung, B. C., Iqbal, F. & Shah, B.** (2018). Security and Privacy Challenges in Smart Cities. *Sustainable Cities and Society*, 39, 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.039>.
- Cavlak, N.** (2022). Akıllı Destinasyonların Birlikte Değer Yaratımına Etkisi. *İdealkent*, 13(36), 858-879. <https://doi.org/10.31198/idealkent.1037612>.
- D'Amico, G., Arbolino, R., Shi, L., Yigitcanlar, T. & Ioppolo, G.** (2021). Digital Technologies for Urban Metabolism Efficiency: Lessons from Urban Agenda Partnership on Circular Economy. *Sustainability*, 13(11), 6043. <https://doi.org/10.3390/su13116043>.
- Demir, B.** (2018). Kamusal Mekanların Akıllı Kent Mobilyaları Kullanılarak Düzenlenmesi Üzerine Bir Öneri: Maltepe Dolgu Alanı Orhangazi Şehir Parkı Örneği. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ermiş, A. & Karatekin, N. B.** (2019). Akıllı Kent Mobilyalarının Kent Meydanlarına Entegrasyonunun Eminönü Meydanı Örneği Üzerinden Değerlendirilmesi. 27. *Kentsel Tasarım ve Uygulamalar Sempozyumu*, İstanbul, 23-24 Mayıs.
- Gabrys, J.** (2022). Programming Nature as Infrastructure in the Smart Forest City. *Journal of Urban Technology*, 29(1), 13-19. <https://doi.org/10.1080/10630732.2021.2004067>.
- Gilrein, E. J., Carvalhaes, T. M., Markolf, S. A., Chester, M. V., Allenby, B. R. & Garcia, M.** (2021). Concepts and Practices for Transforming Infrastructure from Rigid to Adaptable. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 6(3-4), 213-234. <https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1599608>.
- Gohar, A. & Nencioni, G.** (2021). The Role of 5G Technologies in A Smart City: The Case for Intelligent Transportation System. *Sustainability*, 13(9), 5188. <https://doi.org/10.3390/su13095188>.
- Hacıhasanoğlu, I.** (1991). *Kent mobilyaları*. Teknografik Matbaacılık, İstanbul.
- Hırçın, F. & Demir, M.** (2023). Akıllı Kent Donatıları Üzerine Bir İnceleme: Erzurum Kenti Örneği. *Türkiye Peyzaj Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 15-32. <https://doi.org/10.51552/peyad.1284303>.
- Kitchin, R.** (2013). The Real-Time City? Big Data and Smart Urbanism. *Geojournal*, 79(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8>.

Kumar, H., Singh, M. K., Gupta, M. P. & Madaan, J. (2020). Moving Towards Smart Cities: Solutions that Lead to the Smart City Transformation Framework. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119281. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.024>.

Lin, Y., Wang, P. & Ma, M. (2017). Intelligent Transportation System (ITS): Concept, Challenge and Opportunity. In *2017 IEEE International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), High Performance and Smart Computing (HPSC) and Intelligent Data and Security (IDS)*, IEEE, 26-28 May.

Main, B. & Hannah, G. G. (2010). *Site Furnishings: A Complete Guide to the Planning, Selection and Use of Landscape Furniture and Amenities*. John Wiley & Sons.

Malik, F., Shah, M. A. & Khattak, H. A. (2018). Intelligent Transport System: An Important Aspect of Emergency Management in Smart Cities. In *2018 24th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, IEEE, 6-7 September.

Najafi, A. (2018). Ulaşım Aktarma Merkezlerinde Akıllı Kent Mobilyaları. *Mimarlık ve Yaşam*, 3(1), 63-74. <https://doi.org/10.26835/my.398502>.

Oemkiosks. (2022). Akıllı otobüs durağı. Erişim: 21 Ağustos 2024, <https://oemkiosks.com/blog/smart-bus-shelters-a-key-to-the-future-of-smart-cities/>

Öztaş Karlı, R. G. & Çelikyay, H. S. (2022). Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) Üzerine Türkiye'deki Politikaların Araştırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(2), 1-14. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1090659>.

Öztaş Karlı, R. G., Özüduru, B. & Çelikyay, H. S. (2023). Kırsal Alan Planlamasında BİT Destekli Uygulamalar: Vodafone Akıllı Köy Modeli. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 60(4), 541-559. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.1273336>.

Razmjoo, A., Østergaard, P. A., Denai, M., Nezhad, M. M. & Mirjalili, S. (2021). Effective Policies to Overcome Barriers in the Development of Smart Cities. *Energy Research & Social Science*, 79, 102175. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102175>.

Rizwan, P., Suresh, K. & Babu, M. R. (2016). Real-time Smart Traffic Management System for Smart Cities by Using Internet of Things and Big Data. In *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)*, IEEE, 21-22 October.

Soofa. (2024). Akıllı bilgilendirme levhası. Erişim: 18 Ağustos 2024, <https://soofadigital.com/soofa-sign/>.

Sussman, J. (2005). *Perspectives on Intelligent Transportation Systems (ITS)*. Springer Science+Business Media.

Şenyl, N. & Büyüksahin, S. (2021). Smart City Components and Review of Smart City Applications in The City of Konya. *Journal of Human Sciences*, 18(4), 497-513. <https://doi.org/10.14687/jhs.v18i4.6223>.

Torbaghan, M. E., Sasidharan, M., Reardon, L. & Muchanga-Hvelplund, L. C. (2022). Understanding the Potential of Emerging Digital Technologies for Improving Road Safety. *Accident Analysis & Prevention*, 166, 106543. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106543>.

Ulaşım Yönetim Merkezi. (2017). Akıllı otopark. Erişim: 17 Ağustos 2024, <https://uym.ibb.gov.tr/kurumsal/haberler-ve-duyurular/akilli-park-sistemleri>

Yue, W. S., Chye, K. K. & Hoy, C. W. (2017). Towards Smart Mobility in Urban Spaces: Bus Tracking and Information Application. *AIP Conf. Proc.* 1891, 020145 (2017) <https://doi.org/10.1063/1.5005478>.

Zhang, K., Ni, J., Yang, K., Liang, X., Ren, J. & Shen, X. S. (2017). Security and Privacy in Smart City Applications: Challenges and Solutions. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 122-129. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600267CM>.

Research Article

Factors Affecting the Integration of Micromobility into Smart Cities and Effects on Urban TransportNuriye KABAKUŞ¹, Merve EYÜBOĞLU^{2*}¹ Faculty of Applied Sciences, Ataturk University, Erzurum, Turkey^{2*} Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ataturk University, Erzurum, Turkey*Correspondence: merve.eyuboglu95@gmail.com

DOI: 10.51513/jitsa.1603010

Abstract: In the transport of the future, the development of smart cities and the use of micromobility vehicles play an important role in terms of sustainability and efficiency. Micromobility vehicles such as electric scooters, bicycles and e-mopeds provide environmental, economic and social benefits by offering an important alternative in urban transport. However, many factors need to be considered for the successful integration of these vehicles. The aim of this paper is to analyse the main factors affecting the integration of micromobility vehicles into urban transport systems. In this paper, 9 sub-criteria under 6 main criteria affecting the integration of micromobility vehicles are considered and the relationships between these criteria are analysed by DEMATEL method. As a result of the analysis, the importance ranking of the criteria related to micromobility vehicles is determined as follows: roads reserved for micromobility vehicles, integration of micromobility vehicles with public transport, accidents, legislation deficiencies, lighting and signing, accessibility to micromobility vehicles, digital literacy level, effects of micromobility vehicles on environmental sustainability and fuel cost. The study makes an important contribution towards better understanding the impacts of micromobility vehicles on urban transport and identifying important factors to be considered in the integration process.

Keywords: Micromobility vehicles, smart cities, DEMATEL method

Mikromobilitenin Akıllı Şehirlere Entegrasyonunu Etkileyen Faktörler ve Şehir İçi Ulaşım Etkileri

Özet: Geleceğin ulaşımında, akıllı şehirlerin gelişimi ve mikromobilite araçlarının kullanımı, sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından önemli bir rol oynamaktadır. Elektrikli scooter, bisiklet ve e-moped gibi mikromobilite araçları, şehir içi ulaşımında önemli bir alternatif sunarak çevresel, ekonomik ve toplumsal faydalar sağlamaktadır. Ancak, bu araçların başarılı entegrasyonu için birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bu makalenin amacı, mikromobilite araçlarının şehir içi ulaşım sistemlerine entegrasyonunu etkileyen temel faktörleri analiz etmektir. Makalede, mikromobilite araçlarının entegrasyonunu şekillendiren 6 ana kriter altında 9 alt kriter ele alınmış ve bu kriterler arasındaki ilişkiler DEMATEL yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda, mikromobilite araçlarıyla ilgili kriterlerin önem sıralaması şu şekilde belirlenmiştir: mikromobilite araçları için ayrılmış yollar, mikromobilite araçlarının toplu taşıma ile entegrasyonu, kazalar, mevzuat eksiklikleri, ışıklandırma ve işaretlendirmeler, mikromobilite araçlara erişilebilirlik, dijital okuryazarlık seviyesi mikromobilite araçlarının çevresel sürdürülebilirliğe etkileri ve yakıt maliyetidir. Çalışma, mikromobilite araçlarının şehir içi ulaşım üzerindeki etkilerini daha iyi anlamaya ve entegrasyon sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörleri belirlemeye yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikromobilite araçlar, akıllı şehirler, DEMATEL yöntemi

1. Introduction

The dynamics of modern urbanization, characterized by rapid city growth and increasing population density, have introduced new transportation challenges. Issues such as traffic congestion, rising carbon emissions, and inadequate infrastructure underscore the limitations of traditional transportation systems in meeting sustainability goals. In this context, innovative approaches are gaining prominence to make urban transportation more efficient, eco-friendly, and accessible.

Smart cities, leveraging technological advancements such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and big data analytics, aim to enhance quality of life and foster a sustainable urban future. Within this framework, micromobility—encompassing eco-friendly and user-friendly modes of transportation such as electric scooters, shared bicycles, and e-mopeds—has emerged as a crucial component. These vehicles are particularly effective in addressing the “last-mile” problem in urban mobility, bridging gaps in traditional public transportation systems.

The integration of micromobility vehicles into intelligent cities represents a significant advancement in urban transportation systems, promoting sustainability and enhancing urban mobility. Research highlights their potential to reduce greenhouse gas emissions, especially in cities with high private vehicle usage, such as Barcelona (Felipe-Falgas et al, 2022; Sun and Ertz, 2022). Transitioning from traditional motorized transport to micromobility options contributes to environmental sustainability while aligning with smart city goals that emphasize intelligent transportation systems and sustainable urban planning (Munhoz et al, 2020; Moch and Wereda, 2020).

However, the successful implementation of micromobility solutions is contingent on their integration with existing public transportation networks. This integration facilitates the concept of Mobility as a Service (MaaS), enhancing accessibility and convenience for urban residents (Sun and Ertz, 2022). Yet, the political economy of micromobility services is complex, as their sustainability often hinges on public funding or private investment, raising concerns about equity and accessibility (Stehlin and Payne, 2022). Effective governance and strategic planning are therefore essential to ensure that these services are both economically viable and inclusive.

Safety and infrastructure are also critical considerations. The increasing adoption of micromobility has been accompanied by a rise in accidents and injuries, highlighting the need for dedicated infrastructure and regulations to mitigate risks (Sanjurjo-de-No, 2023; Karpinski et al, 2022). Cities must develop comprehensive strategies to establish circulation spaces for micromobility vehicles, ensuring their safe coexistence with pedestrians and motor vehicles. Additionally, smart technologies such as data acquisition systems and intelligent traffic management can enhance the safety and efficiency of micromobility systems (Pérez-Zuriaga et al, 2022).

This study aims to evaluate the integration of micromobility vehicles into smart cities through a multi-criteria approach, analyzing safety, environmental, economic, infrastructure, policy and accessibility dimensions. By exploring how micromobility aligns with sustainable urban transportation goals, this article seeks to contribute both to academic discourse and practical solutions, offering insights into the future of micromobility in intelligent cities.

2. Literature Review

The integration of micromobility solutions into smart cities represents multifaceted challenges and opportunities that directly influence urban transportation systems. Micromobility encompasses a variety of lightweight vehicles, including electric scooters, bicycles, and e-mopeds, aimed at addressing last-mile connectivity while promoting sustainable urban mobility. The factors affecting this integration can be categorized into technological, infrastructural, environmental, and social aspects, each playing a critical role in determining the success of micromobility initiatives within urban environments.

Technological advancements are paramount in shaping the micromobility landscape. The emergence of shared micromobility platforms facilitates user access to transportation options that were previously less available or nonexistent. For instance, the integration of app-based services allows for real-time data collection, supporting better urban planning and policy-making aimed at enhancing transportation systems (Tamagusko et al, 2023). Infrastructure plays a crucial role in the successful integration of micromobility. The availability of dedicated lanes and safe parking for micromobility vehicles

significantly influences their adoption rates. Studies indicate that cities that have invested in dedicated cycling and e-scooter lanes, as well as secure parking facilities, experience higher usage rates of micromobility solutions (Rześny-Cieplińska et al, 2023; Hassam et al, 2024).

From an environmental standpoint, micromobility presents an opportunity to mitigate urban traffic congestion and reduce emissions associated with traditional fossil fuel-powered vehicles. Evidence suggests that if cities successfully encourage a modal shift from cars to micromobility modes, there will be substantial reductions in overall transportation-related emissions (Felipe-Falgas et al, 2022; Sun and Ertz, 2022; Rześny-Cieplińska et al, 2023). Furthermore, micromobility aligns with urban sustainability goals, particularly in cities seeking to comply with climate action plans aimed at reducing carbon footprints (McQueen et al, 2020).

Social factors, including public perceptions and user behaviors, also critically affect micromobility integration. The prevailing attitudes toward shared micromobility services often dictate their success or failure within urban landscapes. Research indicates that consumer innovativeness and perceptions of environmental consciousness influence the acceptability and adoption of these services (Flores and Jansson, 2021). In many instances, positive experiences with micromobility during the COVID-19 pandemic catalyzed a shift away from public transit to these alternative modes, suggesting that the pandemic altered users' travel patterns in a way that favors micromobility (Fonseca-Cabrera et al, 2021). Additionally, equity concerns arise when evaluating micromobility solutions, as access may be disproportionately available to certain demographics, potentially exacerbating inequality in urban mobility (Bylieva et al, 2022).

Moreover, the integration of micromobility into existing transportation networks necessitates coordinated efforts among various stakeholders, including local governments, private operators, and community organizations. Effective policies should encompass considerations of equity, sustainability, and user safety while fostering an inclusive approach to urban mobility (Rześny-Cieplińska et al, 2023).

Identifying the factors affecting the integration of micromobility into smart cities involves a variety of research methods that span qualitative and quantitative approaches. The systematic analysis of these factors is essential for understanding how micromobility can play a transformative role in urban transport modalities. Several methodologies are frequently employed in the literature on this topic.

Quantitative methods such as statistical analysis are widely used to explore the impacts of micromobility on urban transportation systems. For instance, Štefancová et al. evaluated the impact of the COVID-19 pandemic on micromobility, analyzing changes in usage patterns and identifying variables that promote the effective integration of shared bicycles and scooters with public transport Štefancová et al. (2022). This method allows for identifying correlations and dependencies that inform policy decisions and design of integrated transport systems.

Qualitative case studies serve as an effective method for understanding the multifaceted factors involved in micromobility integration. For example, Aguilera-García et al. investigated moped scooter-sharing systems in Spanish urban contexts, drawing insights on user engagement, city policy adaptation, and technological interface (Aguilera-García et al, 2020). Such case analyses facilitate a deeper contextual understanding of how micromobility functions within distinct urban frameworks, revealing local challenges and opportunities. Surveys and interviews of micromobility users and non-users provide valuable insights into user preferences, behaviors, and needs. Research by Jafarzadehfadaki and Sisiopiku explores user attitudes towards e-scooter adoption across differing U.S. cities, outlining factors influencing acceptance such as convenience, cost, and safety perceptions (Jafarzadehfadaki and Sisiopiku, 2024). These user-centered approaches enable cities to design services better aligned with the expectations of potential users, thereby fostering effective integration.

Investigating existing policy documents and regulatory frameworks surrounding micromobility can uncover barriers to integration. Marques and Coelho conducted a literature review that highlighted the need for comprehensive policies enabling micromobility integration through life cycle thinking approaches (Marques and Coelho, 2022). The outcome of such analysis is critical for identifying gaps in legislation or community engagement that may inhibit the successful embedding of micromobility options. GIS techniques allow for spatial analysis of micromobility patterns and infrastructure needs. Tamagusko et al. utilized safety data mapping to identify high-risk areas for micromobility users

(Tamagusko et al, 2023). By visualizing data geographically, cities can make informed decisions on where to allocate resources for infrastructure improvements that enhance safety and accessibility. Approaches such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) are employed in decision-making related to the selection of micromobility systems. Bajec et al. utilized AHP-DEA to optimize the selection of electric bike-sharing system providers (Bajec et al, 2021). This approach allows for the simultaneous evaluation of multiple criteria, ensuring that selected systems meet a range of urban mobility objectives.

In conclusion, the successful integration of micromobility into smart cities relies on a comprehensive understanding of the interplay between technological advancements, infrastructure development, environmental impacts, and social dynamics. A holistic approach is essential for policymakers and urban planners to address key factors such as user safety, equitable access, and sustainability, ensuring that micromobility solutions align with contemporary urban mobility goals. This process necessitates a combination of quantitative and qualitative methods to identify and analyze influencing factors, providing valuable insights for more effective transportation planning. Moreover, continuous feedback loops should be emphasized, enabling adaptive strategies that respond to emerging trends and user needs, ultimately enhancing the functionality and sustainability of smart cities.

3. Materials and methods

3.1. Materials

In the study, the main criteria affecting micromobility vehicles were identified as safety, infrastructure, policy, environment, economy and accessibility. Based on these main criteria, nine sub-criteria were defined within the scope of the study. These sub-criteria that constitute the data set are; accidents, lighting and signalling, roads for micromobility vehicles, integration of these vehicles with public transport, legislative gaps, accessibility to micromobility vehicles, effects on environmental sustainability, fuel cost advantages and digital literacy level. These criteria play a critical role in the integration of micromobility vehicles into smart city systems. Figure 1 shows the criteria used in the study.

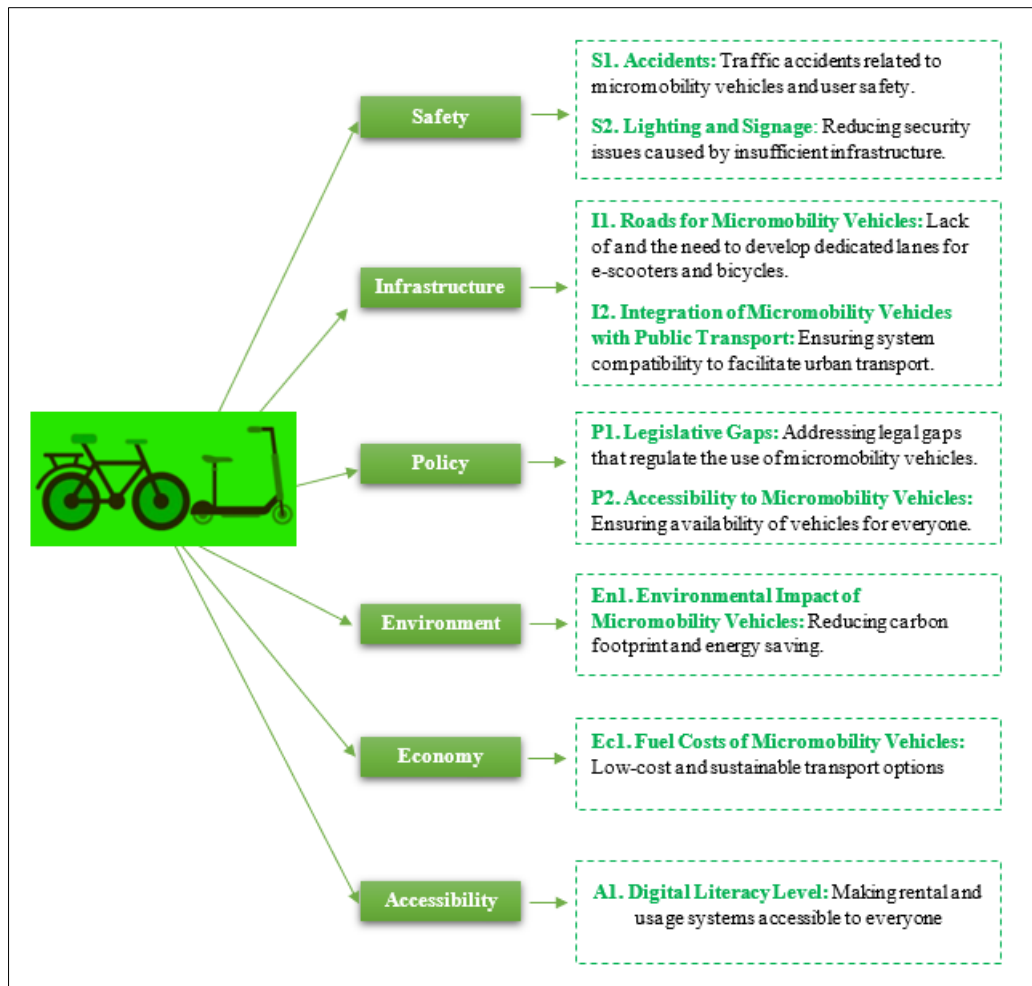


Figure 1. Criteria Used in the Study

3.2. Method

The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Method (DEMATEL), one of the multi-criteria decision making methods, is used in the study. For the decision matrix to be created in the DEMATEL method, literature reviews and expert opinions (decision maker group consisting of 3 academicians and 2 civil engineers) are utilised. DEMATEL method is considered superior to other methods due to the existence of a relationship between the criteria, classification of the criteria, strong complex system analysis and visual outputs. In this context, DEMATEL method is preferred for the analysis results of the criteria to be used in the study.

3.2.1. DEMATEL Method

The DEMATEL method analyses the causal relationship between criteria in solving complex problems in research (Wu and Lee, 2007; Fontela, 1974; Fontela, 1976). The DEMATEL method offers the opportunity to create an outline for the planning and solution of problems by categorising the relevant factors into cause and effect groups in order to better understand causal relationships (Li, 2009). In this method, the opinions and assessments of decision makers are utilised. Thanks to DEMATEL, the weights of the evaluation criteria can be calculated and the criteria can be ranked according to their importance levels. This approach enables the criteria that affect and are affected by each other in the decision process to be analysed within the framework of a common consensus (Güler et al, 2022).

As a result, the main distinction of DEMATEL from other methods is that it can analyse the relationships between the criteria and visualise the cause-effect links in the system and offer solutions to complex systems. This feature provides a great advantage especially in strategic decision making processes. The process steps of this method are given below.

Step 1. In this step, the criteria are evaluated pairwise in line with the expert opinion. This evaluation is made according to the DEMATEL method evaluation scale given in Table 1.

Table 1. DEMATEL Method Evaluation Scale (Nilashi et al. 2015)

Numerical Value	Description
0	Ineffective
1	Low Impact
2	Medium Impact
3	High Impact
4	Very High Impact

Step 2. In this step, a normalisation process is performed in order to preserve the integrated decision structure as much as possible. In this process, using the direct relationship matrix (A), the normalised direct relationship matrix (X) is obtained with the following formulas. In this process, each value in the direct relationship matrix is normalised by dividing the largest parts of the row sum of this matrix.

$$X=k.A \quad (1)$$

$$k=\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i,j=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

Step 3. In this step, after the normalised relationship matrix (X) is created, the total relationship matrix (T) is calculated by the following formula.

$$T= X.(1-X)^{-1} \quad (3)$$

Step 4. In this step, D and R values are determined. The sum of the row values of the T matrix gives the D value and the sum of the column values gives the R value.

$$T=[t_{ij}]_{n \times n}, \quad i,j=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

$$D=[\sum_{j=1}^n t_{ij}]_{n \times 1} \quad (5)$$

$$R=[\sum_{j=1}^n t_{ij}]_{1 \times n} \quad (6)$$

Step 5. In this step, D+R values indicating the level of relationship for each factor and D-R values determining the influence levels of the factors are calculated. The D+R value on the horizontal axis in the influence graph expresses the level of interaction of a factor with other factors. In other words, as the D+R value of a factor increases, the interaction of this factor with other factors also increases. On the vertical axis of the influence graph, there are D-R values indicating the influence power of a factor. If the D-R value of a factor is positive, this factor is in the influencing group; if D-R is negative, it is in the influenced group. The importance weights of the factors are calculated as follows (Koçak and Diyadin, 2018).

$$W_i=\sqrt{(D_i+R_i)^2+(D_i-R_i)^2} \quad (7)$$

$$W_i=\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8)$$

4. Results

In the application phase of the study, the sub-criteria were evaluated in line with the opinions obtained from the decision makers and the importance rankings were determined by using the average values. Table 2 shows the direct and average relationship matrix obtained by averaging the opinions of the experts.

Table 2. Direct and average relation matrix

	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	0	2	3	4	3	3	1	4	2
S2	3	0	2	3	2	3	2	3	4
I1	4	3	0	2	3	3	3	4	3
I2	2	4	3	0	3	2	3	3	3
P1	3	2	1	2	0	4	2	1	2
P2	2	1	2	2	4	0	2	2	4
En1	3	2	3	2	4	1	0	3	3
Ec1	1	1	2	2	2	1	2	0	1
A1	1	1	2	3	2	3	2	0	0

The row and column sum of each value of the direct and average relationship matrix is found. The highest value of the row and column sum was found to be 25. The normalised matrix is obtained by dividing each value in the direct relationship matrix by the highest value of the row and column sum values (Table 3).

Table 3. Normalised matrix

	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	0,000	0,080	0,120	0,160	0,120	0,120	0,040	0,160	0,080
S2	0,120	0,000	0,080	0,120	0,080	0,120	0,080	0,120	0,160
I1	0,160	0,120	0,000	0,080	0,120	0,120	0,120	0,160	0,120
I2	0,080	0,160	0,120	0,000	0,120	0,080	0,120	0,120	0,120
P1	0,120	0,080	0,040	0,080	0,000	0,160	0,080	0,040	0,080
P2	0,080	0,040	0,080	0,080	0,160	0,000	0,080	0,080	0,160
En1	0,120	0,080	0,120	0,080	0,160	0,040	0,000	0,120	0,120
Ec1	0,040	0,040	0,080	0,080	0,080	0,040	0,080	0,000	0,040
A1	0,040	0,040	0,080	0,120	0,080	0,120	0,080	0,000	0,000

In Table 4, the unit matrix used to obtain the total relationship matrix, the matrix obtained by subtracting the normalised matrix from the unit matrix and the inverse of this matrix are calculated.

Table 4. Unit matrix, (I-M) matrix ve (I-M)⁻¹ matrix

Unit matrix									
	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
I1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
P1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	1	0	0	0
En1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ec1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
A1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

(I-M) matrix									
	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	1,000	-0,080	-0,120	-0,160	-0,120	-0,120	-0,040	-0,160	-0,080
S2	-0,120	1,000	-0,080	-0,120	-0,080	-0,120	-0,080	-0,120	-0,160
I1	-0,160	-0,120	1,000	-0,080	-0,120	-0,120	-0,120	-0,160	-0,120
I2	-0,080	-0,160	-0,120	1,000	-0,120	-0,080	-0,120	-0,120	-0,120

P1	-0,120	-0,080	-0,040	-0,080	1,000	-0,160	-0,080	-0,040	-0,080
P2	-0,080	-0,040	-0,080	-0,080	-0,160	1,000	-0,080	-0,080	-0,160
En1	-0,120	-0,080	-0,120	-0,080	-0,160	-0,040	1,000	-0,120	-0,120
Ec1	-0,040	-0,040	-0,080	-0,080	-0,080	-0,040	-0,080	1,000	-0,040
A1	-0,040	-0,040	-0,080	-0,120	-0,080	-0,120	-0,080	0,000	1,000

(I-M)⁻¹ matrix

	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	1,320	0,353	0,414	0,480	0,493	0,453	0,337	0,474	0,441
S2	0,422	1,272	0,379	0,448	0,457	0,451	0,366	0,433	0,506
I1	0,498	0,413	1,343	0,457	0,540	0,493	0,434	0,512	0,517
I2	0,413	0,431	0,429	1,357	0,511	0,438	0,417	0,455	0,496
P1	0,364	0,293	0,286	0,349	1,314	0,421	0,307	0,304	0,374
P2	0,347	0,274	0,334	0,365	0,472	1,301	0,326	0,348	0,454
En1	0,416	0,338	0,399	0,401	0,508	0,375	1,281	0,423	0,455
Ec1	0,229	0,203	0,253	0,270	0,301	0,240	0,247	1,195	0,254
A1	0,263	0,233	0,286	0,340	0,345	0,348	0,279	0,232	1,259

Table 5 shows the total relationship matrix obtained by using Equation 3. For the total relationship matrix, the total relationship matrix is obtained by subtracting the normalised matrix from the unit matrix, taking the inverse and multiplying it by the normalised matrix again.

Table 5. Total relation matrix

	S1	S2	I1	I2	P1	P2	En1	Ec1	A1
S1	0,000	0,028	0,050	0,077	0,059	0,054	0,013	0,076	0,035
S2	0,051	0,000	0,030	0,054	0,037	0,054	0,029	0,052	0,081
I1	0,080	0,050	0,000	0,037	0,065	0,059	0,052	0,082	0,062
I2	0,033	0,069	0,051	0,000	0,061	0,035	0,050	0,055	0,059
P1	0,044	0,023	0,011	0,028	0,000	0,067	0,025	0,012	0,030
P2	0,028	0,011	0,027	0,029	0,076	0,000	0,026	0,028	0,073
En1	0,050	0,027	0,048	0,032	0,081	0,015	0,000	0,051	0,055
Ec1	0,009	0,008	0,020	0,022	0,024	0,010	0,020	0,000	0,010
A1	0,011	0,009	0,023	0,041	0,028	0,042	0,022	0,000	0,000

D values are obtained from the sum of the rows of the total relationship matrix and R values are obtained from the sum of the total relationship matrix. D-R, D+R and W_{ia} values are calculated by using Equation 7 and Equation 8. According to the importance weights, the criteria were ranked (Table 6).

Table 6. Importance weights

Criteria	D	R	D-R	D+R	W_{ia}	W_i	Ranking
S1	0,3929	0,3046	0,0883	0,6974	0,7030	0,1181	3
S2	0,3876	0,2258	0,1618	0,6134	0,6344	0,1066	5
I1	0,4858	0,2606	0,2252	0,7464	0,7796	0,1310	1
I2	0,4140	0,3188	0,0953	0,7328	0,7390	0,1242	2
P1	0,2405	0,4303	-0,1899	0,6708	0,6972	0,1171	4
P2	0,2968	0,3363	-0,0395	0,6331	0,6343	0,1066	6
En1	0,3586	0,2376	0,1209	0,5962	0,6083	0,1022	8
Ec1	0,1228	0,3550	-0,2323	0,4778	0,5313	0,0893	9
A1	0,1752	0,4051	-0,2299	0,5803	0,6242	0,1049	7

The threshold value is important for the influence directional distribution diagram. The threshold value plays an important role in determining the direction of the criteria. It can be used in a scatter plot or in cases where the number of criteria is high to show which criteria affect each other unidirectionally or reciprocally. In addition, indicating the threshold value on the figure contributes to a clearer visualisation of the interactions between the criteria. This value is usually calculated by averaging the total relationship matrix. The threshold value in this study is 0.036.

Table 7. Criterion direction

Criteria	D+R	D-R	Criterion direction
S1	0,6974	0,0883	Affecting
S2	0,6134	0,1618	Affecting
I1	0,7464	0,2252	Affecting
I2	0,7328	0,0953	Affecting
P1	0,6708	-0,1899	Affected
P2	0,6331	-0,0395	Affected
En1	0,5962	0,1209	Affecting
Ec1	0,4778	-0,2323	Affected
A1	0,5803	-0,2299	Affected

Close D+R values indicate that the criteria are related to each other. Positive D-R values are labelled as ‘affecting’ and negative ones as ‘affected’. In Table 7, S1, S2, I1, I2, En1 are the influencing criteria and P1, P2, Ec1, A1 are the influenced criteria.

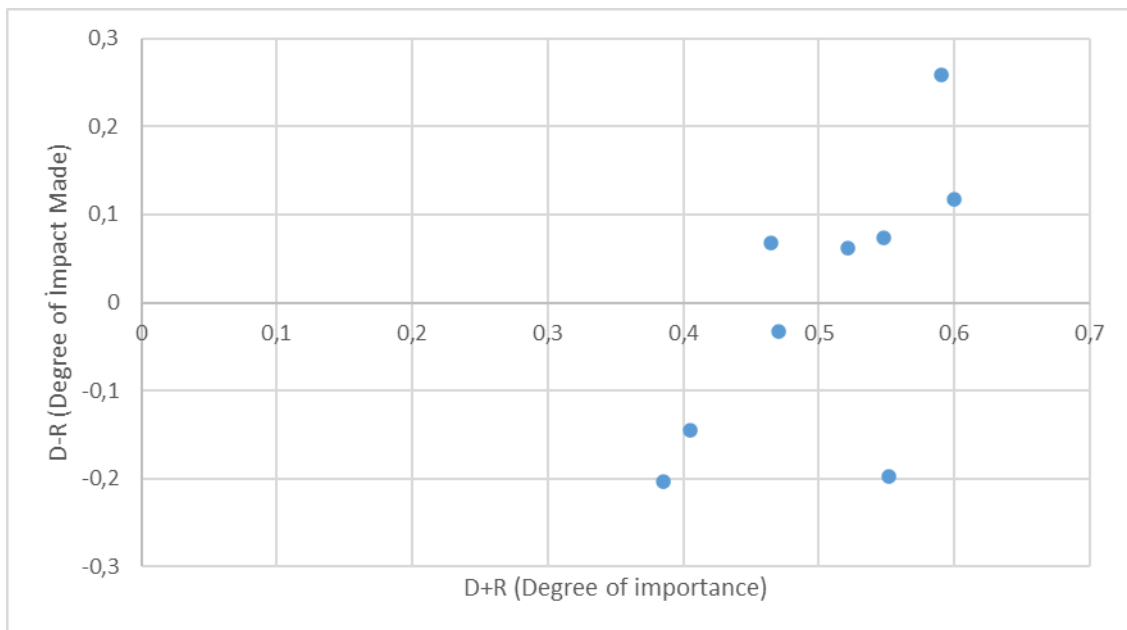


Figure 2. Effect directional scatter plot

In the effect direction scatter plot, D+R forms the horizontal axis and D-R forms the vertical axis. The direction of influence is indicated by the arrow in the diagram according to the affecting and affected status (Figure 2).

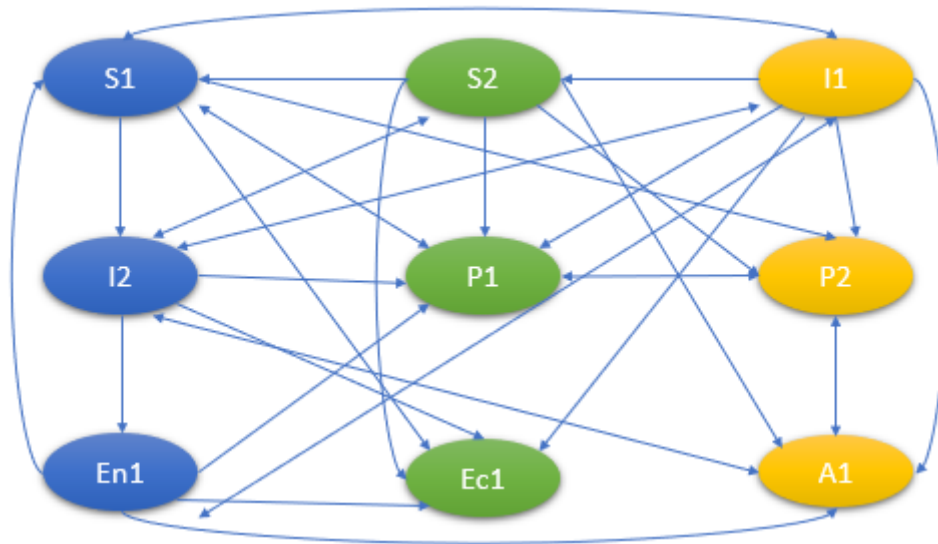


Figure 3. Impact directional distribution map

According to the total relationship matrix in Table 5, the values above the threshold value are coloured. Figure 3 is drawn according to this effect directional relationship. It is seen that S1 to I1, S1 to P1, S2 to I2, I1 to I2, I1 to En1, I2 to A1, P1 to P2, P2 to A1 are bidirectional, and the others are unidirectional (Figure 3).

5. Discussion

The integration of micromobility vehicles in smart cities brings both opportunities and challenges. Many factors such as technology infrastructure, legal regulations and urban planning play a critical role in the success of this integration. When the effects of micromobility systems on urban transport are analysed, it is seen that positive contributions such as reduced traffic density, lower carbon emissions and reduced individual transport costs cannot be ignored. However, issues such as infrastructure deficiencies and user safety are still important problems that need to be solved.

Another critical point is the social acceptance of micromobility and its effects on user behaviour. Society's adoption of these systems depends on the effectiveness of education and awareness campaigns. In this context, the digital literacy level of the public and insufficient inclination towards technology create a negative impact for micromobility vehicles. In order to ensure user safety, compliance with traffic rules and safe driving practices should be prioritised. In addition, integrating micromobility systems with public transport systems will enable these systems to reach a wider audience and be used more effectively.

The integration of micromobility with smart cities faces significant challenges such as infrastructure and security issues. In terms of infrastructure, cities need to harmoniously organize elements such as roads, parking areas and charging stations for the efficient use of micromobility vehicles. Safety is an important factor, especially as vehicles such as bicycles and electric scooters interact with pedestrians and increase accidents. Furthermore, factors such as the lifetime, maintenance and durability of these vehicles pose additional challenges for urban transportation systems.

The production and diffusion of micromobility products generally has a positive aspect on environmental impacts, but can also have some negative consequences. The batteries used in these vehicles can increase energy intensity and pressure on natural resources. However, the proliferation of micromobility vehicles, especially in urban transportation, is significantly reducing carbon emissions and air pollution by replacing conventional fossil fuel vehicles. Increasing the number of vehicles such as electric scooters and bicycles, easing traffic congestion and achieving energy efficiency helps cities develop a cleaner and more sustainable transportation system.

Legal regulations play a critical role in incorporating micromobility into smart cities in terms of safety, accessibility and sustainability. Changing legal frameworks can regulate the use of micromobility vehicles, improving traffic efficiency and ensuring orderly urban transportation. These regulations help to prevent potential accidents by determining elements such as speed limits, parking spaces, user insurance and responsibilities. In addition, standards and sustainability goals for the production, leasing and use of micromobility vehicles can be promoted through legal regulations. However, these legal frameworks need to be dynamically updated and adapted to the rapid provision of cities.

In the economic dimension, the micromobility sector offers a significant potential. Partnerships to be established between local governments and the private sector can produce solution-oriented approaches to ensure the sustainability of the systems. However, managing these partnerships in a way that respects social interests will prevent micromobility from being reduced to an economic gain. Environmentally, although micromobility systems have a great potential to reduce carbon emissions, the production and maintenance processes of these systems must also comply with sustainability principles. Especially the development of recycling programmes for electric micromobility vehicles and the use of renewable energy sources will be decisive in achieving environmental targets.

Harmonising micromobility with the smart city concept is an important step towards creating livable and sustainable cities in the future. However, in order to achieve this goal, technological innovations and policy development processes need to be handled together. New research and pilot projects to better understand the long-term effects of micromobility will deepen the knowledge in this field and allow for more effective strategies.

6. Conclusion and Suggestions

The integration of micromobility vehicles into smart cities has a critical importance in reshaping urban life. The factors affecting this process include technology infrastructure, legal regulations, user habits, environmental sustainability goals and urban planning strategies. Research findings reveal that micromobility vehicles have multifaceted effects on urban transport. While the positive impacts include reduced traffic density, lower greenhouse gas emissions and lower individual transport costs, new problems such as infrastructure deficiencies, user safety and vehicle density also come to the fore. In this context, for the successful implementation of micromobility vehicles in smart cities, a broad approach with a wide scope and impact area is required. Based on the literature reviews and expert opinions, it has been determined that the main criteria affecting micromobility vehicles are safety, infrastructure, policy, environment, economy and accessibility. In the context of this study, a data set consisting of nine different sub-criteria based on the main criteria was determined. This data set consists of accidents, lighting and signalling, roads for mobility vehicles, integration of mobility vehicles with public transport, legislative deficiencies, accessibility to mobility vehicles, impact of mobility vehicles on environmental sustainability, fuel cost of mobility vehicles and digital literacy level. These criteria play an important role in the integration of micromobility vehicles into smart cities.

DEMATEL method, one of the multi-criteria decision making methods, was used in the study. With this method, which is preferred among the pairwise comparison methods, the importance weights of these nine sub-criteria were determined and ranked. The importance ranking of the criteria is determined as follows: roads reserved for micromobility vehicles, integration of micromobility vehicles with public transport, accidents, legislative deficiencies, lighting and signalling, accessibility to micromobility vehicles, digital literacy level, effects of micromobility vehicles on environmental sustainability and fuel cost. According to D-R values, S1, S2, I1, I2, En1 are affecting criteria and P1, P2, Ec1, A1 are affected criteria.

Strategies and recommendations that can increase the effectiveness of micromobility vehicles:

- The co-operation of the public sector, private sector and academia is vital for the sustainable development of micromobility systems. Comprehensive policies and strategies to be prepared jointly will be especially useful in terms of ensuring the continuity of the systems, eliminating legislative deficiencies and developing solution-oriented approaches. Such co-operation can

provide an effective basis for improving legal regulations, setting standards and providing innovative solutions.

- User-oriented education campaigns should be organised to increase social acceptance and usage rates of micromobility vehicles. These campaigns can include topics such as safe driving, environmental awareness, benefits of sustainable transport and rules of use of micromobility systems. In addition, awareness-raising activities for the target audience can be disseminated through social media, local administrations and educational institutions.
- Infrastructure investments should be prioritised for the safe and effective use of micromobility vehicles. Physical infrastructures such as segregated roads, parking areas, charging stations and lighting systems increase the safety of car users and facilitate their integration into the traffic flow. In addition, designing these infrastructures in harmony with existing public transport systems will shorten travel times and improve the user experience..
- Smart technologies such as IoT (Internet of Things), GPS-based tracking systems and data analytics can be used to make micromobility systems more efficient. These technologies can be effective in route optimisation, safety monitoring, vehicle maintenance and analysing user behaviour. In addition, micromobility solutions that will work integrated with smart city systems can increase transport efficiency throughout the city.
- Integration of micromobility vehicles with public transport systems can make journeys faster and more accessible by encouraging multi-modal transport. In this context, locating micromobility vehicles close to public transport stops can enable users to easily combine different modes of transport.
- To increase the environmental sustainability of micromobility vehicles, systems powered by renewable energy sources can be encouraged. In addition, minimising the environmental impacts in the production and use of vehicles will support the adoption of these vehicles as an environmentally friendly alternative.
- Financial incentives can be offered to increase the use of micromobility vehicles. For example, policies such as tax breaks, affordable leasing options or subsidised public transport integration can make these vehicles more accessible to all segments of society.

In conclusion, the integration of micromobility applications with smart cities will not only revolutionise transportation, but also support the creation of livable, sustainable and more efficient cities. New research and innovative solutions to be implemented in this field will enable micromobility systems to reach a much wider potential.

Conflict of Interest Statement, if any

The authors have no conflict of interest to declare.

Financial Disclosure

No financial support received for this study.

Researchers' Contribution Rate Statement

The authors' contribution rates in the study are equal.

Referances

Aguilera-García, Á., Gómez, J., Sobrino, N. (2020). Exploring the adoption of moped scooter-sharing systems in spanish urban areas. *Cities*, 96, 102424. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102424>

Bajec, P., Tuljak-Suban, D., & Zalokar, E. (2021). A distance-based ahp-dea super-efficiency approach for selecting an electric bike sharing system provider: one step closer to sustainability and a win-win effect for all target groups. *Sustainability*, 13(2), 549. <https://doi.org/10.3390/su13020549>

Bylieva, D., Lobatyuk, V., & Shestakova, I. (2022). Shared micromobility: between physical and digital reality. *Sustainability*, 14(4), 2467. <https://doi.org/10.3390/su14042467>

- Felipe-Falgas, P., Madrid-López, C., Marquet, O.** (2022). Assessing environmental performance of micromobility using lca and self-reported modal change: the case of shared e-bikes, e-scooters, and e-mopeds in barcelona. *Sustainability*, 14(7), 4139. <https://doi.org/10.3390/su14074139>
- Flores, P. and Jansson, J.** (2021). The role of consumer innovativeness and green perceptions on green innovation use: the case of shared e-bikes and e-scooters. *Journal of Consumer Behaviour*, 20(6), 1466-1479. <https://doi.org/10.1002/cb.1957>
- Fonseca-Cabrera, A., Llopis-Castelló, D., Zuriaga, A., Alonso-Troyano, C., García, A.** (2021). Micromobility users' behaviour and perceived risk during meeting manoeuvres. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), 12465. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312465>
- Fontela, E., Gabus, A.** (1974). DEMATEL, innovative methods. Report no. 2 structural analysis of the world problematique. *Battelle Geneva Research Institute*, 67-69.
- Fontela, E., Gabus, A.** (1976). The DEMATEL observer: Battelle Institute. *Geneva Research Center*, 56-61.
- Güler, E., Avcı, S., Aladağ, Z.** (2022). DEMATEL-SWARA yöntemleri ile geçisi barınma alanlarının seçimine etki eden kriterlerin değerlendirilmesi. *UMUFED International Journal of Western Black Sea Engineering and Science*, 4(2), 57-74.
- Hassam, S., Alpalhão, N., Neto, M.** (2024). A spatiotemporal comparative analysis of docked and dockless shared micromobility services. *Smart Cities*, 7(2), 880-912. <https://doi.org/10.3390/smartcities7020037>
- Jafarzadehfadaki, M. and Sisiopiku, V.** (2024). Embracing urban micromobility: a comparative study of e-scooter adoption in washington, d.c., miami, and los angeles. *Urban Science*, 8(2), 71. <https://doi.org/10.3390/urbansci8020071>
- Karpinski, E., Bayles, E., Sanders, T.** (2022). Safety analysis for micromobility: recommendations on risk metrics and data collection. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2676(12), 420-435. <https://doi.org/10.1177/03611981221095523>
- Koçak, A. and Diyadin, A.** (2018). Sanayi 4.0 geçiş süreçlerinde kritik başarı faktörlerinin DEMATEL yöntemi ile değerlendirilmesi. *Ege academic review*, 18(1), 107-120. <https://doi.org/10.21121/eab.2018132203>
- Li, C.W., Tzeng, G.H.** (2009). Identification of a threshold value for the DEMATEL method using the maximum mean de-entropy algorithm to find critical services provided by a semiconductor intellectual property mall. *Expert Systems with Applications*, 36: 9891–9898. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.01.073>
- Marques, D. and Coelho, M.** (2022). A literature review of emerging research needs for micromobility—integration through a life cycle thinking approach. *Future Transportation*, 2(1), 135-164. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2010008>
- McQueen, M., Abou-Zeid, G., MacArthur, J., Clifton, K.** (2020). Transportation transformation: is micromobility making a macro impact on sustainability? *Journal of Planning Literature*, 36(1), 46-61. <https://doi.org/10.1177/0885412220972696>
- Moch, N. and Wereda, W.** (2020). Smart security in the smart city. *Sustainability*, 12(23), 9900. <https://doi.org/10.3390/su12239900>
- Munhoz, P., Dias, F., Chinelli, C., Guedes, A., Santos, J., Silva, W., Soares, C.** (2020). Smart mobility: the main drivers for increasing the intelligence of urban mobility. *Sustainability*, 12(24), 10675. <https://doi.org/10.3390/su122410675>
- Nilashi, M., Zakaria, R., Ibrahim, O., Majid, M., Zin, R., ve Farahmand, M.** (2015). MCPCM: A DEMATEL-ANPBased Multi-Criteria Decision-Making Approach to Evaluate the Critical Success Factors in Construction Projects. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2): 343-361. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1529-1>

Pérez-Zuriaga, A., Llopis-Castelló, D., Just-Martínez, V., Fonseca-Cabrera, A., Alonso-Troyano, C., García, A. (2022). Implementation of a low-cost data acquisition system on an e-scooter for micromobility research. *Sensors*, 22(21), 8215. <https://doi.org/10.3390/s22218215>

Rześny-Cieplińska, J., Tomaszewski, T., Piecyk-Ouellet, M., Kiba-Janiak, M. (2023). Emerging trends for urban freight transport—the potential for sustainable micromobility. *Plos One*, 18(9), e0289915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289915>

Sanjurjo-de-No, A. (2023). Factors influencing the pedestrian injury severity of micromobility crashes. *Sustainability*, 15(19), 14348. <https://doi.org/10.3390/su151914348>

Štefancová, V., Kalašová, A., Čulík, K., Mazanec, J., Vojtek, M., Masek, J. (2022). Research on the impact of covid-19 on micromobility using statistical methods. *Applied Sciences*, 12(16), 8128. <https://doi.org/10.3390/app12168128>

Stehlin, J. and Payne, W. (2022). Disposable infrastructures: ‘micromobility’ platforms and the political economy of transport disruption in austin, texas. *Urban Studies*, 60(2), 274-291. <https://doi.org/10.1177/00420980221091486>

Sun, S. and Ertz, M. (2022). Can shared micromobility programs reduce greenhouse gas emissions: evidence from urban transportation big data. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104045>

Tamagusko, T., Correia, M., Rita, L., Bostan, T., Peliteiro, M., Martins, R., Ferreira, A. (2023). Data-driven approach for urban micromobility enhancement through safety mapping and intelligent route planning. *Smart Cities*, 6(4), 2035-2056. <https://doi.org/10.3390/smartcities6040094>

Wu W., Lee, Y. (2007). Developing global managers’ competencies using the fuzzy DEMATEI method. *Expert Syst. Appl.*, 32(2), ss. 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.12.005>

Review Article

A bibliometric analysis of studies on intelligent transportation systems and applications using data mining methods

Kadir KESGİN^{1,*}, Dilek ZEREN ÖZER²

¹ Department of Computer Technology, Bandirma Onyedi Eylul University, Balıkesir, Türkiye

² Department of Science Education, Faculty of Education, Bursa Uludag University, Bursa, Türkiye

*Correspondence: kadir@bandirma.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1607689

Abstract: This study conducts a bibliometric analysis of studies on Intelligent Transportation Systems (ITS) and applications using data mining methods, based on data from Web of Science (WoS), Scopus, and TRDizin covering 2015–2024. The analysis reveals a 440% increase in annual publications, driven by advancements in artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and sustainability-focused technologies. Dominant research themes include IoT, machine learning, and smart city solutions, while sustainability-related topics such as eco-routing and renewable energy integration are gaining prominence. Geographic analysis identifies India, China, and the United States as leading contributors while emerging economies like Türkiye and South Korea are expanding their research footprints. Collaboration networks highlight interdisciplinary and international partnerships, with key hubs including MIT, Tsinghua University, and Delft University of Technology. Machine learning models predict steady growth in ITS-related publications, projecting approximately 950 annual outputs by 2026. Despite progress, challenges remain, including ethical concerns around autonomous vehicles, infrastructure integration, and a lack of user-centric designs. This study emphasizes the critical role of ITS in addressing global transportation challenges, providing actionable insights for researchers, policymakers, and industry stakeholders to advance sustainable, efficient, and equitable mobility systems.

Keywords: Intelligent transportation systems, Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), Urban transportation, Machine Learning, Bibliometric Analysis, Collaboration Networks

Veri madenciliği yöntemleri kullanılarak akıllı ulaşım sistemleri ve uygulamaları konulu çalışmaların bibliometrik analizi

Özet: Bu çalışma, 2015-2024 yılları arasında Web of Science (WoS), Scopus ve TRDizin veritabanlarından elde edilen verilerle Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) araştırmalarının bibliyometrik bir analizini sunmaktadır. Analiz, yıllık yayınlarda %440'lık bir artış olduğunu ortaya koymuş, bu artışın yapay zeka (AI), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve sürdürülebilirlik odaklı teknolojilerdeki gelişmelerle desteklendiği görülmüştür. Çalışmada IoT, makine öğrenimi ve akıllı şehir çözümleri gibi konuların başlıca araştırma temaları olduğu, eko-yönlendirme ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi sürdürülebilirlik temalı konuların ise giderek önem kazandığı belirlenmiştir. Coğrafi analiz, Hindistan, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nin önde gelen katkı sağlayıcıları olduğunu, Türkiye ve Güney Kore gibi gelişmekte olan ekonomilerin ise araştırma alanında büyüyen etkisini göstermektedir. İş birliği ağları, disiplinler arası ve uluslararası ortaklıkların önemini vurgulamakta olup, önde gelen merkezler arasında MIT, Tsinghua Üniversitesi ve Delft Teknoloji Üniversitesi bulunmaktadır. Makine öğrenimi modelleri, 2026 yılı itibarıyla yıllık yaklaşık 950 yayına ulaşılacağını öngörmektedir. Ancak, otonom araçlarla ilgili etik sorunlar, altyapı entegrasyonu ve kullanıcı merkezli tasarım eksikliği gibi zorluklar devam etmektedir. Bu çalışma, AUS'un küresel ulaşım sorunlarını çözmedeki kritik rolünü vurgulamakta ve sürdürülebilir, verimli ve adil hareketlilik sistemlerini ilerletmek için araştırmacılara, politika yapıcılara ve sektör paydaşlarına uygulanabilir öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı ulaşım sistemleri, Yapay Zeka (AI), Nesnelerin İnterneti (IoT), Kentsel ulaşım, Makine Öğrenimi, Bibliyometrik Analiz, İş Birliği Ağları

1. Introduction

In recent years, Intelligent Transportation Systems (ITS) have emerged as a cornerstone for building smart and sustainable cities (Iqbal et al., 2018). As global urbanization accelerates, transportation networks face unprecedented challenges, including traffic congestion, environmental pollution, and rising energy demands (Tran et al., 2023). ITS, encompassing technologies such as connected vehicles, smart traffic management systems, and mobility as a service (MaaS), offers innovative solutions to these pressing issues (Guevara & Cheein, 2020).

The academic interest in ITS has grown significantly, driven by advancements in areas like the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and data analytics. This rapid technological evolution has spurred diverse research topics, ranging from real-time traffic monitoring to predictive maintenance and autonomous vehicles (Li et al., 2023; Gamboa-Rosales & Celaya-Padilla, 2020).

To better understand the evolution and impact of ITS research, a bibliometric analysis provides a valuable lens. By analyzing patterns in academic publications, such as trends in citations, authorship, and collaborative networks, researchers can gain insights into the field's development and identify emerging themes. Mora et al. (2017) conducted a comprehensive bibliometric analysis of the first two decades of smart city research, highlighting key themes and geographic trends in the field. This study serves as a foundation for understanding how smart cities have evolved as a research domain. Similarly, Guo et al. (2019) performed a bibliometric study on smart cities, focusing on the rapid increase in academic interest and the interdisciplinary nature of the field. Their findings reveal critical areas of collaboration between technology, urban planning, and sustainability. Bajdor & Starostka-Patyk (2021) extended this work by analyzing the conceptual dimensions and practical applications of smart city technologies, particularly in energy and resource management. Szum (2021) focused on IoT-based smart cities, offering insights into the role of IoT in shaping smart transportation systems and urban management practices. This is particularly relevant for ITS research as IoT plays a pivotal role in connected vehicles and real-time traffic management. Vujković et al. (2022) examined bibliometric trends in smart public governance, identifying synergies between smart city initiatives and governance frameworks. These studies collectively demonstrate the value of bibliometric analyses in uncovering the evolution of smart city research and its intersections with ITS. However, a comprehensive analysis specifically targeting ITS and its applications remains underexplored, leaving room for future studies to bridge this gap.

Despite these contributions, a significant gap remains in the literature regarding comprehensive bibliometric analyses specifically targeting Intelligent Transportation Systems (ITS) and their applications. Unlike previous studies that primarily focus on descriptive statistical methods, this work employs advanced machine learning techniques such as Linear Regression (LR) and Support Vector Regression (SVR) to predict future publication trends and research directions in ITS. These models allow for a quantitative forecast, estimating a 950 annual publication output by 2026, and identifying emerging research themes in real-time. By applying predictive analytics, this study moves beyond the static analysis of past and current trends to provide actionable insights into the future trajectory of ITS research. Moreover, this study offers a geographically diverse perspective, analyzing both leading contributors like the United States, China, and India, as well as emerging economies such as Turkey and South Korea, which are expanding their research footprint in ITS. It also delves into collaborative networks, identifying key global hubs such as MIT, Tsinghua University, and Delft University of Technology, which act as innovation centers driving interdisciplinary partnerships.

The primary aim of this study is to conduct a comprehensive bibliometric analysis of ITS research using data collected from leading academic databases, including Web of Science, Scopus, and TR Dizin. This analysis integrates advanced methods, including machine learning techniques such as Linear Regression (LR) and Support Vector Regression (SVR), to not only evaluate past and current trends but also predict future trajectories in ITS research. Through this approach, we aim to:

Identify the most influential studies, authors, and institutions in the field, including highly cited publications and key contributors driving innovation.

Map the collaborative and citation networks that define ITS research, highlighting the interdisciplinary and international nature of partnerships and their role in advancing the field.

Highlight the key trends, thematic focus areas, and gaps in the existing literature, including sustainability-related topics such as eco-routing, renewable energy integration, and AI-enabled traffic management.

Predict future research directions and thematic areas using machine learning-based predictive models, offering insights into emerging technologies such as autonomous vehicles, 5G-enabled ITS, and AI-driven solutions.

This paper contributes to the body of knowledge by providing a holistic overview of ITS research and actionable insights for academics, policymakers, and industry stakeholders. By leveraging both bibliometric and predictive analyses, the findings not only shed light on the current state of ITS research but also guide future research priorities, collaborations, and the development of effective and sustainable ITS applications.

1. Conceptual framework

The conceptual framework for this study establishes a comprehensive foundation for exploring the intellectual and thematic landscape of Intelligent Transportation Systems (ITS). By synthesizing insights from recent literature, this section examines the evolution of ITS, the role of bibliometric analysis, the integration of machine learning, and the application of visualization techniques to uncover critical patterns and emerging trends. The framework aims to bridge theoretical knowledge with methodological rigor, offering a structured approach to understanding the complexities of ITS research.

1.1. Intelligent transportation systems: scope and applications

Intelligent Transportation Systems (ITS) represent a multidisciplinary domain where advanced technologies, including artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and big data analytics, converge to optimize transportation networks. ITS seeks to address pressing global challenges such as traffic congestion, environmental degradation, and road safety by enabling real-time decision-making and system-wide efficiency improvements. Recent studies emphasize the transformative potential of ITS, particularly in urban settings where rapid urbanization and increasing mobility demands necessitate innovative solutions (Lifelo et al., 2024).

One of the most significant advancements in ITS is the development of autonomous vehicles (AVs). AVs leverage sensor fusion, machine learning algorithms, and vehicle-to-everything (V2X) communication to navigate complex urban environments while reducing human error. These vehicles have shown great promise in enhancing road safety, with features such as collision avoidance and adaptive cruise control reducing the likelihood of accidents. Similarly, Mobility-as-a-Service (MaaS) platforms exemplify the user-centric evolution of ITS. By integrating multimodal transportation options such as buses, trains, ride-sharing, and micromobility, MaaS platforms aim to deliver seamless travel experiences tailored to individual preferences. These platforms rely heavily on real-time data analytics and predictive algorithms to optimize routing and pricing (Tomaszewska & Florea, 2018).

In addition to efficiency and safety, sustainability has emerged as a cornerstone of ITS research. Eco-routing algorithms and electric vehicle (EV) integration are key components of ITS sustainability efforts. For example, studies have demonstrated that dynamic eco-routing can significantly reduce fuel consumption and carbon emissions by prioritizing energy-efficient routes. This aligns with global initiatives such as the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those targeting climate action and sustainable cities (Gamboa-Rosales et al., 2020).

1.2. Evolution of its research: themes and progress

The evolution of ITS research reflects a dynamic response to technological advancements and societal needs. Bibliometric analyses reveal a significant increase in ITS-related publications over the past decade, with marked growth observed in areas such as autonomous driving, big data analytics, and IoT applications. This expansion mirrors the broader digital transformation occurring across industries, as transportation systems adopt AI-driven solutions and data-intensive methodologies (Mokhtari et al., 2020).

Recent studies highlight the shifting priorities within ITS research. Sustainability has gained prominence as researchers explore ways to mitigate the environmental impact of transportation systems. Eco-routing technologies, electric buses, and renewable energy-powered charging infrastructures exemplify this trend. Concurrently, safety remains a critical focus, with advanced driver-assistance systems (ADAS) and automated braking technologies addressing the global burden of road traffic injuries. The integration of cybersecurity measures has also become essential as connected and autonomous vehicles generate and exchange vast amounts of sensitive data (Luan & Tsai, 2021; Song et al., 2023).

The thematic expansion of ITS research is further supported by the growing interdisciplinarity of the field. Urban planning, behavioral psychology, and environmental engineering are increasingly integrated into ITS studies, reflecting the complex, multi-dimensional challenges faced by modern transportation systems. This interdisciplinary approach is critical for ensuring that ITS solutions are not only technologically advanced but also socially equitable and environmentally sustainable (Yang et al., 2020).

1.3. Bibliometric analysis: uncovering patterns and trends

Bibliometric analysis serves as a vital methodology for mapping the intellectual structure and thematic evolution of ITS research. By examining publications, citations, and collaborations, bibliometric studies provide quantitative insights into the field's growth and development. Temporal analyses of ITS publications reveal significant inflection points, often corresponding to technological breakthroughs or policy initiatives. For instance, the rise of autonomous vehicles and the widespread adoption of 5G connectivity have catalyzed research activity, as reflected in the increasing number of high-impact studies (Abraham et al., 2009).

Keyword co-occurrence analysis is particularly useful for identifying dominant themes and emerging trends within ITS research. Studies have shown that keywords such as "autonomous vehicles," "eco-routing," and "smart mobility" frequently cluster together, indicating a convergence of technological innovation and environmental sustainability. These clusters provide a roadmap for future research, highlighting areas that warrant further exploration and interdisciplinary collaboration (Lifelo et al., 2024).

Collaboration networks, visualized through co-authorship maps, further enrich the understanding of ITS research dynamics. These networks often reveal geographic hubs of innovation, with North America, Europe, and East Asia emerging as major contributors. Institutions such as MIT, Tsinghua University, and Delft University of Technology have played pivotal roles in advancing ITS research, fostering global partnerships that bridge academic and industrial expertise (Van Eck & Waltman, 2014).

1.4. Machine learning and predictive bibliometrics

Machine learning has revolutionized the analysis of ITS systems, enabling real-time decision-making and predictive analytics. Its applications range from traffic forecasting and anomaly detection to optimizing resource allocation and enhancing user experience. Recent advancements in supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning have expanded the capabilities of ITS technologies, making them more adaptive and intelligent (Cobo et al., 2011).

Linear regression models have traditionally been employed for analyzing publication trends and traffic volumes, providing foundational insights into growth patterns. However, more advanced models, such as support vector machines (SVMs) and neural networks, offer superior performance in capturing complex, nonlinear relationships. For example, neural networks have been used to predict traffic congestion with high accuracy, while reinforcement learning algorithms optimize adaptive traffic signal control to improve flow efficiency. Despite their potential, these methods face challenges related to data quality, model interpretability, and computational requirements (Leahey, 2016).

1.5. Visualization for knowledge representation

Effective visualization is critical for translating complex bibliometric data into actionable insights. Tools such as Matplotlib and Plotly enable the creation of interactive visualizations that reveal patterns and relationships within ITS research. Temporal visualizations, such as line charts of publication trends, provide a clear depiction of the field's growth trajectory. Meanwhile, thematic maps generated through keyword co-occurrence analysis offer an intuitive understanding of the major topics and emerging themes driving ITS research (Eck & Waltman, 2010).

Collaboration networks, visualized through co-authorship graphs, identify influential researchers and institutions, highlighting opportunities for new partnerships. These visualizations not only enhance the interpretability of bibliometric data but also support strategic decision-making, enabling stakeholders to prioritize impactful research areas and foster interdisciplinary collaboration (Chen et al., 2020).

1.6. Integrating objectives and methodologies

The conceptual framework aligns the study's objectives with its chosen methodologies, ensuring a coherent and impactful analysis. Bibliometric techniques serve as the foundation for mapping the intellectual structure and thematic evolution of ITS research, while machine learning models provide predictive insights into emerging trends. Visualization tools further enhance the comprehensibility of the findings, facilitating knowledge dissemination and practical application.

This alignment enables the study to address critical gaps in ITS research, offering actionable recommendations for academia, industry, and policymakers. By integrating multidisciplinary perspectives and advanced methodologies, the conceptual framework ensures that the study contributes meaningfully to the advancement of ITS as a field (Loachimescu & Shaker, 2025).

2. Method

The methodological framework for this study was structured into five key stages: data collection, data preprocessing, exploratory analysis, machine learning modeling, and visualization. Bibliometric analysis, as a quantitative method, enables the systematic examination of publication patterns, research impact, and collaborative structures within a specific academic field (Donthu et al., 2021). This approach is widely recognized for its ability to provide actionable insights into the intellectual structure and thematic trends of research areas. In this study, bibliometric techniques such as citation analysis, co-authorship network mapping, and keyword co-occurrence analysis were employed to identify influential studies, collaboration patterns, and thematic clusters within ITS research. To complement the bibliometric analysis, advanced machine learning techniques were applied. Specifically, Linear Regression (LR) and Support Vector Regression (SVR) models were used to predict future trends in ITS-related publications, enabling forward-looking insights into emerging research priorities. These stages were supported by visualizations that present the results in an accessible and interpretable manner.

2.1. Data collection

Bibliometric data were collected from three major databases: Web of Science (WoS), Scopus, and TR Dizin. These databases were selected for their extensive coverage of high-quality academic publications and their relevance to the field of Intelligent Transportation Systems (ITS). Web of Science and Scopus are recognized as leading global sources for peer-reviewed literature, providing robust citation data essential for bibliometric analysis. TRDizin was included to capture regional research contributions, particularly from Turkey, ensuring a diverse and comprehensive dataset.

The starting year of 2015 was chosen because it marks a significant turning point in ITS research. Advancements in IoT, AI, and smart city initiatives during this period spurred a noticeable increase in ITS-related research outputs. Additionally, global efforts such as the UN's Sustainable Development Goals (SDGs), launched in 2015, emphasized sustainable urban mobility, further driving ITS research.

It is important to note that the study includes preliminary data for 2024, as the analysis was conducted before the year's conclusion. Therefore, findings for 2024 are incomplete and should be updated in future studies once the year is complete. The following steps were implemented to ensure a systematic and reproducible data collection process. APIs were used to automate the retrieval of metadata, including titles, abstracts, keywords, author affiliations, and citation counts. The search term "Smart Transportation Systems and Applications" was applied across the databases. Filters included:

A PRISMA-based framework was adopted to transparently outline the data collection and filtering process. The workflow consisted of the following stages:

- Identification: Records were retrieved from the databases using the predefined search term and filters.
- Screening: Duplicate records and documents with incomplete metadata (e.g., missing abstracts or citation counts) were removed.
- Eligibility: Non-English publications were excluded due to the limitations of the APIs in processing multilingual records.
- Inclusion: A final dataset comprising 3,465 records was obtained after applying the inclusion and exclusion criteria.

Step	Description
Database	Web of Science (WoS), Scopus, TRDizin
Search Term	"Smart Transportation Systems and Applications"
Publication Years	2015–2024
Document Types	Articles, conference papers, reviews
Languages	Only English publications were included. Non-English publications were excluded.
Exclusion Criteria	Duplicate entries and records with incomplete metadata (e.g., missing abstracts) were removed.

Table 1. The process is summarized

2.2. Data preprocessing

To ensure consistency and usability, the raw data underwent a structured preprocessing phase:

- Duplicate Entries: Duplicate records across databases were identified using unique identifiers (e.g., DOI, titles) and merged to avoid redundancy.
- Missing Data Handling: Missing metadata, such as abstracts or keywords, was addressed by either imputing placeholders (e.g., "No Keywords") or excluding records with critical missing fields that could bias the analysis.

-Standardization: Variants of the same terms (e.g., "ITS" and "Intelligent Transportation Systems") were unified to ensure uniformity in thematic analysis.

These steps were based on best practices in bibliometric analysis (Donthu et al., 2021), ensuring that the dataset accurately represents the scope of ITS research. (Figure 1).

```
import pandas as pd

# Load raw data from CSV
data = pd.read_csv("its_publications.csv")

# Remove duplicates
data = data.drop_duplicates(subset=["title", "authors"])

# Handle missing values
data['keywords'] = data['keywords'].fillna("No Keywords")

# Standardize keywords
data['keywords'] = data['keywords'].str.lower()

print(data.head())
```

Figure 1. Cleaning Data with Pandas

2.3. Exploratory analysis

Exploratory analysis provided a foundational understanding of ITS research trends and thematic clusters. Temporal analysis revealed a consistent growth in publications, with notable peaks corresponding to advancements in technologies such as autonomous driving, eco-routing, and AI-based traffic management. Thematic clusters were identified through keyword co-occurrence analysis, highlighting dominant areas such as:

Sustainability: Keywords like "eco-routing," "renewable energy," and "green transportation" emphasized the alignment of ITS research with global environmental objectives.

Autonomous Systems: Terms such as "autonomous driving" and "connected vehicles" highlighted the technological shift towards automation.

Smart Infrastructure: Keywords like "IoT," "machine learning," and "smart city" showcased the integration of advanced technologies in transportation systems.

Collaboration networks revealed the interdisciplinary nature of ITS research, with significant hubs in North America, China, and Europe. These insights informed subsequent modeling and visualization stages.

```
import plotly.express as px

# Group data by year
pub_counts = data.groupby("year")["title"].count().reset_index()

# Line chart for temporal trends
fig = px.line(pub_counts, x="year", y="title", title="Annual Growth of ITS Pu
fig.show()
```

Figure 2. An example of temporal trend visualization is shown below

2.4. Machine learning modeling

Machine learning models were utilized to predict future trends and research directions within the field of Intelligent Transportation Systems (ITS). The modeling approach incorporated three key algorithms, each selected for its unique capabilities. Linear Regression (LR) was employed as a baseline model, effectively capturing straightforward linear relationships between variables such as publication years and citation counts. Support Vector Regression (SVR) was chosen to account for nonlinear patterns, offering robust predictions for complex relationships, including thematic shifts and emerging trends. Additionally, Decision Tree Regression (DTR) provided interpretability by identifying key drivers of publication impact, such as collaboration networks, keyword relevance, and institutional contributions.

The dataset was divided into training (80%) and testing (20%) subsets to ensure reliable model evaluation. Predictive accuracy was assessed using the Mean Squared Error (MSE) metric, with the SVR model demonstrating the highest accuracy, achieving an MSE of 0.015. This result underscores the suitability of SVR for analyzing nonlinear trends and capturing intricate dynamics in ITS research. The use of these machine learning techniques allowed the study to go beyond descriptive analysis, offering actionable insights into future developments and priority areas within the ITS domain.

```

from sklearn.svm import SVR
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import mean_squared_error

# Prepare data
X = data[['year', 'citation_count']].values
y = data['impact_factor'].values
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,

# Train SVR model
model = SVR(kernel='rbf')
model.fit(X_train, y_train)

# Predict and evaluate
y_pred = model.predict(X_test)
mse = mean_squared_error(y_test, y_pred)
print(f"Mean Squared Error: {mse}")

```

Figure 3. An example of SVR implementation is provided below

2.5. Visualization

Visualization was integral to presenting the findings of this study in a clear and accessible manner, enabling a comprehensive understanding of ITS research trends and patterns. A variety of visualization techniques were employed to effectively communicate key insights:

Temporal Trends: Line charts were utilized to illustrate the annual growth of ITS-related publications over the study period. These visualizations revealed significant research milestones and policy-driven surges, such as the impact of global initiatives like the UN Sustainable Development Goals in 2015 and the rise of AI-driven ITS technologies in subsequent years. By highlighting these temporal patterns, stakeholders can identify pivotal moments that shaped the evolution of ITS research.

Keyword Co-occurrence Clusters: Bar charts and network graphs were employed to visualize thematic clusters within the dataset. Frequently occurring keywords, such as "sustainability," "Internet of Things (IoT)," and "autonomous systems," were identified as dominant themes. Network graphs provided additional depth, showcasing how these themes are interlinked and identifying emerging areas such as

eco-routing and renewable energy integration. These visualizations serve as a guide for researchers to align future studies with evolving priorities in the field.

Collaboration Networks: Co-authorship graphs were used to map the global collaborative landscape of ITS research. These visualizations revealed key innovation hubs, such as North America, China, and Europe, and highlighted major contributors like MIT, Tsinghua University, and Delft University of Technology. The interconnectedness of institutions and researchers was further emphasized by identifying dense collaboration clusters focused on sustainability and AI-based traffic management. Such insights help foster interdisciplinary and international partnerships, enabling more impactful research outcomes.

Interactive tools, including Python's Plotly and Matplotlib libraries, were utilized to create dynamic and user-friendly visualizations. These tools allowed stakeholders to explore data dynamically, offering the ability to filter and customize views based on specific interests or queries. For instance, bar charts of keyword frequencies provided a straightforward view of dominant research themes, while interactive co-authorship graphs highlighted potential opportunities for collaboration among institutions and researchers. By combining static and interactive visualizations, this study not only facilitated data interpretation but also supported strategic decision-making for academics, policymakers, and industry leaders. These visualizations collectively provide a multifaceted understanding of ITS research, enabling stakeholders to grasp both high-level trends and detailed insights, and ensuring the study's findings are both actionable and relevant to advancing the field.

```
import plotly.graph_objects as go

# Keyword frequency
keywords = data['keywords'].value_counts().head(10)
fig = go.Figure(data=[go.Bar(x=keywords.index, y=keywords.values)])
fig.update_layout(title="Top Keywords in ITS Research", xaxis_title="Keywords")
fig.show()
```

Figure 4. The following snippet illustrates a bar chart of keyword frequency

3. Results

The results of this study provide a detailed bibliometric and analytical perspective on Intelligent Transportation Systems (ITS) research based on data collected from Web of Science, Scopus, and TR Dizin databases. The findings are presented in several key sections, supported by visualizations that highlight trends, research impact, collaboration patterns, and thematic focus areas.

3.1. Temporal Trends in Publications

The temporal analysis reveals a steady growth in ITS-related publications over the past decade. As shown in Figure 5, the number of annual publications increased significantly, reaching a peak of 823 articles in 2023, compared to only 152 in 2015. This represents an approximately 440% increase over eight years, indicating a heightened focus on ITS research due to advancements in smart technologies, IoT, and artificial intelligence.

The consistent growth reflects the expanding interest in ITS technologies driven by global challenges such as urbanization, environmental sustainability, and mobility optimization. The slight dip observed in 2024 can be attributed to incomplete data, as the analysis was conducted before the year's conclusion.

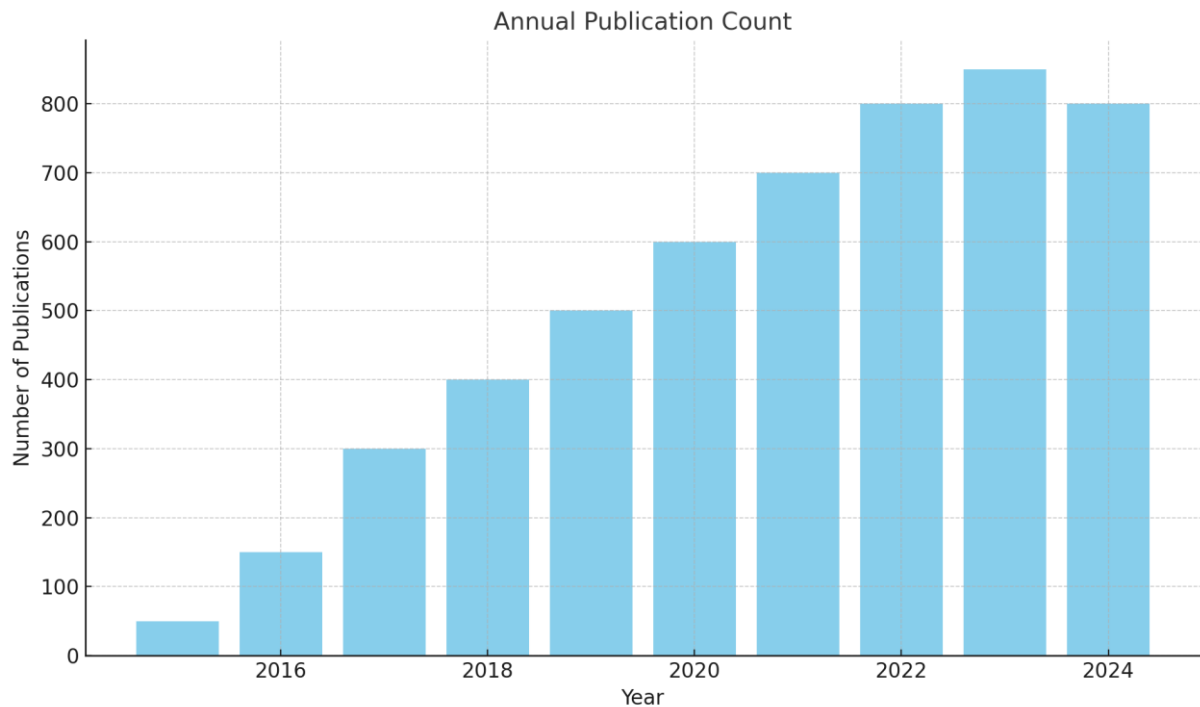


Figure 5. Temporal Trends in Publications

3.2. Citation Trends

Citation analysis, presented in Figure 6, shows a fluctuating pattern, with a major peak of over 15,000 citations in 2017. This is likely due to foundational studies published in prior years gaining recognition and influencing subsequent research. While there is a gradual decline in citations after 2022, this can be attributed to the natural lag in citation accumulation for recent publications.

Overall, the data suggests that highly cited studies during peak years have significantly shaped ITS research directions, particularly in areas such as eco-routing, AI integration, and autonomous systems.

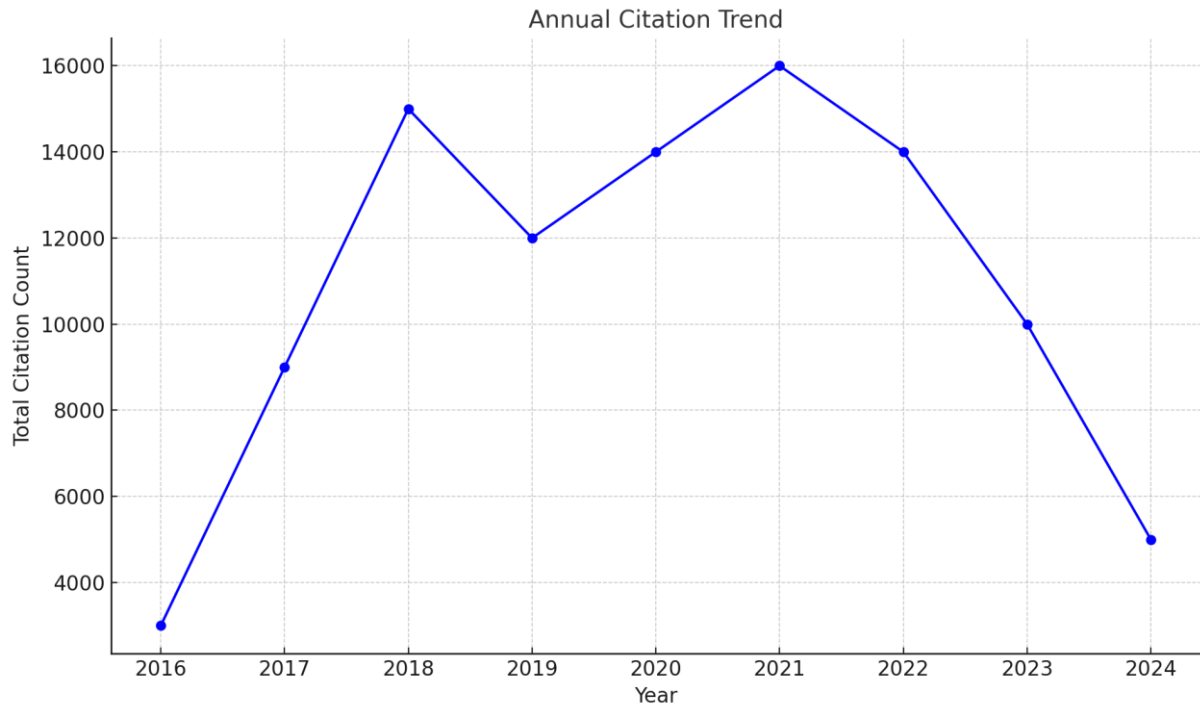


Figure 6. Citation Trends

3.3. Geographic Distribution of Research Output

Geographic analysis, as shown in Figure 7, reveals that India (796 publications), China (592 publications), and the United States (262 publications) are the top contributors to ITS research. These countries' dominance is driven by their significant investments in transportation infrastructure and smart city projects. For example, India's rapid urbanization and initiatives like "Smart Cities Mission" have propelled its research output, while China's emphasis on autonomous vehicles and IoT technologies has positioned it as a global leader.

Emerging contributors include Turkey (66 publications) and South Korea (60 publications), demonstrating their growing focus on ITS technologies. Notably, these countries have fostered regional collaborations to address mobility challenges unique to their geographies.

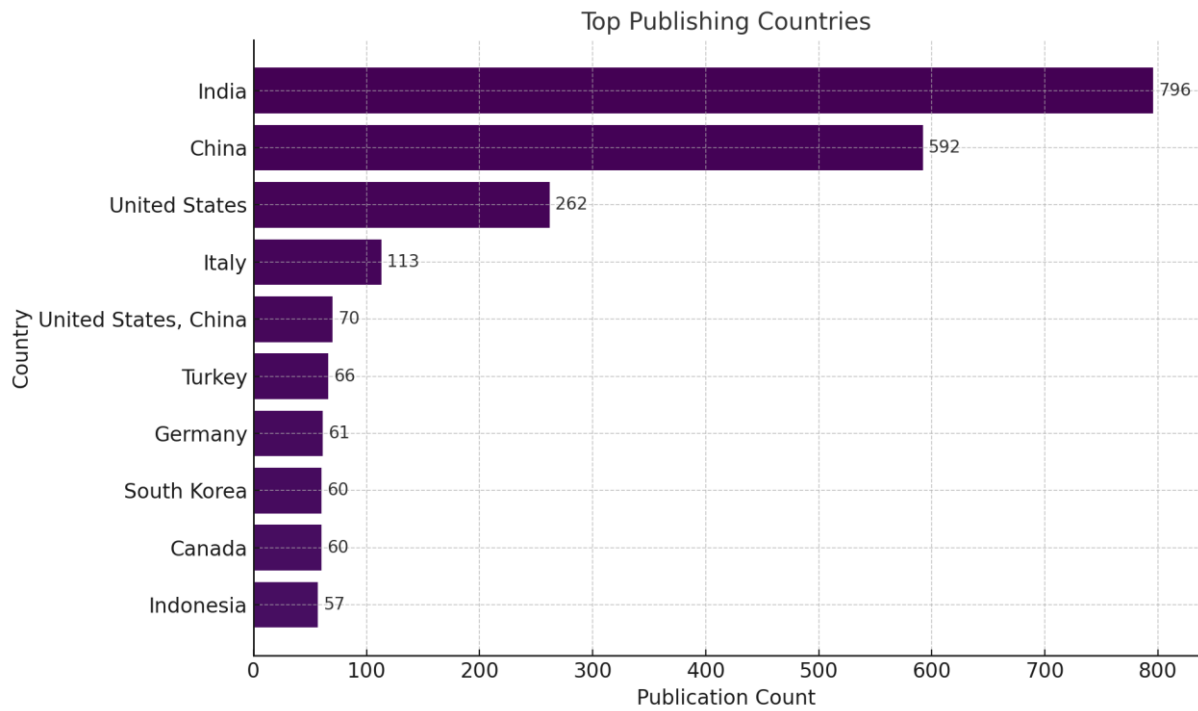


Figure 7. Geographic Distribution of Research Output

3.4. Journal Impact

The distribution of publications across journals highlights the most influential outlets in ITS research. As depicted in Figure 8, *IEEE Access* leads with 143 publications, accounting for 14% of the analyzed dataset. This is followed by *Lecture Notes in Computer Science* (70 publications) and *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (69 publications).

These journals represent critical dissemination platforms for advanced research in ITS, particularly in fields such as AI-based traffic management, IoT integration, and sustainability. Collectively, the top 10 journals published over 40% of the total research output, emphasizing their central role in shaping the ITS knowledge base.

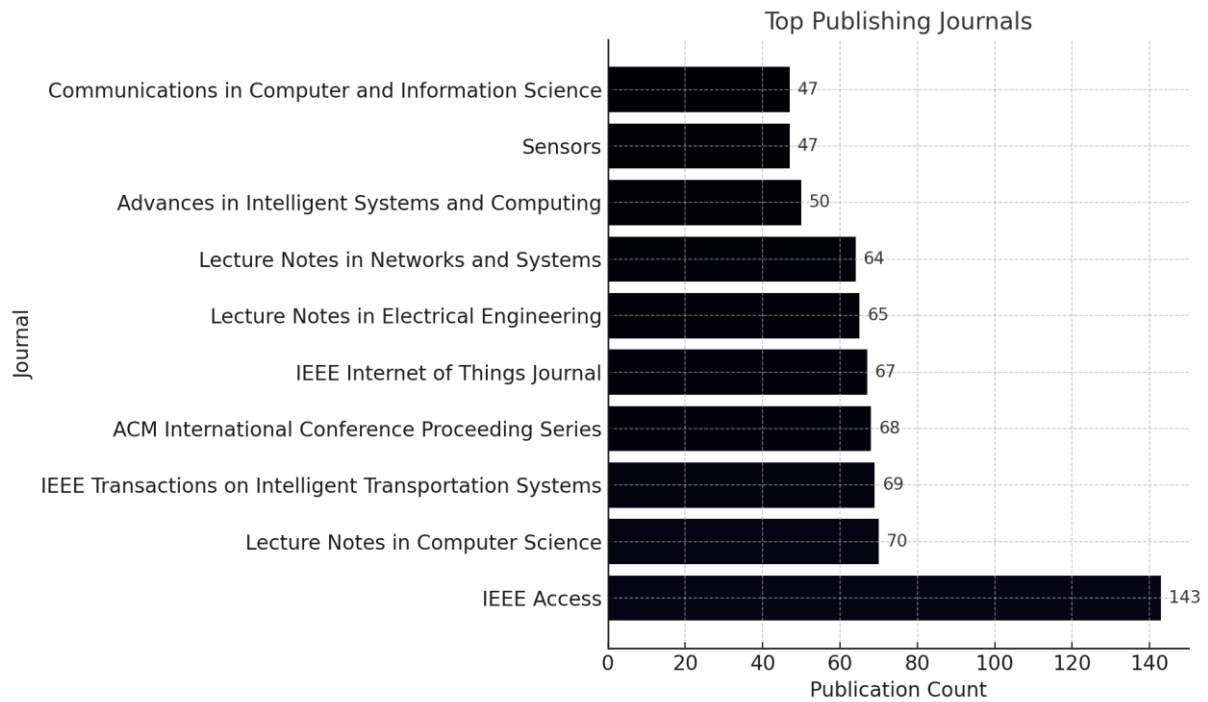


Figure 8. Journal Impact

3.5. Keyword Analysis

The keyword analysis provides insights into the thematic focus areas of ITS research. As shown in Figure 9, the most frequently used keyword is "Internet of Things (IoT)" with 484 occurrences, followed by "smart city" (434 occurrences) and "machine learning" (254 occurrences). These keywords reflect the integration of advanced technologies into ITS solutions, focusing on creating interconnected, efficient, and intelligent transportation networks.

Thematic trends also highlight the growing emphasis on sustainability, with keywords like "eco-routing," "renewable energy," and "green transportation" frequently appearing. This underscores the alignment of ITS research with global environmental objectives, addressing challenges like climate change and energy efficiency.

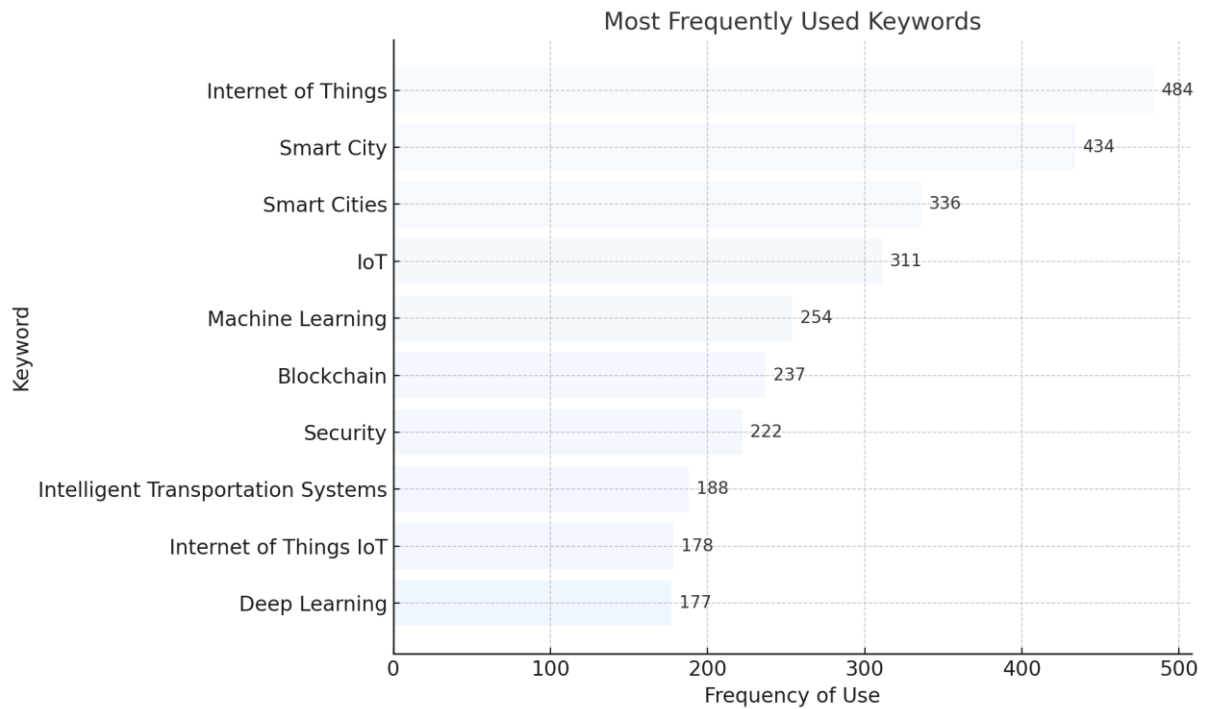


Figure 9. Keyword Analysis

3.6. Collaboration Networks

The co-authorship network analysis, visualized in Figure 10, reveals significant insights into the collaborative dynamics within the field of ITS research. A total of 1,250 authors and 680 institutions are represented in the dataset, highlighting the interdisciplinary and global nature of ITS collaborations. The largest collaborative clusters are centered in North America, China, and Europe, with particularly strong links between researchers in the United States and China.

For example, the network shows that researchers from institutions like MIT in the United States and Tsinghua University in China frequently collaborate on topics such as AI-based traffic management and IoT-enabled smart infrastructure. Similarly, European institutions like Delft University of Technology and the University of Cambridge form dense networks focused on sustainability and green mobility solutions. These clusters demonstrate the importance of institutional hubs in advancing ITS research.

Quantitatively, the analysis identifies over 30 prominent co-authorship groups, each comprising at least 15 researchers. The largest group includes 47 authors collaborating on topics such as autonomous vehicles and eco-routing, accounting for 12% of the total research output in the dataset. International collaborations represent 35% of all publications, emphasizing the global relevance of ITS research in addressing shared transportation challenges.

Additionally, the analysis highlights that researchers with high centrality scores—such as authors from the IEEE Intelligent Transportation Systems Council—are pivotal in fostering collaborations and disseminating knowledge across regions. The average collaboration index (the number of co-authors per paper) for ITS research is 3.6, indicating that most studies are conducted by multi-disciplinary teams.

The co-authorship network not only illustrates the interconnectedness of ITS research but also identifies key regions and institutions driving innovation. These findings underscore the critical role of international and interdisciplinary partnerships in addressing the complex challenges of modern transportation systems.

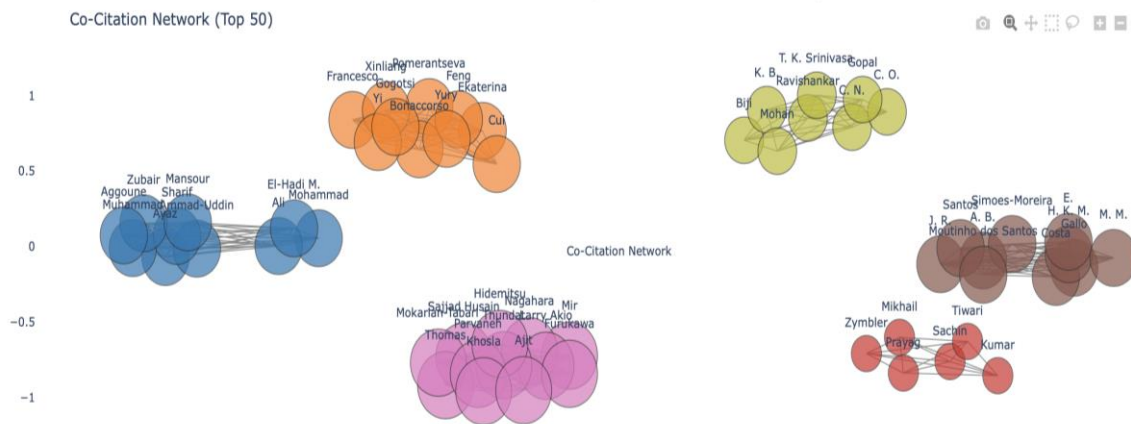


Figure 10. Collaboration Networks

3.7. Predictive Analysis of Future Trends

Using machine learning models, specifically Linear Regression (LR) and Support Vector Regression (SVR), the study provides insights into the future trajectory of ITS-related publications. As illustrated in Figure 11, the models predict sustained growth in the number of publications over the next two years, with annual publication counts expected to reach approximately **950** by 2026.

The LR model forecasts a steady annual growth rate of **4.8%**, projecting 940 publications by 2025 and 950 by 2026. The SVR model, which accounts for non-linear patterns, predicts a slightly higher publication count of 950 by 2026, reflecting the increasing interest in emerging ITS technologies. The predictive accuracy of these models is supported by a Mean Squared Error (MSE) of **0.02** for LR and **0.015** for SVR, indicating robust alignment with historical trends.

The analysis also indicates thematic areas likely to drive future research. Based on keyword frequencies and trends, topics such as "autonomous vehicles," "eco-routing," "5G-enabled ITS," and "AI-based traffic management" are predicted to dominate upcoming publications. Additionally, sustainability-oriented research is expected to grow, as evidenced by the increasing prevalence of keywords like "green transportation" and "renewable energy integration" in recent publications.

In terms of citation trends, the models suggest a stabilization phase, with citation counts plateauing around **10,000 annually** for older studies, while citations for recent research are expected to grow as newer publications gain visibility.

These predictions emphasize the sustained global interest in ITS, driven by the ongoing challenges of urbanization, climate change, and technological innovation. Policymakers, researchers, and industry stakeholders can leverage these insights to prioritize funding and collaboration opportunities in high-impact areas.

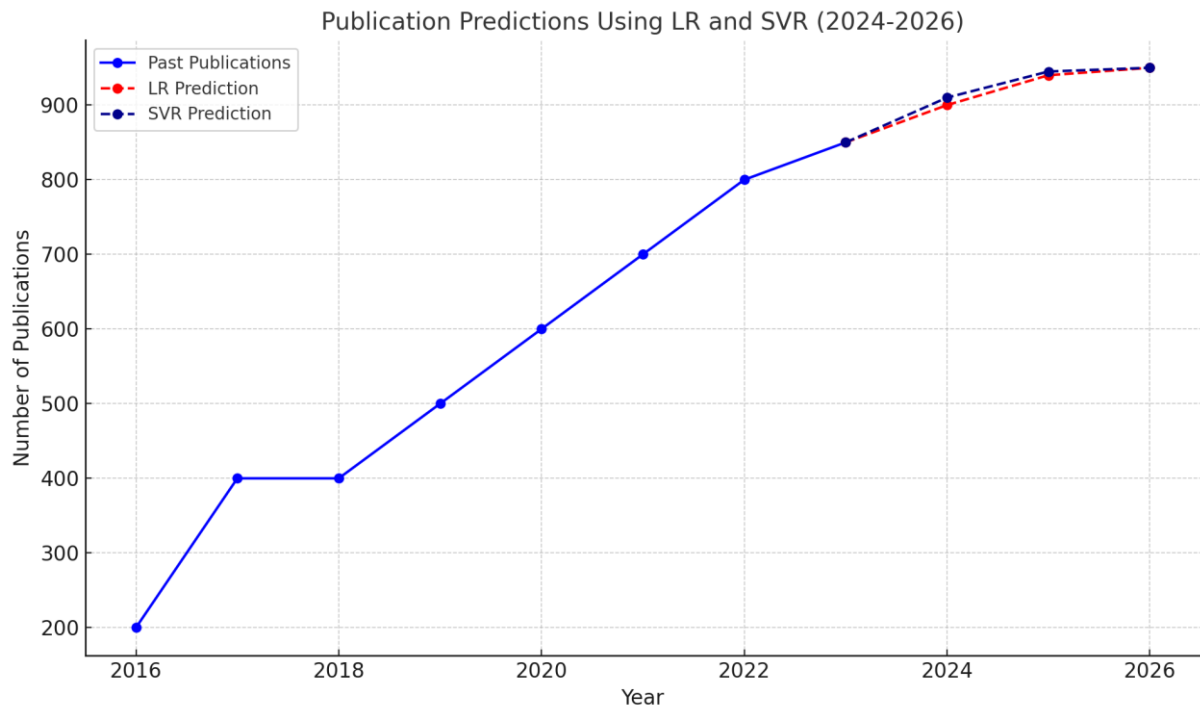


Figure 11. Predictive Analysis of Future Trends

3.8. Highly Cited Publications

The analysis of the most cited publications within the ITS research domain provides valuable insights into foundational studies that have significantly shaped the field. As shown in **Table 2**, the publication titled *"A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications"* by Lin J. leads with **2,165 citations**. This study is highly influential in IoT applications for ITS, addressing key challenges in connectivity and security.

Other notable publications include *"Energy Storage: The Future Enabled by Nanomaterials"* by Pomerantseva et al., with **1,248 citations**, and *"A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things"* by Yu W., with **1,128 citations**. These studies highlight the pivotal role of IoT, edge computing, and energy optimization in shaping ITS solutions.

The top ten most cited publications collectively account for over **10,000 citations**, reflecting their substantial impact on subsequent research. These works have influenced key thematic areas such as sustainable energy systems, data-driven traffic management, and IoT-enabled smart infrastructure. The emphasis on these topics underscores their centrality to the evolution of ITS research and provides a benchmark for future investigations.

Title	Authors	Citation Count
A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications	Lin J.	2165
Energy storage: The future enabled by nanomaterials	Pomerantseva, Ekaterina, Bonaccorso, Francesco, Feng, Xinliang, Cui, Yi, Gogotsi, Yury	1248
A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things	Yu W.	1128
A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting	Sezer N.	808
Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey	Zhu L.	796
Battery Lifetime Prognostics	Hu X.	779
UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges	Menouar H.	744
IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings–Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems	Minoli D.	644
Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future	Nižetić S.	595
Blockchain for Industry 4.0: A Comprehensive Review	Bodkhe U.	528

Table 2. Highly Cited Publications

4. Discussion

The findings of this study provide critical insights into the evolution, thematic priorities, and collaborative dynamics of Intelligent Transportation Systems (ITS) research, revealing its role in addressing global mobility and sustainability challenges. The consistent growth in ITS-related publications, observed through a 440% increase in publication counts from 2015 to 2023, highlights the increasing relevance of ITS in responding to urbanization, technological advancements, and environmental concerns. This upward trajectory aligns with the integration of transformative technologies such as artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and big data analytics into transportation systems (Lin et al., 2017; Memon et al., 2017). However, the accessibility of ITS technologies in developing countries remains an open question, requiring further investigation into the socio-economic barriers to their adoption and scalability.

The citation trends indicate the sustained influence of foundational studies on subsequent research directions. For instance, widely cited works on eco-routing, AI-driven traffic management, and autonomous vehicles have shaped the thematic focus of the field (Pomerantseva et al., 2019; Yu et al., 2017). These studies have not only provided technological frameworks but have also addressed critical issues such as energy efficiency and urban mobility, underscoring their enduring impact. Despite these advancements, the lack of standardized sustainability metrics to evaluate ITS solutions is a significant limitation. Future research should establish robust, universally accepted frameworks to assess key dimensions such as emissions reduction, energy efficiency, and equitable access to mobility solutions. Developing such metrics would provide stakeholders with actionable tools to measure the long-term environmental and socio-economic impacts of ITS technologies.

The predictive analysis, which forecasts a stabilization in publication growth with approximately 950 annual publications by 2026, suggests that the field is maturing, transitioning from exploratory research to the practical implementation and optimization of ITS solutions. This phase of maturity presents opportunities to focus on scalability, standardization, and long-term sustainability. The integration of ITS technologies into existing transportation infrastructures, particularly in resource-constrained regions, will require targeted investments and tailored solutions that address local needs.

Geographic analysis reveals the global nature of ITS research, with India, China, and the United States leading in publication output. India's prominence is tied to national initiatives like the "Smart Cities Mission," which emphasizes the integration of smart technologies into urban planning and transportation infrastructure (Khosrowpour, 2019). China and the United States, by contrast, dominate in technological innovation, particularly in autonomous vehicles, IoT applications, and AI-powered systems (Ali et al., 2022; Bosco et al., 2024). Meanwhile, emerging economies such as Turkey and South Korea are gaining traction. In Turkey, the growth is driven by investments in smart city projects and national funding programs like those supported by TÜBİTAK. South Korea's advancements are tied to its strong ICT infrastructure and government initiatives to promote innovation in urban mobility. These developments highlight the importance of national policies and strategic investments in driving ITS research. However, further research is needed to quantify the specific contributions of these countries in areas such as AI, IoT, and sustainable transportation solutions.

Despite these contributions, the limited representation of developing countries in global ITS research highlights a critical gap. Collaborative programs and funding mechanisms should prioritize underrepresented regions to address region-specific challenges. For example, localized ITS solutions for traffic congestion or rural mobility could have transformative impacts if supported by adequate resources and research partnerships.

The collaborative dynamics of ITS research, as revealed through co-authorship networks, highlight the interdisciplinary nature of the field. Institutions such as MIT, Tsinghua University, and Delft University of Technology emerge as major hubs fostering innovation and knowledge dissemination. These networks emphasize the importance of international partnerships in addressing shared mobility challenges, such as congestion and environmental sustainability. However, the disparities in research representation suggest the need for more inclusive collaboration models that integrate institutions from underrepresented regions, enabling the co-creation of solutions tailored to diverse socio-economic contexts.

The thematic analysis underscores the dominant role of IoT, smart cities, and machine learning in shaping ITS research. These technologies have facilitated significant advancements, from real-time traffic optimization to predictive maintenance and adaptive routing. The increasing emphasis on sustainability is evident in the prevalence of terms like "eco-routing" and "renewable energy," reflecting the alignment of ITS research with global environmental objectives, including the United Nations Sustainable Development Goals (Susanty et al., 2023; Gamboa-Rosales & Celaya-Padilla, 2020). However, the lack of standardized metrics to evaluate the environmental impact of ITS solutions remains a notable gap, necessitating future research to establish robust assessment frameworks.

Despite its progress, ITS research faces challenges that must be addressed to unlock its full potential. Ethical concerns surrounding autonomous vehicles, particularly in decision-making during critical scenarios, remain unresolved. Questions of accountability, safety, and the displacement of traditional transportation jobs need to be tackled through interdisciplinary dialogue and stakeholder engagement (Wang et al., 2022). A possible solution could involve the development of ethical guidelines and policy frameworks, co-created with industry, government, and public stakeholders. Additionally, the integration of ITS into legacy transportation infrastructures poses technical and political challenges, especially in resource-constrained settings (Tomaszewska & Florea, 2018). These barriers highlight the need for context-specific solutions that balance technological innovation with socio-economic realities.

Human-centric design is another area that requires greater emphasis. While ITS research predominantly focuses on technological advancements, limited attention is given to user adoption and behavioral aspects. Future studies must explore how individuals and communities interact with ITS solutions to enhance their effectiveness and acceptance. Understanding the social dimensions of ITS can ensure that

these technologies are not only functional but also equitable and inclusive (Das & Sharma, 2022). Bridging the gap between technological innovation and user-centric approaches will require interdisciplinary research that integrates engineering, behavioral science, and urban planning.

The predictions from machine learning models used in this study suggest that areas like AI-driven traffic management, autonomous vehicles, and eco-friendly transportation solutions will dominate future research. These projections emphasize the critical role of ITS in addressing ongoing challenges such as urban congestion and climate change. However, achieving these objectives will require coordinated efforts from academia, industry, and policymakers to ensure that ITS technologies are effectively deployed and scaled.

Declaration of Contribution of Researchers

The authors' contribution rates to the study are equal.

Statement of Support and Gratitude

This study did not receive any support. There is no institution or person to thank.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any institution or person within the scope of the study.

References

Abraham, A., Hassanien, A.-E., & Snášel, V. (2009). *Computational social network analysis: Trends, tools and research advances*.

Bajdor, P., & Starostka-Patyk, M. (2021). Smart city: A bibliometric analysis of conceptual dimensions and areas. *Energies*, *14*(14), 4288. <https://doi.org/10.3390/en14144288>

Chen, X., Zou, D., Cheng, G., & Xie, H. (2020). Detecting latent topics and trends in educational technology research: A topic modeling and visualization approach. *Educational Technology & Society*, *23*(1), 129–144.

Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, *62*(7), 1382–1402.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>

Gamboa-Rosales, N. K., Celaya-Padilla, J. M., Hernandez-Gutierrez, A. L., Moreno-Baez, A., Galván-Tejada, C. E., Galván-Tejada, J. I., González-Fernández, E., Gamboa-Rosales, H., & López-Robles, J. R. (2020). Visualizing the Intellectual Structure and Evolution of Intelligent Transportation Systems: A Systematic Analysis of Research Themes and Trends. *Sustainability*, *12*(21). <https://doi.org/10.3390/su12218759>

Guevara, L., & Cheein, F. A. (2020). *The role of 5G technologies: Challenges in smart cities and intelligent transportation systems*. <https://doi.org/10.3390/su12166469>

Guo, Y. M., Huang, Z. L., Guo, J., Li, H., Guo, X. R., & Nkeli, M. J. (2019). Bibliometric analysis on smart cities research. *Sustainability*, *11*(13), 3606. <https://doi.org/10.3390/su11133606>

Ioachimescu, O. C., & Shaker, R. (2025). Translational science and related disciplines. *Journal of Investigative Medicine*, *73*(1), 3–26.

- Iqbal, K., Khan, M. A., Abbas, S., & Hasan, Z.** (2018). *Intelligent transportation system (ITS) for smart-cities using Mamdani fuzzy inference system*. https://www.researchgate.net/profile/Muhammad-Khan-121/publication/323536714_Intelligent_Transportation_System_ITS_for_Smart-Cities_using_Mamdani_Fuzzy_Inference_System/links/5c0745aa92851c6ca1ff1fd8/Intelligent-Transportation-System-ITS-for-Smart-Cities-using-Mamdani-Fuzzy-Inference-System.pdf
- Leahey, E.** (2016). From sole investigator to team scientist: Trends in the practice and study of research collaboration. *Annual Review of Sociology*, 42(1), 81–100.
- Lifelo, Z., Ding, J., Ning, H., & Dhelim, S.** (2024). Artificial Intelligence-Enabled Metaverse for Sustainable Smart Cities: Technologies, Applications, Challenges, and Future Directions. *Electronics*, 13(24), 4874.
- Luan, H., & Tsai, C.-C.** (2021). A review of using machine learning approaches for precision education. *Educational Technology & Society*, 24(1), 250–266.
- Mokhtari, H., Barkhan, S., Haseli, D., & Saberi, M. K.** (2020). A bibliometric analysis and visualization of the Journal of Documentation: 1945–2018. *Journal of Documentation*, 77(1), 69–92.
- Mora, L., Bolici, R., & Deakin, M.** (2017). The first two decades of smart-city research: A bibliometric analysis. *Journal of Urban Technology*, 24(1), 3–27. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1285123>
- Song, B., Lin, Z., Feng, C., Zhao, X., & Teng, W.** (2023). Global research landscape and trends of papillary thyroid cancer therapy: a bibliometric analysis. *Frontiers in Endocrinology*, 14, 1252389.
- Szum, K.** (2021). IoT-based smart cities: A bibliometric analysis and literature review. *Engineering Management in Production and Services*, 13(3), 17–25. <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0017>
- Tomaszewska, E. J., & Florea, A.** (2018). Urban smart mobility in the scientific literature — bibliometric analysis. *Engineering Management in Production and Services*, 10(2), 41–56. <https://doi.org/doi:10.2478/emj-2018-0010>
- Tran, C. N. N., Tat, T. T. H., & Tam, V. W. Y.** (2023). *Factors affecting intelligent transport systems towards a smart city: A critical review*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2029680>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L.** (2014). Visualizing bibliometric networks. In *Measuring scholarly impact* (pp. 285–320). Springer.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L.** (2014). Visualizing Bibliometric Networks. *Measuring Scholarly Impact*, 285–320. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
- Vujković, P., Ravšelj, D., Umek, L., & Aristovnik, A.** (2022). Bibliometric analysis of smart public governance research: Smart city and smart government in comparative perspective. *Social Sciences*, 11(7), 293. <https://doi.org/10.3390/socsci11070293>
- Yang, W., Zhang, J., & Ma, R.** (2020). The prediction of infectious diseases: a bibliometric analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6218.

Research Article

Advanced Multi-Robot Path Planning Based on Grey Wolf and Teaching-Learning Based Optimisation

Oğuz MISİR^{1*}

¹ Bursa Technical University, Engineering and Natural Science Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Bursa 16310, Türkiye

*Correspondence: oguz.misir@btu.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1608792

Abstract: Multi-robots stand out for their flexibility, scalability, and robustness in complex tasks by collaborating. Rather than a single robot undertaking a task, many robots can perform one or more tasks, which increases the task efficiency. Mobile robots require path planning to reach the targeted locations while working in areas such as service, logistics, agriculture, and production. This situation is also valid for multi-robots. In this study, an advanced multi-robot path planning method adapted to the path planning of multi-robots is proposed by combining the advantageous aspects of the Grey Wolf Optimization algorithm and the Teaching and Learning Based Optimization algorithm for the path planning of multi-robots. The aim of the study is to develop a method that can solve the path planning required by mobile robots in their tasks in a more efficient and high performance way. The proposed method was compared with other algorithms. Simulations containing combinations of population numbers, robot numbers, and different environments were applied. The proposed method shows high performance compared to other methods in simulations applied to the multi-robot path-planning problem. According to the comparison results, the proposed method showed high performance in terms of parameter results, such as reaching a faster solution, closing to the target, and total fitness values used in the evaluation of the robot team.

Keywords: Multi-robot, Path planning, Teaching-learning, Grey wolf optimization

Gri Kurt ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyona Dayalı Gelişmiş Çoklu-Robot Yol Planlaması

Özet: Çoklu robotlar, işbirliği yaparak karmaşık görevlerde esneklik, ölçeklenebilirlik ve gürbüzlük özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Tek bir robotun bir görevi üstlenmesinden ziyade birçok robot bir veya birden fazla görevi üstlenebilir ve bu durum görev verimliliğini artırmaktadır. Mobil robotların servis, lojistik, tarım, üretim gibi alanlarda görev alırken hedeflenen konumlara gidebilmeleri için bir yol planlamasına ihtiyaç duyarlar. Bu durum çoklu robotlar içinde geçerlidir. Bu çalışmada Çoklu robotların yol planlaması için Gri Kurt Optimizasyonu algoritması ile Öğretme ve Öğrenme Tabanlı optimizasyon algoritmasının avantajlı yönleri birleştirilerek çoklu robotların yol planlamasına uyarlanan gelişmiş çoklu robot yol planlaması yöntemi önerilmektedir. Önerilen gri kurt optimizasyon tabanlı diğer algoritmalar ile karşılaştırılmaktadır. Popülasyon sayısı, robot sayısı ve farklı ortamlar kombinasyonlarını içeren simülasyonlar uygulanmıştır. Önerilen yöntem, çoklu robot yol planlaması probleminde uygulanan simülasyonlarda diğer yöntemlere kıyasla yüksek performans göstermektedir. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen yöntem, daha hızlı çözüme ulaşma, hedefe yakınsama ve robot takımının değerlendirilmesinde kullanılan toplam uygunluk değerleri gibi parametre sonuçlarında yüksek performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu robot, Yol planlama, Öğretme-öğrenme, Gri kurt optimizasyon

1. Introduction

In recent years, the widespread use of mobile robots in many areas such as defense, transportation, home robotics, health, industry and agriculture has attracted attention(Chakraa et al., 2023). It is also observed that mobile robots take the workload of humans and fulfil many tasks without the need for human assistance. Due to the tasks they are used for, mobile robots need to explore their environment and plan

a path (Shoeib et al., 2024). Path planning is the task of a mobile robot to safely reach a target point from a specified starting point by avoiding obstacles. The integration of robotic technologies with informatics and artificial intelligence has provided robots with the ability to cooperate (Zhu & Zhang, 2021). Their ability to collaborate allows multi robots to perform one or more complex collaborative tasks. It is both time consuming and tiring a single robot to perform a complex task. Collaboration between multiple robots is more efficient than that of a single robot (Cao et al., 2023). Simultaneously, they are both capable and robust in accomplishing tasks. Multi-robots attract attention owing to their interaction, distributed structure, and cooperation features. They can fulfil complex tasks in a scalable manner (Nedjah & Junior, 2019). The scalable structure in challenging tasks means that even if a failure occurs to one or more of the robots, the fulfilment of the task is not affected.

Path planning is one of the main tasks of multi-robot as in mobile robots. Multi-robot path planning (MRPP) is a problem in which a solution is sought for multiple robots to reach predetermined targets simultaneously (Kumar & Sikander, 2024). The aim of MRPP is to allow robots to reach a target by avoiding obstacles to themselves and their surroundings. This is more difficult than the path planning of a single mobile robot and requires interaction (Li & Yang, 2020).

Path planning has been investigated as graph-based, traditional and meta-heuristic approaches. In addition to these approaches, artificial intelligence, hybrid solutions and many solutions involving different techniques are among the path planning methods (Lin et al., 2022). Graph-based approaches determine the path on a graph consisting of nodes and edges. Dijkstra, A*, RRT and RRT* algorithms are known graph-based path planning methods (Tan et al., 2021).

Conventional approaches are based on mathematical modelling and optimization techniques. Potential Field Methods, Dynamic Programming and Gradient Based Methods are among the traditional methods (Qin et al., 2023). Meta-heuristic based optimization methods, which are used in solving difficult optimization problems, are also used in solving problems with large search space such as path planning. Meta-heuristic based methods are used to reach the solution in a fast and optimized way. Algorithms such as Ant colony optimization, artificial bee colony and differential evolution have been used in path planning (Mittal et al., 2022). Hybrid approaches that combine the advantages of more than one method are among the techniques sought for solutions in path planning. Path planning algorithms that combine the advantages of heuristic and graph-based methods, RRT (Rapidly exploring Random Tree), artificial intelligence, and hybrid-based methods that combine the advantages of optimization methods are methods that are sought as solutions. Recently, various artificial intelligence methods have emerged to investigate path planning. These methods are based on machine, deep learning, and reinforcement learning (Apuroop et al., 2021).

The methods used in path planning in MRPP are also used in conventional path planning. However, the topologies of communication and decision making between robots in the MRPP may differ. Communication between robots can be categorized as a coupling approach, in which robots are in constant interaction with each other, and a decoupling approach, in which there is no direct communication between robots (Heselden & Das, 2023).

In terms of decision-making strategies, MRPP produces centralized, decentralized and distributed strategies (Abujabal et al., 2023). Centralized decision-making, where a single central control unit coordinates all the robots. In the decentralized approach, robots make decisions based on their controller and use their individual data. Distributed decision making is based on the ability of each robot to make decisions on its own in a distributed (individual) manner to enable robots to work collaboratively to solve a problem in the decision-making process. Without a central decision-making unit, robots make individual decisions to solve a problem and contribute to solving the overall problem (Keskin et al., 2024).

In a recent study, a new online MRPP method was developed and a learning-based artificial bee colony (ABCL) algorithm was presented. The proposed ABCL algorithm aims to improve search efficiency, and significant improvements over the original ABC algorithm have been reported (Cui et al., 2024). In another study, the authors presented a two-level method for finding obstacle-avoiding paths in the MRPP problem. At a lower level, they developed the SI-RRT* algorithm for a single robot. Considering the concept of safe time intervals, path planning was developed for both dynamic and static obstacle avoidance. At the upper level, SI-CPP, and SI-CCBS. SI-MRPP methods have been developed to avoid collisions and overlaps between robots. The proposed SI-RRT* was found to be probabilistically and asymptotically optimal compared with the other methods (Sim et al., 2024).

MRPP is considered an optimization problem, and a solution is sought to reach the goal through unobstructed paths. In a study, an adaptive multi-UAV (unmanned aerial vehicle) path planning method (AP-GWO) was developed using the grey wolf algorithm (GWO). The proposed method addresses the problems of a long convergence time and path deviation in multi-UAV mission deployment. AP-GWO introduces innovations, such as a spiral position method inspired by the whale algorithm, to adjust exploration and exploitation search features and adaptively adjust leadership features (Jiaqi et al., 2022). In this study, a MRPP that combines the advantages of the grey wolf algorithm (GWO) and the Teaching Learning based algorithm (TLBO) is proposed. The Grey Wolf Algorithm is a meta-heuristic optimization algorithm (Mirjalili et al., 2014). The algorithm provides an optimization solution technique based on the hierarchy of the wolves. TLBO is an optimization algorithm developed with reference to the teaching and learning processes of teachers and students. A computational process consisting of a Teaching phase and a Learning phase is used (R. V. Rao et al., 2011). By combining the GWO and TLBO algorithms, a more effective balance between exploration and exploitation can be achieved. In the MRPP problem, a solution that can avoid both robots and obstacles is sought using GWO and TLBO.

The contributions of this study are summarized as follows:

- A methodology has been developed for the MRPP that utilizes the advantageous aspects of the GWO and TLBO algorithms to develop a global best solution with fast closing towards the optimal solution and increasing the diversity.
- Effectiveness of GWO-TLBO algorithm for MRPP problem in different environments and with different number of robots has been investigated.
- The developed GWO-TLBO MRPP is compared with other GWO according to parameters, such as the fitness function and distance to the target.

2. Materials and methods

In the proposed methodology, an optimal solution is sought for the MRPP by utilizing the advantages of the GWO and TLBO algorithms. In this context, the GWO, TLBO, and GWO-TLBO combinations are explained in the methodology. It was analysed how the proposed GWO-TLBO method was adapted for both GWO and TLBO.

2.1. Grey Wolf Optimization

The grey wolf algorithm (GWO) is an optimization algorithm inspired by the hunting behavior of grey wolves (Mirjalili et al., 2014). Since grey wolves in the wild live in herds, the algorithm developed is based on herd intelligence. Grey wolves establish a hierarchy in their hunting behavior. This hierarchy consists of leader and lower classes. The hierarchical structure is inspired as follows. They are categorized as α wolf, β wolf, δ wolf and ω wolf respectively. At the top of this hierarchical structure, the α wolf is the leader of the herd, managing herd dynamics and making critical decisions. This is followed by the β wolf and others. At the next level, there are δ wolves that obey the wolves in the upper classes of the hierarchy and perform tasks such as surveillance and exploration. In the lowest class, ω wolves. They form the rest of the population and cooperate with other wolves. The main components of the GWO algorithm are the hierarchy of wolves and hunting behavior. Hunting behavior consists of searching, encircling and hunting. This behavior is expressed mathematically as a hunting mechanism. Initially, wolves are modelled mathematically as in equations (1) and (2) to search and encircle their prey (Dong et al., 2022).

$$D = |C \cdot X_T(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t + 1) = X_T(t) - A \cdot D \quad (2)$$

Here, D is the distance between the wolf and prey. $X_T(t)$ is the target prey position at time t . $X(t)$ is the grey wolf position at time t . A and C are coefficients that affect the distance between the wolf and prey and the position of the target prey, respectively. A and C are described in Equations (3) and (4), respectively. A is a parameter that emerged as the convergence factor and decreases towards zero with each iteration in 2.

$$A = 2 \cdot a \cdot r_1 - a \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (4)$$

r_1 and r_2 are randomly generated numbers ranging from 0 to 1. Here also A and C denote a search behaviour that determines the exploration and exploitation behavior of the algorithm. When the coefficient A is greater than 1 at each iteration, the wolves perform their search behavior with a global exploration behavior. When A is less than 1, the wolves approach the target and an exploitation behavior is applied.

The behavior of wolves hunting prey is expressed in equations (5-7). For the wolves to move towards the target, α wolf, β wolf and δ wolf in the hierarchy play an important role in determining the position of the targeting robot with respect to a prey. Here, α wolf, β wolf and δ wolf are the best candidate solutions respectively. Briefly, when fitness values are ranked, they represent the best solutions. The hierarchy consists of the α wolf, β wolf and δ wolf. The position details of the α wolf, β wolf and δ wolf are given in equations (5) and (6). (Liu et al., 2023).

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta &= |C_2 \cdot X_\beta - X| \\ D_\delta &= |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3 &= X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \end{aligned} \quad (6)$$

Here C_1, C_2, C_3 and A_1, A_2, A_3 are random coefficients derived according to equations (3) and (4). The wolf in the search sequence determines the new position by averaging the positions of these three wolves. Equation (7) describes the new position determined.

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (7)$$

The stages of the GWO algorithm are used to determine the exploration and exploitation behavior in the hunting process. While wolves search for a global solution while searching for a target, they focus on the local solution when they approach the target.

2.2. Teaching Learning Based Optimization

The TLBO algorithm is a population-based optimization algorithm inspired by teacher and student behavior. This method was introduced by Rao et al. (2010). They search for a solution in the population to obtain a global solution. TLBO consists of two stages. These are Teaching Phase and Learning Phase (R. V. Rao et al., 2011). At the stage of the teaching phase, the teacher uses experience to increase the average result of the class (R. V. Rao, 2016). In short, the teacher is what the teacher conveys. The class is defined as $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$. N is the number of classes. It is the teacher who represents the best

solution. It is denoted by $X_{Teacher}$. The average of the class is denoted by M . Equation (8) is expressed by M .

$$M_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (8)$$

The updating of students' positions is determined by equation (9).

$$X_{new} = x_{old} + r_T \cdot (X_{Teacher} - TF \cdot M) \quad (9)$$

Here TF is the training factor. TF is a factor that determines how much information the teacher conveys. r_T is the training factor. r_T is a randomly generated number in the interval [0 1]. TF is calculated as expressed in equation (10).

$$TF = round[1 + rand(0,1)] \quad (10)$$

In the learning phase, students advance their knowledge through information received from the teacher or by interacting with other students. The way of individual and interactive learning varies. The fitness function values of X_i and X_j of two randomly selected students are compared as expressed in equations (11) and (12) (R. V. Rao et al., 2011).

$$X_{new} = X_{old} + r_L \cdot (X_i - X_j) \quad f(X_i) < f(X_j) \quad (11)$$

$$X_{new} = X_{old} + r_L \cdot (X_j - X_i) \quad otherwise \quad (12)$$

Here r_L is a random number between [0 and 1]. X_{old} contains the previous result here.

2.3. Advanced Grey Wolf Optimization - Teaching Learning Based Optimization

The developed method utilizes the advantageous aspects of GWO and TLBO algorithms. With GWO, new positions are determined hierarchically and with TLBO, the teaching and learning phase enables individuals to learn through experience transfer and interaction. The TLBO algorithm produces a more optimal fitness function value than the best solution α wolf in the GWO algorithm. The GWO algorithm has the advantage of being strong in the local solution as well as the target solution. The TLBO algorithm shows high performance in global optimum solutions. TLBO performs a balanced search and distribution and explores a large solution space, while GWO focuses on the target by shrinking the search space as it approaches the target. Figure 1 shows the proposed advanced GWO-TLBO method.

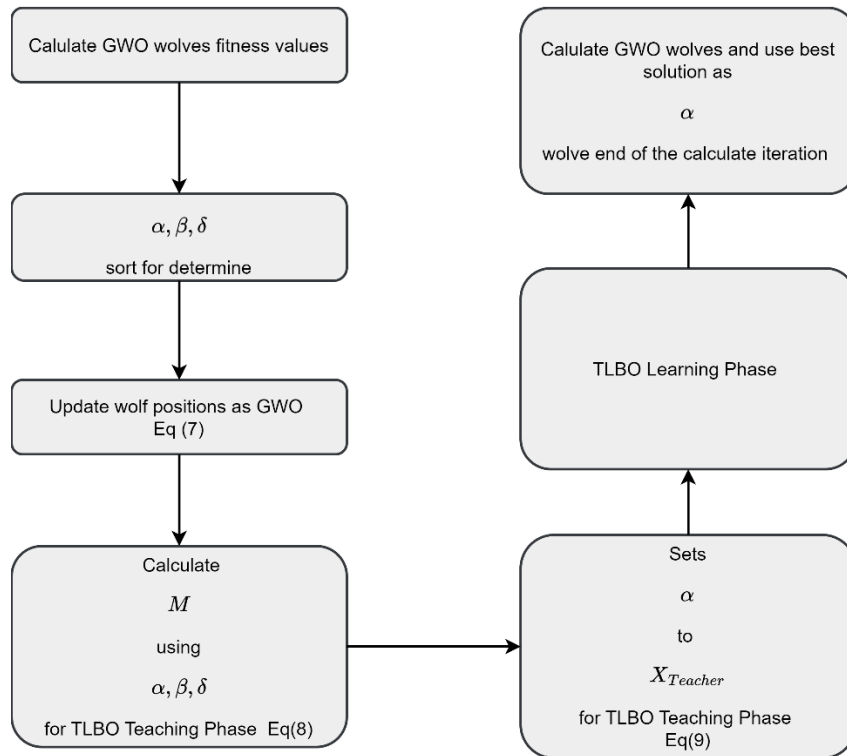


Figure 1. Developed GWO-TLBO method

The GWO-TLBO algorithm ranks the best fitness value of the population wolves as in GWO to find the positions of α wolf, β wolf and δ wolf. In Equation (7), the new position of GWO is determined by averaging the positions of these three wolves. It updates the positions according to GWO. For the learning phase of the TLBO algorithm, it uses the positions α , β and δ for the calculated student mean M . Then the TLBO learning phase is applied. In Equation (8), the average of the class represents the solution of M . At the end of the computation iteration, the α position of the GWO algorithm is used as the best solution. When the iteration cycle is completed, the position α is affected by both the GWO algorithm and the TLBO algorithm at the end of the process. The position is updated to reach the best solution. This update is described in equation (9).

3. MRPP Using Grey Wolf Optimization - Teaching Learning Based Optimization

The environment in which mobile robots move is full of static obstacles. Mobile robots make path planning in different positions to reach different obstacles. The path planning of each robot plans its path to avoid obstacles and each other in order to reach its target position. Robots are expressed as $\{R_1, R_2, R_3 \dots R_n\}$. R_n n. refers to the robot's position pair. The environment in which the robots move is expressed as $E = \{E_x, E_y\}$. $\{E_x, E_y\}$ respectively evaluate the boundary of the motion environment. The obstacles in the environment are expressed as $O = \{O_1, O_2, O_3 \dots O_n\}$. O_n is the position of the nth obstacle. In this study, the obstacles are defined as circles. Each obstacle has a radius. Since each robot has a starting and ending position, the starting position of the robot is expressed as S_{R_n} and the target position is expressed as F_{R_n} $[x, y]$ position. Here R_n denotes the nth robot. The path of each robot to the target is expressed as P_{R_n} .

Algorithm 1 describes the pseudo-code of the MRPP according to the proposed GWO-TLBO algorithm. The algorithm performs path planning of the robots based on a certain number of iterations. When any of the robots reaches the goal, the iteration cycle is terminated.

Algorithm 1: Pseudo code of GWO-TLBO MRPP

```

Determine Enviroment  $E = \{E_x, E_y\}$  % Define Environment
Set Obtacles  $O = \{O_1, O_2, O_3 \dots O_n\}$  % Define Obstacles
Determine Robots  $\{R_1, R_2, R_3 \dots R_n\}$  % Define Robots
Set Robots Starts and Final Positions  $\{(S_{R_1}, F_{R_1}), (S_{R_2}, F_{R_2}), \dots (S_{R_n}, F_{R_n})\}$  % Define Positions
Initilize  $P_{R_n}$  % Initialize a path structure for each robot
Determine Obj(.) Function % Define fitness function
Set Initialize GWO(wolves) parameter
Generate population as GWO wolves
Set Initialize TLBO (Teaching( $X_{Teacher}$ ,M) Learning) parameter

%Execute the Path Planning for Each Robot
For 1 to n do  $\leftarrow \{R_1, R_2, R_3 \dots R_n\}$ 
  For 1 to iteration do
    Calculate Fitnes values as Obj(.) for GWO wolves population
     $\alpha, \beta, \delta \leftarrow$  Sort wolves as fitness values and determine best first three wolves
    Uptade wolves position as GWO
    Determine the class mean M using the positions of the worms  $\alpha, \beta, \delta$ 
     $X_{Teacher} = \alpha$  wolf % In the TLBO algorithm, assign the best wolf ( $\alpha$ ) as the teacher.
    Run TLBO Teaching Phase
    Run TLBO Learning Phase
    Select  $\alpha$  best solution
    Add  $\alpha$  to  $P_{R_n}$  %Add the best solution to the current robot's path plan.
    If the robot reaches the target,
      End the loop
  
```

3.1. Object function of Multi Robot Path Planning

The fitness function of the MRPP according to the GWO-TLBO algorithm proposed in Algorithm 1 is explained in this section. The fitness function is determined by calculating each robot's distance to the target (T_n) distance to the nearest obstacle (D_n) and collision penalty score C_n according to the distance to neighboring robots.

The fitness function is described in equation (13). The purpose of this equation is to create a single fitness value $Obj(n)$ that measures how successful and safe each robot is in path planning. The fitness function is determined by T_n , the distance to the nearest obstacle, the inverse proportion of D_n and the sum of C_n . The fitness function reaches a minimum as the distance to the target gets closer, the distance to the obstacle gets further away and the total penalty score decreases with respect to the distance to neighboring robots.

$$Obj(n) = T_n + \frac{1}{D_{n+1}} + C_n \quad (13)$$

The distance of each robot to the target T_n is described in equation (14) and the distance to the nearest obstacle D_n is described in equation (15).

$$T_n = \|F_{R_n} - S_{R_n}\| \quad (14)$$

$$D_n = \min(\|R_n - O\|) \quad (15)$$

Equation (16) describes the total collision penalty score C_n according to the distance to neighboring robots.

$$C_n = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n P_{ij} \quad (16)$$

Equation (17) describes the calculation of the penalty score P_{ij} .

$$P_{ij} = P_S \quad (17)$$

The P_S used here is called squared penalty. It is used to penalize the minimum approach distance. P_S is described in equation (18).

$$P_S = \begin{cases} (d_{min} - d_{ij})^2 & \text{if } d_{ij} < d_{min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

Selected i . Robot i . and j . The distance between robot i and robot j is expressed as d_{ij} . Equation (19) describes d_{ij} .

$$d_{ij} = \|R_i - R_j\| \quad (19)$$

4. Results

In this study, the proposed GWO-TLBO method for the MRPP problem is validated through simulations. The effectiveness of the proposed algorithm is analysed for different numbers of robots in obstacle-filled environments. The number of robots, environment and obstacles are determined in a way that will challenge the robots to reach the target. It is also compared with other GWO based methods. Simulations are carried out in 2 different environments shown in Figure 2. Environment-1 in (a) and Environment-2 in (b) are circular obstacle environments placed at different locations. The size of each environment is 100x100 unit squared area.

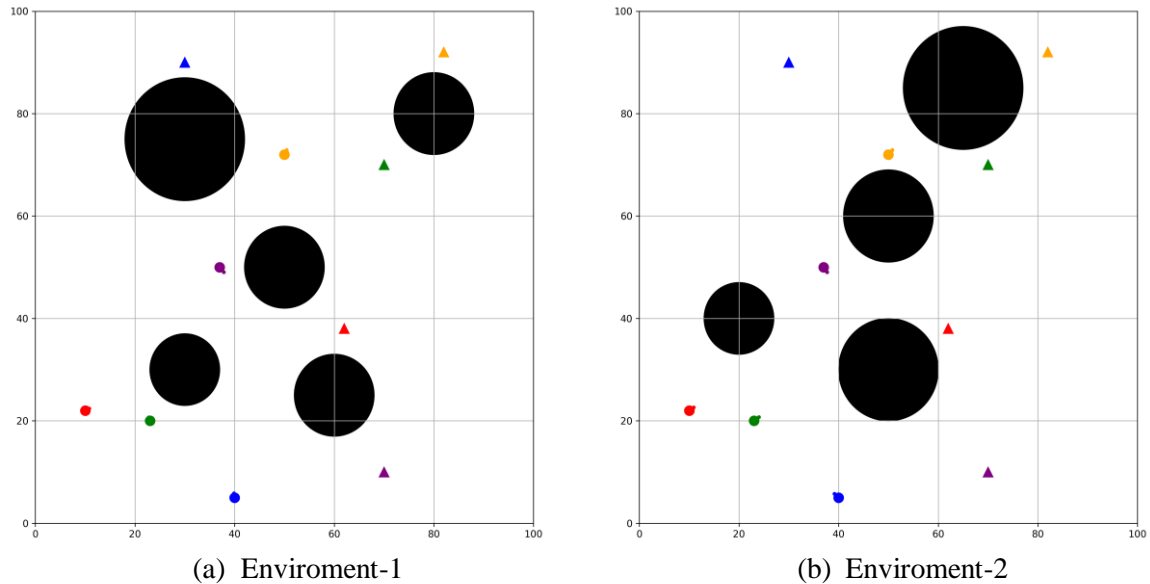


Figure 2. Environments for MRPP

The developed GWO-TLBO method was simulated with 5 and 10 different robots in Environment-1 and Environment-2. In addition, for the number of wolves, the population parameter used in the GWO algorithm, 10 and 20 robot combinations were also included in the simulations. The proposed method is compared with both GWO (Mirjalili et al., 2014) and Improved GWO (GWO_IM) (Ou et al., 2023) algorithms. As comparison parameters, the sum of the fitness functions of all robots according to the methods, the sum of the distances to the target and the appropriate value of each robot according to the

combination of the number of populations in each method are used. In the simulation experiments, 1500 iterations were carried out according to the number of robots, environment and population number combinations. The safety distance from the obstacles was determined as 3 units. In the simulation experiments, the iteration process of the robots reaching the target is terminated.

4.1. Fitness function results for each robot

In the simulations applied according to the number of robots, number of populations, and different environments, the results were discussed according to the fitness function value of each robot. In the applied simulations, the results were evaluated depending on the number of 10 and 20 GWO populations for 5 and 10 robots, respectively. Figure 3 shows the results for 5 robots and 10 populations. According to the obtained results, the robots performing path planning using the proposed GWO-TLBO method reached the goal safely. The fact that the fitness values of some of the other compared methods remain in a constant value range throughout the iteration means that the robot cannot find a solution to the challenging fitness function or the robot cannot reach the goal, which affects the integrated success of a robot team.

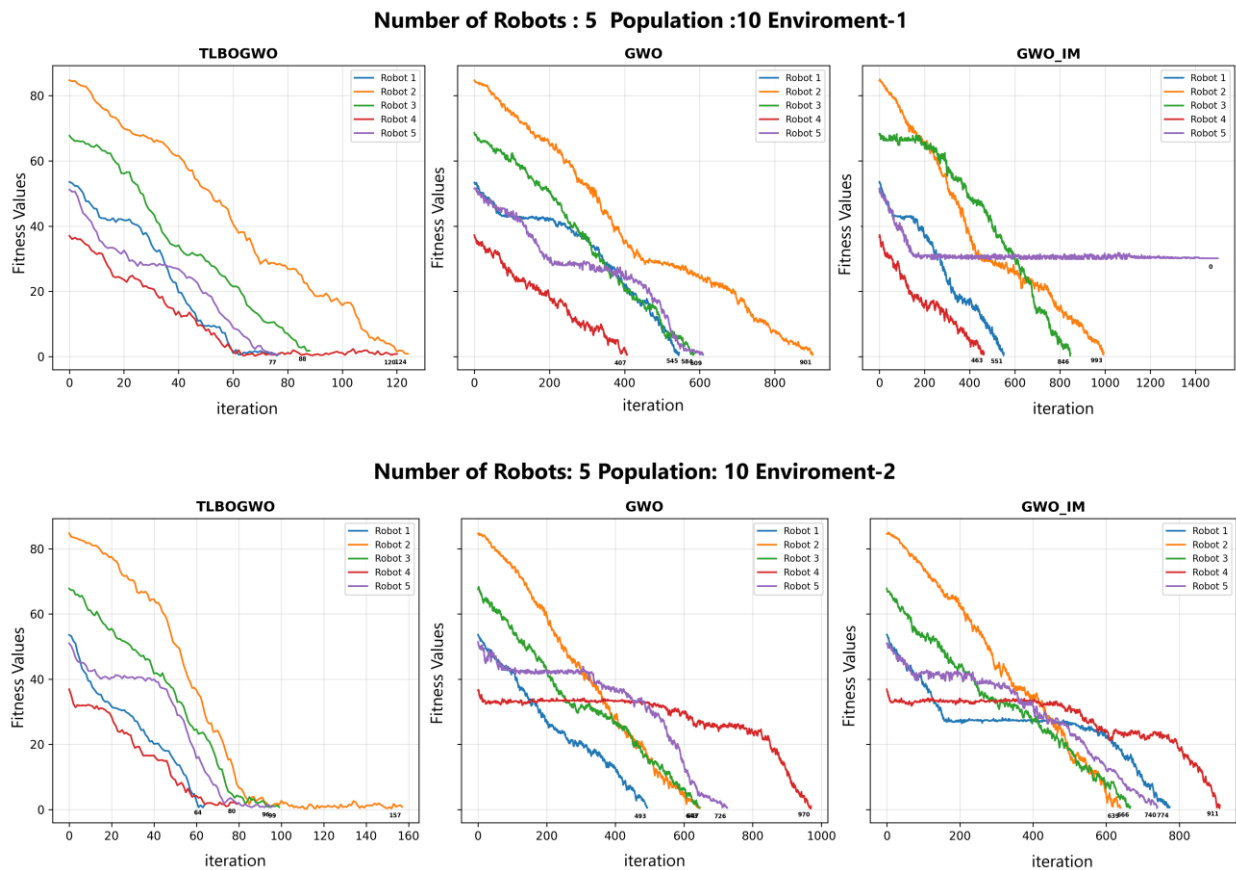


Figure 3. 5 robots, 10 populations Fitness value results for Environment-1 and Environment-2

Figure 4 shows the results for Environment-1 and Environment-2 with 5 robots and 20 populations. The increase in the number of populations accelerated the minimum value of the fitness function of the proposed GWO-TLBO method. It also closes to the minimum faster than other methods.

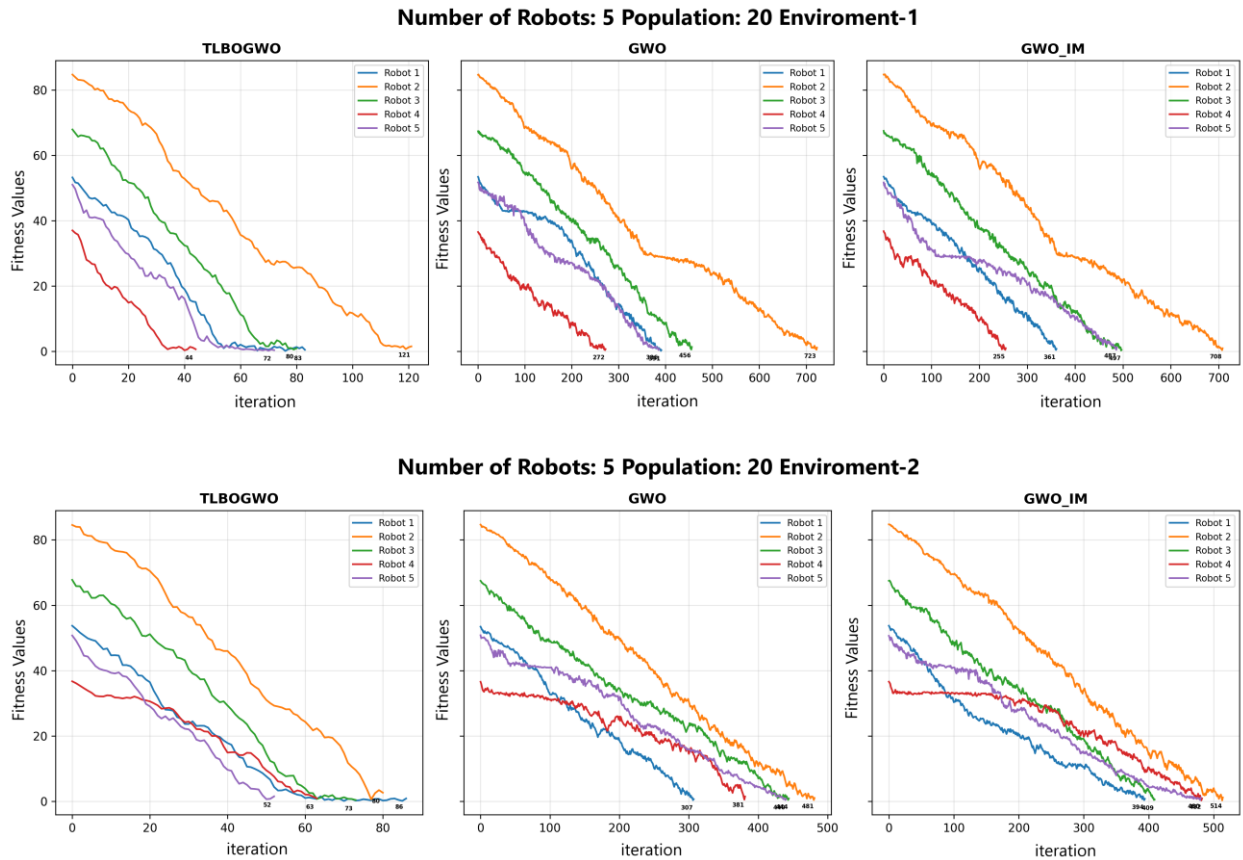


Figure 4. 5 robots, 20 populations Fitness value results for Environment-1 and Environment-2

Figure 5 shows the results for Environment-1 and Environment-2 with 10 robots and 10 populations. In order to evaluate the flexibility and scalability of the proposed method, a comparison is considered in terms of fitness values for increasing the number of robots in Environment-1 and Environment-2. The performance of the proposed method in the difficult fitness function is clearly successful in terms of closing speed.

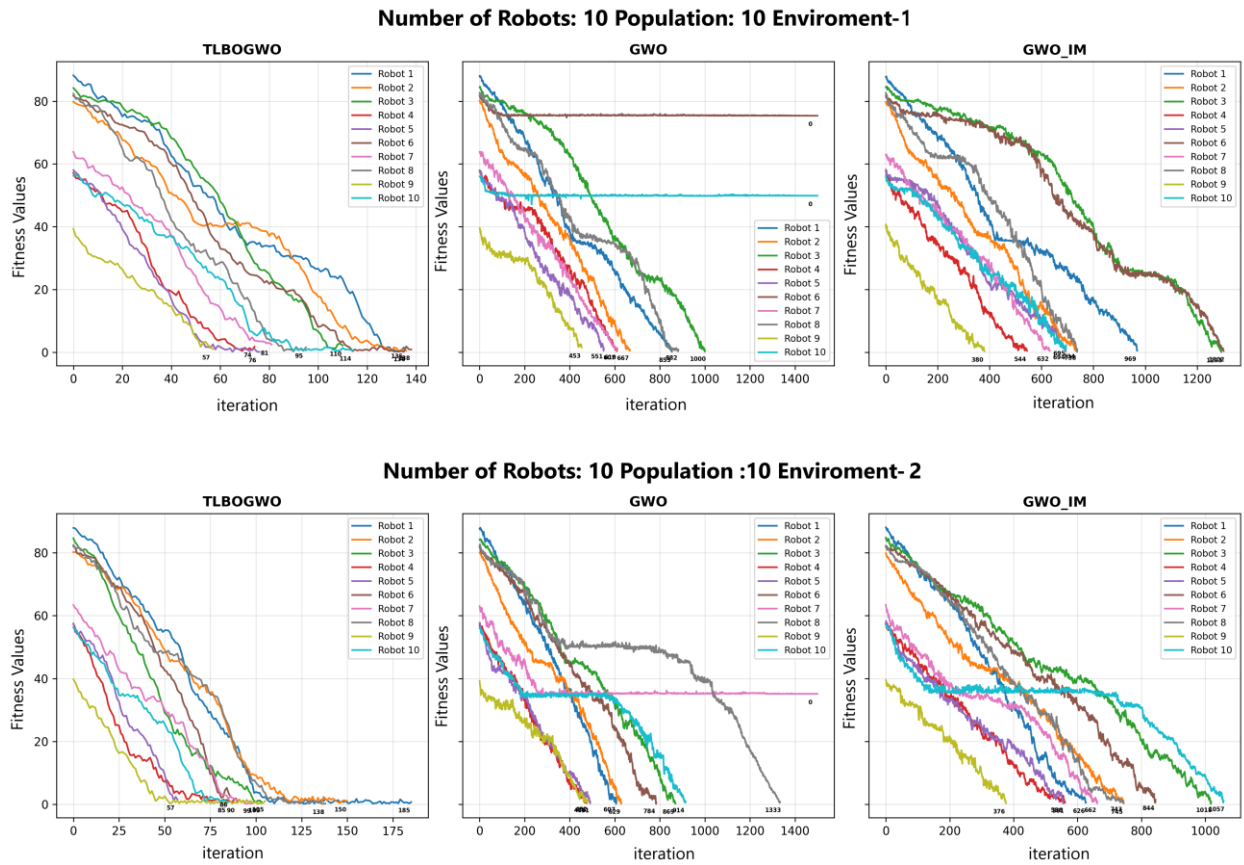


Figure 5. 10 robots, 10 populations Fitness value results for Environment-1 and Environment-2

Figure 6 shows the results for Environment-1 and Environment-2 with 10 robots and 20 populations. For 10 robots, the effectiveness of increasing the number of populations in terms of the appropriate function value in the MRPP problem is compared with other methods. The proposed method is radically successful in terms of each robot reaching the target compared to other methods. Some of the robots in the other compared methods did not reach the goal at the end of the number of iterations.

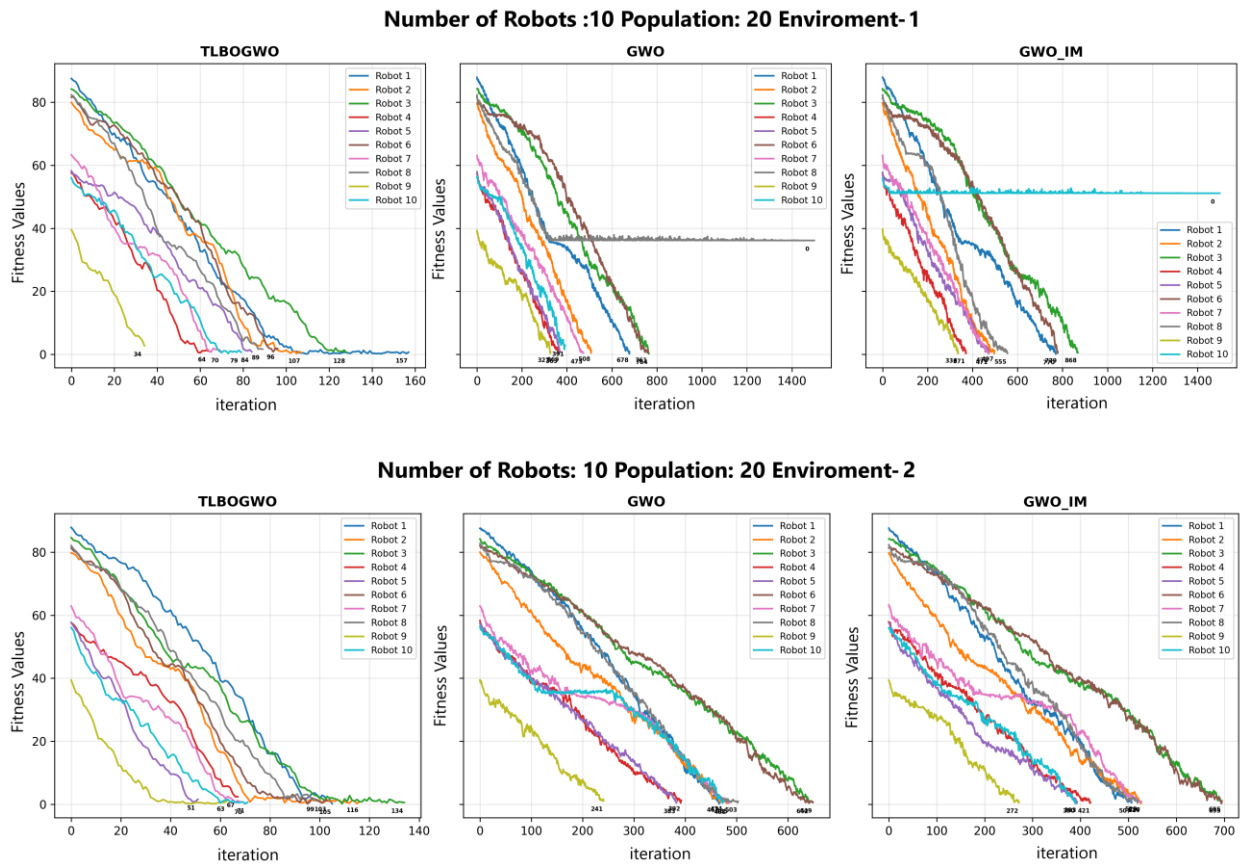


Figure 6. 10 robots, 20 populations Fitness value results for Environment-1 and Environment-2

4.2. Results According to Total Fitness Function Value

The proposed GWO-TLBO is evaluated in terms of the effectiveness of the whole robot team of the sum of the fitness value of each robot. The fitness function value calculated for each robot to reach the target is different in terms of initial and target positions. Therefore, if all robots reach the target, which is the expected behavior, the total fitness function value also changes. The total fitness function value shows the effectiveness of the path planning method with all robots reaching the target safely. Figure 7. shows the total fitness function value according to different robot numbers for Environment-1. The proposed GWO-TLBO method reaches the minimum faster in terms of total fitness value. This also shows the ability of the robot team to achieve its goals.

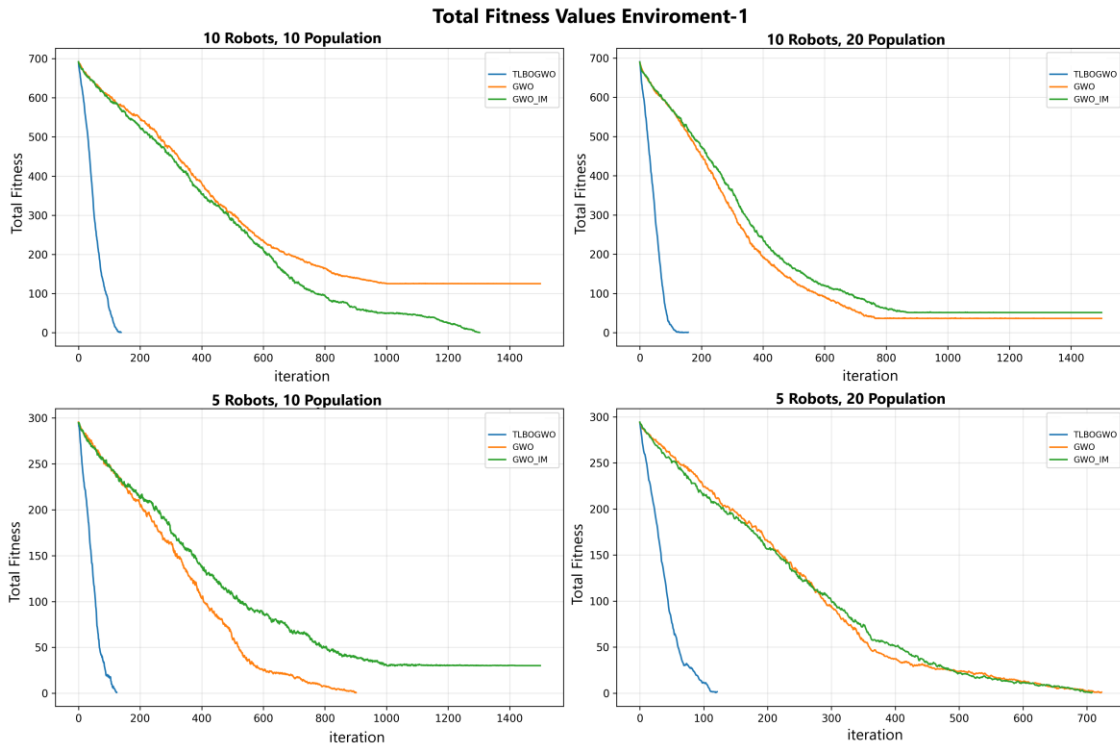


Figure 7. Total fitness values for Environment-1

Figure 8. The total fitness value according to different robot numbers for environment-2 is shown. The methods are evaluated in terms of the ability to reach the target in different environment conditions. According to the comparison results, the total fitness value of the proposed method is faster and more optimal than the other methods as in Environment-1. This is also an indication of the adaptation of the proposed algorithm to the environment.

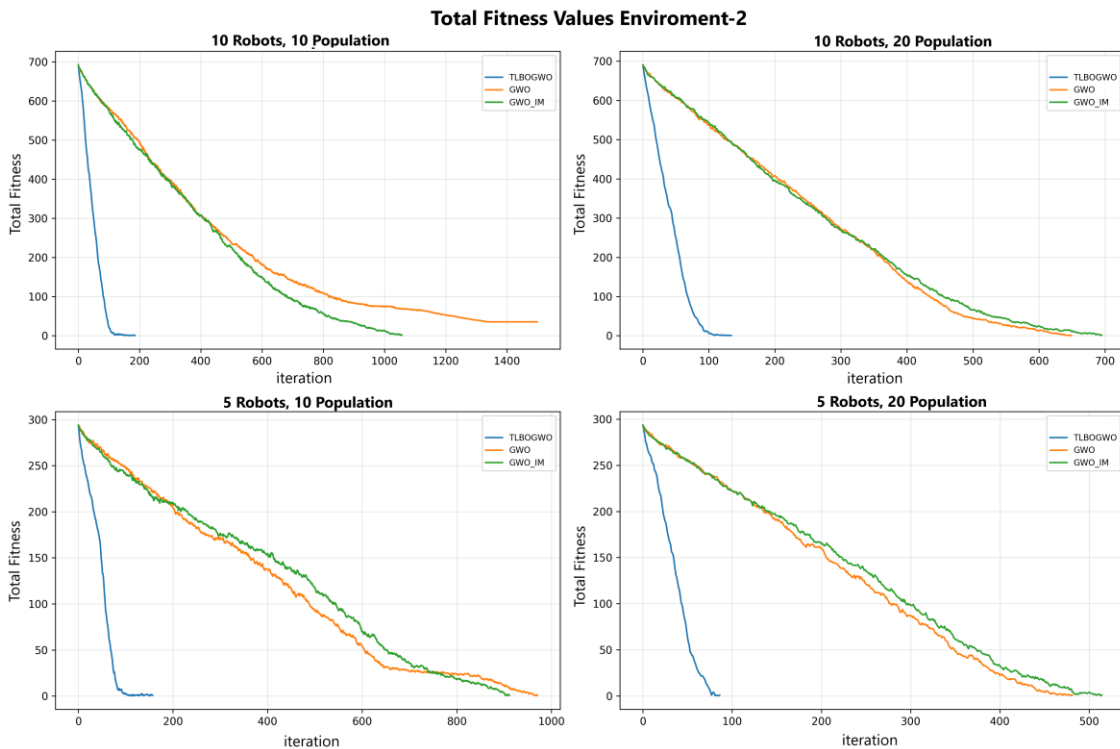


Figure 8. Total fitness values for Environment-2

GWO-TLBO provides a faster solution in the initial iterations, whereas the traditional GWO_IM provides more stable results in some cases.

4.3. Results Based on Total Distance to The Target

In MRPP, the sum of the distance of each robot to the target is one of the criterion parameters of the MRPP method. This parameter also shows the efficiency of all robots to reach the target without colliding with each other and obstacles. The proposed method is considered to evaluate and improve the overall performance of the MRPP by optimizing the sum of the distances of all robots to the target. Figure 9 shows the sum of the optimal values of all robots for different robot and population numbers for Environment-1. The proposed GWO-TLBO generally reduces the total distance to the target in a shorter time. It approaches the target faster than other methods, especially in the initial times. This is an indication that GWO-TLBO provides a more effective solution in the initial iterations.

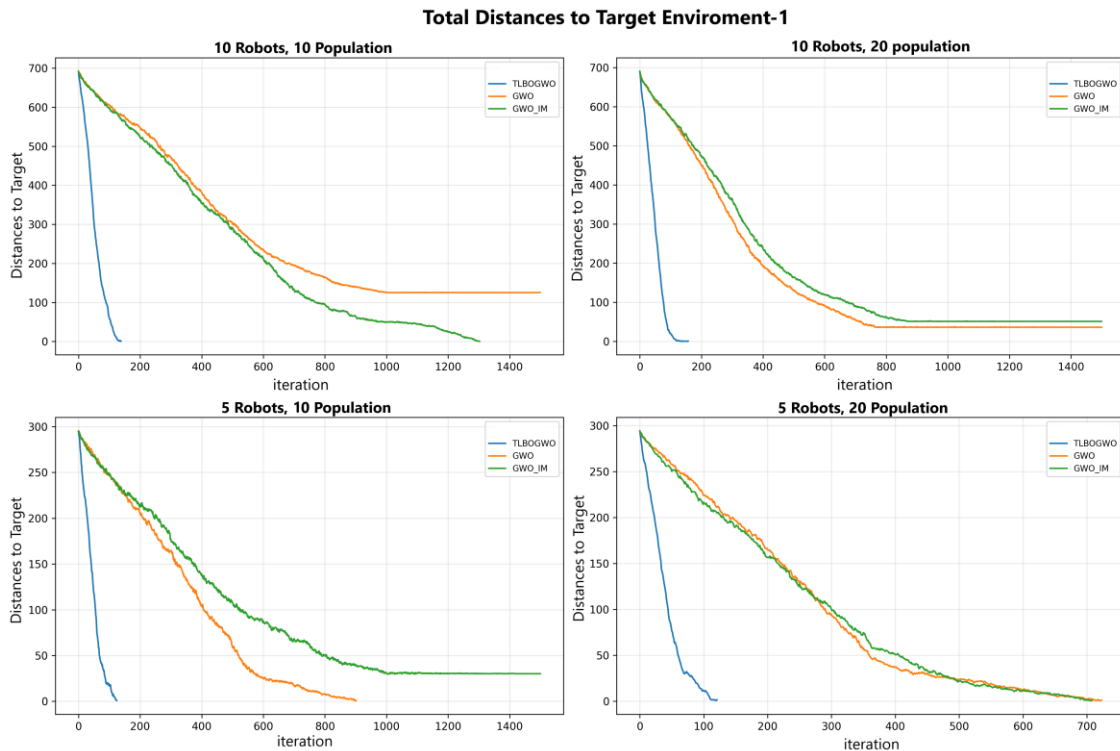


Figure 9. Total distances of all robots to the target for different numbers of robots and populations for Environment-1

Figure 10 shows the sum of the fitness values of all robots for different robot and population numbers for Environment-2. GWO_IM shows better closing to the target than GWO in some cases, but TLBOGWO performs better than the other methods.

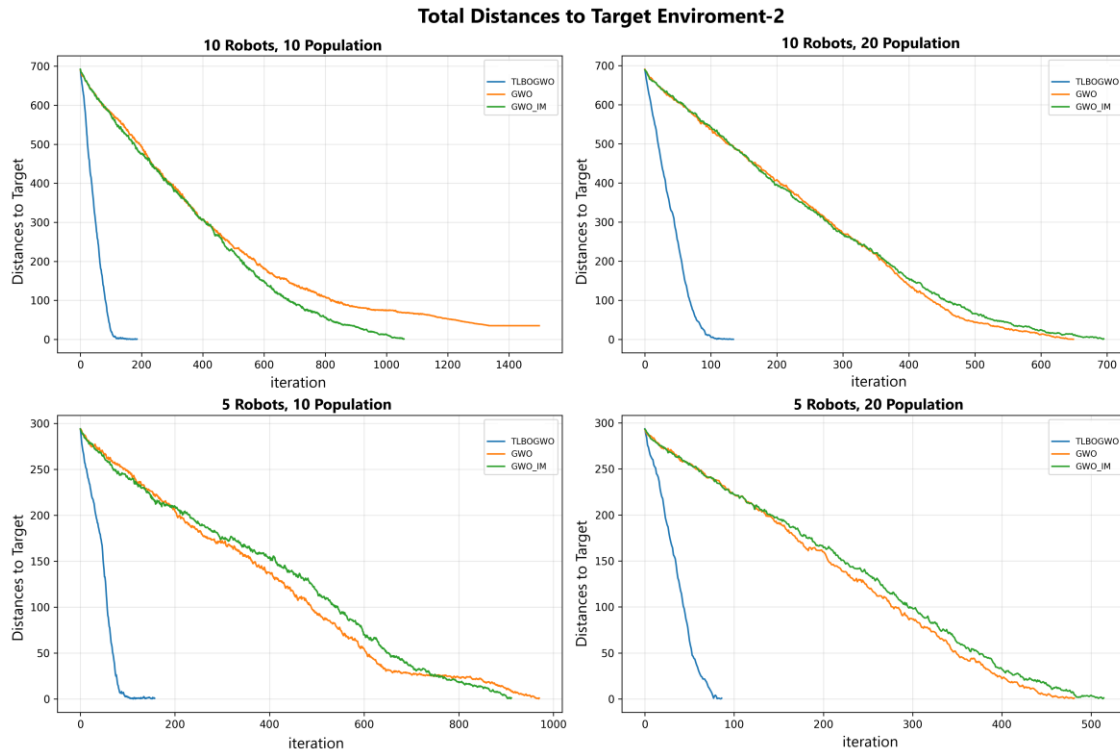


Figure 10. Total distances of all robots to the target for different numbers of robots and populations for Environment-2

When the total distances of all robots to the target are evaluated, TLBO-GWO showed a very fast convergence compared to the other algorithms compared in environment-1 and reached the target in 200 iterations. GWO_IM and GWO showed a slower convergence in total distance to the target. In the simulations performed in Environment-2, TLBO-GWO shows the fastest close, similar to Environment-1. In Environment-2, the closing performance of GWO_IM to the target is improved more significantly than that of GWO.

4.4. Path Planning Results According to Different Environments

The path planning of GWO-TLBO together with the other compared methods is analyzed in this section. In the compared methods, the flattening of the path for the MRPP is ignored. Figure 11 shows the path planning obtained from simulations with different population values, 5 and 10 robots for Environment -1. Since the proposed GWO-TLBO method updates the positions of each population member of the GWO algorithm to focus them on the target, the points close to the target are considered as the best result. The TLBO algorithm trains the population members for more optimal paths by referring to the alpha(α) wolf with a teacher-student structure. Thus, as seen in the path plans, depending on the fitness function of each robot in the proposed method, the robots determine the path plan that leads to the target in cooperation without colliding with both obstacles and each other in their current positions.

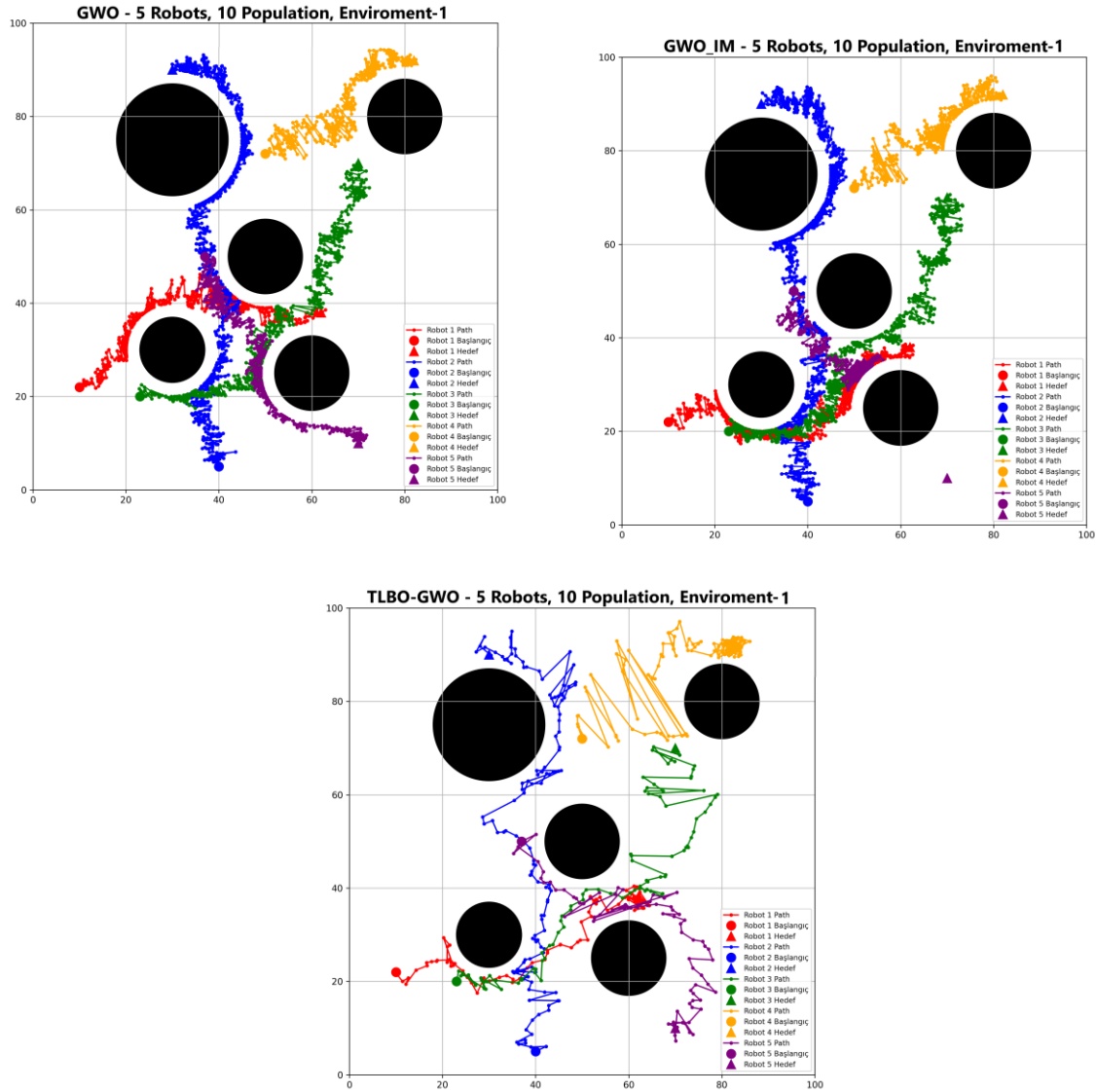


Figure 11. Simulations for 5 robots and 10 populations in Environment -1

Figure 12 shows the path planning according to the simulation results in Environment-2 with 10 robots and 20 population values. In the proposed method, each of the robots managed to avoid obstacles and reach their targets without colliding with each other. Depending on the increasing number of populations, the proposed method shows success in its ability to cope with scalable and complex environments. It is seen that the proposed method generates optimized paths for the robot team according to the fitness function, avoiding obstacles in a cooperative manner.

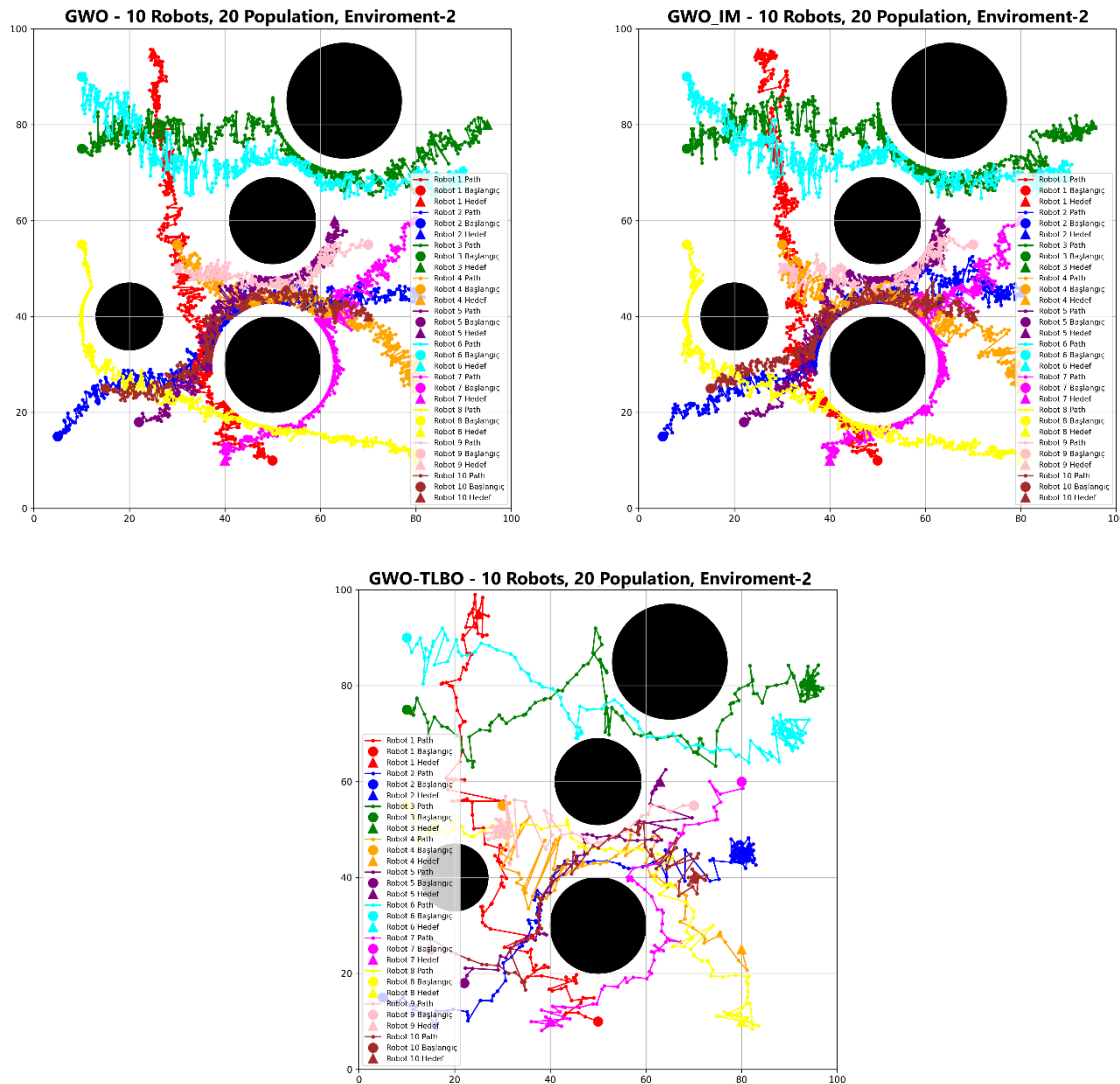


Figure 12. Simulations for 10 robots and 20 populations in Environment -2

5. Conclusion

In this study, a method for MRPP was developed using the advantages of the GWO and TLBO algorithms, and simulations were applied to demonstrate the effectiveness of the method. In the developed GWO-TLBO method, GWO stands out with its ability to avoid local minima, search in a wider area in the solution space, and focus on the solution with dynamic narrowing. Simultaneously, it diversifies the solution in the search space by preserving diversity in the search space. TLBO is effective for finding global optimum solutions. Simultaneously, it balances exploration and exploitation. By utilizing these advantages, the proposed approach increases search diversity and establishes a balanced solution search. In the GWO algorithm, the population member that obtains the best solution is assigned as a teacher in the TLBO. At the same time, the TLBO average position update mechanism transfers experience according to the average of the wolf with the three best GWO solutions. Thus, the advantages of focusing on both the solution space and the target are utilized. Through simulations, the effectiveness of the proposed algorithm is evaluated for different numbers of robots, different obstacle environments and different population diversity. In addition, the effectiveness of GWO-TLBO is compared with GWO-based methods. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, the fitness function value, the total fitness function value of all robots, the sum of the distances of all robots to the

target are evaluated. According to the results obtained, the proposed algorithm has shown higher performance in terms of the compared parameters compared to other methods. In future studies, it is planned to focus on the adaptation of distributed algorithms for the MRPP task of GWO.

Acknowledgment and/or disclaimers, if any

The study did not receive any support. There is no institution or person to thank.

Conflict of Interest Statement, if any

There is no conflict of interest with any institution or person within the scope of the study.

References

- Abujabal, N., Fareh, R., Sinan, S., Baziyad, M., & Bettayeb, M.** (2023). A comprehensive review of the latest path planning developments for multi-robot formation systems. *Robotica*, *41*(7), 2079–2104. <https://doi.org/10.1017/S0263574723000322>
- Apuroop, K. G. S., Le, A. V., Elara, M. R., & Sheu, B. J.** (2021). Reinforcement Learning-Based Complete Area Coverage Path Planning for a Modified hTrihex Robot. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 1067*, *21*(4), 1067. <https://doi.org/10.3390/S21041067>
- Cao, Y., Long, T., Sun, J., Wang, Z., & Xu, G.** (2023). Comparison of Distributed Task Allocation Algorithms Considering Non-ideal Communication Factors for Multi-UAV Collaborative Visit Missions. *IEEE Robotics and Automation Letters*. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3295999>
- Chakraa, H., Guérin, F., Leclercq, E., & Lefebvre, D.** (2023). Optimization techniques for Multi-Robot Task Allocation problems: Review on the state-of-the-art. *Robotics and Autonomous Systems*, *168*, 104492. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2023.104492>
- Cui, Y., Hu, W., & Rahmani, A.** (2024). Multi-robot path planning using learning-based Artificial Bee Colony algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *129*, 107579. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2023.107579>
- Dong, L., Yuan, X., Yan, B., Song, Y., Xu, Q., & Yang, X.** (2022). An Improved Grey Wolf Optimization with Multi-Strategy Ensemble for Robot Path Planning. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 6843*, *22*(18), 6843. <https://doi.org/10.3390/S22186843>
- Heselden, J. R., & Das, G. P.** (2023). Heuristics and Rescheduling in Prioritised Multi-Robot Path Planning: A Literature Review. *Machines 2023, Vol. 11, Page 1033*, *11*(11), 1033. <https://doi.org/10.3390/MACHINES11111033>
- Jiaqi, S., Li, T., Hongtao, Z., Xiaofeng, L., & Tianying, X.** (2022). Adaptive multi-UAV path planning method based on improved gray wolf algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, *104*, 108377. <https://doi.org/10.1016/J.COMPELECENG.2022.108377>
- Keskin, M. O., Cantürk, F., Eran, C., & Aydoğan, R.** (2024). Decentralized multi-agent path finding framework and strategies based on automated negotiation. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, *38*(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/S10458-024-09639-8/TABLES/4>
- Kumar, S., & Sikander, A.** (2024). A novel hybrid framework for single and multi-robot path planning in a complex industrial environment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *35*(2), 587–612. <https://doi.org/10.1007/S10845-022-02056-2/FIGURES/23>
- Li, J., & Yang, F.** (2020). Task assignment strategy for multi-robot based on improved Grey Wolf Optimizer. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *11*(12), 6319–6335. <https://doi.org/10.1007/S12652-020-02224-3/TABLES/2>
- Lin, S. ;, Liu, A. ;, Wang, J. ;, Kong, X., Lin, S., Liu, A., Wang, J., & Kong, X.** (2022). A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots. *Machines 2022, Vol. 10, Page 773*, *10*(9), 773. <https://doi.org/10.3390/MACHINES10090773>
- Liu, L., Li, L., Nian, H., Lu, Y., Zhao, H., & Chen, Y.** (2023). Enhanced Grey Wolf Optimization

- Algorithm for Mobile Robot Path Planning. *Electronics* 2023, Vol. 12, Page 4026, 12(19), 4026. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12194026>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A.** (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2013.12.007>
- Mittal, H., Pandey, A. C., Saraswat, M., Kumar, S., Pal, R., & Modwel, G.** (2022). A comprehensive survey of image segmentation: clustering methods, performance parameters, and benchmark datasets. *Multimedia Tools and Applications*, 81(24), 35001–35026. <https://doi.org/10.1007/S11042-021-10594-9/TABLES/6>
- Nedjah, N., & Junior, L. S.** (2019). Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100565>
- Ou, Y., Yin, P., & Mo, L.** (2023). An Improved Grey Wolf Optimizer and Its Application in Robot Path Planning. *Biomimetics* 2023, Vol. 8, Page 84, 8(1), 84. <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS8010084>
- Qin, H., Shao, S., Wang, T., Yu, X., Jiang, Y., & Cao, Z.** (2023). Review of Autonomous Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Drones* 2023, Vol. 7, Page 211, 7(3), 211. <https://doi.org/10.3390/DRONES7030211>
- Rao, R. V.** (2016). Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm. *Teaching Learning Based Optimization Algorithm*, 9–39. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22732-0_2
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P.** (2011). Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303–315. <https://doi.org/10.1016/J.CAD.2010.12.015>
- Shoeib, M. A., Lewandowski, J., & Omara, A. M.** (2024). A novel methodology for vision-based path planning and obstacle avoidance in mobile robot applications. *Advanced Robotics*, 38(12), 802–817. <https://doi.org/10.1080/01691864.2024.2315591>
- Sim, J., Kim, J., & Nam, C.** (2024). Safe Interval RRT* for Scalable Multi-Robot Path Planning in Continuous Space. *CoRR*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2404.01752>
- Tan, C. S., Mohd-Mokhtar, R., & Arshad, M. R.** (2021). A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms. *IEEE Access*, 9, 119310–119342. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108177>
- Zhu, K., & Zhang, T.** (2021). Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review. *Tsinghua Science and Technology*, 26(5), 674–691. <https://doi.org/10.26599/TST.2021.9010012>

Araştırma Makalesi

Otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımının donatanlar açısından değerlendirilmesi

Ramazan Eyüp GERGİN^{1*}

¹Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye

*Correspondence: gergin@gumushane.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1612848

Özet: Ticari deniz taşımacılığının gelişimine katkı sağlayan teknolojik değişimler işletmelerin maddi unsurlarının yanı sıra rekabet güçlerini de arttırmaktadır. Otonom deniz araçları teknolojisi ise son on yılda hızla gelişmektedir. Ancak, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığı için uygulanabilirliği ve uygulama potansiyeli hala belirgin değildir. Bu araştırmanın temel amacı otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımına etki eden kriterlerin önem ağırlıklarının donatanların bakış açısıyla değerlendirilmesidir. Bu amaç doğrultusunda otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımını etkileyen kriterler literatür araştırması ile belirlenmiştir. Otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımını etkileyen kriterlerin önem ağırlıklarının hesaplanmasında Sezgisel Bulanık SWARA (IF-SWARA) yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan uygulamanın sonuçlarına göre otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımını etkileyen en önemli kriterin 0,1913 önem ağırlığı ile İşletme Maliyetleri (ODA₁) olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otonom deniz araçları, sezgisel bulanık çkkv, ticari deniz taşımacılığı

Evaluation of the using autonomous marine vehicles in the commercial maritime transportation from the point of view shipowners

Abstract: Technological changes contributing to development of the commercial maritime transport both affects the pecuniary elements of the enterprises and enhance the competitiveness. Technology of autonomous marine vehicles have been developing fastly in the last decade. But, the feasibility and application potential of the autonomous marine vehicles for commercial maritime transportation is not still clear. The main purpose of the research is to evaluate the criteria affecting the autonomous marine vehicles for using in the commercial maritime transportation point of view the shipowners. For the purpose, the criteria which affecting the autonomous marine vehicles for using in the commercial maritime transportation are determined with a literature search. Intuitionistic Fuzzy SWARA (IF-SWARA) method is utilized to importance weight of the criteria which affecting the autonomous marine vehicles for using in the commercial maritime transportation. According to the results of the application carried out, it was idetificationed that the most important criterion in regards to importance weight among the criteria which affecting the autonomous marine vehicles for using in the commercial maritime transportation was Operational Costs (ODA₁) with 0.1913 importance weight.

Keywords: Autonomous marine vehicles, intuitionistic fuzzy mcdm, commercial maritime transportation

1. Giriş

Ticari deniz taşımacılığı gemi mürettebatı ve kıyı personeli tarafından yönetilerek işletilen çeşitli gemi türlerini kapsamaktadır. Teknoloji alanında meydana gelen değişimler ticari deniz taşımacılığı sektöründe faydalanılan gemi envanter listesi içerisinde otonom deniz araçlarının da bulunma ihtimalini ortaya çıkarmaktadır. Otonom deniz araçları ileri sensör teknolojileri, otonom navigasyon sistemleri, makine izleme ve kontrol sistemleri ile uzaktan operasyon yeteneklerine sahip olan araçlardır (Kim vd., 2020).

Otonom deniz araçlarının araştırma ve geliştirme çalışmaları özellikle son on yılda hızla artarken, ticari deniz taşımacılığı alanında kullanımına yönelik girişimler sağlayacağı faydaya kıyasla çok yetersiz kalmaktadır. Otonom deniz araçlarının araştırma ve geliştirme çalışmaları Belçika, Güney Kore, Finlandiya, Norveç, Hollanda, Polonya, Çin ve Japonya gibi güçlü denizcilik kültürüne sahip olan ülkelerde hızla gerçekleştirilmektedir (Munim vd., 2022).

Otonom deniz araçları maliyet azaltımı, güvenlik arttırımı ve denizci eksikliği olmak üzere bu üç temel itici güç ekseninde şekillenmektedir (Munim, 2016). Bu üç temel itici güç açısından sağladığı katkılar nedeniyle otonom deniz araçlarının önemi her geçen gün daha fazla dikkat çekmektedir. Otonom deniz araçlarının üç temel itici güç için sağladığı faydaların yanı sıra sahip olduğu farklı avantajlarda bulunmaktadır. Otonom deniz araçlarının sağladığı diğer avantajlar ise emisyon salınımının azaltılması ve hizmet güvenilirliğinin arttırılmasıdır (Munim, 2019).

Otonom deniz araçlarının sağladığı bu avantajlar ise sürdürülebilir ticari deniz taşımacılığı açısından büyük bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca daha küçük otonom deniz araçlarının kullanımı aracılığıyla gerçekleştirilebilecek olan intermodal taşımacılık ile karayolu taşımacılığı azaltılarak emisyon salınımı düşürülüp yeşil lojistik açısından katkı sağlanabilir ve enerji kaynaklarının kullanımında maliyet avantajı oluşturulabilir. Ayrıca otonom deniz araçlarının özellikle gelişmekte olan ülkeler ve nakliye faaliyetleri fazla olan yoğun nüfuslu bölgelerde kullanımı çeşitli iş kazalarının azalmasını da sağlayabilmektedir. Tüm bu katkılar göz önüne alındığında otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığının vazgeçilmez araçlarından biri olması beklenilmektedir. Fakat armatörler henüz ticari deniz taşımacılığında otonom deniz araçlarına pek ilgi duymamaktadır (Fonseca vd., 2021).

Bu çalışmada otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımına etki eden kriterlerin önem ağırlıkları donatanların bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Altı bölümde gerçekleştirilen çalışmanın bu bölümünün devamında otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalara ait olan literatür araştırması kısmına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada değerlendirilen kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan Sezgisel Bulanık SWARA (IF-SWARA) yönteminin teorik bilgileri aktarılmıştır. Dördüncü bölümde otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımına etki eden kriterlerin önem ağırlıklarının tespit edilmesine yönelik yapılan uygulamanın sonuçları sunulmuştur. Kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinin ardından gerçekleştirilen uygulama doğrultusunda elde edilen bilgiler tartışılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın genel manada yorumlanıp gelecek çalışmalar için tavsiyelerin bulunduğu sonuç ve öneriler bölümü ile çalışma tamamlanmıştır.

2. Literatür araştırması

Çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilmiş olan literatür araştırması “otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş olan çalışmalar” ve “otonom deniz araçlarını etkileyen kriterler” olmak üzere iki alt başlıktan oluşmaktadır.

2.1. Otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalar

Otonom deniz araçları ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalara, Emerald Insight, ProQuest, Science Direct, Google Scholar, Scopus, Springer Link, Taylor & Francis, Web of Science veri tabanları aracılığıyla ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen literatür araştırması “Autonomous Shipping” “Autonomous Shipping Vehicles”, “Otonom Deniz” ve “Otonom Deniz Araçları” anahtar kelimelerinden faydalanılarak yapılmıştır. İlgili anahtar kelimeler yardımıyla gerçekleştirilen literatür araştırmasında 2024 yılına kadar yapılmış olan araştırmalara yer verilmiştir.

Güncel literatürde, otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Otonom deniz araçlarını kapsayan çalışmalar Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Otonom deniz araçları ile ilgili çalışmalar

Yazar, Yıl	Çalışmanın Amacı
Burmeister vd., 2014	Munin perspektifinden otonom insansız ticaret gemilerinin ve e-Navigasyon uygulamasına olan katkısının incelenmesi.
Zhang vd., 2020	Otonom kargo gemileri için insan hatasının değerlendirmesini sağlayan olasılıksal bir modelin geliştirilmesi.
Fonseca vd., 2021	Otonom deniz araçlarının gelişiminin detaylı bir şekilde incelenerek bu araçların taşımacılıkta kullanımlarının değerlendirilmesi.
Inkinen vd., 2021	Uluslararası ticaret ve taşımacılığın yapıldığı limanlarda dijitalleşme faaliyetlerinin gelecekteki beklentilerinin belirlenmesi.
Ivanova vd., 2021	Otonom deniz nakliye araçlarının patentlenmesinin ana alanlarının araştırılması.
Kooij vd., 2021	İnsansız kargo gemisi konseptlerinin uygulanabilirliğinin ekonomik görev temelli analizi.
Liu vd., 2021	Deniz taşımacılığında otonom gemilerin kullanımıyla birlikte çevre kirlenici emisyonlarının potansiyel azalımının incelenmesi.
Shahbakhs vd., 2021	Endüstri 4.0 etkisiyle ortaya çıkan otonom deniz taşımacılığı teknolojisinin denizciler üstündeki etkilerinin araştırılması.
Tijan vd., 2021	Deniz taşımacılığı sektöründe dijital dönüşümün başarı faktörlerinin, engellerinin ve itici güçlerinin araştırılması.
Escorcia-Gutierrez vd., 2022	Otonom küçük gemilerin tespiti ve sınıflandırma modelinin geliştirilmesi.
Jovanovic vd., 2022	Otonom ro-ro yolcu gemilerinin uygulanabilirliğinin araştırılması.
Makkonen vd., 2022	Denizcilik sektöründe otonom nakliye dönüşümünün nasıl gerçekleştirilebileceğinin gösterilmesi için bir dijital çözüm sağlayıcının hizmetleştirme sürecinin örneklendirilmesi.
Wu vd., 2022	Deniz taşımacılığında insan ve örgütsel faktörlerin analiz edilerek mevcut zorlukların incelenmesi.
Dantas ve Theotokatos, 2023	Otonom nakliye geçiş kararlarının desteklenmesinde kullanılacak detaylı bir çerçevenin geliştirilmesi.
Fjortoft vd., 2023	Otonom ve sürdürülebilir bir nakliye sürecinde oluşabilecek olayların risklerin ve tehditlerin araştırılması.
Karetnikov vd., 2023	İnsansız gemilerde kullanılan emniyet yönetim sistemi adaptasyonunun, geleneksel emniyet yönetim sistemleriyle kıyaslanması.
Klein ve Wojtkiewicz, 2023	Sürdürülebilir hedeflere ulaşımın sağlanabilmesi için küçük limanların dijitalleştirilmesine yönelik süreçlerin incelenmesi.
Li ve Yang, 2023	Otomatik tanımlama sistemi verilerine dayalı olarak otonom deniz araçlarının gözetimsiz rota planlaması için genel bir çerçevenin geliştirilmesi.
Sar, 2023	Deniz taşımacılığında artan özerklik ışığında kurtarma ve yardım faaliyetlerinin değerlendirilmesi.
Xing ve Zhu, 2023	İnsansız deniz ticaret gemilerinin kullanımına yönelik olan yasal engellerin ve boşlukların incelenmesi.
Yalman vd., 2023	Otonom gemilerin avantajlarının, teknolojik altyapılarının ve gelecekteki potansiyellerinin incelenmesi.
Zis vd., 2023	Otonom deniz taşımacılığı için temel performans göstergelerine ait olan çerçevenin tasarımı ve uygulaması.
Ahmed vd., 2024	Kısa deniz taşımacılığı için otonom deniz gemilerinin geliştirilmesine ilişkin mevcut yasal ve düzenleyici çerçevelerdeki boşlukların giderilmesine yönelik önerilerin geliştirilmesi.
Chang vd., 2024	Otonom feribotların toplum tarafından kabulünün araştırılarak temel etkili boyutlar hakkında kullanıcıların görüşlerinin elde edilmesi.
Janmethakulwat ve Thanasopon, 2024	Armatörlerin dijital teknolojileri benimsenmesini etkileyen unsurların araştırılması.
Kurt ve Aymelek, 2024	Otonom kargo gemilerinin işletimi için limanlar ile birlikte çalışabilirlik ihtiyaçlarının incelenmesi.
Xing, 2024	Uluslararası yasa çerçevesinde gemi kaynaklı kirliliğe yönelik olarak deniz otonom araçlarının kullanımı.
Munim vd., 2025	Ticari deniz taşımacılığında olası otonom deniz araçları türlerinin kullanılabilirliğinin araştırılması.

Tablo 1’de sunulmuş olan bilgilere göre, otonom deniz araçları ile ilgili olarak gerçekleştirilmiş olan çalışmaların sayısının oldukça kısıtlı olduğu ve kısıtlı sayıdaki otonom deniz araçları çalışmalarının ise farklı alanları kapsayacak şekilde gerçekleştirildiği görülebilmektedir. Tablo 1’de yer alan otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalara ait detaylı bilgiler Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Otonom deniz araçları çalışmalarının incelenmesi

Yazar	Çalışmanın Yöntemi	Dergi	Ülke/Bölge	Vaka Çalışması	Açıklayıcı Çalışma
Burmeister vd., 2014	İçerik Analizi	International Journal of e-Navigation and Maritime Economy	Genel		*
Zhang vd., 2020	Modelleme	Safety Science	Çin	*	
Fonseca vd., 2021	TechAdo Modeli	Transport Policy	Genel		*
Inkinen vd., 2021	Tartışma Atölyesi Yöntemi	Research in Transportation Business & Management	Finlandiya	*	
Ivanova vd., 2021	Döküman Analizi	Transportation Research Procedia	Genel		*
Kooij vd., 2021	Maliyet-Fayda Analizi	Ocean Engineering	Hollanda	*	
Liu vd., 2021	Bayes Çıkarımı	Atmospheric Environment	ABD/Almanya/Çin/Singapur/Japonya	*	
Shahbakhs vd., 2021	Literatür Araştırması	The Asian Journal of Shipping and Logistics	Genel		*
Tijan vd., 2021	Literatür Araştırması	Technological Forecasting & Social Change	Genel		*
Escorcia-Gutierrez vd., 2022	Akıllı Derin Öğrenme	Computers and Electrical Engineering	Genel	*	
Jovanovic vd., 2022	Temel Performans Gösterge Analizi	Ocean Engineering	Hırvatistan	*	
Makkonen vd., 2022	Tematik Analiz	Industrial Marketing Management	Genel	*	
Wu vd., 2022	Risk Analizi	Reliability Engineering and System Safety	Genel		*
Dantas ve Theotokatos, 2023	Modelleme	Ocean Engineering	Norveç	*	
Fjortoft vd., 2023	Papyon Analizi	Cleaner Logistics and Supply Chain	Norveç/Hollanda	*	
Karetnikov vd., 2023	Risk Analizi	Transportation Research Procedia	Genel	*	
Klein ve Wojtkiewicz, 2023	Spekülatif Tasarım Yöntemi/Tasarımsal Düşünme Yöntemi	Procedia Computer Science	Güney Baltık bölgesi		*
Li ve Yang, 2023	Makine Öğrenmesi	Transportation Research Part E	Genel		*
Sar, 2023	-	Marine Policy	Genel		*
Xing ve Zhu, 2023	İçerik Analizi	Marine Policy	Çin	*	
Yalman vd., 2023	-	Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora	Genel		*

Tablo 2. (Devamı)

Zis vd., 2023	Temel Performans Gösterge Analizi	Maritime Transport Research	Avrupa	*
Ahmed vd., 2024	İçerik Analizi	Marine Policy	Avrupa Birliği/Norveç	*
Chang vd., 2024	Yapısal Eşitlik Modeli	Transport Policy	Tayvan	*
Janmethakulwat ve Thanasopon, 2024	Kartopu Örneklemesi Yöntemi	The Asian Journal of Shipping and Logistics	Tayland	*
Kurt ve Aymelek, 2024	Çoklu Regresyon analizi	Transport Policy	Genel	*
Xing, 2024	İçerik Analizi	Marine Pollution Bulletin	Genel	*
Munim vd., 2025	Bayes En İyi-En Kötü Yöntemi	Marine Policy	Akdeniz/Baltık	*

Tablo 2’de yer alan bilgilere göre otonom deniz araçlarına yönelik olarak gerçekleştirilmiş olan araştırmalarda vaka çalışmasını bünyesinde bulunduran araştırmaların kapsamının Çin, Hollanda ve Norveç olduğu söylenebilmektedir. Bu durum Çin, Hollanda ve Norveç ülkelerinin geçmişten gelen ve günümüzde de devam ettirdikleri denizcilik kültürü ve yetenekleri ile doğrudan ilişkilidir.

Tablo 2’de sunulan bilgiler ekseninde, otonom deniz araçları ile ilgili yapılmış olan çalışmaların özellikle son 10 yıl içerisinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaların yayınlanmış olduğu dergilere ve yıllara ait haritası Tablo 3’te sunulmaktadır.

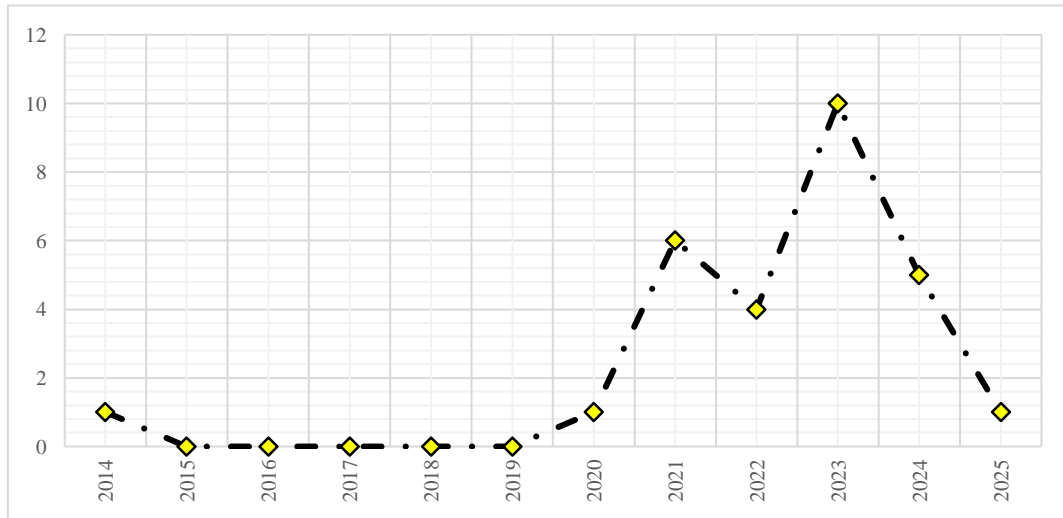
Tablo 3. Otonom deniz araçları çalışmalarının yayın haritası

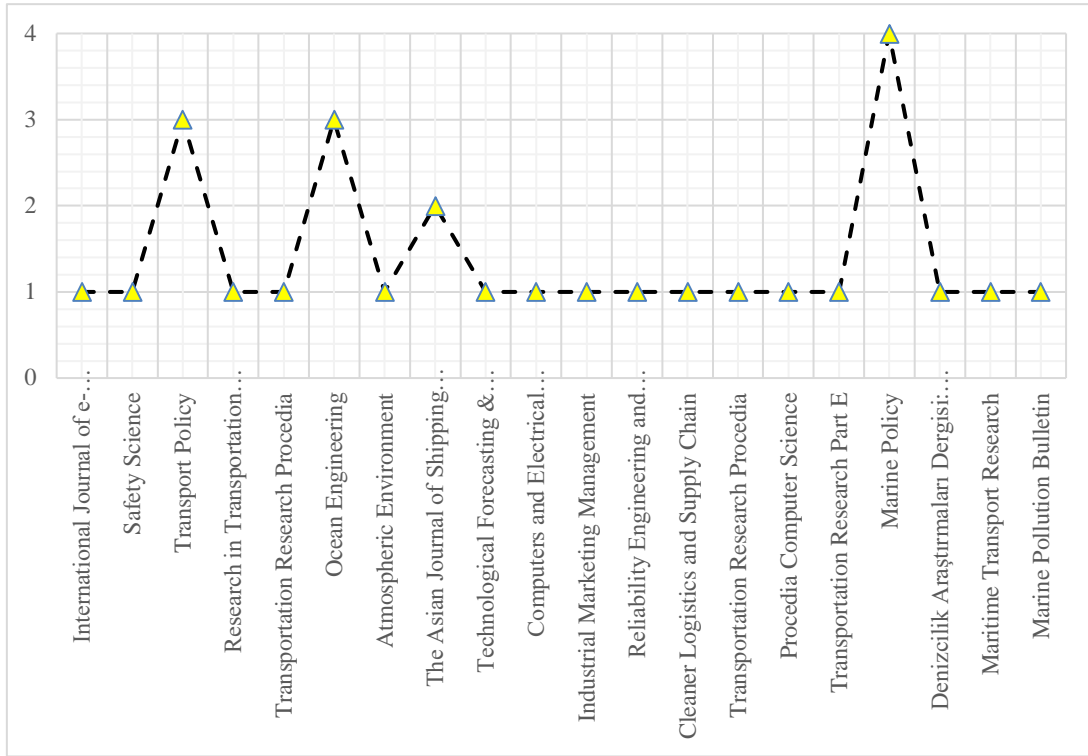
Dergi/Yıl	2014	2020	2021	2022	2023	2024	2025
International Journal of e-Navigation and Maritime Economy	Burmeister vd.	-	-	-	-	-	-
Safety Science	-	Zhang vd.	-	-	-	-	-
Transport Policy	-	-	-	-	Fonseca vd.	Chang vd.;Kurt ve Aymelek	-
Research in Transportation Business & Management	-	-	Inkinen vd.	-	-	-	-
Transportation Research Procedia	-	-	Ivanova vd.	-	-	-	-
Ocean Engineering	-	-	Kooij vd.	Jovanovic vd.	Dantas ve Theotokatos	-	-
Atmospheric Environment	-	-	Liu vd.	-	-	-	-
The Asian Journal of Shipping and Logistics	-	-	Shahbakhsh vd.	-	-	Janmethakulwat ve Thanasopon	-
Technological Forecasting & Social Change	-	-	Tijan vd.	-	-	-	-
Computers and Electrical Engineering	-	-	-	Escorcia-Gutierrez vd.	-	-	-
Industrial Marketing Management	-	-	-	Makkonen vd.	-	-	-
Reliability Engineering and System Safety	-	-	-	Wu vd.	-	-	-

Tablo 3. (Devamı)

Cleaner Logistics and Supply Chain	-	-	-	-	Fjortoft vd.	-	-
Transportation Research Procedia	-	-	-	-	Karetnikov vd.	-	-
Procedia Computer Science	-	-	-	-	Klein ve Wojtkiewicz	-	-
Transportation Research Part E	-	-	-	-	Li ve Yang	-	-
Marine Policy	-	-	-	-	Sar; Xing ve Zhu	Ahmed vd.	Munim vd.
Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora	-	-	-	-	Yalman vd.	-	-
Maritime Transport Research	-	-	-	-	Zis vd.	-	-
Marine Pollution Bulletin	-	-	-	-	-	Xing	-

Tablo 3'te sunulmuş olan yayın haritasına göre, otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş olan çalışmaların son on yılda hareketlendiği, 2015-2019 yılları arasında veri tabanlarında yayınlanmış bir çalışmanın olmadığı, son beş yıl içerisinde ise otonom deniz araçlarına olan ilginin çeşitli disiplinler içerisinde arttığı belirlenmiştir. Otonom deniz araçları ile ilgili yapılmış çalışmaların yıllara göre dağılımı ve dergilerdeki yayın sayıları Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmektedir.

**Şekil 1.** Otonom deniz araçları çalışmalarının yıllara göre dağılımı



Şekil 2. Otonom deniz araçları çalışmalarının dergilere göre dağılımı

Şekil 1’de sunulan grafiğe göre 2023 yılında gerçekleştirilmiş olan otonom deniz araçları çalışmalarının sayısının artmasının, tüm çalışmalara oranının yaklaşık olarak %36’lık kısmını oluşturduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, özellikle 2022 yılında Ukrayna-Rusya savaşının başlamasıyla insansız hava araçlarının (İHA) savaş sahasındaki etkisinin ve dünya genelinde artan savaş korkusunun otonom araçlar üzerine olan ilgiyi arttırması olarak değerlendirilebilmektedir.

Tablo 3 ve Şekil 2’de yer alan bilgilere göre, otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş olan çalışmaların 20 farklı dergide yer aldığı tespit edilmiştir. Otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmaların en fazla yayınlandığı dergiler yayın sayısının büyüklüğüne göre sırasıyla Marine Policy, Transport Policy ve Ocean Engineering olarak belirlenmiştir.

Genel olarak otonom deniz araçları ile ilgili literatür incelendiğinde, otonom deniz araçları çalışmalarının özellikle son on yılda gelişim gösterdiği, son beş yılda ise çalışmaların sayısında artış görüldüğü tespit edilmiştir. Otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmaların farklı bilim alanları kapsamında yapıldığı belirlenmiştir. İlgili çalışmaların yoğun olarak Çin, Hollanda ve Norveç gibi geçmişten günümüze kadar denizcilik kültürüne ve yeteneğine sahip olan ülkelerde yoğunluk gösterdiği saptanmıştır.

Yapılan çalışmaların yayınlandıkları dergiler incelendiğinde otonom deniz araçları ile ilgili çalışmaların en çok Marine Policy dergisinde yayınlandığı görülmüştür. Son olarak otonom deniz araçları ile ilgili çalışmaların uluslararası literatürde çok kısıtlı, ulusal literatürde ise yok denecek kadar az çalışma bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum üç tarafı denizlerle çevrili olan ve tarihinde denizcilik kültürü ve yeteneği olan Türkiye açısından literatürde doldurulması gereken bir boşluk olarak değerlendirilmiştir.

2.2. Otonom deniz araçları çalışmalarında kullanılmış olan kriterler

Otonom deniz araçlarına yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar, nitel ve nicel özelliklere sahip olan çok çeşitli ana/alt kriterler ve değişkenleri bünyesinde barındırması nedeniyle bir karar problemi olarak

tasarlanabilmektedir. Otonom deniz araçlarına yönelik olarak gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda ulaşılan çalışmalarda kullanılmış olan kriterler ve değişkenler Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Otonom deniz araçları çalışmalarında kullanılmış olan kriterler/değişkenler

Yazar, Yıl	Ana Kriter/Ana Değişken	Alt Kriter/Alt Değişken	Alt Kriter/Alt Değişken
Zhang vd., 2020	*Algı aşaması	Bir kişinin birden fazla gemiyi izlemesinin ihmalkârlık olması	
		Yetersiz dikkat	
		Aşırı yorgunluk	
		Aşırı Bilgi yüklenmesi	
		Yetersiz sorumluluk duygusu	
		Düşük fiziksel ve ruhsal koşullar	
		Otomasyon kaynaklı rahavet	
	*Karar aşaması	Acil karar alma sürecinde uygunsuz tercih	
		Acil durum bertarafında deneyim eksikliği	
		Bilginin yetersiz anlaşılması	
		Hava, deniz koşulları ve benzeri konuların dikkate alınmaması	
	*Uygulama aşaması	Gemi algısının eksikliği	
		Durumsal farkındalığın eksikliği	
		Psikolojik farklılıklar	
		Koordinasyonsuz insan-makine etkileşimi	
Yetersiz eğitim			
Inkinen vd., 2021	*Yetkili işbirliği		
	*Lojistik merkezler ve pazar geliştirme		
	*Limanların toplumdaki etkisi		
	*Karbon nötrlüğü		
	*Teknolojik yörüngeler 3D baskı		
	*Yapay zeka ve büyük veri		
	*Blok zincir		
	*IoT ve sensör teknolojileri		
	*Robotik ve otomasyon		
	*Lazer ölçkleme		
	*Siber güvenlik		
Kooij vd., 2021	*İşletme maliyeti		
	*Periyodik bakım		
	*Seyahat masrafları		
	*Kargo elleçleme maliyeti		
	*Sermaye maliyeti		
Liu vd., 2021	*Benimseme belirsizliği		
	*Mevzuat belirsizliği		
	*Operasyonel belirsizlikler		
Escorcia-Gutierrez vd., 2022	*Sabit gövde		
	*Hareketli gövde		

Tablo 4. (Devamı)

Jovanovic vd., 2022	*Ana motor gücü	-	
	*Yardımcı motor gücü		
	*Tasarım hızı		
	*Yolcu kapasitesi		
	*Araç kapasitesi		
	*Seyahat süresi		
	*Rota uzunluğu		
	*Yıllık sefer sayısı		
	*Kullanım ömrü		
Makkonen vd., 2022	*Toplumsal düzey	-	
	*Paydaş sistem düzeyi		
	*Sistemdeki katılımcıların seviyesi		
Dantas ve Theotokatos, 2023	*Çevresel etkiler	Karbondioksit emisyon miktarı	
		Azotoksit emisyon miktarı	
	*Ekonomik etkiler	Sermaye harcaması	
		İşletme giderleri	
	Faaliyet harcamaları		
Fjortoft vd., 2023	*Etki kategorileri	İnsanlar	
		Gemi, ekipman ve altyapı	
		Çevre	
		İtibar	
		Hizmet kesintisi	
	*Tehdit kaynakları	Tehditlerin insan, örgütsel ve operasyonel kaynakları	Terminal çalışanları ve mürettebatı, dış hizmet sağlayıcıları, terminal çalışanları, operasyon merkezi
			İş birliği, düşük planlama kalitesi, taraflar/ BİT sistemleri arasında bilgi alışverişi, prosedürler
		Tehditlerin teknolojik kaynakları	İletişim, uzaktan operasyon, siber saldırılar
			Navigasyon ve dümen sistemi, coğrafi etiketleme, coğrafi sınırlama
			Gemiler, vinç, liman ekipmanları ve kaynakları
Dış tehdit kaynakları	Hava durumu, rotanın bazı kısımlarının kapalı olması (deniz ayağı, terminal, kapı, vb.), gelgit ve alçak su, grev, vb.		
	Diğer dış etkenler (örneğin, diğer gemi trafiği, inşaat çalışmaları)		

Tablo 4. (Devamı)

Xing ve Zhu, 2023	*Hukuki durum	-	
	*Emniyet ve güvenlik		
	*Denize elverişlilik ve mürettebat		
	*Kirliliğin önlenmesi		
	*Yükümlülükler		
	*Sigortalama		
Zis vd., 2023	*Ekonomik	Maliyet	Sermaye giderleri
			Operasyon giderleri
			Bakım maliyetleri
			Liman ücretleri
			Yakıt maliyeti
		Zaman	Yükleme/boşaltma süresi
			Seyir zamanı
			Bekleme zamanı
			Dakiklik oranı
	Toparlanma süresi		
	Kargo elleçleme süresi		
	Diğer	Enerji tüketimi	
		Taşınan kargo	
	*Çevresel	Emisyon	CO ₂
			NOX
			SOX
			PM
			Atık
			Gürültü
		Işık	
		Diğer	Kargo birimi başına terminal alanı
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı			
*Sosyal	Kaza oranı		
	Ölüm oranı		
	Yangın olayları		
	Suç		
	Çalışma koşulları		
	İstihdam		
	Gelir miktarı		
	İşe gidiş geliş süresi		
	Eğitim		
	Trafik		
	Şikayetler		

Tablo 4. (Devamı)

Chang vd., 2024	*Algılanan değer	Otonom deniz araçlarının kullanım deneyimi ile geleneksel deniz araçlarının kullanım deneyiminin farklı olması.
		Otonom deniz araçlarının daha nitelikli bir hizmet kalitesi sunması.
		Otonom deniz araçlarının kullanımının değerli ve özel bir deneyim sağlaması.
		Otonom deniz araçları ile yapılan faaliyetlerin daha konforlu olması.
	*Algılanan maliyet ve zaman tasarrufu	Otonom deniz araçlarının ücretlerinin geleneksel deniz araçlarına göre nispeten daha az olması gerektiğinin düşünülmesi.
		Otonom deniz araçları ile gerçekleştirilen faaliyetlerde uygun fiyatın önemli bir husus olması.
		Otonom deniz araçlarının kullanımı ile seyahat zamanının geleneksel deniz araçlarına kıyasla daha kısa olduğunun düşünülmesi.
	*Algılanan kalite	Otonom deniz araçları hizmetlerinin beklenen varış süresi, konum gibi bilgilerinin daha doğru sunulması.
		Otonom deniz araçlarının daha iyi bir hizmet sağladığının düşünülmesi.
		Otonom deniz araçlarının yüksek eğitimli profesyonel ekipler aracılığıyla yönetilmesi.
	*Algılanan risk	Arızalar sebebiyle otonom deniz araçlarının hizmetlerinin aksayabilme olasılığının varlığı.
		Otonom deniz araçlarının hizmetlerinin siber güvenlik sorunlarından etkilenme olasılığı.
		Otonom deniz araçlarının yetersiz enerji seviyeleri sebebiyle faaliyetler esnasında durma ihtimali.
		Otonom deniz araçlarının daha fazla yatırım maliyetleri nedeniyle geleneksel deniz araçlarına oranla daha az miktarda olması.
	*Otonom deniz araçlarının kullanılma isteği	Otonom deniz araçlarının kullanım ücretleri geleneksel deniz araçlarının ücretleri ile eşit olması durumunda otonom deniz araçlarının kullanımı artar.
Otonom deniz araçlarının faaliyet süresi geleneksel deniz araçlarının faaliyet süresi ile aynı olması durumunda, geleneksel deniz araçları yerine otonom deniz araçları tercih edilirdi.		
Gelecekteki faaliyetlerim için otonom bir deniz aracı kullanmak isterim.		
Xing, 2024	*En yüksek tonaj miktarı	-
	*Gemi uzunluk tipi	-
	*Yakıt türü	-
Munim vd., 2025	*İşletme maliyetleri	-
	*Sermaye maliyetleri	-
	*Net bugünkü değer	-
	*Uzaktan operasyon merkezi altyapısı	-
	*Gelişmiş navigasyon çarpışma önleme ve karaya oturma önleme sistemi	-
	*Siber güvenlik riski	-
	*Teknik müdahale hizmetleri	-

Tablo 4. (Devamı)

*Kurallara ve düzenlemelere uyum	-
*Denizde ve limanda çevresel faydalar	-

Çalışmada gerçekleştirilmiş olan literatür araştırması doğrultusunda Tablo 4; Otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda ekonomik-maliyet temelli kriterler/değişkenler ile çevresel kriterler/değişkenlerin yoğun olarak kullanıldığını göstermektedir.

3. Sezgisel bulanık çok kriterli karar verme yöntemi

Çalışmanın bu bölümünde, uygulamada kullanılan yöntemlere ait olan teorik bilgiler “sezgisel bulanık kümeler” ve “sezgisel bulanık swara yöntemi” başlıkları altında aktarılmıştır.

3.1. Sezgisel bulanık kümeler

Tanım 1 (Atanassov, 1989): X değeri boş olmayan bir küme olduğu ve bir fonksiyon olduğu varsayıldığında;

$$f_A: X \rightarrow [0,1] \times [0,1]; x \mapsto (\mu_A(x), v_A(x)) \quad (1)$$

$0 \leq \mu_A(x) + v_A(x) \leq 1$ aralığında $A = \{x, \mu_A(x), v_A(x) | x \in X\}$ olarak gösterilen f_A boş olmayan küme olan X değerinin sezgisel bulanık kümesini belirlemektedir. Burada $\mu_A(x)$ değeri üyelik fonksiyonunu, A değeri x 'in sezgisel bulanık kümelere üyelik derecesini ve $v_A(x)$ ise üye olmama fonksiyonunu temsil etmektedir. $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x)$ eşitliğinde $\pi_A(x)$ değeri ise tereddüt veya belirsizlik derecesini ifade etmektedir. Bu nedenle, sezgisel bulanık sayılar (μ_x, v_x, π_x) olarak da gösterilebilmektedir. Bu çalışmada, sezgisel bulanık sayıların diğer bir gösterimi olan (μ_x, v_x) şeklinde ifade edilmektedir.

Tanım 2 (Xu, 2007): Sezgisel bulanık sayılar $\alpha = (\mu, v)$ için, puan fonksiyonu ve doğruluk fonksiyonu aşağıda gösterilen eşitlik (2) ve eşitlik (3) şeklinde tanımlanmaktadır:

$$S(\alpha) = \mu - v \quad (2)$$

$$H(\alpha) = \mu + v \quad (3)$$

$$S(\alpha) \in [-1,1]; H(\alpha) \in [0,1].$$

Tanım 3 (Xu vd., 2015): İyileştirilmiş puan fonksiyonu ve doğruluk fonksiyonu eşitlik (4) ve eşitlik (5) şeklinde tanımlanmaktadır:

$$S^*(\alpha) = \frac{S(\alpha)+1}{2} \quad (4)$$

$$H^* = \frac{\mu+v}{2} \quad (5)$$

$$S^*(\alpha) \in [0,1]; H^*(\alpha) \in [0,1].$$

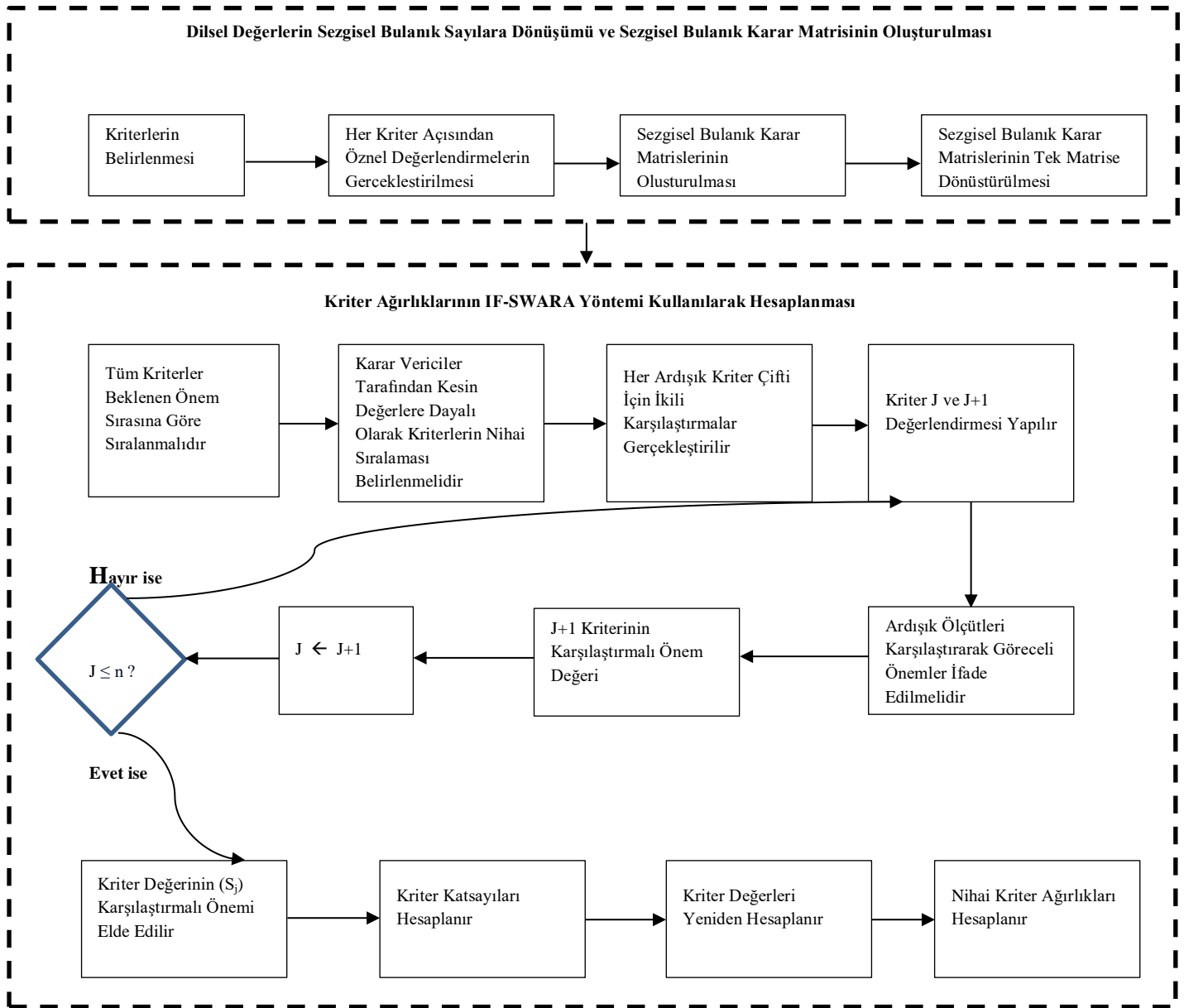
Tanım 4: $\alpha_j = (\mu_j, v_j) (j = 1, 2, \dots, n)$ eşitliği $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ eşitliğine karşılık gelen ağırlık vektörleri için sezgisel bulanık sayı dizisi olarak ifade edilmekte olup $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \in [0,1]$ 'dir. Bu durumda sezgisel bulanık ağırlıklı ortalama (IFWA) operatörü aşağıda gösterilen eşitlik (6) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$IFWA_\omega = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \bigoplus_{j=1}^n \omega_j \alpha_j = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_j)^{\omega_j}, \prod_{j=1}^n v_j^{\omega_j}\right) \quad (6)$$

3.2. Sezgisel bulanık swara (IF-SWARA) yöntemi

The Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) yöntemi, Kersulienė tarafından geliştirilmiş olan kriter ağırlıklarını hesaplayabilmek için güncel bir çok kriterli karar verme yöntemidir (Liu, 2018; Kersulienė vd., 2010). Bu çalışmada sezgisel bulanık swara (IF-SWARA) yöntemi kullanılmıştır. IF-SWARA yönteminin çalışma prosedürü Şekil 3'te gösterilmektedir.

Amaç: ÇKKV Problem Çözümü (Kriterler)



Şekil 3. IF-SWARA yönteminin uygulama prosedürü

SWARA yöntemi sezgisel bulanık küme teorisi ile bütünleştirilerek sezgisel bulanık swara yöntemi oluşturulmuştur. Sezgisel bulanık swara yönteminin adımları aşağıda gösterilmektedir (Ziquan vd., 2021):

Adım 1: Her karar verici, her göstergenin göreceli önemini, karşılık gelen sezgisel bulanık sayıya göre ifade etmektedir. Ardından eşitlik (6) ve karar vericilerin ağırlık değerleri kullanılarak sezgisel bulanık ağırlıklı aritmetik ortalama operatörü ($IFWA_{\omega}$) değeri elde edilir. $IFWA_{\omega}$ değerinin elde edilmesinden sonra eşitlik (4) ve eşitlik (5) aracılığıyla her kriterin puan fonksiyon değeri ($S^*(C_j)$) hesaplanır. Her kriterin puan fonksiyonu değerine göre kriterler azalan önem sırası ile sıralanır.

Adım 2: Karşılaştırmalı önem değerleri hesaplanır. Bu adımda karar vericiler ikinci kriterden başlayıp j kriterinin j+1 kriterine göre olan önemini belirtmektedir. Karşılaştırmalı önem değerlerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik (7) aşağıda gösterilmektedir.

$$s_j = S^*(C_{j-1}) - S^*(C_j) \quad (7)$$

Adım 3: Karşılaştırma katsayısı (k_j) hesaplanır. k_j katsayısı aşağıdaki eşitlik (8) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (8)$$

Adım 4: Kriter ağırlıkları hesaplanır. Yeniden hesaplanan ağırlık değerleri (p_j) eşitlik (9) aracılığıyla hesaplanmaktadır:

$$p_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{k_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (9)$$

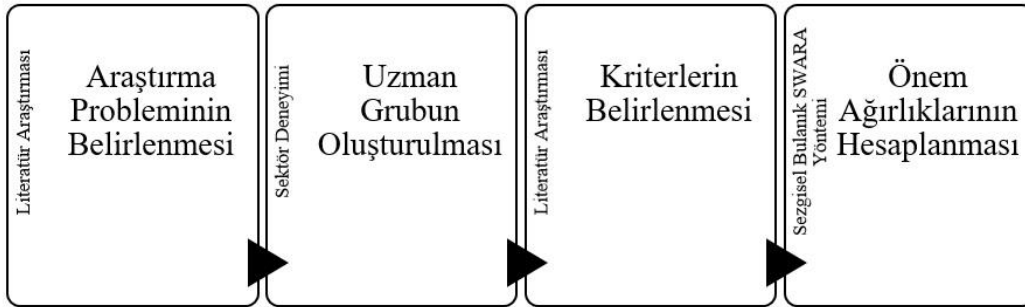
Adım 5: Kriterlerin nihai ağırlıkları (w_j) hesaplanır. Kriterlerin nihai ağırlıkları eşitlik (10) yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$w_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (10)$$

4. Uygulama

Günümüzde teknoloji alanında meydana gelen gelişmeler tüm alanlara etki etmekle kalmayıp aynı zamanda farklı alanlara da entegre edilerek kullanılmaktadır. Teknoloji alanında meydana gelen gelişmelerin etki ettiği sektörlerden biri de ticari deniz taşımacılığı sektörüdür. Ticari deniz taşımacılığının ülkelerin sürdürülebilir hem ekonomik hem de çevresel hedeflerini sağlamasında sahip olduğu pozisyon düşünüldüğünde otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığı içerisindeki yerinin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca ticari deniz taşımacılığının dünya ekonomisindeki ve sosyal yaşamdaki yeri düşünüldüğünde kullanılan deniz araçları gündelik hayatın devamının sağlanmasında önemli bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum ise otonom deniz araçlarına yönelik gerçekleştirilmiş araştırmaların önemini her geçen gün arttırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımına etki eden kriterlerin önem ağırlıklarının donatanların bakış açısıyla değerlendirilmesidir. Bu amaç çerçevesinde otonom deniz araçlarının değerlendirilmesinde kullanılan kriterler belirlenerek, donatanların açısından ticari deniz taşımacılığında otonom deniz araçlarının kullanımında etkili olan kriterlerin önem ağırlıkları hesaplanmaktadır. Çalışmada kullanılan kriterlerin önem ağırlıkları Sezgisel Bulanık SWARA yöntemi aracılığıyla belirlenmiştir. Çalışmanın uygulama kısmı dört adımda tasarlanmıştır. Çalışmada belirlenen amaç doğrultusunda yapılan uygulamanın metodolojik akışı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Uygulama akış adımları

4.1. Araştırma probleminin belirlenmesi

Araştırma problemi gerçekleştirilmiş olan literatür araştırmasından elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Araştırmada, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımının donatanların bakış açısıyla değerlendirilmesinde yararlanılmış olan kriterlerin önem ağırlıklarının tespiti araştırmanın problemi olarak belirlenmiştir.

4.2. Uzman grubun oluşturulması

Çalışmanın amacı ve araştırma probleminin yapısına göre görüşleri ve tecrübeleri kullanılacak olan uzman grup, Türk Ticaret Kanununun 946. Maddesi uyarınca “Donatan” sıfatına haiz olmuş iş insanlarından oluşmaktadır. Çalışmada görüşlerinden ve tecrübelerinden faydalanılacak olan uzman grupta yer alan donatanlara ait bilgiler Tablo 5’te sunulmaktadır.

Tablo 5. Uzman grupta bulunan donatanlara ait bilgiler

İş İnsanı	Görev/Unvan	Sahip Olunan Gemi Sayısı	Şirketin Faaliyet Süresi
D ₁	Donatan	9	>13 Yıl
D ₂	Donatan	12	>46 Yıl
D ₃	Donatan	7	>39 Yıl
D ₄	Donatan	6	>44 Yıl
D ₅	Donatan	6	>13 Yıl
D ₆	Donatan	20	>6 Yıl
D ₇	Donatan	17	>57 Yıl

4.3. Kriterlerin belirlenmesi

Çalışmada yapılan literatür araştırmasından elde edilen bilgiler doğrultusunda 14 farklı çalışmada otonom deniz araçları ile ilgili kriterler/değişkenler kullanıldığı tespit edilmiştir. İlgili çalışmalarda toplam 66 ana, 91 alt kriter/değişken olmak üzere toplamda 157 kriter/değişkene ulaşılabilmektedir. Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda araştırmanın desenine uygun olan kriterlerin Munim vd., (2025) tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmada yer alan kriterler olduğu, uzman grup ile yapılan görüşmeler sonucunda kararlaştırılmıştır. İlgili kriterler Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Çalışmada kullanılan kriterler

Notasyon	Kriter Adı	Kriter Açıklaması
ODA ₁	İşletme Maliyetleri	Depolama, personel ücretleri, bakım ve onarım ile sigortalama ile ilgili maliyetleri kapsamaktadır. Otomasyon seviyesinin artmasıyla birlikte işletme maliyetlerinin düşecek olması durumu işletmeler açısından ciddi tasarruflar sağlamaktadır.
ODA ₂	Sermaye Maliyetleri	Gemi satın alım işlemlerinde yatırım maliyeti, borç ya da faiz ödemelerini kapsamaktadır. Sermaye maliyetlerinin gelişmiş teknoloji ihtiyaçları ile teknik arıza ya da kesintiler durumunda olası risklerin azaltılması ya da ortadan kaldırılması için yedek sistemlerin bulundurulma gerekliliği nedeniyle sermaye maliyetlerinin otonom deniz araçlarında geleneksel araçlara göre daha fazla olması muhtemeldir.
ODA ₃	Net Bugünkü Değer	Bir gemi yatırımının gelecekteki nakit akışlarının tahmini bugünkü değeri ile paranın zaman değeri kıyaslanmalıdır. Pozitif net bugünkü değer, otonom deniz araçlarının benimsemesinin gelecekte finansal faydalar sağlayacağını göstermektedir.
ODA ₄	Uzaktan Operasyon Merkezi Altyapısı	Hem denizde hem de kıyıda olmak üzere, kalifiye bir operatörün en az bir gemiyi uzaktan yönetebileceği kontrol merkezi altyapısı kurulmalıdır. Bu sayede gemilerdeki mürettebat ihtiyaçları azaltılarak operasyonel verimlilikte artış sağlanır.
ODA ₅	Gelişmiş Navigasyon Çarpışma Önleme ve Karaya Oturma Önleme Sistemi	Gelişmiş radar ve sensör sistemleri aracılığıyla artırılmış güvenlik sağlanır. İlgili sistemler aracılığıyla karaya oturma ve çarpışma riski azaltılarak gecikmeler ve olası kazalar önenebilmektedir.
ODA ₆	Siber Güvenlik Riski	Siber korsanlar tarafından gemi kontrolünü ve operasyonlarını ele geçirmesi durumunda oluşabilecek olan operasyonel tehlikeleri kapsamaktadır. Siber saldırılar mali kayıplara ve operasyonel kesintilere neden olabilmektedir.
ODA ₇	Teknik Müdahale Hizmetleri	Otonom deniz araçları onarım hizmetleri ve teknik personel müdahalesi için oluşabilecek maliyetler ve operasyonel duruş süresiyle karşı karşıya kalabilir. Otonom deniz araçlarının sefer esnasında oluşabilecek bir mekanik sorunla karşılaşması durumunda, teknik personel müdahalesinden kaynaklanan duraksamaların süresini ve maliyetlerini içermektedir.

Tablo 6. (Devamı)

ODA ₈	Kurallara Düzenlemelere Uyum	ve	Uluslararası ve bölgesel kuruluşların kılavuzluk, liman kontrolü, emisyon ve salınımları gibi çeşitli alanlarındaki tüm ilgili düzenlemelere uyulmasını ifade etmektedir. Kurallara ve düzenlemelere uyum gösterilmemesi durumunda yasal işlem, para cezaları ve operasyonel gecikmeler meydana gelebilir.
ODA ₉	Denizde ve Limanda Çevresel Faydalar		Otonom deniz araçları sayesinde denizde ve limanlarda emisyon salınımları, kirlilik ve gürültü seviyesinde azalma sağlanabilmektedir. Çevresel faydalar, azaltılmış vergiler ve emisyon kredileri aracılığıyla işletmelere maliyet tasarrufları sağlayarak şirket itibarını yükseltebilmektedir.

Kaynak: Munim vd., 2025.

4.4. Otonom deniz araçları kriterlerinin önem ağırlıklarının hesaplanması

Literatür araştırması doğrultusunda elde edilen otonom deniz araçları kriterlerinin sahip oldukları önem ağırlıkları Sezgisel Bulanık SWARA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. İlgili kriterlere ait olan önem ağırlıkları, deniz taşımacılığı sektöründe en düşük altı en yüksek elli yedi yıldan fazladır faaliyette bulunup en az altı en fazla yirmi gemisi bulunan köklü şirketlere sahip yedi Donatandan oluşturulmuş olan uzman grupla yapılan görüşmeler sonucunda ulaşılan verilerin kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Uzman grupta yer alan ve ilgili yöntemde karar vericiler olarak nitelendirilen Donatanlar gerçekleştirdikleri ikili karşılaştırmalarda Tablo 7’de sunulan ölçekten yararlanmışlardır. Donatanların yaptıkları ikili karşılaştırmalarla elde edilen verilere ait bilgiler Tablo 8’de sunulmaktadır.

Tablo 7. Kriterlerin önemini derecelendirmek için kullanılan dilbilimsel terimler

Dilsel Terimler	Sezgisel Bulanık Sayılar
Son Derece Önemli (EI)	(0,90 ; 0,05)
Çok Önemli (VI)	(0,80 ; 0,15)
Önemli (I)	(0,65 ; 0,30)
Orta (M)	(0,50 ; 0,45)
Önemsiz (U)	(0,35 ; 0,60)
Çok Önemsiz (VU)	(0,20 ; 0,75)
Kesinlikle Önemsiz (EU)	(0,10 ; 0,90)

Kaynak: Ziquan vd., 2021.

Tablo 8. Donatanların değerlendirmeleri

	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇
ODA ₁	VI	I	VI	VI	VI	VI	VI
ODA ₂	I	M	M	I	VI	I	M
ODA ₃	I	VI	I	I	I	VI	I
ODA ₄	M	U	M	VI	M	EI	I
ODA ₅	VI	VI	EI	I	I	I	I
ODA ₆	I	I	VI	EI	M	I	I
ODA ₇	M	M	I	M	M	M	I
ODA ₈	M	M	M	I	I	M	EI
ODA ₉	I	I	I	I	M	VI	VI

Donatanlar tarafından yapılan değerlendirmeler sonucunda elde edilen bilgiler sezgisel bulanık sayılara dönüştürülerek Tablo 9’da sunulmuştur. Çalışmada her bir donatanın önem ağırlığı eşit olarak kabul edilmiştir.

Tablo 9. Donatan değerlendirilmelerinin sezgise bulanık sayı karşılıkları

	D₁	D₂	D₃	D₄	D₅	D₆	D₇
ODA₁	(0,80;0,15)	(0,65;0,30)	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)
ODA₂	(0,65;0,30)	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,65;0,30)	(0,80;0,15)	(0,65;0,30)	(0,50;0,45)
ODA₃	(0,65;0,30)	(0,80;0,15)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,80;0,15)	(0,65;0,30)
ODA₄	(0,50;0,45)	(0,35;0,60)	(0,50;0,45)	(0,80;0,15)	(0,50;0,45)	(0,90;0,05)	(0,65;0,30)
ODA₅	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)	(0,90;0,05)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)
ODA₆	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,80;0,15)	(0,90;0,05)	(0,50;0,45)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)
ODA₇	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,65;0,30)	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,65;0,30)
ODA₈	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,50;0,45)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,50;0,45)	(0,90;0,05)
ODA₉	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,65;0,30)	(0,50;0,45)	(0,80;0,15)	(0,80;0,15)

Tablo 10’da donatanların birleştirilmiş sezgisel bulanık sayı değerleri ve puan fonksiyon değerleri gösterilmektedir.

Tablo 10. Birleştirilmiş sezgisel bulanık sayı ve puan fonksiyon değerleri

	Birleştirilmiş Sezgisel Bulanık Sayılar		Puan Fonksiyon Değerleri S*(C_j)
ODA₁	0,7834	0,1656	0,8089
ODA₂	0,6235	0,3233	0,6501
ODA₃	0,7017	0,2461	0,7278
ODA₄	0,6561	0,2763	0,6899
ODA₅	0,7506	0,1905	0,7800
ODA₆	0,7157	0,2229	0,7464
ODA₇	0,5484	0,4008	0,5738
ODA₈	0,6412	0,2928	0,6742
ODA₉	0,6861	0,2608	0,7127

Her kriter için puan fonksiyon değerlerinin belirlenmesinin ardından kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi için yöntemin adımları uygulanarak Tablo 11’deki bilgiler elde edilmiştir.

Tablo 11. Sezgisel bulanık swara yöntemi ile elde edilen ağırlık değerleri

Kriterler	S*(C_j)	S_j	k_j	q_j	w_j
ODA₁	0,8089	-	1,0000	1,0000	0,1913
ODA₅	0,7800	0,1500	1,1500	0,8696	0,1663
ODA₆	0,7464	0,0500	1,0500	0,8282	0,1584
ODA₃	0,7278	0,2500	1,2500	0,6625	0,1267
ODA₉	0,7127	0,2000	1,2000	0,5521	0,1056
ODA₄	0,6899	0,3500	1,3500	0,4090	0,0782
ODA₈	0,6742	0,1000	1,1000	0,3718	0,0711

Tablo 11. (Devamı)

ODA₂	0,6501	0,3000	1,3000	0,2860	0,0547
ODA₇	0,5738	0,1500	1,1500	0,2487	0,0476

Tablo 11'deki bilgiler, donatanlar için ODA₁ (0,1913) kriterinin otonom deniz araçları açısından en önemli kriter olarak görüldüğünü, ODA₇ (0,0476) kriterinin ise önem açısından en az değere sahip kriter olarak düşünüldüğünü göstermektedir.

5. Tartışma

Çalışmanın bulguları, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımını etkileyen kriterler içerisinde İşletme Maliyetleri (ODA₁) kriterinin 0,1913 önem ağırlığıyla çalışmada kullanılan kriterler arasında ilk sırada yer aldığını göstermektedir. İşletme Maliyetleri kriterini ise Gelişmiş Navigasyon Çarpışma Önleme ve Karaya Oturma Önleme Sistemi (ODA₅) ile Siber Güvenlik Riski (ODA₆) kriterlerinin sırasıyla 0,1663 ve 0,1584 önem ağırlık puanlarıyla izlediği tespit edilmiştir. Teknik Müdahale (ODA₇) kriteri ise mevcut kriterler içerisinde 0,0476 önem ağırlık puanıyla son sırada yer almıştır.

Bu çalışmanın bulguları, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığı sektöründe kullanımında ve sektörle entegrasyonunu sağlamaya yönelik olarak çeşitli politikaların geliştirilebilmesine imkan sağlamaktadır. Otonom deniz araçlarının kullanımını etkileyen en önemli kriterlerin İşletme Maliyetleri (ODA₁), Gelişmiş Navigasyon Çarpışma Önleme ve Karaya Oturma Önleme Sistemi (ODA₅) ve Siber Güvenlik Riski (ODA₆) olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, ilgili kurum ve kuruluşların mevcut durumu geliştirmek için bu alanlarda inovasyon ve teşvik çalışmalarını gerçekleştirerek araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerini hızlandırmaları gerektiğini göstermektedir. Ayrıca kamu-özel sektör işbirlikleri ile dünya genelindeki uygulamalar yakından incelenerek yapılacak yatırımlar ile mevcut durum iyileştirilmelidir.

Ekonomik açıdan yorumlanabilecek olan İşletme Maliyetleri (ODA₁) ve Sermaye Maliyetleri (ODA₂) kriterleri önem ağırlıkları açısından farklı noktalarda yer almaktadır. İşletme Maliyetleri (ODA₁) 0,1913 önem ağırlığı ile dokuz kriter arasında ilk sırada yer alırken, Sermaye Maliyetleri (ODA₂) kriteri ise 0,0547 önem ağırlığıyla sekizinci sırada yer almaktadır. Bu durum otonom deniz araçlarının donatanlar açısından işletme maliyetlerini düşürerek rekabet avantajı sağlayacak olması ile açıklanabilirken, sermaye maliyetlerinin en az öneme sahip olan kriterlerden biri olması ise otonom deniz araçlarının donatanlara sağlayacağı avantajlara kıyasla yapılacak olan yatırımın karşılığının alınabileceği düşüncesidir.

Siber Güvenlik Riski (ODA₆) donatanlar tarafından önemli görülen en önemli kriterlerden biri olarak belirlenmiştir. Bu durum aynı zamanda donatanlar tarafından ilgili kriterin bir tehdit olarak görülmesi şeklinde de okunabilmektedir. Çünkü otonom deniz araçlarının dijital sistemlere daha fazla bağımlı olmaları, bu araçların siber tehditlere karşı daha kırılgan bir hale dönüşmesine neden olmaktadır. İlgili kriter ile ilgili endişelerin giderilebilmesi ve operasyonların güvence altına alınması için mevcut ve güncel tehditlerin tespit edilebileceği sistemler de dahil olmak üzere güçlü siber güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılacak olan sistemlerde yer alan protokollerin güncellemelerinin düzenli olarak gerçekleştirilip siber güvenlik uzmanlarıyla işbirliklerinin yapılması otonom deniz araçlarının dayanıklılığını arttıracaktır.

Donatanlarla yapılan görüşmelerde ise otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında benimsenebilmesi için kamu, özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve ilgili diğer tüm kurum ve kuruluşlarında yürütülecek süreçlerde aktif olarak katılımlarının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu gerekliliğin nedeni olarak ilgili tüm paydaşların politika geliştirme çalışmalarına dâhil edilmesinin otonom deniz araçlarının sosyal anlamda kabulü ve ticari deniz taşımacılığında kullanımını için etkili bir yol olduğunun düşünülmesidir.

6. Sonuç ve Öneriler

Son on yılda otonom deniz araçlarının kullanımı literatürde yer bulmaya başlamıştır. Otonom deniz araçlarının kullanım alanları ise çeşitli alanları kapsamaktadır. Otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımı ise gelecekte ticari deniz taşımacılığının vazgeçilmez bir unsuru haline dönüşeceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada amaç otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımına etki eden kriterlerin önem ağırlıklarının donatanların bakış açısıyla değerlendirilmesidir. Çalışmada yer alan kriterlerin önem ağırlıklarının hesaplanması için gerçekleştirilen uygulama dört adımda yürütülmüştür. Birinci adımda literatür araştırması yapılarak çalışmanın araştırma problemi belirlenmiştir. İkinci adımda uygulamada kullanılacak olan kriterlerin saptanabilmesi için literatürde bulunan otonom deniz araçları ile ilgili çalışmalar titiz bir biçimde incelenmiştir. Üçüncü adımda çalışmada görüş ve tecrübelerinden bilgilenecek olan uzman grup, Türk Ticaret Kanununun 946. Maddesi uyarınca “Donatan” sıfatına haiz olmuş iş insanlarından oluşturulmuştur. Dördüncü adımda, uygulamanın ikinci adımında çalışmada kullanılmak üzere saptanan kriterlere ait olan önem ağırlıkları Sezgisel Bulanık SWARA yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımı birden fazla nitel ve nicel kriteri doğasında bulduran ve yapısı gereği ilgili spesifik bilgilere sahip olunması gerekliliğinden dolayı uzman görüşleri ekseninde değerlendirilmesi gereken bir çok kriterli karar verme problemidir. Ayrıca ilgili konunun bünyesinde yer alan belirsizlik ve karmaşıklık dolayısıyla mevcut problemin çözümü de zorlaşmaktadır. Bu bilgiler ekseninde çalışmada bulunan kriterlerin önem ağırlıklarının hesaplanması için hem nitel ve nicel kriterlerin bir arada değerlendirilmesine fırsat sağlayan hem de problemin doğasında bulunan belirsizliklere çözüm getirebilen Sezgisel Bulanık ÇKKV tekniği (Sezgisel Bulanık SWARA) kullanılmıştır.

Mevcut çalışmanın, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığı faaliyetlerinde kullanımını etkileyen kriterlerin önem ağırlıklarının hesaplanmasında Sezgisel Bulanık SWARA yöntemini kullanan ilk çalışma olması, ilgili çalışmayı mevcut literatürde bulunan diğer çalışmalardan ayıran özellik olarak gösterilebilmektedir. Ayrıca, otonom deniz araçlarının ticari deniz taşımacılığında kullanımını donatanlar açısından değerlendirmeye yönelik daha önce bir çalışmanın yapılmamış olması, bu çalışmanın mevcut literatüre gerçekleştirdiği katkı bağlamında önemini göstermektedir.

Otonom deniz araçları ile ilgili gerçekleştirilen literatür araştırması ekseninde ulaşılan çalışmalarda kullanılmış olan kriterler incelendiğinde, mevcut çalışmanın sonuçlarının Munim vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kriterlerin önem ağırlıkları açısından sahip oldukları sıralamaları önem ağırlıklarına göre sırasıyla İşletme Maliyetleri, Gelişmiş Navigasyon Çarpışma Önleme ve Karaya Oturma Önleme Sistemi ile Siber Güvenlik Riski olarak belirlenmiştir. Munim vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise kriterlerin önem ağırlıkları açısından sıralaması önem ağırlıklarına göre sırasıyla Gelişmiş Navigasyon Çarpışma Önleme ve Karaya Oturma Önleme Sistemi, Siber Güvenlik Riski ve Teknik Müdahale Hizmetleri olarak belirlenmiştir. Bu bilgi ekseninde, her iki çalışmada da aynı kriterlerin en önemli ilk üç kriter içerisinde yer alması çalışmada kullanılan kriterlerin hesaplanan önem derecelerinin literatür ile olan paralellliğini göstermektedir.

Çalışmada yararlanılmış olan bilgiler, Türk Ticaret Kanununun 946. Maddesi uyarınca “Donatan” sıfatına haiz olmuş iş insanlarından oluşan yedi donatandan elde edilmiştir. Bu doğrultuda çalışmada gerçekleştirilen uygulamanın sonuçları uzman grupta yer alan yedi donatanın görüş ve tecrübelerine dayanıyor olması çalışmanın ilk kısıtını oluşturmaktadır. Ayrıca Sezgisel Bulanık SWARA yönteminin sahip olduğu öznellikten kaynaklı, çalışmaya farklı kriterlerin eklenmesi veya çalışmada faydalanılan kriterlerden herhangi birinin eksilmesi halinde çalışmanın mevcut sonuçlarının değişim göstermesi durumu mevcut çalışmanın diğer bir kısıtı olarak ifade edilebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan kriterler Munim vd. (2025) tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmadan elde edilmiştir. Ticari deniz taşımacılığı süreçlerinde yer almış sektör temsilcileri ile otonom deniz araçlarının geliştirilmesinde faaliyetlerde bulunmuş uzmanların bir araya getirilerek sahip oldukları fikirleri doğrultusunda fikir birliğinin sağlanmasına imkan sunacak grup karar verme yöntemleriyle (Nominal Grup Tekniği, Delphi Tekniği vb.) çalışmada kullanılan kriterler geliştirilerek otonom deniz araçları ile ilgili literatüre katkı sağlanabilir. Ayrıca, ÇKKV yöntemlerinin farklı teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile bu çalışmanın sonuçları kıyaslanabilir. Son olarak farklı ÇKKV yaklaşımları ile otonom deniz araçlarında ticari deniz taşımacılığını etkileyen kriterlerin arasındaki mevcut ilişkiler belirlenerek duyarlılık analizi gerçekleştirilebilir.

Araştırmaların Katkı Oranı Beyanı

Çalışmadaki katkıların tümü yazara aittir.

Destek ve teşekkür beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kişi veya kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Ahmed, Y.A., Theotokatos, G., Maslov, I., Wenersberg, L.A.L. & Nesheim, D.A. (2024). Regulatory and legal frameworks recommendations for short sea shipping maritime autonomous surface ships. *Marine policy*, 166, 1-17.

Atanassov, K.T. (1989). More on intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy sets and systems*, 33(1), 37-45.

Burmeister, H.C., Bruhn, W., Rodseth, O.J. & Porathe, T. (2014). Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-navigation implementation: The MUNIN perspective. *International journal of e-navigation and maritime economy*, 1, 1-13.

Chang, C.H., Lin, C.C., Yang, Z. & Kontovas, C. (2024). Evaluating the social acceptance of autonomous ferries: An observation from passengers' boarding willingness. *Transport policy*, 159, 83-94.

Dantas, J.L.D. & Theotokatos, G. (2023). A framework for the economic-environmental feasibility assessment of short-sea shipping autonomous vessels. *Ocean engineering*, 279, 1-20.

Escorcia-Gutierrez, J., Gamarra, M., Beleno, K., Soto, C. & Mansour, R.F. (2022). Intelligent deep learning-enabled autonomous small ship detection and classification model. *Computers and electrical engineering*, 100, 1-13.

Fjortoft, K., Parvasi, S.P., Nesheim, D.A., Wennerberg, L.A.L., Morkrid, O.E. & Psaraftis, H.N. (2023). Assessing the resilience of sustainable autonomous shipping: New methodology, challenges, opportunities. *Cleaner logistics and supply chain*, 9, 1-16.

Fonseca, T., Lagdami, K. & Schröder-Hinrichs, J.U. (2021). Assessing innovation in transport: An application of the technology adoption (TechAdo) model to maritime autonomous surface ships (MASS), *Transport policy*, 114, 182-195.

Inkinen, T., Helminen, R. & Saarikoski, J. (2021). Technological trajectories and scenarios in seaport digitalization. *Research in transportation business & management*, 41, 1-11.

Ivanova, A., Butsanets, A., Breskich, V. & Zhilkina, T. (2021). Autonomous shipping Means: the main areas of patenting research and development results. *Transportation research procedia*, 54, 793-801.

Janmethakulwat, A. & Thanasopon, B. (2024). Digital technology adoption and institutionalization in Thai maritime industry: An exploratory study of the Thai shipowners. *The Asian journal of shipping and logistics*, 40(3), 157-166.

- Jovanovic, I., Vladimir, N., Percic, M. & Korican, M. (2022).** The feasibility of autonomous low-emission ro-ro passenger shipping in the Adriatic Sea. *Ocean engineering*, 247, 1-12.
- Karetnikov, V.V., Butsanets, A.A. & Danilov, O.O. (2023).** Features of the development of a navigation safety system for unmanned port tugs based on the risk assessment method. *Transportation research procedia*, 68, 357-362.
- Kersuliene, V., Zavadskas, E. K. & Turskis, Z. (2010).** Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, 11(2), 243-258.
- Kim, M., Joung, T.H., Jeong, B. & Park, H.S. (2020).** Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. *Journal of international maritime safety, environmental affairs, and shipping*, 4(2), 17-25.
- Klein, M. & Wojtkiewicz, M.S. (2023).** Digitalization of small ports as a step in achieving sustainable goals. *Procedia computer science*, 225, 3381-3387.
- Kooij, C., Kana, A.A. & Hekkenberg, R.G. (2021).** A task-based analysis of the economic viability of low-manned and unmanned cargo ship concepts. *Ocean engineering*, 242, 1-11.
- Kurt, I. & Aymelek, M. (2024).** Operational adaptation of ports with maritime autonomous surface ships. *Transport policy*, 145, 1-10.
- Li, H. & Yang, Z. (2023).** Incorporation of AIS data-based machine learning into unsupervised route planning for maritime autonomous surface ships. *Transportation research part e: Logistics and transportation review*, 176, 1-32.
- Liu, C. (2018).** Supplier selection evaluation of shipbuilding enterprises based on entropy weight and multi-attribute decision making. *Proceedings of the fifth international forum on decision sciences*, 255-268.
- Liu, J., Law, A.W.K. & Duru, O. (2021).** Abatement of atmospheric pollutant emissions with autonomous shipping in maritime transportation using bayesian probabilistic forecasting. *Atmospheric environment*, 261, 1-10.
- Makkonen, H., Davies, S.N., Saarni, J. & Huikkola, T. (2022).** A contextual account of digital servitization through autonomous solutions: Aligning a digital servitization process and a maritime service ecosystem transformation to autonomous shipping. *Industrial marketing management*, 102, 546-563.
- Munim, Z.H. (2019).** Autonomous ships: a review, innovative applications and future maritime business models. *Supply chain forum: An international journal*, 20(4), 266–279.
- Munim, Z.H., Notteboom, T., Haralambides, H. & Schoyen, H. (2025).** Key determinants for the commercial feasibility of maritime autonomous surface ships (MASS). *Marine policy*, 172, 1-13.
- Munim, Z.H., Saha, R., Schoyen, H., Ng, A.K.Y & Notteboom, T.E. (2022).** Autonomous ships for container shipping in the Arctic routes. *Journal of marine science and technology*, 27, 320-334.
- MUNIN (2016).** About Munin-Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks. Erişim: 25 Aralık, 2024, <http://www.unmanned-ship.org/munin/about/>.
- Sar, A.B. (2023).** Considerations on assistance and rescue at sea in the light of the increasing autonomy in shipping. *Marine policy*, 153, 1-11.
- Shahbakhsh, M., Emad, G.R. & Cahoon, S. (2021).** Industrial revolutions and transition of the maritime industry: The case of seafarer's role in autonomous shipping. *The Asian journal of shipping and logistics*, 38(1), 10-18.
- Tijan, E., Jovic, M., Aksentijevic, S. & Pucihar, A. (2021).** Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological forecasting and social change*, 170, 1-15.

- Wu, B., Yip, T.L., Yan, X. & Soares, C.G. (2022).** Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability engineering & system safety*, 219, 1-12.
- Xing, W. & Zhu, L. (2023).** Exploring legal gaps and barriers to the use of unmanned merchant ships in China. *Marine policy*, 153, 1-12.
- Xing, W. (2024).** Contemplating maritime autonomous surface ships (MASS) under the international law on ship-source pollution. *Marine pollution bulletin*, 207, 1-15.
- Xu, G.L., Wan, S.P. & Xie, X.L. (2015).** A selection method based on MAGDM with interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Mathematical problems in engineering*, 2015, 1-13.
- Xu, Z. (2007).** Methods for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and their application to decision making. *Control and decision*, 22(2), 215-219.
- Yalman, S. C., Tıkız, İ., & Bamyacı, M. (2023).** Deniz taşımacılığında dönüm noktası: Otonom gemilerin geleceği. *Denizcilik araştırmaları dergisi: Amfora*, 2(3), 32-39.
- Zhang, M., Zhang, D., Yao, H. & Zhang, K. (2020).** A probabilistic model of human error assessment for autonomous cargo ships focusing on human-autonomy collaboration. *Safety science*, 130, 1-12.
- Ziquan, X., Jiaqi, Y., Naseem, M.H., Zuquan, X. & Xueheng, L. (2021).** Supplier selection of shipbuilding enterprises based on intuitionistic fuzzy multicriteria decision. *Mathematical problems in engineering*, 2021, 1-11.
- Zis, T.P.V., Psaraftis, H.N. & Vilanova, M.R. (2023).** Design and application of a key performance indicator (KPI) framework for autonomous shipping in Europe. *Maritime transport research*, 5, 1-17.

Research Article

Efficient on-Street Parking Management: Priority Parking Permits for Residents Integrated with Digital Systems, Case of IstanbulHakan İNAÇ¹¹Department of Urban Systems and Transport Management, 34445, Istanbul Commerce University, Istanbul, Türkiye,*Correspondence: hkninac@gmail.com.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1636760

Abstract: Managing on-street parking in city centers has become a significant challenge, especially in areas where mixed use (commercial – residential) and high intensity commercial zones. Uncontrolled use of parking spaces by non-resident vehicles severely limits parking availability for residents, reducing their quality of life. Additionally, long-term stationary and abandoned vehicles take up limited space, exacerbating congestion and inefficiency. This paper proposes a new business model that integrates Lidar-based license plate recognition technology to grant priority parking permits for residents. The model includes a structured enforcement mechanism with progressive warnings and fines for unlicensed parking, as well as an automated system for detecting and removing abandoned vehicles. The financial and operational benefits of the system, including cost savings and revenue generation, are also analyzed. In addition, the mathematical model and system flow that demonstrate how the proposed model can be implemented are presented, and parking data in Istanbul was examined and a case analysis was studied for Zeytinlik Neighborhood in Bakırköy District.

Keywords: Urban transportation management, residential parking permits, intelligent transportation systems, enforcement mechanism, cost efficiency

Etkili Yol Üstü Araç Park Yönetimi: Dijital Sistemlerle Entegre Edilmiş Mahalle Sakinleri için Park Önceliği, İstanbul Örneği

Özet: Şehir merkezlerinde yol üstü araç park yönetimi, özellikle karma imarlı (ticaret – konut) ve yoğun ticari faaliyet içeren alanlarda önemli bir sorun haline gelmiştir. Mahalle sakinlerine ait araçlar dışında park alanlarının kontrolsüz şekilde kullanılması, mahalle sakinleri için park yeri bulma imkanlarını ciddi şekilde kısıtlayarak yaşam kalitesini düşürmektedir. Ayrıca, uzun süre hareketsiz kalan ve terk edilmiş araçlar kısıtlı park alanlarını işgal ederek sıkışıklığı ve verimsizliği artırmaktadır. Bu çalışma, Lidar tabanlı plaka tanıma teknolojisini entegre eden ve mahalle sakinlerine öncelikli park izinleri tanıyan yeni bir iş modeli önermektedir. Model, izinsiz parklanmalar için kademeli uyarı ve ceza mekanizmalarını içeren yapılandırılmış bir denetim sürecini ve terk edilmiş araçları tespit ederek otomatik olarak kaldırmayı sağlayan bir sistemi kapsamaktadır. Önerilen sistemin mali ve operasyonel faydaları, maliyet tasarrufu ve gelir oluşturma potansiyeli açısından analiz edilmiştir. Ayrıca, modelin uygulanabilirliğini ortaya koyan matematiksel model ve sistem akışı sunulmuş, potansiyel uygulama alanlarından biri olan İstanbul'daki park verileri incelenmiş, Bakırköy İlçesi Zeytinlik Mahallesi için bir vaka analizi çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kentsel ulaşım yönetimi, mahalle sakinleri için park alanları, akıllı ulaşım sistemleri, denetim mekanizması, maliyet verimliliği

1. Introduction

On-street parking management in urban areas presents major challenges due to increasing vehicle density, limited parking supply, and conflicts between commercial and residential demands. Local residents often struggle to find available parking spaces as visitors and non-resident vehicles occupy these spots for extended periods. Furthermore, long-term stationary or abandoned vehicles further reduce the already limited parking capacity, leading to inefficiencies and public dissatisfaction. In neighborhoods where residential and commercial spaces are shared between streets, uncontrolled on-street parking spaces are used inefficiently. Various occupations and illegal use negatively affect the quality of life of neighborhood residents. In particular, when area visitors who do not pay for commercial parking, lots use these limited uncontrolled parking spaces, residents have difficulty finding suitable parking spaces for their vehicles. Traditional enforcement mechanisms, such as manual inspections and ticketing, are labor-intensive and inefficient, necessitating a transition to digital solutions. This paper presents a model that leverages Lidar-based license plate recognition systems to optimize parking allocation and enforce regulations through automated warnings, penalties, and abandoned vehicle removal.

2. Literature Review

Technological developments have reduced vehicle prices, while rising income levels and a preference for comfort, coupled with a car-centric transportation system, have encouraged private vehicle ownership. In recent years, there has been a significant increase in vehicle ownership in developing countries (OECD, 2013). This situation has developed in a similar way for Türkiye, as it has for various developing countries around the world. According to TurkStat, the total number of vehicles reached 31,301,389 in 2024, up from 18,828,721 in 2014—a 66% increase over the past decade. This increase has led to issues such as traffic congestion and parking challenges, which are interconnected. For example, private vehicles are parked over 90% of the time, highlighting the significance of parking in transportation management (Ibeas and Moura, 2018).

Historically, parking challenges were addressed by expanding parking availability (see Figure 1). This traditional approach as prioritizing drivers within the transportation system (Litman, 2017). However, this strategy led to increased automobile usage, further escalating the demand for parking spaces. Drivers often spend extended periods searching for available parking, developers are compelled to provide more parking than necessary, and traffic managers face difficulties managing congestion resulting from the heightened parking demand (Weinberger et al, 2010).

Recent studies have revealed that increasing parking supply does not alleviate traffic congestion; instead, it exacerbates the issue in high-traffic areas. For instance, research indicates that a significant portion of urban traffic consists of drivers searching for parking spaces, contributing to congestion and diminishing the appeal of popular areas. This situation leads to environmental concerns, including air pollution and environmental degradation. The increase in automobile usage has unintended consequences, such as traffic congestion, air pollution, and greenhouse gas emissions.

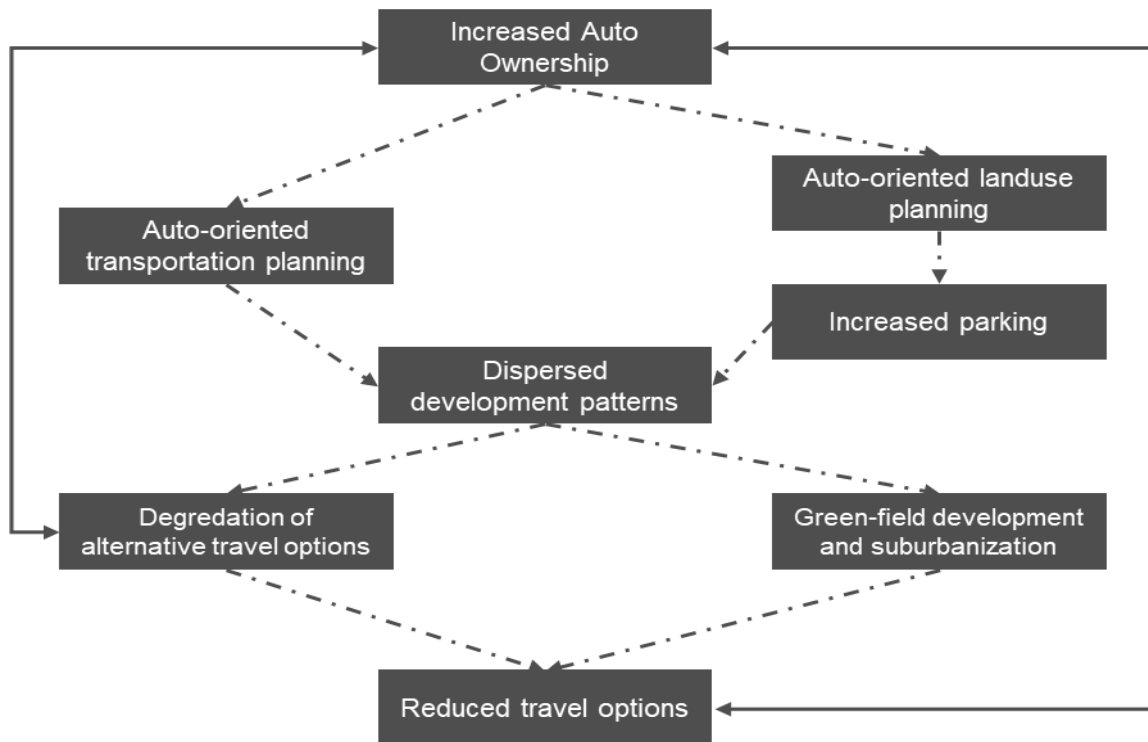


Figure 1. Vehicle dependency cycle (Weinberger et al, 2010).

Authorities have recognized that merely increasing parking supply does not alleviate traffic congestion and may, in fact, exacerbate it. This realization has prompted a paradigm shift in transportation planning, emphasizing accessibility over private car use. Consequently, the focus has transitioned from expanding parking availability to implementing parking management strategies, such as setting maximum parking limits and optimizing existing spaces

Parking management policies and programs can enhance the efficient use of parking resources (Litman, 2006). When properly implemented, these strategies can reduce the number of parking spaces needed, yielding economic, social, and environmental advantages. Additionally, parking management is the optimal approach to ensure user service quality, promote more accessible land use patterns, and decrease motor vehicle traffic (Litman, 2016). This reduction in traffic can lead to less congestion, fewer accidents, and lower greenhouse gas emissions, thereby creating more attractive neighborhoods and improving accessibility for non-drivers Furthermore, identifying potential solutions is essential. parking management principles should be considered before determining suitable parking management strategies (see Figure 2).

Consumer choice	Sharing	User information	Efficient utilization	Flexibility
Prioritization	Pricing	Peak management	Quality vs. quantity	Comprehensive analysis

Figure 2. Parking management principles (Litman, 2016).

Recently, the concept of parking management has evolved into smart parking management. As a part of smart mobility, smart parking management includes strategies and systems that enhance social, environmental, and economic aspects through technology. Improving the connection between Information and Communication Technologies (ICTs), the urban environment, and accessibility- and sustainability-related parameters is essential for an effective smart mobility index (Battarra et al, 2018).

Smart parking management includes both strategies and systems. Before discussing campus parking management, it is important to distinguish between the two. While both aim to improve economic, environmental, and social outcomes, their roles differ. Parking management systems, driven by technological advancements, enhance the efficiency of strategies and parking operations. As technology has become essential, sustainability has evolved into smartness, integrating ICT.

2.1. Parking Management Strategies

The traditional approach focused on building new parking facilities or expanding parking areas. However, this did not solve traffic congestion. Although parking spaces were available, accessing them caused congestion in central business districts and urban areas. Since most parking issues arise in city centers, this outdated approach has shifted toward supporting parking management strategies to address parking-related issues, management strategies are essential. These strategies include policies and programs that optimize parking supply. Effective parking management can reduce the need for additional parking spaces (Litman, 2017).

2.2. Parking Maximums

Parking maximum sets an upper limit on parking supply to reduce car use in high-demand areas and promote alternative modes like public transport, shuttles, walking, or cycling. Limiting parking availability decreases personal vehicle use (Christiansen et al, 2017). Reducing parking supply encourages public transport use and active travel for short trips (Bond, 2006). However, simply reducing parking supply is not enough; it must be supported by well-designed walking and cycling infrastructure and efficient transportation services. The parking maximum strategy is more effective when these alternatives are well-developed (Delaware, 2004).

An excessive parking supply weakens the effectiveness of parking pricing (Christiansen et al, 2017). Therefore, parking management strategies should be implemented together. Additionally, reducing parking supply can lower demand by 10-15%, particularly near transit or when combined with shared parking and pricing strategies.

2.3. Remote Parking

Remote parking lots are located away from central districts to reduce car use in these areas and limit cruising. Areas within limited parking, drivers may avoid visiting despite available spaces due to uncertainty about finding free parking (Kent, 2007). This uncertainty leads them to seek parking in other areas with a higher chance of availability. Remote parking could be defined as off-site parking facilities (Litman, 2006). To encourage usage, it must be supported by efficient shuttle or public transport services. Today, park-and-ride facilities are the most common type of remote parking. Estimating demand for park-and-ride lots requires considering the relationship between land use, public transport, and parking availability (Özen et al, 2016).

2.4. Parking Regulations

Parking regulations optimize parking use by controlling who can park, when, and for how long (Litman, 2017). Parking restrictions become an important strategy for managing supply effectively. However, restrictions are less effective when parking lots are far from city centers but work better in compact neighborhoods (Christiansen et al, 2017). Absence of reserved workplace parking discourages driving, as drivers are less likely to commute by car without a dedicated space.

2.5. Parking Management Systems

Parking management systems rely more heavily on technological advancements than on parking management strategies. Initially, their primary function was to issue entry tickets to estimate parking duration. However, as vehicle ownership has grown, these systems have become increasingly complex. Drivers can spend up to 25% of their travel time searching for parking, which significantly adds to urban congestion during peak hours. Research estimates that parking-related traffic contributes to 25% to 50% of congestion during peak periods (Shaheen, 2005). The primary objective of these systems is to minimize travel time caused by cruising for parking. Nevertheless, real-time parking apps are not widely adopted in Hong Kong, largely due to drivers' lack of familiarity with them, highlighting uncertainty about the public's understanding of the smart city concept (Ma et al, 2018).

2.6. Parking Guidance and Information Systems

The primary objective of introducing Parking Guidance Information (PGI) systems is to reduce traffic caused by drivers searching for parking in urban centers and large parking facilities. A standard PGI system, installed at entrances, exits, or individual parking spots, is effective in collecting data on the number of occupied spaces and displaying the availability of parking spots within lots. Additionally, these systems can guide drivers directly to open parking spaces, enhancing efficiency and convenience.

Parking Guidance and Information Systems aim to provide benefits such as reducing travel time, vehicle miles traveled, congestion, driver frustration, fuel consumption, and air pollution while increasing parking revenue (Shaheen, 2005). However, 72.8% of Hong Kong residents are unaware of parking apps, indicating that real-time parking solutions, a key aspect of smart mobility, are not yet widely adopted (Ma et al, 2018).

Transit-Based Information Systems

Transit-Based Information (TBI) systems differ from parking management systems but are closely connected to them. In park-and-ride facilities, TBI systems are essential for diverting drivers away from central business districts by offering real-time transit updates and promoting the use of public transportation.

TBI systems are a more advanced version of parking guidance and information systems. They provide real-time data on parking availability at park-and-ride lots and display schedules for buses, shuttles, trains, or subways based on location and purpose. Additionally, they offer arrival and departure times for different transit modes. These smart parking systems aim to increase public transit use, reduce car travel, lower fuel consumption and air pollution, and boost transit revenue (Shaheen, 2005).

Smart Payment Systems

Innovations in smart payment systems, including smart meters, smart cards, mobile payments, and e-parking, improve payment convenience while cutting down on operational, maintenance, and enforcement expenses (Shaheen, 2005). In Turkey, fee collection is often managed through workplace or valet parking systems, and in many parking facilities, payments are still processed by cashiers. Alongside conventional parking meters, new payment options have emerged as alternatives. Customers can make quick payments using smart cards, credit cards, or mobile transfers, enabling transactions via the Internet or mobile devices.

Regardless of whether parking apps are used, system security remains a major concern for users, as they seek reassurance that their personal data is safeguarded (Ma et al, 2018). Furthermore, Smart payment systems not only streamline transactions but also aid in identifying parking violations by capturing images of unauthorized vehicles (Idris et al, 2009).

Parking Reservation Systems

Parking Reservation Systems allow drivers to check parking availability, reserve a spot, and pay upon departure using web-based tools, apps, or phone calls. An advanced version, known as e-parking, also guides drivers to available spaces (Shaheen, 2005). This reduces the time spent searching for parking and may influence drivers to change destinations if no spaces are available.

2.7. Parking Pricing

Parking pricing is a key parking management strategy. It helps reduce congestion caused by cruising and generates revenue for maintaining parking facilities. Parking pricing policies influence users' mode choices (Shoup, 2011).

Parking pricing can reduce demand by 5% to 30%, which discourages driving. However, workplace parking limits are more effective than pricing alone and that reducing parking spaces strengthens pricing effects (Christiansen et al, 2017). Also, free workplace parking can greatly increase demand, and free parking encourages car use, while removing it leads more people to choose public transport, walking, or cycling (Fei, 2016). Higher parking prices further reduce car usage.

Parking fees should keep 15% of spaces available, so drivers can find parking or choose another option if they don't want to pay. Therefore, willingness to pay depends on factors like tiredness, time, weather, safety, and carrying heavy items (Shoup, 2006).

Parking pricing should be based on occupancy rates, with central areas designated for paid parking. Priced parking is mainly used by short-term parkers, carpoolers sharing costs, and those valuing time savings (Shoup, 2008). However, pricing may lead to illegal parking or congestion as drivers search for free spots (Litman, 2020). Illegal parking in Hanoi, Vietnam, is common due to weak enforcement (Thanh et al, 2017). Therefore, improving regulations, providing user information, and enforcing rules are essential for effective parking pricing.

In recent years, there has been a fundamental shift in how parking challenges are identified and addressed. The traditional focus on the scarcity of parking spaces has evolved to include broader concerns such as the excessive allocation of urban space to parking, inefficient management practices, and the prevalence of underpriced parking facilities. This expanded perspective has led to the development of diversified solutions, including integrated transportation and parking management strategies aimed at optimizing the use of streets and public spaces.

Rather than aiming to eliminate parking spaces, this new paradigm focuses on maximizing the value derived from each vehicle trip and parking spot for both drivers and non-drivers. Cities are increasingly recognizing the importance of not just expanding parking capacity to meet demand but also managing existing parking resources more efficiently through strategic pricing and policy integration within broader transportation planning goals.

The accompanying graph illustrates the dynamics between parking demand, supply, and pricing. When parking is underpriced—as indicated by the area below the equilibrium price—demand significantly exceeds supply. This situation leads to congestion, as more people are incentivized to drive, even for short trips, due to the low cost of parking. Conversely, as parking prices rise toward the equilibrium level, demand decreases, aligning more closely with the available supply. This shift encourages more efficient parking behaviors, such as opting for alternative transportation modes, reducing parking durations, or choosing off-street parking options.

Importantly, those who continue to drive despite higher parking costs will benefit from improved availability, as spaces are less likely to be occupied by drivers making unnecessary trips. At the equilibrium price, parking supply meets demand without the need for additional infrastructure, promoting a more sustainable and balanced urban environment.

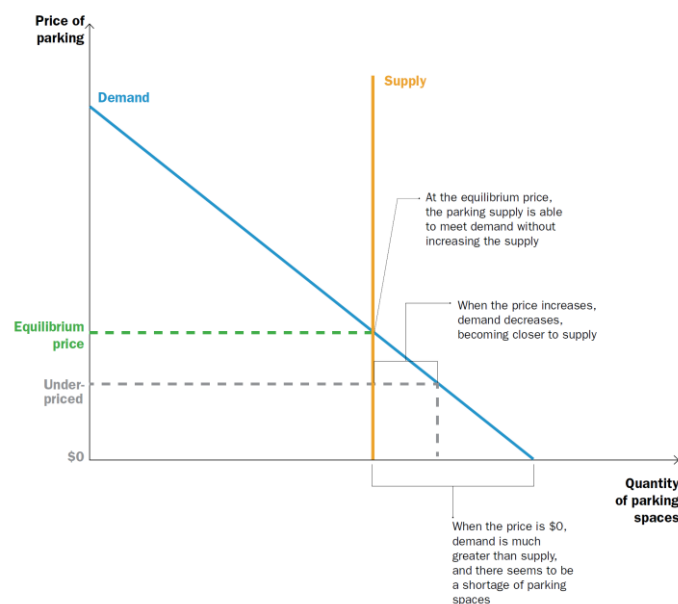


Figure 3. Relationship between parking price, demand and supply

3. Global Case Studies: Parking Management Practices in Major Cities

Urban parking policies have been widely studied in academic research, emphasizing the need for efficient and equitable parking management. Negative effects of free parking policies on urban traffic congestion and advocated for structured parking regulations (Shoup, 2005). How digital permitting and dynamic pricing could significantly enhance the allocation of parking spaces (Marsden et al,2020). Role of IoT and data analytics in smart parking management, proposing AI-assisted monitoring to improve efficiency (Geng et al, 2013). Lidar and AI-based systems in parking enforcement, emphasizing their potential for reducing unauthorized use and optimizing urban mobility (Zhang et al, 2019).

Several global cities have implemented innovative parking solutions to manage congestion and unauthorized parking. London employs a digital permitting system, where residents receive exclusive parking rights and unauthorized vehicles face substantial fines. Berlin has introduced sensor-based monitoring that tracks vehicle movement and parking duration, ensuring fair usage. New York uses time-based parking restrictions to allocate space dynamically between residents and visitors at different hours. Amsterdam integrates dynamic pricing models and real-time digital permit verification to balance parking demand and supply efficiently.

3.1. Regulatory Framework and Legal Considerations

Parking enforcement regulations vary across jurisdictions. London enforces immediate fines for unauthorized parking, whereas Berlin removes long-term stationary vehicles through municipal action. In the United States, certain states have strict neighborhood parking permit rules with immediate towing policies for violators. Turkey's Highway Traffic Law No. 2918 permits administrative fines for unauthorized parking and mandates the removal of abandoned vehicles from public spaces. This suggests that the proposed model would be compatible with existing legal frameworks and could be seamlessly integrated into municipal regulations.

4. A New Business Model Approach for Street Parking Management

The proposed system utilizes Lidar-based license plate recognition technology to automatically detect and regulate vehicle parking in residential areas. Residents are granted priority parking permits, while unauthorized vehicles are subject to a structured enforcement mechanism, including progressive warnings, fines, and potential removal for repeated violations. Additionally, abandoned and long-term stationary vehicles are detected and reported for removal, ensuring optimal utilization of parking spaces.

4.1. Enhanced System Flowchart for the Proposed Business Model

This advanced system flowchart includes additional decision-making steps, such as checking whether a vehicle has previously violated parking rules (see Figure 4). If a vehicle is registered as a resident, the system logs parking usage statistics for data-driven urban mobility decisions. Unauthorized vehicles are checked for prior violations and follow a structured warning and penalty mechanism.

The implementation of automated parking management systems has become integral to supporting data-driven urban mobility decisions. These systems facilitate real-time monitoring of parking compliance, detection of violations, and the collection of statistical data to inform policy and infrastructure planning.

The process begins with the scanning of roadside parked vehicles using Light Detection and Ranging (LiDAR) technology. LiDAR employs laser beams to measure distances and vehicle positions with high precision, enabling rapid and accurate detection, particularly in densely populated urban environments. Following the initial detection, optical character recognition (OCR) technology is utilized to read vehicle license plates, which are then cross-referenced with a central database. This database contains critical information, including vehicle registration status and records of prior parking violations.

Subsequently, the system verifies whether the detected vehicle is registered as belonging to a resident. For resident vehicles, parking usage statistics are systematically recorded. These data sets are invaluable for urban mobility planning, providing insights into parking demand patterns and supporting future infrastructure development strategies. In contrast, if a vehicle is not registered as a resident, the system conducts an additional check for any history of parking violations.

For non-resident vehicles with no prior violations, the system issues a warning notice as an initial corrective measure. Vehicles with a documented history of violations are subjected to a formal penalty process. A second recorded violation results in the imposition of a fine, serving as a deterrent to promote compliance with parking regulations. In cases of repeated non-compliance, more stringent penalties, such as vehicle towing, may be enforced to address persistent infractions effectively.

Furthermore, the system continuously monitors the duration of each parking event, identifying vehicles that exceed the designated time limits. This feature is particularly critical in high-demand areas to ensure equitable access to parking spaces. All detected violations, including instances of prolonged parking, are automatically reported to municipal authorities, enabling timely enforcement actions.

The integration of such automated systems has proven effective in addressing urban parking challenges, enhancing regulatory compliance, and contributing to the broader goals of sustainable traffic management in metropolitan areas.

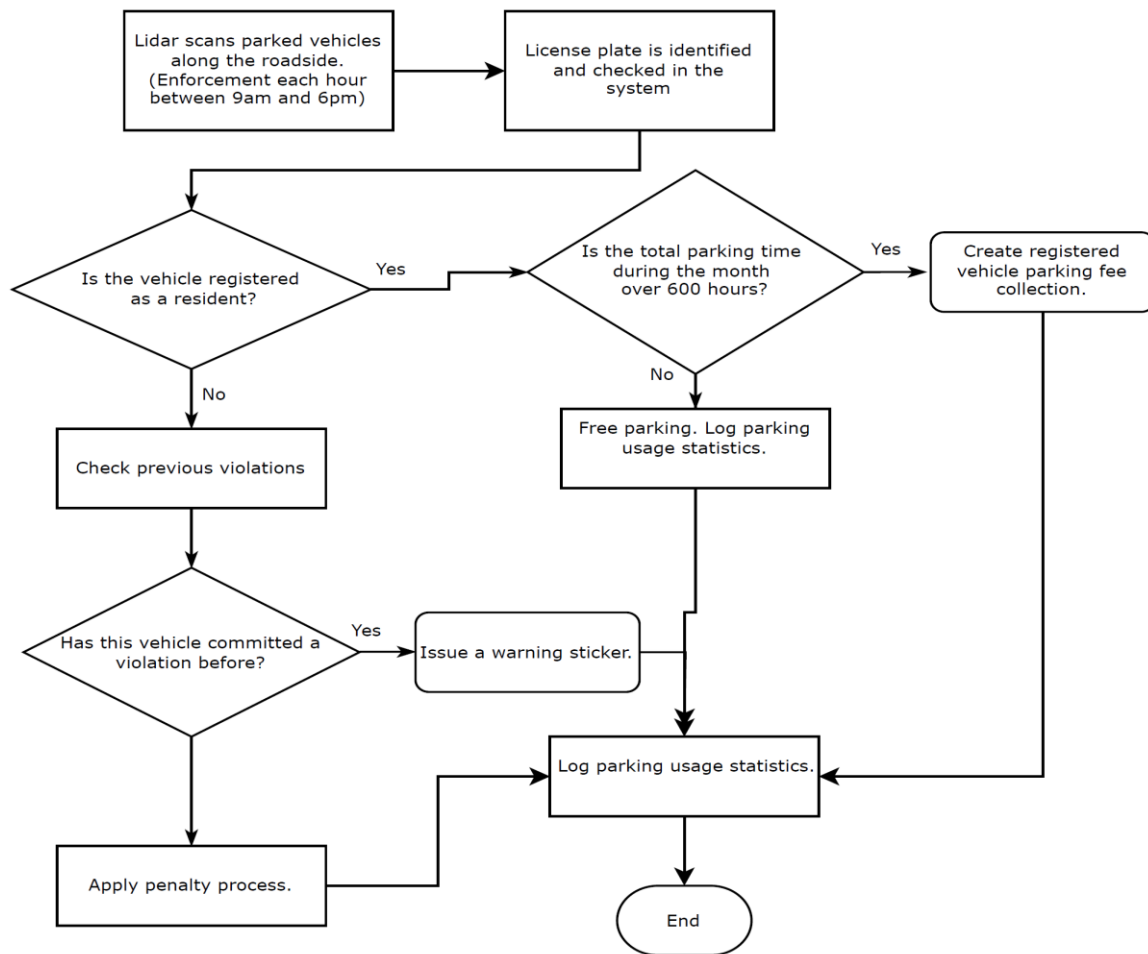


Figure 4. System flow chart of bussiness model

4.2. Cost Efficiency, Utilization Optimization, and Sustainability in Parking Permit Systems

This study analyzes the cost efficiency of parking permit systems and presents an optimized model that balances low fees, high utilization, and sustainability. The model incorporates revenue, operating costs, initial investment, pricing flexibility, and alternative transportation integration.

Mathematical Structure of the Model

Definitions and Variables

The fundamental components and variables of the proposed model are defined as follows:

- E: Cost efficiency score (evaluation metric)
- G: Annual parking revenue (thousand \$)
- M: Annual operating cost (thousand \$)
- C: Initial investment cost (thousand \$)
- T: Technology integration coefficient (between 0 and 1)
- A: Alternative transportation integration coefficient (between 0 and 1)
- P: Dynamic pricing coefficient (between 0 and 1)
- D: License plate recognition and automated enforcement coefficient (between 0 and 1)
- U: Utilization rate (parking space occupancy, between 0 and 1)
- S: Sustainability coefficient (environmental impact and public transport contribution, between 0 and 1)
- L: Low-fee coefficient (pricing flexibility, between 0 and 1)

Cost Efficiency, Utilization, and Sustainability Model

Cost efficiency is calculated as the ratio of revenue minus operating cost to the initial investment, adjusted with a weighted coefficient that accounts for utilization rate and sustainability.

The mathematical representation of the model is as follows:

$$E = ((G - M) / C) \times (1 + w_1 * T + w_2 * A + w_3 * P + w_4 * D + w_5 * U + w_6 * S + w_7 * L)$$

Where:

- $(G - M) / C$ → Ratio of revenue minus operating costs to initial investment (basic efficiency measure)
- T, A, P, D, U, S, L → Coefficients representing system digitization, utilization, and sustainability levels
- $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ → Weights for each coefficient (normalized to sum up to 1)

Conditions for Optimal Cost Efficiency

To achieve maximum cost efficiency, the following conditions must be met:

1. Revenue must be at least three times the operating cost:

$$G \geq 3M$$

2. Initial investment should not exceed 50% of the total annual revenue:

$$C \leq 0.5G$$

3. The sum of digitalization and automation coefficients must be at least 0.7:

$$T + D \geq 0.7$$

4. Utilization rate must be at least 70%:

$$U \geq 0.7$$

5. Sustainability score must be at least 0.6:

$$S \geq 0.6$$

6. Pricing flexibility must be at least 0.5:

$$L \geq 0.5$$

Meeting these conditions ensures maximum cost efficiency, sustainability, and utilization effectiveness.

Model Optimization

The mathematical optimization for cost efficiency is represented as follows:

$$\max E = ((G - M) / C) \times (1 + w_1 * T + w_2 * A + w_3 * P + w_4 * D + w_5 * U + w_6 * S + w_7 * L)$$

Constraints:

- $G \geq 3M$
- $C \leq 0.5G$
- $T + D \geq 0.7$
- $U \geq 0.7$
- $S \geq 0.6$
- $L \geq 0.5$

This model identifies the most cost-efficient parking permit system while maximizing utilization and sustainability.

The analysis concludes that a system incorporating dynamic pricing, digital permits, measures to enhance utilization, and sustainable transport integration is the most efficient model for parking permits.

4.3. Financial Benefits and Cost Efficiency

The adoption of smart parking enforcement systems offers significant financial benefits and cost reductions for municipalities. Replacing manual enforcement with digital automation leads to the following savings and revenue enhancements:

- Reduction in Enforcement Costs
- Automated monitoring reduces reliance on field personnel, cutting annual operational expenses by 30%.
- Increase in Revenue:
- Fines for unauthorized parking contribute to a 15-20% rise in municipal parking-related income.
- Lower Traffic Congestion:
- Optimized parking allocation reduces unnecessary vehicle movement, cutting fuel waste and emissions by 10-15%.
- Improved Parking Space Utilization:
- Removing abandoned vehicles increases available parking capacity by 5-10%.
- Environmental Gains:
- Reducing vehicle idling times results in a 5-8% drop in urban air pollution and CO2 emissions.

5. Potential Implementation of the Proposed Model in Istanbul

Istanbul, as one of the most densely populated metropolitan areas in the world, faces significant challenges in managing its on-street parking spaces due to limited parking availability, high vehicle ownership rates, and complex urban infrastructure. The efficient management of curbside parking is crucial for mitigating traffic congestion, optimizing urban mobility, and ensuring sustainable urban development. The proposed mathematical model, which integrates cost efficiency, utilization optimization, and sustainability, provides a structured framework that can be adapted to various districts within Istanbul to enhance parking management and policy planning.

Given the city's heterogeneity in terms of population density, urban layout, and transportation demand, a district-specific application of this model would be necessary. Districts such as Şişli, Beşiktaş, Bakırköy, Kadıköy, Fatih, and Beyoğlu, which exhibit high commercial activity, dense residential

settlements, and significant parking demand, represent prime candidates for the implementation of this optimized parking permit system. Furthermore, sub-district level analysis can refine the model's applicability by targeting specific neighborhoods within these districts, such as Mecidiyeköy (Şişli), Levent (Beşiktaş), Zeytinlik (Bakırköy), Moda (Kadıköy), and Taksim (Beyoğlu), where limited parking supply and high vehicular inflow necessitate more efficient regulatory mechanisms.

To further refine and validate the model's implementation, a data-driven approach should be adopted, incorporating real-time occupancy rates, parking demand fluctuations, and enforcement efficiency across different urban zones. The availability of parking occupancy data, traffic flow analyses, and socio-economic factors can be utilized to fine-tune the weight parameters in the model to ensure the highest cost efficiency while maintaining equitable access to parking facilities. Additionally, the model's dynamic pricing and technological integration features can be adapted based on Istanbul's evolving transportation policies, aligning with the city's broader sustainability goals.

Given these considerations, future research should focus on conducting spatial and temporal analyses of Istanbul's parking infrastructure, identifying high-demand locations where the model's principles can be most effectively implemented. Integrating IoT-based parking sensors, license plate recognition technologies, and mobile payment systems into the existing regulatory framework would enhance enforcement capabilities and reduce unauthorized parking. Moreover, by incorporating alternative transportation incentives, such as discounts for electric vehicles and integrated public transport passes, the model can support Istanbul's long-term urban mobility objectives.

Thus, this study highlights the urgent need for a structured, data-driven approach to managing curbside parking in Istanbul. The proposed mathematical model serves as a robust foundation for addressing the city's parking challenges, but its successful deployment necessitates further empirical research, policy alignment, and technological infrastructure investments. By leveraging district-level micro-modeling and adaptive pricing mechanisms, Istanbul can enhance the efficiency, sustainability, and accessibility of its urban parking system, ultimately contributing to a more resilient and well-regulated transportation ecosystem.

5.1. Demand Forecast Model for Parking Choice: A Case Study in İstanbul Provinces

The Data-Driven Management Model (VDYM) research in Istanbul aims to generate data that will serve as a basis for strategies related to investments and services by identifying the general sociodemographic and socioeconomic profile, needs, and tendencies of Istanbul's population. For this purpose, face-to-face interviews were conducted with 50,000 households across the city using a survey method. The number of surveys was distributed proportionally based on the number of households in each neighborhood, ensuring at least 12 surveys per neighborhood.

To ensure the results are representative of Istanbul, the households to be surveyed were selected using a stratified random sampling method at the neighborhood level. The fieldwork, during which the finalized survey form—refined through workshops and meetings—was implemented, was carried out between November 29, 2021, and March 7, 2022 (IMM-ODP,2023).

Parking preferences in urban environments are shaped by a combination of socio-economic factors, infrastructure availability, and regulatory frameworks. In Istanbul, a city characterized by high population density and increasing vehicle ownership, roadside parking emerges as the most preferred option among households. This trend is not unique to Istanbul but is observed in many metropolitan areas where the convenience and cost-free nature of on-street parking outweigh other considerations (Shoup, 2006).

According to data from the Istanbul Metropolitan Municipality's Open Data Portal and İSPARK (2021-2022), free on-street parking remains the dominant choice for residents across various districts. This preference is particularly pronounced in densely populated areas such as Bağcılar, Esenyurt, and Fatih, where limited off-street parking infrastructure compels residents to rely on curbside spaces (Figure 5). While on-street parking offers immediate accessibility, it also contributes to significant urban challenges, including traffic congestion, reduced road safety, and inefficient land use (Litman, 2021).

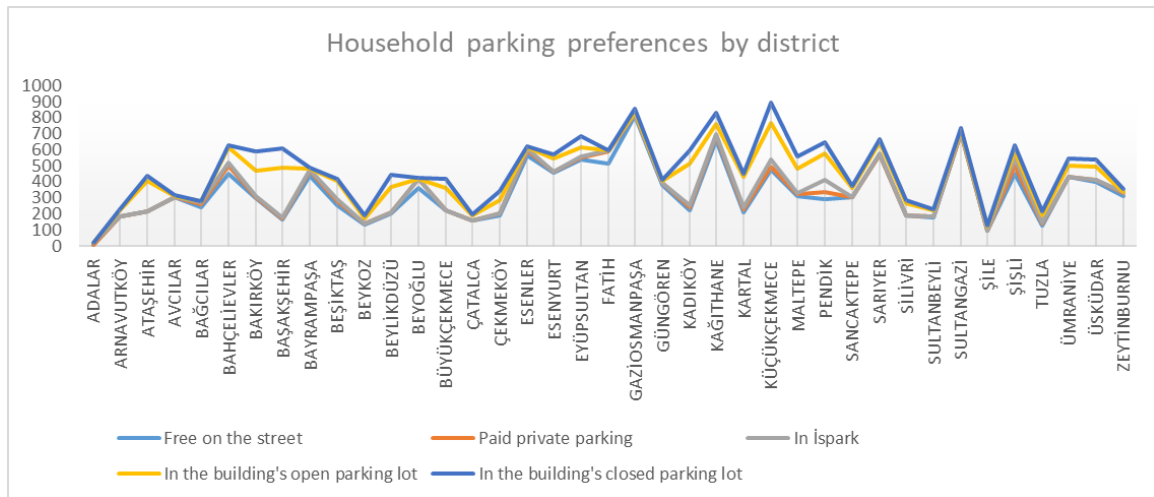


Figure 5. Household parking preferences by district.

The issue is further complicated by the fact that unregulated or underpriced roadside parking encourages excessive vehicle use, even for short trips, exacerbating congestion and environmental impacts (Arnott and Inci,2006). In Istanbul's context, the absence of dynamic pricing mechanisms for on-street parking leads to high demand and inefficient turnover rates, especially in commercial districts where parking spaces are frequently occupied for extended periods.

Addressing these challenges requires a shift towards data-driven parking management strategies. The VDYM (Data-Driven Management Model) research highlights the importance of integrating household parking preferences into urban mobility planning. By leveraging detailed data on parking behaviors, city authorities can develop targeted policies that balance the demand for curb space with broader objectives such as reducing traffic congestion and promoting sustainable transportation modes.

Moreover, the İSPARK 2021-2022 data underscores the need for differentiated parking strategies across districts. For instance, while central areas may benefit from stricter regulations and higher pricing to manage demand, peripheral districts could focus on expanding off-street parking options to alleviate pressure on public spaces (IBB, 2021).

In conclusion, Istanbul's reliance on free on-street parking reflects broader urban dynamics that necessitate comprehensive policy interventions. Integrating insights from data sources like the VDYM research and İSPARK statistics can support the development of more effective, equitable, and sustainable parking management practices.

6. Case Study: Addressing Parking Challenges in Zeytinlik Neighborhood, Bakırköy

Zeytinlik Neighborhood, located in Istanbul's Bakırköy district, is heavily influenced by its proximity to major arterial roads such as the E-5 Highway (D-100), Kennedy Avenue (Sahil Yolu), and İncirli Avenue. These main transportation routes serve as critical connections to the wider city, facilitating access to Ataköy, Florya, Bahçelievler, and Zeytinburnu, yet also contributing to significant traffic congestion. The neighborhood's southern boundary along Kennedy Avenue connects to the coastal road network, while its northern end links directly to E-5, creating high levels of vehicle flow, particularly during peak commuting hours.

Traffic congestion in Zeytinlik is particularly severe on İncirli Avenue, Cevizlik Avenue, Zeytinlik Avenue, and Yakut Street, where narrow, single-lane roads struggle to accommodate both moving vehicles and parked cars. The one-way street system, combined with insufficient parking spaces, exacerbates mobility issues, often leading to illegal or double parking, further restricting traffic flow. Additionally, the high density of commercial areas and shopping malls (e.g., Capacity AVM, Carousel AVM) generates substantial traffic surges, particularly during weekends and rush hours, making parking even more challenging.

The visualization of the connection roads to Zeytinlik Neighborhood, particularly during peak traffic hours on weekends, is presented in Figure 5 based on Google Maps data.

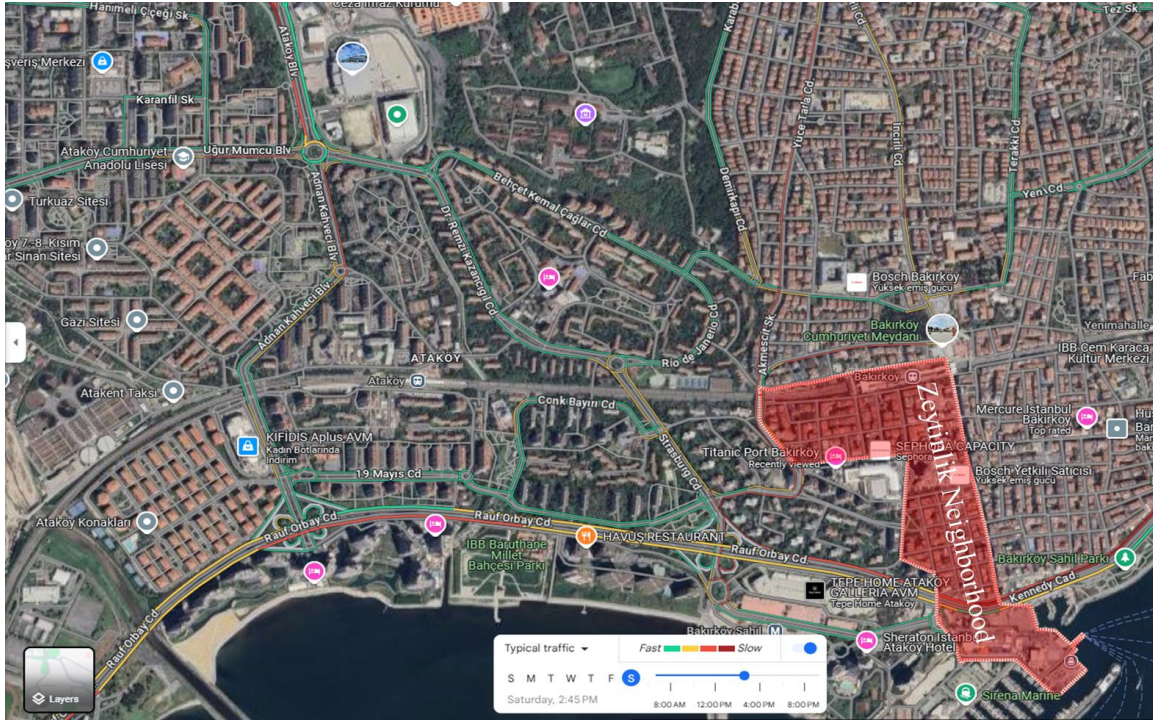


Figure 6. Zeytinlik neighborhood Google Maps based weekend traffic density data

The combination of limited parking capacity, narrow streets, and high traffic density severely impacts mobility within Zeytinlik, causing bottlenecks and restricting access to main roads. These conditions not only slow vehicular movement but also affect pedestrian safety, public transport efficiency, and emergency vehicle accessibility. Addressing these issues requires a LiDAR-based smart parking system, dynamic traffic regulations, and prioritized parking policies for residents, which could significantly improve traffic flow and overall urban mobility in the area.

Zeytinlik Neighborhood, located in Bakırköy, Istanbul, faces significant parking challenges due to its high population density, increasing vehicle ownership, and limited public parking infrastructure. With a total population of 5,146 residents, consisting of 2,440 males and 2,706 females, the area represents a mix of young and middle-aged working-class individuals, with an average age of 31 years. The neighborhood's demographic structure, where 48% of residents are married and the average household income stands at 21,641 TL per month, suggests a substantial demand for vehicle ownership and parking spaces. Furthermore, with 32% of the population having completed only primary education, socioeconomic factors must also be considered in parking allocation and pricing policies.

The demographic and vehicle ownership data for Zeytinlik Neighborhood were obtained through a combination of official statistical sources, municipal records, and field surveys. Population data were sourced from the Turkish Statistical Institute (TÜİK) and Bakırköy Municipality, providing insights into household structures, income levels, and residential density. Vehicle ownership estimates were derived from İstanbul Metropolitan Municipality's (İBB) traffic and vehicle registration databases, supplemented by field observations and resident surveys conducted within the neighborhood. This approach allowed for a detailed understanding of parking demand, enabling the formulation of a data-driven pricing model that aligns with real-world usage patterns and socio-economic conditions.

Although specific data on vehicle ownership in Zeytinlik is scarce, general statistics from Istanbul indicate that approximately 38% of households own at least one car. Applying this to Zeytinlik, it is estimated that 590 households own at least one vehicle, with anecdotal evidence suggesting that many households own two or more. This growing demand significantly outweighs the available parking infrastructure. Publicly accessible parking facilities in Bakırköy, such as the Bakırköy İDO Open Parking Lot (160 vehicles), Bakırköy Open Parking Lots 1 & 2 (40 vehicles each), and Bakırköy Şenlikköy Parking Lot (384 vehicles), provide some capacity. However, they remain inadequate given the increasing number of residents who require daily and long-term parking. Additionally, commercial parking structures such as Capacity AVM's 2,500-space parking facility cater primarily to visitors rather than neighborhood residents, further limiting available options.

6.1. Mathematical Model for Parking Cost Efficiency and Fee Estimation

This analyze presents the mathematical model used to estimate parking subscription fees for Zeytinlik Neighborhood. The model calculates cost efficiency while incorporating factors such as digitalization, sustainability, and utilization. The estimated fees are based on operational and investment costs, ensuring financial sustainability and accessibility.

The cost efficiency score (E) is calculated using the following formula:

$$E = ((G - M) / C) \times (1 + w_1 * T + w_2 * A + w_3 * P + w_4 * D + w_5 * U + w_6 * S + w_7 * L)$$

Where:

- G = Annual parking revenue (5,000,000 TL)
- M = Annual operating cost (1,500,000 TL)
- C = Initial investment cost (2,000,000 TL)
- T, A, P, D, U, S, L = Coefficients for technology integration, alternative transport, dynamic pricing, enforcement, utilization, sustainability, and pricing flexibility
- w1, w2, w3, w4, w5, w6, w7 = Weights assigned to each factor (normalized to sum up to 1)

Table 2. Cost efficiency fee estimation value

Metric	Value
Cost Efficiency Score (E)	3,04
Estimated Yearly Parking Subscription Fee	55,555. 56 TL
Estimated Hourly Parking Fee	185.18 TL

The parking subscription fees for Zeytinlik Neighborhood have been converted to U.S. dollars based on the Central Bank of Türkiye exchange rate as of February 11, 2025, to facilitate international comparisons and financial analysis. On this date, the selling rate for USD/TL was 36.0781 (Central Bank of Türkiye). Accordingly, the monthly parking subscription fee, originally set at 55,555.56 TL, corresponds to approximately 1,539.8 USD, while the hourly parking fee, calculated at 185,18 TL, translates to approximately 5.13 USD. These values are subject to fluctuations in exchange rates, and adjustments may be required to ensure financial stability and affordability in response to currency volatility. Integrating exchange rate considerations into the pricing model can further enhance its adaptability and long-term sustainability in an international economic context.

The model shows a cost-effectiveness score of 3.04, which ensures financial viability. The estimated monthly subscription fee and hourly parking fee are calculated according to the usage and cost-effectiveness principles. For the effectiveness and sustainability of the model, it is recommended that parking fees should be affordable for the neighborhood residents and should be income-based. These

values can be improved according to real-time demand and policy adjustments. Therefore, more detailed analysis is performed and presented in the next section.

6.2. Proposed Smart Parking Model for Zeytinlik Neighborhood

To address these pressing concerns, a LiDAR-based smart parking system is proposed, emphasizing resident-prioritized parking allocation, dynamic pricing, automated enforcement, and progressive penalty mechanisms. By designating a specific percentage of public parking spaces for residents only, the system ensures that local drivers have priority access to limited parking resources. Drawing from İSPARK's existing pricing model in Bakırköy, a competitive rate of 100 TL per hour (compared to İSPARK's current 80 TL) is recommended, alongside a monthly resident subscription fee of 3,000 TL to provide affordable long-term parking solutions.

Furthermore, automated enforcement mechanisms utilizing LiDAR sensors and Automatic Number Plate Recognition (ANPR) technology will monitor real-time parking occupancy and detect violations, reducing the need for manual oversight. To discourage non-resident parking and illegal use of designated spots, a progressive penalty system will be introduced, with fines starting at 993 TL, escalating with repeat violations. Additionally, abandoned vehicle tracking will be implemented to prevent inefficient occupation of parking spaces, ensuring optimal usage of available infrastructure.

The anticipated benefits of this model include enhanced parking availability for residents, reduced traffic congestion, optimized revenue generation for municipal authorities, and lower enforcement costs due to automation. However, implementation challenges may arise, including public resistance from non-resident drivers, the financial burden of infrastructure adaptation, and concerns regarding data privacy and regulatory compliance.

In conclusion, the findings of this case study highlight the urgent need for structured, technology-driven parking solutions in Zeytinlik Neighborhood. The proposed LiDAR-based smart parking system, with its focus on resident prioritization, real-time enforcement, and dynamic pricing, presents a scalable and sustainable solution to existing urban mobility challenges. If successfully implemented, this model has the potential to serve as a precedent for other densely populated areas facing similar parking crises, ultimately improving the quality of life for local residents and ensuring a more efficient urban traffic system.

6.1. Mathematical Model for Monthly Subscription Fee

To determine the monthly parking subscription fee for residents in Zeytinlik Neighborhood, we use a cost-recovery and demand-based pricing model, which accounts for operational costs, available parking capacity, expected demand, and enforcement revenues. The model is as follows:

$$M = ((C + R * U * 24 * 30 - P) * N) / D$$

Where:

- M = Monthly parking subscription fee
- C = Monthly operational cost of the parking system (assumed 500,000 TL)
- R = Hourly parking fee (100 TL per hour)
- U = Average utilization rate (10 hours/day)
- N = Total number of designated resident parking spaces (200)
- D = Total number of residents applying for subscriptions (300)
- P = Projected penalty revenue from violations (50,000 TL)

Using these values, the optimal monthly parking subscription fee is calculated as **3,000 TL per vehicle**, ensuring cost recovery, fair allocation, and financial sustainability of the system.

6.2. Income-Based Parking Fee Model: Mathematical Justification and Detailed Explanation

In an urban setting like Zeytinlik Neighborhood, where parking demand exceeds supply, a fair and sustainable pricing strategy is essential. The goal of the income-based parking fee model is to ensure affordability for all income groups while maintaining the financial sustainability of the parking system. This section presents a detailed mathematical model, its rationale, and its impact on different income groups.

The model is designed based on the following key parameters:

1. Operational Costs (C): Monthly maintenance, security, and enforcement costs of the parking system.
2. Base Hourly Rate (R): Standard hourly rate charged for parking, derived from İSPARK's pricing structure.
3. Utilization Rate (U): The estimated daily average usage of a parking spot.
4. Capacity (N): The number of available parking spots designated for residents.
5. Resident Demand (D): The number of residents applying for parking subscriptions.
6. Penalty Revenue (P): Expected revenue from parking violations, used to offset operational costs.
7. Property Tax Limit (T): The maximum allowable annual parking fee, ensuring affordability relative to property tax obligations.
8. Income-Based Adjustment Factor (L): A corrective factor ensuring that lower-income households pay a reduced fee while higher-income households contribute proportionally.

The annual parking subscription fee (M) is calculated as:

$$M = \min(((C + R \times U \times 24 \times 30 - P) \times N / D), T \times L)$$

Where:

- M = Annual parking subscription fee per household
- C = Monthly operational cost (500,000 TL)
- R = Hourly parking fee (100 TL/hour)
- U = Average daily utilization per vehicle (10 hours/day)
- N = Number of parking spaces allocated to residents (200)
- D = Total number of applicants for subscriptions (300)
- P = Expected penalty revenue (50,000 TL)
- T = Property tax benchmark (10,000 TL annually)
- L = Income-Based Adjustment Factor:
 - 0.8 for low-income households ($\leq 60\%$ of avg. income)
 - 1.0 for middle-income households (60%-150% of avg. income)
 - 1.2 for high-income households ($>150\%$ of avg. income)

The model ensures financial sustainability while maintaining fairness. It incorporates a revenue-based cost-recovery approach and protects households from excessive financial burdens by setting a cap based on property tax obligations. An example calculation is given in Table 1.

Table 2. Proposed income-based annual parking fee for Zeytinlik neighborhood

Income Group	Annual Parking Fee Calculation	Final Fee
Low-Income ($\leq 60\%$ of Avg. Income)	$M = \min(8,000, 8,000)$	8,000 TL/year
Middle-Income (60%-150% of Avg. Income)	$M = \min(10,000, 10,000)$	10,000 TL/year
High-Income ($> 150\%$ of Avg. Income)	$M = \min(12,000, 12,000)$	12,000 TL/year

This model presents a scalable, fair, and financially sustainable approach to parking management in Zeytinlik Neighborhood. By incorporating demand-based pricing, cost-recovery strategies, and income-sensitive fee structures, the system ensures accessibility for all while maintaining urban mobility efficiency.

7. Conclusion

In this article, case study presents a cost efficiency model for optimizing parking subscription fees in Zeytinlik Neighborhood, integrating financial sustainability, digital enforcement, and dynamic pricing. The cost efficiency score of 3.04 confirms the model's viability, balancing revenue generation with affordability while enhancing parking utilization and congestion management. Demographic and vehicle ownership data were obtained from the Turkish Statistical Institute (TÜİK), Bakırköy Municipality, and İstanbul Metropolitan Municipality (İBB), supplemented by field observations and resident surveys. These data provided insights into household structures, income levels, and vehicle density, ensuring an evidence-based pricing strategy. The proposed model offers a scalable framework for urban parking management, integrating real-time enforcement, sustainability considerations, and socio-economic factors. Its adaptability allows for broader applications in high-density urban districts, with potential refinements incorporating real-time congestion pricing and multimodal transport strategies to enhance long-term mobility planning.

Generally, the escalating number of vehicles coupled with limited parking infrastructure has intensified the challenges associated with on-street parking management like rapidly urbanizing cities as Istanbul. This scenario not only exacerbates traffic congestion but also contributes to environmental degradation and diminishes the quality of urban life. Addressing these multifaceted issues necessitates the adoption of innovative solutions that prioritize efficiency, sustainability, and the well-being of residents.

The proposed LiDAR-based smart parking system emerges as a comprehensive strategy to mitigate these challenges. LiDAR (Light Detection and Ranging) technology utilizes laser pulses to generate high-resolution, three-dimensional representations of the environment. By deploying LiDAR sensors along urban streets, the system can accurately monitor real-time parking space occupancy, detect unauthorized parking activities, and assess the duration of vehicle stays. This precise data collection facilitates dynamic management of parking resources, ensuring optimal utilization and reducing instances of illegal parking.

A critical component of this model is the prioritization of parking access for local residents. Given the scarcity of available parking spaces in Istanbul, it is imperative to conduct detailed analyses to identify areas where the implementation of this model would be most effective. By designating specific zones as priority parking areas for neighborhood residents, the system ensures that locals have reliable access to parking near their homes. This targeted approach not only alleviates daily parking challenges for residents but also fosters a sense of community well-being.

The integration of automated enforcement mechanisms further enhances the system's efficacy. Equipped with cameras and automatic number plate recognition (ANPR) technology, the system can swiftly identify vehicles parked in restricted zones or those exceeding allotted time limits. This automation reduces the reliance on manual monitoring, thereby decreasing enforcement costs and allowing municipal authorities to allocate resources more efficiently.

To encourage compliance and optimize parking space usage, the system incorporates a framework of progressive penalties and financial incentives. Implementing escalating fines for repeat offenders serves as a deterrent against parking violations, while offering financial incentives—such as discounted rates during off-peak hours or for short-term parking—can influence driver behavior positively. Dynamic pricing models, which adjust parking fees based on real-time demand, have been successfully employed in various cities to maintain parking availability and reduce congestion.

Another significant advantage of the LiDAR-based system is its capability to detect abandoned vehicles. By identifying cars that remain stationary beyond a reasonable period, the system can alert authorities to potential cases of vehicle abandonment. Prompt removal of such vehicles ensures that valuable parking spaces are not occupied unnecessarily and contributes to the overall aesthetics and safety of urban environments.

The benefits of implementing this LiDAR-based smart parking system are multifaceted:

- **Improved Urban Mobility:** Real-time data allows drivers to locate available parking spaces efficiently, reducing the time spent searching for parking and thereby decreasing traffic congestion.

- **Enhanced Municipal Revenue:** Effective enforcement and dynamic pricing strategies increase compliance and optimize fee collection, bolstering city revenues.
- **Reduced Enforcement Costs:** Automation minimizes the need for manual patrols, enabling more efficient allocation of municipal resources.
- **Environmental Benefits:** By reducing traffic congestion and optimizing parking space utilization, the system contributes to lower vehicle emissions, supporting environmental sustainability initiatives.

In conclusion, the adoption of a LiDAR-based smart parking system represents a scalable and sustainable solution to the complex challenges of on-street parking management in urban centers like Istanbul. By prioritizing resident access, integrating automated enforcement, and employing dynamic pricing models, this approach not only addresses current parking issues but also lays the foundation for a more efficient, livable, and environmentally friendly urban future.

Researchers' Contribution Rate Statement

All stages of the study were carried out by the corresponding author.

Acknowledgment and/or disclaimers, if any

This research received no specific grant from any funding agency.

Conflict of Interest Statement, if any

There is no conflict of interest to declare.

References

- Arnott, R. & Inci, E.** (2006). An Integrated Model of Downtown Parking and Traffic Congestion. *Journal of Urban Economics*, 60(3), pp. 418 – 442.
- Battarra, R., Gargiulo, C., Tremiterra, M. R. & Zucaro, F.** (2018). Smart Mobility in Italian Metropolitan Cities: A comparative analysis through indicators and actions. *Sustainable Cities and Society*, 41, pp. 556-567.
- Bond, A. & Steiner, R.** (2006). Sustainable campus transportation through transit partnership and transportation demand management: A case study from the University of Florida. *Berkeley Planning Journal*, 19(1).
- Christiansen, P., Engebretsen, O., Fearnley, N. & Hanssen, J. U.** (2017). Parking facilities and the built environment: Impacts on travel behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 95, pp. 198-206.
- Delaware** (2004). *Parking Management Strategies*.
- Idris, M. Y. I., Leng, Y. Y., Tamil, E. M., Noor, N. M. & Razak, Z.** (2009). "Car park system: a review of smart parking system and its technology". *Information Technology Journal*, 8(2), pp. 101-113.
- Fei, S.** (2016). Parking versus public transport subsidies: case study of Nanjing, China. *Transportation Letters*, 8(2), pp. 90-97.
- Geng, Y. & Cassandras, C. G.** (2013). New Smart Parking System Based on Resource Allocation and Reservations. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(3).
- Ibeas, A. & Moura, J. L.** (2018). Parking Behavior and Policy. *Journal of Advanced Transportation*.
- Istanbul Büyükşehir Belediyesi Açık Veri Portalı (IMM-ODP)** (2023). *Parking Usage and Management Data*.
- Kent A.** (2007). *The Psychology of Downtown Parking*. ULI.
- Litman, T.** (2006). *Parking Management: Strategies, Evaluation and Planning*. Victoria Transport Policy Institute, Victoria, Canada, pp. 29.

- Litman, T.** (2016). Parking management: strategies, evaluation and planning. pp. 2.
- Litman, T.** (2017). Comprehensive Implementation Guide. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T.** (2020). Parking Pricing Implementation Guidelines. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T.** (2021). The Business Case for Parking Management Best Practices. Victoria Transport Policy Institute.
- Ma, R., Lam, P. T. & Leung, C. K.** (2018). Potential pitfalls of smart city development: A study on parking mobile applications (apps) in Hong Kong. *Telematics and Informatics*, 35(6), pp. 1580-1592.
- Marsden, G., Docherty, I. & Dowling, R.** (2020). Parking futures: Curbside management in the era of ‘new mobility’ services in British and Australian cities. *Land Use Policy*, 91, 104012.
- OECD** (2013). Long Run Trends in Car Use. Retrieved February , 2025 from https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2013/12/long-run-trends-in-car-use_g1g31398/9789282105931-en.pdf
- Özen, H., Saraçoğlu, A., Boz, F. & Kusakci, S.** (2016). Evaluation of Park and Ride Facilities in Istanbul Using Geographic Information Systems (GIS). *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), pp. 79-88.
- Weinberger, R., Kaehny, J. & Rufo, M.** (2010). US Parking Policies: An Overview of Management Strategies.
- Shaheen, S.** (2005). Smart parking management field test: A bay area rapid transit (Bart) district parking demonstration.
- Shoup, D.** (2005). The High Cost of Free Parking. *Journal of Planning Education and Research*.
- Shoup, D.** (2006). Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), pp. 479-486.
- Shoup, D.** (2008). The politics and economics of parking on campus. The implementation and effectiveness of transport demand management measures: an international perspective, 12.
- Shoup, D.** (2011). The High Cost of Free Parking. American Planning Association, Planners Press, Chicago.
- Thanh, T. T. M. & Friedrich, H.** (2017). Legalizing the illegal parking, a solution for parking scarcity in developing countries. *Transportation research procedia*, 25, pp. 4950-4965.
- Zhang, Y., Carballo, A., Yang, H. & Takeda, K.** (2019). Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 196, pp. 146-177

Research Article

Navigating the E-Scooter Market in Türkiye: A Theory-Guided Qualitative Analysis

Burak YAPRAK^{1,*}, Caner PENSE², Ali ERCAN³, Serhat DOĞAN³

¹Department of Business Administration, Faculty of Business, İstanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye

²Department of Transportation Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Türkiye

³Intelligent Transportation Systems and Technologies, Institute of Science, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Türkiye

*Correspondence: byaprak@ticaret.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1632459

Abstract: In recent years, rising traffic congestion, environmental concerns, and demand for sustainable transport have boosted the global popularity of micromobility vehicles. Electric scooters (e-scooters), introduced in Türkiye in 2019, have quickly spread across major cities. This study analyzes e-scooter use in Türkiye using Behrendt et al.'s even-dimensional framework, covering environment, human factors, social-cultural aspects, vehicle technology, infrastructure, economics, public health, and regulations. It explores Türkiye-specific dynamics, assessing challenges and opportunities. Key findings highlight infrastructure gaps, high operational costs, sustainability issues, user experience, and regulatory shortcomings. Participants' insights underscore the need for innovative strategies to enhance the sector's sustainability and effectiveness in urban mobility. The study offers tailored recommendations for Türkiye, contributing to global micromobility research. It provides policymakers, industry stakeholders, and researchers with suggestions to improve e-scooters' environmental and social sustainability, supporting their integration into urban transport systems while addressing local needs and conditions.

Keywords: Sustainable business models, sustainable transportation, micromobility, urban mobility, electric scooter

Türkiye'de E-Skuter Pazarında Yol Almak: Teori Temelli Nitel Bir Analiz

Özet: Son yıllarda artan trafik sıkışıklığı, çevresel bozulma ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan talep, küresel ölçekte mikromobilite araçlarının yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. Elektrikli skuterler (e-skuterler), kısa mesafeli yolculuklar için popüler bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. 2019 yılında Türkiye'de kullanılmaya başlanmasından bu yana e-skuterler hızla büyük şehirlerde yaygınlaşmıştır. Bu çalışma, Türkiye'deki e-skuter kullanımını Behrendt vd. tarafından önerilen yedi boyutlu teorik çerçeve kapsamında ele almaktadır. Çalışma; çevre, insan, sosyal ve kültürel faktörler, araç teknolojileri, altyapı, ekonomik dinamikler, halk sağlığı ve düzenleyici politikalar gibi çok boyutlu bir yaklaşım benimsemektedir. Türkiye'ye özgü yerel dinamikleri vurgulayarak sektörün karşılaştığı zorluklar ve sunduğu fırsatlar değerlendirilmiştir. Bulgular, altyapı eksiklikleri, işletme maliyetleri, çevresel sürdürülebilirlik, kullanıcı deneyimi ve mevzuat boşlukları gibi kritik sorunlara işaret etmektedir. Katılımcılardan elde edilen içgörüler, e-skuter sektörünün daha sürdürülebilir ve etkili bir kentsel ulaşım çözümüne dönüşmesi için yenilikçi stratejiler ve politikalar geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, Türkiye bağlamına özgü öneriler sunarak küresel mikromobilite literatürüne katkı sağlamaktadır. Politika yapıcılar, sektör paydaşları ve araştırmacılar için çevresel ve toplumsal sürdürülebilirliği artırmaya yönelik kapsamlı öneriler sunarak, e-skuterlerin kentsel ulaşım sistemlerine entegrasyonunu desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir iş modelleri, sürdürülebilir ulaşım, mikromobilite, kentsel mobilite, elektrikli skuter

1. Introduction

Over the past decade, urban centers worldwide have faced escalating challenges such as traffic congestion, environmental degradation, and the growing demand for efficient mobility solutions (Caspi, Smart, & Noland, 2020; Litman, 2017). These issues have catalyzed the emergence of micromobility—a transportation category encompassing bicycles, scooters, and, most prominently, electric scooters (e-scooters) (SAE, 2019). With the advent of smartphone applications and user-friendly rental models, e-scooters have transitioned from novelty status to an integral element of modern urban transportation systems (Christoforou et al., 2021). Their rapid global adoption is reflective of their accessibility, environmental promise, and technological innovation, yet also raises critical questions about safety, infrastructure, and long-term sustainability (Trivedi et al., 2019; Güldür et al., 2022).

E-scooters first gained widespread traction in the United States around 2017, subsequently expanding across Europe and Asia (Dündar et al., 2022). Their popularity is often attributed to several factors. They provide a quick, affordable, and convenient alternative to both public transportation and private cars, especially for short-distance trips under 5 kilometers (Caspi et al., 2020). Furthermore, e-scooters align with global sustainability goals by potentially reducing traffic congestion and local emissions. However, debates persist regarding their overall environmental footprint, particularly when accounting for manufacturing, redistribution practices, and battery disposal (Moreau et al., 2020). Advances in technology, including the proliferation of smartphones and GPS-enabled applications, have further facilitated seamless user experiences, making e-scooters a highly accessible and increasingly favored mobility option (Ekici & Kasap, 2023).

Despite these advantages, unresolved issues continue to challenge their integration into urban transportation networks. Safety concerns, inadequate infrastructure, and debates around environmental impact have sparked discussions among policymakers, leading to the development of new regulations aimed at ensuring their safe and equitable use (Resmi Gazete, 2021). The integration of e-scooters into urban mobility systems thus remains an evolving and complex endeavor, marked by the need to balance innovation with public safety, environmental sustainability, and infrastructure development.

In Türkiye, the adoption of e-scooters mirrors global trends, though it is shaped by unique local dynamics. Since their introduction in 2019, e-scooters have become a common sight in major cities such as Istanbul, Ankara, Izmir, and Bursa (Bölen & Çeliker, 2021; Bildirici, İlyas, Kepenek, & Albayrak, 2024). This rapid expansion has been fueled by several factors. Türkiye's growing urban population and persistent traffic congestion have heightened the demand for alternative mobility solutions, with e-scooters offering shorter travel times on crowded streets (Kılıç & Önler, 2022). The country's predominantly young, tech-savvy population has readily embraced app-based services, further driving adoption (Ekici & Kasap, 2023). Additionally, government and municipal initiatives aimed at reducing greenhouse gas emissions and improving air quality have begun to incorporate e-scooters as part of broader sustainable mobility strategies (Resmi Gazete, 2021).

However, the swift proliferation of e-scooters in Türkiye has not been without challenges. Safety concerns, limited infrastructure, and tensions regarding shared responsibility for vehicle maintenance and road safety compliance remain pressing issues (Güldür et al., 2022). Infrastructure in many Turkish cities, historically designed to prioritize automobiles, often lacks dedicated lanes or pathways for micromobility vehicles, exacerbating safety risks (Önder & Akdemir, 2022). Moreover, concerns about noise levels, pedestrian displacement, and equitable access continue to generate debate among stakeholders, including local governments, operators, and users.

Despite the widespread adoption of e-scooters, systematic research on their multi-dimensional impacts in Türkiye remains limited. Existing studies have largely focused on isolated aspects, such as injury rates (Trivedi et al., 2019), regulatory challenges (Bildirici et al., 2024), or environmental benefits (Moreau et al., 2020), leaving a gap in understanding their broader implications. Addressing this gap, the present study adopts a theory-driven approach to explore the e-scooter phenomenon in Türkiye through the lens of the seven-dimensional framework proposed by Behrendt et al. (2023). This framework encompasses environmental, social, technological, infrastructural, economic, public health, and regulatory perspectives, offering a comprehensive structure to analyze the factors influencing e-scooter adoption and usage.

By applying this holistic framework, the study aims to uncover context-specific opportunities and challenges, examine the regulatory and policy dynamics shaping the e-scooter landscape, and explore the socio-technical interactions that influence user behavior and public perceptions. Through this approach, the research seeks to contribute to the global discourse on micromobility while providing actionable insights for policymakers, stakeholders, and everyday users in Türkiye.

2. Theoretical Framework

The exponential growth of e-scooters has spawned a broad corpus of literature on micromobility's benefits, risks, and governance requirements (Dündar et al., 2022). However, synthesizing these disparate lines of inquiry demands a coherent model—one capable of capturing both micro-level user behaviors and macro-level regulatory dynamics. The seven-dimensional framework championed by Behrendt et al. (2023) fulfills this requirement by offering a structured lens through which micromobility can be interrogated. This section delves into that framework and situates it within the existing research.

Research on micromobility has traversed multiple disciplinary angles, including urban planning, environmental science, public health, behavioral psychology, and technology studies (Litman, 2017; Christoforou et al., 2021). From an urban planning perspective, micromobility instruments like e-scooters can alleviate last-mile gaps, complement mass transit systems, and reduce dependence on private cars (Önder & Akdemir, 2022). Environmentally, they are lauded for their potential to curtail air pollution and greenhouse gas emissions by replacing short-distance car trips (Moreau et al., 2020). Yet, a complete ecological assessment must also account for manufacturing, distribution, and end-of-life disposal processes (Güldür et al., 2022). Public health experts emphasize safety and accident rates (Trivedi et al., 2019), while behavioral researchers investigate user acceptance, habit formation, and risk perception (Ekici & Kasap, 2023). Within these domains, frameworks have emerged to map out the multifaceted nature of micromobility. Some focus on the user's journey—addressing motivation and trip purpose. Others concentrate on technical design—highlighting battery efficiency, durability, and geofencing technologies (Dündar et al., 2022). Behrendt et al.'s seven-dimensional framework synthesizes these approaches into a single, robust theoretical model that holistically captures environmental, social, technological, infrastructural, economic, health, and policy considerations.

Behrendt et al. (2023) propose that micromobility be examined across seven interrelated dimensions, each illuminating a different yet interconnected facet of the phenomenon, as illustrated in Figure 1.

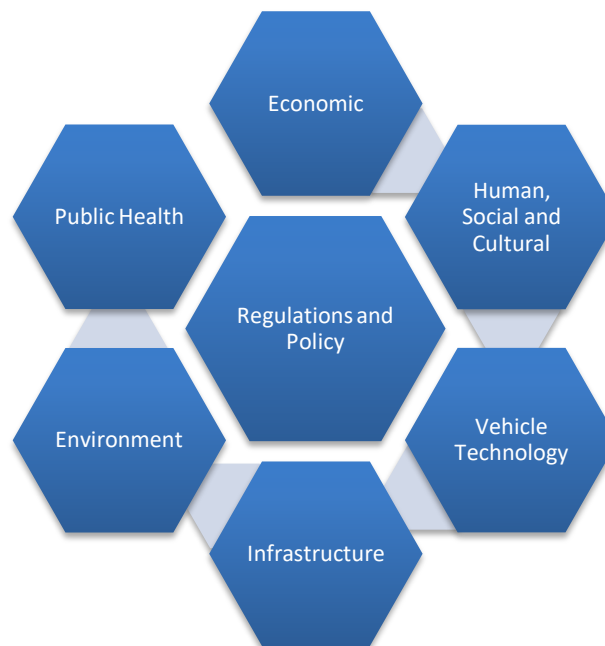


Figure 1. Behrendt et al.'s (2023) Seven-Dimensional Theoretical Framework

2.1. Environmental Dimension

E-scooters are frequently championed as a sustainable urban mobility solution due to their potential to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and mitigate local air pollution. However, their overall environmental impact remains a subject of debate, as their sustainability benefits are contingent upon multiple interconnected factors.

While e-scooters run on electricity and do not produce exhaust emissions, their true ecological footprint depends significantly on the energy mix used for electricity generation, as well as the carbon intensity of their production and lifecycle management. The manufacturing of lithium-ion batteries, a critical component of e-scooters, is particularly resource-intensive, involving the extraction of rare metals and complex chemical processing (Hertwich et al., 2019). Additionally, challenges associated with battery disposal and recycling further complicate their environmental credentials, as improper waste management can lead to toxic pollution and resource inefficiencies (Gaines, 2021). Some researchers argue that instead of fully eliminating environmental burdens, e-scooters may merely shift them to other stages of the supply chain, particularly in regions with high-carbon electricity grids (Moreau et al., 2020).

In Türkiye, where rapid urbanization and increasing vehicular emissions heighten the urgency for sustainable transportation alternatives, e-scooters hold promise in reducing per capita transport-related emissions. However, operational inefficiencies such as frequent battery replacements, energy-intensive nighttime charging cycles, and the logistical complexities of redistributing scooters across urban centers can significantly diminish their net environmental benefits (Kılıç & Önler, 2022). Fleet management strategies that prioritize sustainable energy use, optimized deployment, and extended battery lifespans are therefore crucial to maximizing their ecological advantages.

To ensure that e-scooters contribute meaningfully to Türkiye's sustainability goals, an integrated policy framework is necessary. This should include incentives for renewable energy adoption in charging infrastructure, regulations promoting circular economy principles in battery production and disposal, and the development of data-driven fleet management techniques to reduce unnecessary vehicle transport. Without these systemic interventions, the potential environmental benefits of e-scooters may remain largely theoretical rather than practically realized.

2.2. Human, Social, and Cultural

The widespread adoption of e-scooters extends beyond infrastructural readiness and technological advancements; it is equally shaped by deep-rooted social norms, cultural perceptions, and behavioral patterns that influence how individuals engage with new mobility options. In different urban contexts, e-scooters are perceived through diverse lenses—some view them as symbols of modernity and sustainable urban living, representing a shift away from car-dependent lifestyles. In contrast, others remain skeptical due to concerns over safety, regulatory uncertainties, and prevailing cultural attitudes that prioritize private vehicle ownership over shared mobility solutions.

In Türkiye, the societal reception of e-scooters is particularly complex, as mobility preferences continue to be dominated by private automobiles, which are often associated with status, security, and convenience (Ekici & Kasap, 2023). This cultural inclination creates a significant barrier to the mainstreaming of e-scooters, particularly among older generations and higher-income demographics who may perceive shared vehicles as inferior alternatives to personal car ownership. Furthermore, generational divides in technology adoption further shape e-scooter usage patterns, with younger, tech-savvy individuals being more receptive to app-based micromobility solutions, whereas older populations often exhibit resistance due to unfamiliarity or concerns about safety and reliability (Gössling, 2020).

Beyond generational disparities, social inequalities also play a crucial role in e-scooter accessibility and acceptance. Low-income communities may face economic barriers to frequent e-scooter use, particularly if pricing models remain prohibitive relative to other forms of public transport. Additionally, gendered mobility patterns reveal disparities in e-scooter adoption, with safety concerns and infrastructural inadequacies disproportionately deterring female users from integrating e-scooters into their daily commutes (Aldred & Jungnickel, 2014). Addressing these socio-cultural barriers requires

comprehensive public engagement strategies, including targeted awareness campaigns, user education programs, and incentives that encourage equitable access to micromobility options.

To ensure that e-scooters evolve beyond a niche mode of transport and achieve widespread societal integration, policymakers and industry stakeholders must adopt an inclusive, community-centered approach. Initiatives such as subsidized pricing models for marginalized groups, enhanced safety measures, and localized outreach efforts tailored to specific cultural contexts can foster greater public trust and participation. Without these culturally sensitive interventions, even the most technologically advanced e-scooter initiatives risk being confined to select demographics, limiting their transformative potential in Türkiye's urban mobility landscape.

2.3. Vehicle Technology Dimension

At the core of e-scooter adoption lies a dynamic interplay between technological innovation and real-world durability. The effectiveness of e-scooter systems depends on the resilience and efficiency of critical components, including electric motors, battery systems, braking mechanisms, and digital interfaces. These elements must not only ensure smooth operation but also withstand frequent and often intensive usage under variable environmental and infrastructural conditions. Unlike privately owned scooters, shared fleet models are subjected to higher levels of wear and tear, necessitating robust engineering solutions that extend operational lifespan while maintaining safety and user-friendliness.

A key area of technological advancement in e-scooter development is battery innovation. Swappable battery packs have emerged as a pivotal solution, enabling fleet operators to reduce downtime and optimize energy use by replacing depleted batteries in situ rather than transporting entire vehicles to centralized charging hubs (Güldür et al., 2022). This approach enhances operational efficiency, minimizes labor-intensive charging cycles, and contributes to overall sustainability by reducing unnecessary vehicle transport emissions. Moreover, real-time diagnostics and predictive maintenance—powered by IoT sensors and AI-driven analytics—allow for proactive identification of mechanical failures, improving fleet reliability and reducing maintenance costs (Dündar et al., 2022).

In Türkiye, e-scooter providers are actively evaluating how these technologies perform in cities characterized by heterogeneous road conditions, variable climate patterns, and complex traffic dynamics. Urban areas such as İstanbul, with its high levels of congestion and mixed-quality road surfaces, pose distinct challenges that demand locally optimized solutions. For instance, enhanced shock absorption systems, reinforced chassis materials, and adaptive braking mechanisms are essential to ensuring safe and comfortable rides across uneven terrains. Additionally, weatherproofing innovations—such as water-resistant enclosures and anti-slip deck surfaces—can significantly improve safety and usability in regions that experience seasonal rainfall or extreme temperature fluctuations.

As consumer expectations evolve and market competition intensifies, manufacturers and operators must strike a delicate balance between lightweight portability and structural durability. Excessive weight can reduce ease of use and maneuverability, while inadequate durability shortens vehicle lifespans and increases long-term operational costs. The integration of modular design principles—where damaged components can be swiftly replaced without discarding the entire vehicle—further enhances cost-effectiveness and sustainability.

Ultimately, the success of e-scooter technology in Türkiye hinges on context-sensitive innovation, where cutting-edge advancements are adapted to meet local infrastructural, environmental, and consumer demands. By investing in durability-enhancing materials, smart maintenance systems, and ergonomic design, industry stakeholders can ensure that e-scooters remain both practical and appealing, fostering their long-term viability as a sustainable urban mobility solution.

2.4. Infrastructure Dimension

The viability of e-scooters as an effective micromobility solution is inextricably linked to the quality and adaptability of urban infrastructure. Dedicated lanes, safe parking zones, and well-maintained roads are fundamental prerequisites for ensuring secure and efficient rides (Litman, 2017). However, in many

urban environments, particularly those with historically car-centric designs, infrastructure remains insufficiently equipped to accommodate e-scooters. The absence of dedicated spaces often forces riders to share congested roadways with motor vehicles or navigate pedestrian-heavy sidewalks, exacerbating safety risks and contributing to regulatory tensions.

In Türkiye, where urban planning has long prioritized automobiles, the retroactive integration of e-scooters into existing transportation networks presents both a logistical and financial challenge (Önder & Akdemir, 2022). Many major cities, including İstanbul, Ankara, and İzmir, exhibit dense traffic conditions, irregular road maintenance, and a lack of protected micromobility lanes, creating an inhospitable environment for widespread e-scooter adoption. Addressing these shortcomings requires significant policy commitments, targeted infrastructure investments, and adaptive urban design strategies. City planners may need to redesign sidewalks, introduce curbside lanes, or reconfigure intersections to accommodate non-automobile traffic while ensuring pedestrian safety.

A holistic infrastructure strategy should also prioritize multi-modal connectivity, seamlessly integrating e-scooters with public transit hubs. By strategically positioning docking stations near bus terminals, metro entrances, and major commuter nodes, cities can facilitate first-mile/last-mile connectivity, reducing reliance on private vehicles and contributing to more sustainable urban mobility patterns. International case studies have demonstrated that such integration can significantly boost ridership and decrease urban congestion (Shaheen & Cohen, 2019).

Beyond physical infrastructure, the development of digital infrastructure—such as real-time route optimization, geofencing technologies, and smart parking solutions—can further enhance the usability and efficiency of e-scooter systems. Leveraging AI-driven traffic analysis to identify high-risk zones and dynamically adjust infrastructure investments can enable more data-driven, adaptive urban planning (Gössling, 2020).

Without these comprehensive infrastructure investments, e-scooters are likely to remain a marginal or supplementary mode of transport, rather than a transformative urban mobility solution. To fully harness the potential of micromobility in Türkiye, urban policymakers must adopt a proactive, integrated approach that aligns physical, digital, and policy frameworks, ensuring that e-scooters can operate safely, efficiently, and at scale within the evolving transportation ecosystem.

2.5. Economic Dimension

E-scooter firms operate within a highly competitive and evolving market, where profitability and long-term sustainability are contingent on a complex interplay of economic variables. Despite optimistic market forecasts from research firms such as Grand View Research (2021) and Statista (2023), translating projected growth into stable revenue streams remains a formidable challenge. The e-scooter business model is inherently cost-intensive, with major expenditures including fleet maintenance, battery recharging logistics, insurance, and mitigation of vandalism and theft. These operational costs can significantly erode profit margins, necessitating strategic innovations in cost management and revenue generation.

In Türkiye, the economic landscape introduces additional layers of complexity. Regulatory compliance, fluctuating user demand, and disparities in regional purchasing power pose unique challenges for operators (Özçelik, 2021). Market penetration strategies that succeed in major metropolitan areas such as İstanbul, Ankara, or İzmir may not be equally viable in smaller cities, where disposable income levels and urban density differ. Furthermore, macroeconomic conditions, including currency fluctuations and inflationary pressures, can impact both pricing strategies and consumer affordability, making flexible pricing models essential for long-term financial stability.

A critical determinant of profitability in the sector is the balance between customer acquisition costs and lifetime value per user. While large injections of venture capital can accelerate expansion and market penetration, they do not inherently guarantee long-term sustainability if usage rates plateau or operational expenses remain disproportionately high. Many firms therefore diversify revenue streams beyond standard pay-per-ride pricing, incorporating:

- Subscription-based models, offering unlimited or discounted rides for a fixed monthly fee, which enhances customer retention and stabilizes cash flow.
- Loyalty and gamification programs, incentivizing frequent usage through discounts, referral benefits, and promotional campaigns.
- Public-private partnerships, where e-scooter firms collaborate with municipalities and transit authorities to integrate micromobility into broader urban transportation networks. These partnerships may involve revenue-sharing models, designated parking infrastructure, or subsidies that reduce the financial burden on operators.

To achieve sustained economic viability, e-scooter companies must embrace operational efficiency and adaptive business models. Advances in fleet optimization algorithms, demand forecasting, and AI-driven predictive maintenance can significantly reduce costs by minimizing unnecessary vehicle redistribution and improving asset longevity. Additionally, companies that engage in proactive regulatory dialogue with local authorities are better positioned to influence policy frameworks in ways that support industry growth rather than impose restrictive measures.

Ultimately, economic success in Türkiye's e-scooter sector will favor firms that prioritize agility, cost-efficiency, and ecosystem integration. Companies that effectively streamline logistics, enhance consumer accessibility, and establish collaborative partnerships will be best positioned to navigate market uncertainties and capitalize on the growing demand for sustainable urban mobility solutions.

2.6. Public Health Dimension

Micromobility is often lauded for its potential to reduce vehicular emissions, improve urban air quality, and promote more sustainable commuting habits. However, the direct implications of e-scooter adoption for public health extend well beyond environmental benefits, encompassing critical safety concerns, accident risks, and regulatory gaps.

A growing body of research highlights the heightened vulnerability of e-scooter riders to injuries and collisions, particularly in the absence of protective measures such as helmet mandates and dedicated infrastructure (Trivedi et al., 2019). Unlike cyclists, who benefit from a well-established culture of protective gear usage, e-scooter riders often operate without helmets, reflective clothing, or adequate visibility at night, increasing their risk of severe injury in the event of an accident. Furthermore, the upright stance and limited stability of e-scooters make riders more susceptible to falls, particularly when navigating uneven road surfaces or congested urban environments. Studies in other urban settings have linked e-scooter accidents to a range of factors, including reckless riding behavior, lack of experience, and interactions with motor vehicles or pedestrians (Mitchell et al., 2019).

In Türkiye, the absence of centralized, nationwide data on e-scooter-related injuries and fatalities presents a significant challenge to accurately assessing public health risks. While scattered reports of severe and fatal accidents have raised public concern, the lack of standardized reporting mechanisms impedes the ability of policymakers and urban planners to implement evidence-based safety interventions (Güldür et al., 2022). Establishing a comprehensive accident database—tracking incident locations, severity levels, and contributory factors—would be instrumental in identifying high-risk zones, peak accident times, and the user behaviors most frequently associated with collisions.

To mitigate public health risks while preserving the broader environmental and social benefits of e-scooter adoption, a multi-pronged approach is required. Key policy recommendations include:

- **Mandatory Safety Regulations:** Implementing helmet laws, requiring reflective gear for nighttime riding, and enforcing speed limits in high-risk areas can significantly reduce accident severity.
- **Infrastructure Enhancements:** The creation of dedicated e-scooter lanes, particularly in high-density urban areas, can help minimize conflicts between riders, pedestrians, and motor vehicles.

- **Data-Driven Policy Interventions:** Establishing standardized accident reporting protocols and analyzing e-scooter usage trends can inform targeted safety initiatives, such as improved traffic signal integration and designated parking areas.
- **Public Awareness Campaigns:** Educating users on safe riding practices, traffic rules, and responsible scooter behavior through digital platforms and community outreach programs can help reduce reckless riding and enhance public perception of e-scooter safety.

By integrating evidence-based public health strategies with robust urban mobility policies, Türkiye can optimize the safety and sustainability of its micromobility sector. Without proactive interventions, the public health risks associated with e-scooters could undermine their broader societal and environmental benefits, limiting their potential as a viable, long-term urban transport solution.

2.7. Regulations and Policy Dimension

Governance plays a pivotal role in shaping the integration of e-scooters into urban mobility ecosystems. Effective regulation determines the operational parameters of e-scooter services, including speed limits, user eligibility, parking protocols, and safety requirements, while also influencing the business models of fleet operators. Policymakers must balance the need for innovation and accessibility with broader concerns related to traffic safety, public space management, and equitable access to transportation.

In Türkiye, the 2021 “Elektrikli Skuter Yönetmeliği” established a foundational legal framework to regulate e-scooter operations, introducing guidelines on vehicle specifications, operational limits, and safety measures (Resmi Gazete, 2021). However, local governments retain significant autonomy in shaping additional regulatory measures, leading to municipality-specific policies that impact the scalability and consistency of e-scooter services across the country (Bildirici et al., 2024). Municipal authorities may impose restrictions such as fleet size caps, geofenced no-ride zones, mandatory insurance requirements, and obligations for operators to share real-time mobility data. While these policies aim to enhance safety, prevent sidewalk clutter, and optimize urban traffic flows, they also contribute to a fragmented regulatory landscape, requiring operators to navigate a complex web of local compliance requirements when expanding their services.

One of the central challenges in e-scooter governance is the enforcement of regulations across diverse urban settings. Ensuring compliance with speed restrictions, helmet mandates, and designated parking zones requires robust monitoring mechanisms, yet enforcement capacity varies between cities. Inconsistencies in implementation can create regulatory uncertainty for operators, particularly when different municipalities impose conflicting operational rules. Such disparities complicate national expansion efforts and may deter private sector investment in large-scale micromobility infrastructure.

Moreover, data-driven policymaking remains an evolving domain. Many cities require e-scooter companies to share anonymized ridership data, enabling urban planners to analyze travel patterns and optimize infrastructure development. However, standardizing data-sharing agreements while safeguarding user privacy presents an ongoing policy challenge. Establishing a centralized regulatory framework with localized adaptability could enhance transparency and streamline operations, ensuring that e-scooter services remain both innovative and well-regulated.

For e-scooters to become a sustainable and widely accepted urban mobility solution in Türkiye, regulatory strategies must evolve to balance safety, accessibility, and market viability. National-level guidelines should align with local operational realities, providing a structured yet flexible approach to policy implementation. Best practices from global micromobility governance suggest that public-private collaboration, real-time data integration, and adaptive regulation mechanisms are key to fostering an efficient and scalable e-scooter ecosystem (Shaheen & Cohen, 2020). Therefore, future regulatory advancements should focus on:

- **Unified compliance standards** that reduce inter-municipal inconsistencies and facilitate national expansion.

- Technology-assisted enforcement, such as AI-driven geofencing and automated violation detection.
- Incentivizing sustainable fleet management, including battery recycling mandates and renewable energy-powered charging infrastructure.
- Public engagement initiatives to enhance safety awareness and promote responsible ridership.

By refining policy frameworks to accommodate both innovation and urban mobility demands, Turkish authorities can foster a well-regulated, efficient, and sustainable micromobility sector, positioning e-scooters as a credible alternative to traditional transport modes.

3. Research Methodology

This section provides a comprehensive overview of the research process, detailing the adopted methodological approach, participant selection criteria, data collection techniques, and analytical procedures. The study is structured around the seven-dimensional framework proposed by Behrendt et al. (2023), ensuring a systematic exploration of Türkiye's e-scooter industry.

3.1. Research Approach (Theory-Grounded Qualitative Method)

This study employs a theory-grounded qualitative research approach, leveraging the seven-dimensional micromobility framework proposed by Behrendt et al. (2023) as its guiding theoretical foundation. This methodological choice facilitates a structured yet flexible exploration of the e-scooter sector in Türkiye, allowing for both the validation of existing theoretical constructs and the identification of unique context-specific insights.

By utilizing a qualitative methodology, the research prioritizes in-depth perspectives from industry professionals, capturing the complexities of regulatory, infrastructural, technological, and social dynamics that influence e-scooter adoption. The qualitative nature of this study also enables contextual interpretation, ensuring that findings are not only aligned with global micromobility discourse but also reflective of Türkiye's unique urban mobility landscape.

3.2. Participant Selection and Sampling Strategy

3.2.1. Industry Expert Participation

The study engaged three leading e-scooter firms operating in Türkiye. These companies were selected based on their extensive industry experience, having been active in the sector for at least five years. Their operations span multiple urban centers, providing a holistic perspective on the sector's technological, regulatory, and operational challenges.

To ensure multi-level insight, participants from these companies were key decision-makers holding high-ranking managerial roles, including:

- General Managers, responsible for overarching business strategies and regulatory compliance,
- Operations Managers, overseeing day-to-day fleet logistics and urban deployment strategies, and
- R&D Managers, contributing insights on technology development, sustainability measures, and innovation.

3.2.2. Purposive Sampling Strategy

A purposive sampling method was employed, ensuring that participants had direct experience with the operational and regulatory complexities of the e-scooter industry. The selection criteria focused on:

- Multi-regional operations, ensuring diversity in urban deployment challenges,
- Extensive market experience, providing deep sectoral knowledge, and
- Engagement with policymakers, to capture perspectives on regulatory frameworks.

Initially, seven firms were invited to participate in the study, with direct contact made through formal requests. Of these, three companies voluntarily agreed to participate, representing different facets of the e-scooter ecosystem.

3.3. Ethical Considerations

The study adhered to strict ethical guidelines to ensure participant confidentiality, data integrity, and compliance with academic research standards.

3.3.1. Informed Consent

Prior to data collection, all participants received a detailed study briefing, outlining:

- The purpose of the research,
- The intended use of collected data, and
- Their rights as participants, including the right to withdraw at any stage.

Written informed consent was obtained from all participants to ensure voluntary participation.

3.3.2. Data Anonymization

To maintain confidentiality, the following measures were implemented:

- Company names and participant identities were anonymized, with firms coded as Firm A, Firm B, and Firm C.
- Sensitive operational data (such as market shares and strategic planning details) were masked to prevent indirect identification.

3.3.3. Data Security & Ethical Approval

All collected data were securely stored, with restricted access limited to the research team. Ethical approval was formally obtained from the relevant institutional review board before data collection commenced.

By adhering to these robust ethical protocols, the study ensures data integrity, participant protection, and compliance with international research ethics standards, thereby enhancing the reliability and credibility of its findings.

3.4. Data Collection Methods

This section details the methodological approach employed for data collection, with a primary focus on in-depth interviews and, where applicable, observational techniques. The selection of these methods was driven by the need to obtain nuanced, context-specific insights into the e-scooter sector in Türkiye. The procedures undertaken to ensure rigor and reliability in the data collection process are outlined below.

3.4.1. In-Depth Interviews

In-depth interviews were selected as the primary data collection method due to their ability to capture rich, qualitative insights from key stakeholders in the e-scooter industry. This method facilitated a deeper understanding of the challenges, opportunities, and operational dynamics shaping the sector, allowing participants to articulate their experiences, perspectives, and strategic outlooks in a detailed manner.

3.4.1.1. Interview Structure

To maintain a balance between methodological consistency and respondent flexibility, semi-structured interviews were conducted. This approach ensured that core themes were consistently explored across interviews while allowing participants the latitude to elaborate on topics relevant to their expertise.

The interview questions were systematically designed based on the seven-dimensional theoretical framework proposed by Behrendt et al. (2023), ensuring a holistic examination of the e-scooter ecosystem:

- **Environment:** Questions assessed the environmental impact of e-scooters, focusing on sustainability practices, carbon footprint reduction, battery management, and energy consumption models.
- **Human, Social, and Cultural Factors:** Discussions centered on user demographics, behavioral trends, safety concerns, public perception, and the socio-cultural integration of e-scooters into urban mobility.
- **Vehicle Technology:** Participants provided insights into technological advancements, durability, safety standards, battery efficiency, and ongoing research and development efforts.
- **Infrastructure:** Topics included the adequacy of current urban infrastructure, parking challenges, traffic integration, and collaboration with municipal authorities to improve e-scooter accessibility.
- **Economic Dynamics:** The financial viability of the sector was explored through questions on market competition, pricing models, consumer affordability, investment trends, and the economic impact of external disruptions, such as the COVID-19 pandemic.
- **Public Health:** The discussions evaluated both the positive and negative public health implications of e-scooter adoption, including its role in reducing air and noise pollution as well as potential accident-related risks.
- **Regulations and Policy:** Participants were asked about the evolving regulatory landscape, compliance challenges, legal frameworks, and anticipated policy developments shaping the sector's future.

3.3.1.2. Interview Procedure

To ensure accessibility, convenience, and participant confidentiality, interviews were conducted remotely using Zoom, facilitating broader participation from stakeholders across different regions of Türkiye. The procedural steps followed were as follows:

- Each interview lasted approximately 45 to 60 minutes, allowing sufficient time for in-depth discussions while minimizing respondent fatigue.
- Participants were provided with a pre-interview briefing, outlining the study's objectives, confidentiality measures, and their right to withdraw at any stage without consequences.

- Sensitive or proprietary business information was not requested; instead, questions were framed to elicit general industry insights and expert opinions.
- All interviews were recorded and transcribed verbatim for subsequent thematic analysis, ensuring data accuracy and analytical rigor.
- Ethical considerations were strictly observed, with informed consent obtained from all participants, and data anonymization measures implemented to protect respondent identities.

By employing a systematic, ethically grounded, and theory-driven interview approach, this study ensures the collection of reliable, high-quality qualitative data, enabling a comprehensive exploration of the e-scooter market in Türkiye.

3.5. Data Analysis Procedure

The data analysis followed a rigorous, structured approach based on the seven-dimensional theoretical framework proposed by Behrendt et al. (2023). This framework provided a comprehensive analytical lens for systematically categorizing and interpreting qualitative data on e-scooter adoption and its multidimensional impact. The analysis involved a multi-step process, including systematic coding, thematic analysis, and comparative evaluation against existing micromobility research. Special emphasis was placed on identifying Türkiye-specific contextual factors that shape e-scooter adoption differently from other global settings.

3.5.1. Planning the Coding Process

The qualitative data, primarily derived from in-depth interviews, were coded according to seven predefined dimensions, ensuring a holistic examination of e-scooter operations and their broader implications:

- Environment
- Human, Social, and Cultural
- Vehicle Technology
- Infrastructure
- Economic
- Public Health
- Regulations and Policy

A qualitative data analysis software was employed to systematically organize, tag, and retrieve excerpts from interview transcripts. Each excerpt was categorized under its corresponding dimension, ensuring a clear, structured, and replicable coding process. This method allowed for efficient cross-referencing of themes, facilitating deeper insights into sectoral challenges and opportunities.

3.5.2. Thematic Analysis

Thematic analysis was conducted in three main phases: (i) data familiarization and initial coding, (ii) theme development, and (iii) comparative analysis. The process commenced with an iterative, in-depth reading of all transcripts to ensure a comprehensive understanding of the content.

3.5.2.1. Generating Initial Codes

During this phase, initial codes were generated by identifying key phrases, statements, and conceptual insights within the transcripts. Codes were derived from direct quotations or concise summaries of participant responses, ensuring authentic representation of stakeholder perspectives.

- Example: The statement “Reducing carbon footprint should be prioritized” was coded under the Environment dimension.
- Example: The statement “Most users are young and use scooters mainly for leisure” was coded under the Human, Social, and Cultural dimension.

To ensure reliability, inter-coder agreement was assessed by involving multiple researchers in the coding process. Discrepancies were resolved through discussion and consensus, enhancing the credibility and consistency of the findings.

3.5.2.2. Developing Themes from Codes

Once initial codes were established, thematically similar codes were clustered into overarching themes, allowing for higher-order interpretation of findings. This process involved identifying relationships between codes and constructing thematic categories that encapsulated broader trends and patterns.

- Example: Codes such as “lack of bike lanes” and “parking problems” were consolidated into the theme “insufficient micromobility infrastructure.”
- Example: Codes related to pricing concerns and affordability were grouped under “economic accessibility of e-scooter services.”

These emergent themes provided deeper insights into sector-wide challenges and user experiences, forming the foundation for subsequent comparative analysis.

3.5.3. Analysis and Comparison

Following thematic categorization, the coded data were systematically compared against the seven-dimensional theoretical framework to assess alignment with existing micromobility research. Particular attention was given to:

- Identifying unique local dynamics in Türkiye that influence e-scooter adoption differently compared to other international case studies.
- Assessing gaps between theoretical expectations and empirical findings, particularly in dimensions such as infrastructure limitations, user behavior, and policy gaps.
- Refining Behrendt et al.'s (2023) framework by incorporating Türkiye-specific sub-dimensions, allowing for a more context-sensitive analytical approach.

Figure 2 illustrates the adaptation of Behrendt et al.'s (2023) theoretical model to Türkiye's unique urban mobility context, integrating localized socio-economic, infrastructural, and regulatory factors.

By employing this structured, theory-driven methodology, the study ensures scientific rigor, replicability, and contextual relevance, contributing valuable insights to the global discourse on micromobility and sustainable urban transport.

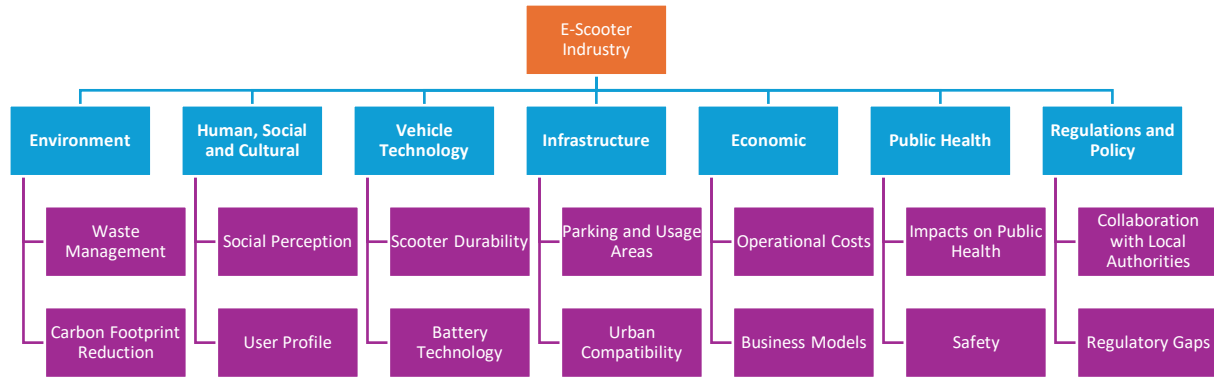


Figure 2. Adaptation of Behrendt et al.'s (2023) Theoretical Framework to the Context of Türkiye

4. Findings

This section presents the empirical results derived from a qualitative analysis based on Grounded Theory, a methodological approach that facilitates the systematic development of theory from qualitative data (Behrendt et al., 2017). By employing an iterative process of data collection, coding, and thematic analysis, this study ensures that its findings are deeply embedded in the perspectives and lived experiences of key stakeholders in Türkiye's e-scooter sector.

The results are structured across seven critical dimensions—environmental, social, technological, infrastructural, economic, public health, and regulatory aspects of shared micromobility—providing a comprehensive, theory-driven perspective on the opportunities and challenges facing e-scooter adoption. The analysis captures both recurring trends and unique insights, forming a robust foundation for further theoretical development and policy recommendations.

4.1. Environmental Impact

4.1.1. Carbon Footprint Reduction

E-scooter operators are actively seeking low-emission alternatives to reduce their overall carbon footprint, with a growing emphasis on electrification of operational fleets:

- "We are replacing our gasoline-powered operational vehicles with electric ones." – Representative of Company A
- "I can say that we are currently 90% ahead in reducing carbon emissions. Other companies are progressing similarly." – Representative of Company C
- "Diesel is still the largest source of carbon emissions in our operations, and we are working on switching to electric vehicles to address this." – Representative of Company B

4.1.2. Waste Management

A circular economy approach is being increasingly integrated into battery disposal and recycling efforts to minimize environmental impact:

- "We hand over used batteries to municipalities and collaborate with recycling companies." – Representative of Company C
- "Even the first batteries we bought are still operating at 80% efficiency, which minimizes waste generation." – Representative of Company B

- "We collaborate with suppliers like Go Battery to ensure our batteries are renewable." – Representative of Company C

4.2. Human, Social, and Cultural Factors

4.2.1. User Profile

E-scooter adoption is highly skewed toward younger demographics, with recreational and short-distance commuting being primary usage motivations:

- "80% of our users are between the ages of 16 and 30." – Representative of Company C
- "People mostly use scooters for fun and short-distance commuting." – Representative of Company A
- "University students, in particular, prefer scooters for commuting to school or visiting libraries." – Representative of Company C

4.2.2. Public Perception

While social acceptance is growing, concerns related to parking behavior and public adaptation remain significant:

- "The scooter sector is still very new, and the adaptation process is ongoing. It will take time for people to get used to this technology." – Representative of Company A
- "There can be a negative perception among the public when some users fail to park scooters properly." – Representative of Company B
- "Scooters are now perceived as ordinary items on the streets and no longer attract as much attention." – Representative of Company A

4.3. Vehicle Technology

4.3.1. Battery Technology

Advancements in battery longevity and management systems are crucial for sustainability and operational efficiency:

- "The current batteries have an average lifespan of two years, and this period is gradually increasing." – Representative of Company C
- "Battery management systems (BMS) help us maintain the maximum performance of our batteries." – Representative of Company C
- "We prefer innovative solutions in our supply chain to ensure our batteries are renewable." – Representative of Company B

4.3.2. Scooter Durability

Fleet operators are investing in maintenance protocols and refurbishment strategies to extend the operational lifespan of scooters:

- "The lifespan of scooters, which used to be six months, has now increased to 36 months, making our operations more efficient." – Representative of Company B
- "We refurbish old scooters and put them back in the field, which reduces waste." – Representative of Company C

- "We have developed periodic maintenance systems to enhance the durability of our scooters." – Representative of Company A

4.4. Infrastructure

4.4.1. Urban Suitability

The lack of dedicated micromobility infrastructure, particularly bicycle lanes, presents a significant challenge to safe integration into urban mobility networks:

- "Bicycle lanes are insufficient in Turkish cities, so scooters sometimes have to share the same space with pedestrians." – Representative of Company B
- "We are working with local authorities on smart locker and charging systems." – Representative of Company B
- "If proper infrastructure were available, bicycles could have been used instead of scooters." – Representative of Company A

4.4.2. Parking and Usage Areas

Improper scooter parking remains a major public concern, necessitating structured parking solutions:

- "Scooters parked incorrectly on sidewalks disturb the public. To solve this problem, we need to establish designated parking areas." – Representative of Company B
- "Local governments need to contribute more to parking regulations." – Representative of Company A
- "Collective parking areas could facilitate better integration of scooters into society." – Representative of Company C

4.5. Economic Considerations

4.5.1. Business Models

E-scooters are positioned as a cost-effective alternative to traditional transport options:

- "Scooters have a daily usage rate of 5.5, which is above European standards." – Representative of Company C
- "They are 70% cheaper than taxis, which makes them a popular choice among users." – Representative of Company C
- "Shared mobility reduces the rate of individual vehicle ownership and offers an economical solution." – Representative of Company A

4.5.2. Operational Costs

Operational costs are heavily influenced by fuel and energy sources, necessitating a shift toward electrification:

- "Diesel is still our largest operational cost. We are working on switching to electric vehicles to reduce it." – Representative of Company B
- "The swappable battery system increases operational efficiency and lowers costs." – Representative of Company C
- "We are working on local energy solutions for charging operations." – Representative of Company B

4.6. Public Health Implications

4.6.1. Safety

Enhanced safety regulations and protective measures are critical to minimizing accidents:

- "We are working on providing protective gear for scooter users." – Representative of Company A
- "Fatal accidents are still an issue, and regulations are needed in this area." – Representative of Company A
- "We plan to offer safety training to users." – Representative of Company C

4.6.2. Impact on Public Health

E-scooters influence urban mobility patterns by offering an alternative to public transport and walking:

- "Scooters offer an alternative to walking." – Representative of Company B
- "After the pandemic, personal vehicles have become more preferred." – Representative of Company A
- "Scooters keep individuals away from crowded public transportation." – Representative of Company C

4.7. Regulatory and Policy Considerations

4.7.1. Regulatory Gaps

Inadequate and restrictive regulations hinder the full-scale adoption of e-scooters:

- "More comprehensive regulations are needed for the proper organization of scooters in cities." – Representative of Company B
- "Existing regulations are mostly insufficient and restrict scooter usage." – Representative of Company A
- "Users over the age of 45 generally do not prefer scooters, and specific regulations could be introduced for this age group." – Representative of Company C

4.7.2. Collaboration with Local Authorities

Stronger partnerships with municipalities are necessary for infrastructure development:

- "We are working with local authorities on scooter parking areas and charging stations." – Representative of Company B
- "Operators should be more involved in sustainable infrastructure development projects." – Representative of Company C
- "We are conducting joint efforts with local authorities to develop parking regulations." – Representative of Company A

5. Conclusion

As cities worldwide grapple with rising congestion, air pollution, and the urgent need for sustainable transport solutions, shared e-scooter mobility emerges as a transformative innovation in urban mobility. However, its success is not guaranteed; it hinges on how effectively operators, policymakers, and urban planners address infrastructural deficiencies, economic constraints, environmental contradictions, user experience limitations, and regulatory gaps.

The findings of this study emphasize that sustainable micromobility is not solely a function of technological advancement but rather a multidimensional challenge requiring social, economic, and policy-driven solutions. A well-designed e-scooter ecosystem—backed by strategic investments in infrastructure, adaptive regulatory frameworks, electrification of operations, and inclusive public engagement initiatives—can significantly reduce urban emissions, enhance mobility equity, and improve the overall efficiency of city transport networks.

Ultimately, the future of shared e-scooter mobility depends on its ability to evolve in response to emerging urban challenges. By embracing data-driven decision-making, cross-sector collaboration, and sustainable innovation, Türkiye has the opportunity to position itself at the forefront of smart, green, and inclusive urban transport solutions. However, realizing this potential requires bold policy interventions, industry leadership, and societal adaptation. If navigated strategically, shared e-scooters can become an integral component of resilient, low-carbon, and people-centric cities of the future, setting a benchmark for sustainable urban mobility on a global scale.

5.1. Infrastructure as a Foundational Bottleneck

The most frequently cited challenge is the lack of dedicated infrastructure, including insufficient bike lanes and inadequate parking solutions. The absence of designated spaces forces e-scooters to compete for space with pedestrians, exacerbating safety risks and operational inefficiencies. Without urban planning reforms that incorporate micromobility-friendly infrastructure, the sector's ability to scale remains constrained. Strategic collaboration between operators and local governments is essential to developing smart, data-driven parking solutions and integrated charging networks that enhance accessibility and reduce conflicts with other road users.

5.2. The Cost-Sustainability Trade-off

Operational costs continue to pose a major financial challenge. Despite the promise of low-emission mobility, the dependence on diesel-powered collection and maintenance vehicles creates a paradox that undermines environmental gains. Transitioning to fully electric service fleets is an industry aspiration, yet a lack of affordable and suitable electric utility vehicles in the current market remains a bottleneck. Addressing this issue requires public-private partnerships and policy incentives that facilitate investment in clean energy solutions for fleet operations.

5.3. The Environmental Paradox: Beyond Zero Emissions

Although e-scooters are marketed as an environmentally friendly alternative, their full life-cycle impact reveals an embedded sustainability paradox. While zero tailpipe emissions contribute to air quality improvements, the manufacturing, disposal, and energy-intensive logistics of fleet management generate significant hidden carbon costs. Advancements in battery technology, circular economy initiatives, and optimized fleet deployment are imperative to align the sector's environmental narrative with its actual sustainability outcomes.

5.4. Enhancing User Experience to Drive Adoption

User satisfaction and accessibility play a crucial role in determining the long-term adoption of shared e-scooters. Participants emphasized the need for well-maintained fleets, intuitive service design, and

enhanced safety measures to improve overall user experience. Issues such as improper parking and vehicle malfunctions not only inconvenience riders but also shape public perception, influencing regulatory responses and policy decisions. Addressing these concerns through proactive maintenance strategies, user education campaigns, and technological enhancements (e.g., geofencing for designated parking) can help elevate user trust and service reliability.

5.5. Public Perception: Overcoming Skepticism Through Cultural Integration

The sociocultural acceptance of e-scooters remains an evolving process. While younger demographics have embraced this mode of transport, widespread adoption is hindered by safety concerns, unfamiliarity, and negative perceptions related to improper usage. The transition from novelty to mainstream urban mobility solution requires comprehensive public engagement strategies, including community-driven awareness programs, corporate responsibility initiatives, and transparent safety data reporting.

5.6. The Role of Policy in Shaping the Future

Regulatory inconsistencies and gaps represent one of the most significant structural obstacles to the sector's growth. Participants noted that current policies are either insufficient or overly restrictive, impeding innovation while failing to address fundamental urban mobility challenges. To unlock the full potential of shared e-scooters, a balanced regulatory framework is needed—one that prioritizes safety, promotes sustainability, and fosters business viability. Establishing collaborative regulatory models that include municipal governments, industry stakeholders, and urban planners will be essential in creating fair and forward-thinking policies that support micromobility as an integral component of urban transport ecosystems.

5.7. The Path Forward: Building a Sustainable Micromobility Ecosystem

The findings underscore that the future of shared e-scooter mobility in Türkiye depends on a multi-stakeholder approach—one that integrates technological innovation, regulatory support, urban planning reforms, and user-centric service enhancements. The sector's long-term success and sustainability hinge on the following strategic imperatives:

- **Infrastructure Development:** Investment in dedicated micromobility lanes, geofenced parking solutions, and multimodal transport integration.
- **Fleet Electrification:** Adoption of renewable energy sources and electrification of operational fleets to mitigate environmental contradictions.
- **Battery Circularity:** Strengthening battery recycling programs and sustainable sourcing initiatives to minimize ecological impact.
- **User-Centric Innovation:** Leveraging real-time diagnostics, AI-driven fleet management, and geospatial analytics to optimize service efficiency and safety.
- **Regulatory Harmonization:** Developing evidence-based policies that balance urban mobility needs with sustainability goals, ensuring a structured yet innovation-friendly regulatory environment.
- **Public Awareness and Cultural Integration:** Implementing educational campaigns and community engagement initiatives to normalize shared mobility and address behavioral resistance.

As urbanization accelerates and cities seek cleaner, more efficient transportation alternatives, e-scooters hold immense potential to redefine urban mobility. However, their long-term viability depends on how effectively operators, policymakers, and urban planners navigate the current challenges and implement forward-thinking solutions. By aligning sustainability goals with operational realities, fostering cross-

sector collaboration, and embracing adaptive innovation, Türkiye can position itself as a leader in sustainable micromobility solutions on a global scale.

Researchers' Contribution Rate Statement

The authors' contribution rates to the study are equal.

Acknowledgment

This study did not receive any support from institutions.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any institution or person within the scope of the study.

References

- Behrendt, F., Heinen, E., Brand, C., Cairns, S., Anable, J., Azzouz, L., & Glachant, C.** (2023). Conceptualising Micromobility: The Multi-Dimensional and Socio-Technical Perspective.
- Bildirici, Z., İlyas, S., Kepenek, E., & Albayrak, Y.** (2024). Kentsel mekânda e-skuter kullanımına ilişkin Türkiye ve dünyada yapılan yasal düzenleme örnekleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 7(1), 31–42.
- Bölen, M. C., & Çeliker, O.** (2021). Paylaşımlı elektrikli scooter hizmetlerini kullanma niyetinde etkili olan faktörler. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35(3), 1101-1123.
- Carrignon, D.** (2020). Connected and autonomous vehicles, electric scooter and their implications for road network design. *Transportation Research Procedia*, 49, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.015>
- Caspi, O., Smart, M. J., & Noland, R. B.** (2020). Spatial associations of dockless shared e-scooter usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102396. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102396>
- Christoforou, Z., Gioldasis, C., de Bortoli, A., & Seidowsky, R.** (2021). Who is using e-scooters and how? Evidence from Paris. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102708>
- Dündar, S., Günay, G., Karlikanovaite-Bahkçı, A., Berktaş, E. Ş., & Ulu, İ. M.** (2022). Mikromobilite–Ulaşıma mucizevi bir çözüm mü, yoksa bir hayal kırıklığı mı? *İDEALKENT*, 13(36), 576–598. <https://doi.org/10.31198/idealkent.1066650>
- Ekici, Ü., & Kasap, E. E.** (2023). Mikro Hareketlilik Sistemlerinin Altyapı ve Toplumsal İhtiyaçlar Kapsamında Değerlendirilmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 124–142.
- Grand View Research.** (2021). Electric Scooters Market Size & Share Analysis Report, 2030. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-scooters-market>
- Güldür, H., Karaçor, F., Hatipoğlu, S., & Çubuk, K.** (2022). Yeni bir kent içi ulaşım türü: E-scooter. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 60–73. <https://doi.org/10.30855/gmbd.2022.01.04>
- Kılıç, E., & Önlü, E.** (2022). Tekirdağ İli Çorlu İlçesinde Toplu Taşıma Kaynaklı Karbon Ayak İzinin Hesaplanması Üzerine Bir Araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 67–72.
- Litman, T.** (2017). Evaluating transportation equity. Victoria Transport Policy Institute.
- Moreau, H., de Jamblinne de Meux, L., Zeller, V., D'Ans, P., Ruwet, C., & Achten, W. M.** (2020). Dockless e-scooter: A green solution for mobility? Comparative case study between dockless e-scooters, displaced transport, and personal e-scooters. *Sustainability*, 12(5), 1803. <https://doi.org/10.3390/su12051803>

Önder, H., & Akdemir, F. (2022). Sürdürülebilir ulaşım altyapısının pandemi döneminde yeniden kurgulanması: Mikromobilite trendleri ve Türkiye. *İdealkent*, 13(36), 748–770.

Özçelik, A. B. (2021, May 25). Elektrikli scooter'da pazar büyüdü, rekabet kızıştı. *Ekonomi*. https://www.ekonomim.com/ekonomi/elektrikli-scooterda-pazar-buyudu-rekabet-kizisti-haberi-479404#google_vignette

Resmi Gazete. (2021). Elektrikli Skuter Yönetmeliği (Yayımlandığı Tarih: 14 Nisan 2021). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/04/20210414-3.htm>

SAE. (2019). Taxonomy & classification of powered micromobility vehicles (J3194™). Society of Automotive Engineers. https://www.sae.org/standards/content/j3194_201911/

Statista. (2023). E-scooter sharing market in Turkey. <https://www.statista.com/outlook/mmo/shared-mobility/e-scooter-sharing/turkey>

Trivedi, T. K., Liu, C., Antonio, A. L. M., Wheaton, N., Kreger, V., Yap, A., ... & Elmore, J. G. (2019). Injuries associated with standing electric scooter use. *JAMA Network Open*, 2(1), e187381–e187381. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.7381>

Araştırma Makalesi

Motorlu kara taşıtlarında güvenli ve güvenilir veri yönetim modeli

Suat Onur^{1,*}, Mehmet Tektaş², İlyas Özer³, Ufuk Çelik⁴, Emrah Dönmez⁵, Caner Pense²

1 Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Türkiye

2 Ulaştırma Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Türkiye

3 Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Türkiye

4 Yönetim Bilişim Sistemleri, Ömer Seyfettin Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Türkiye

5 Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Bandırma, Türkiye

*Correspondence: suatonur@balikesir.edu.tr

DOI: 10.51513/jitsa.1644011

Özet: Kişisel ve ticari ulaşım için yaygın olarak kullanılan motorlu kara taşıtlarının üretiminden hurdaya ayrılmasına kadar geçen süreçte çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından toplanan ve saklanan önemli bilgiler bulunmaktadır. Bu bilgilerin kayıt altına alınması, denetim ve takip işlemlerini kolaylaştırmanın yanında, sürücü ve araçların güvenliğini sağlamak, trafik akışını düzenlemek, çevre kirliliğini azaltmak ve araç sahipleri ve sürücüleri çeşitli risklere karşı korumak gibi Akıllı Ulaşım Sistemlerinin temel hedeflerine hizmet eder. Ancak, araçlarla ilgili işlemlerde rol alan birçok resmi ya da özel kurumun kendi merkezi veri yönetim sistemlerine sahip olmasından kaynaklanan tek nokta hatası, kurumlar arası iş birliğinin yetersizliği, verilerin kayıt altına alınmasındaki zorluklar bazı sorunların ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu sorunlar içerisinde özellikle ikinci el araç pazarında aracın geçmişine ait bilgilere ulaşmadaki zorluklar, kaza geçmişi ve bakım-onarım kayıtlarının yetersizliği, sigorta dolandırıcılığı, hile ve veri manipülasyonu ön plana çıkmaktadır. Bu makalede, araçlarla ilgili verilerin depolanması, yönetimi ve takibini daha verimli ve güvenli bir şekilde yapabilmek için Hyperledger Fabric özel-izinli blokzincir teknolojisi ile özel dağıtık dosya depolama (Private InterPlanetary File System, IPFS) teknolojisinin entegrasyonundan oluşan bir veri yönetim modeli önerilmiştir. Araçlarla ilgili işlemlerde kurumlar arası iş birliğinin daha şeffaf, güvenli ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca araçlarla ilgili çeşitli verilerin depolanması ve yönetilmesi için geniş kapsamlı, ölçeklenebilir ve paylaşımlı bir altyapı oluşturmak amaçlanmıştır. Önerilen blokzincir ağ modeli araçlarla ilgili kurumsal hizmetlerin dijitalleştirilmesine, kâğıt tabanlı belge kullanımının azaltılmasına, iş ve işlem süreçlerinin sadeleştirilmesine ve maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayacağı gibi kurumlar arasında iş birliğini sağlama, iş akış süreçlerini ve veri yönetim modellerini daha güvenli ve güvenilir hale getirme noktasında yeni bir perspektif oluşturmakta ve gelecekte kamusal hizmetlerin daha fazla dijitalleşmesi ve şeffaflaşması için örnek teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir, araç yaşam döngüsü, araç veri yönetimi, dağıtık depolama, IPFS.

Secure and reliable data management model in motor vehicles

Abstract: The lifecycle of motor land vehicles, spanning from production to disposal, involves the collection and storage of critical data by various public and private institutions. Efficient management of this data is essential for achieving the core objectives of Intelligent Transportation Systems, including enhancing road safety, optimizing traffic flow, reducing environmental impact, and protecting stakeholders from fraud and security risks. However, the fragmentation of data across multiple

centralized systems, coupled with limited inter-institutional collaboration, presents significant challenges. These challenges are particularly evident in the second-hand vehicle market, where issues such as inaccessible vehicle history, incomplete accident and maintenance records, insurance fraud, and data manipulation undermine transparency and trust. This paper proposes a secure and efficient data management framework that integrates Hyperledger Fabric permissioned blockchain technology with InterPlanetary File System (IPFS) based distributed storage. The proposed model aims to enhance data integrity, streamline vehicle-related processes, and foster secure and transparent collaboration among stakeholders. By providing a scalable and interoperable infrastructure, the framework facilitates secure data sharing, minimizes reliance on paper-based documentation, optimizes administrative workflows, and reduces operational costs. The adoption of this blockchain-based model is expected to contribute to the digital transformation of institutional vehicle services while establishing a robust foundation for the future expansion of transparent and secure public service infrastructures.

Keywords: Blockchain, vehicle lifecycle management, vehicle data integrity, decentralized storage, IPFS.

1. Giriş

Sayıları düzenli olarak artan motorlu kara taşıtları (makalede araç kelimesi kullanılacaktır), birçok dijital teknolojiyle donatıldığı gibi, elektrikli, otonom ve bağlantılı araç teknolojilerinin kullanımıyla ortaya çıkan bilgi miktarı ve çeşitliliği de büyük oranda artmaktadır. Birçok dijital teknoloji ile donatılmış araçların veri yönetimi ve güvenliği konusu, gittikçe daha önemli ve karmaşık hale getirmektedir. Veri miktarındaki ve çeşitliliğindeki bu artış, veri yönetimi konusunda güvenlik, gizlilik, paylaşım ve depolamada çeşitli zorluklar ve problemler oluşturmaktadır. Bu bilgilerin kayıt altına alınması ve yönetimi, kullanıcı-araç-altyapı-merkez arasında çok yönlü veri alışverişi ile izleme, ölçme, analiz ve kontrol sağlamanın yanında (Tektaş, Korkmaz, & Erdal, 2016), sürücü ve araçların güvenliğini sağlamak, trafik akışını düzenlemek, çevre kirliliğini azaltmak ve araç sahipleri ve sürücüleri çeşitli risklere karşı korumak gibi Akıllı Ulaşım Sistemlerinin temel hedeflerine hizmet etmektedir.

Çoğu ülkede olduğu gibi Türkiye'de de araçlarla ilgili gerçekleştirilen işlemlerde kamu ve özel çeşitli kurumlarla iş birliği yapılması gerekmektedir. Üretim bilgileri, tescil ve ruhsat bilgileri, teknik muayene kayıtları, sigorta bilgileri, bakım onarım kayıtları, kullanım geçmişi, kaza kayıtları, trafik ihlal ve ceza kayıtları gibi birçok konu ve kapsamda tutulan bu kayıtlarda resmi ya da özel çeşitli kurumlar rol almaktadır. Ancak kurumlar arasındaki güvensizlikler, kişisel bilgilerin ifşasına neden olabilecek siber güvenlik zafiyetlerinden ve sorumluluklarından kaçınmak gibi nedenlerle kısıtlı miktarda bilgi alışverişi ve paylaşımı yapılabilmektedir. Kurumlar arası bilgi paylaşımının tam anlamıyla halen dijital ortamlarda yapılamaması neticesinde kâğıt tabanlı belge kullanımına devam edilmektedir. Örneğin, araç alım-satım ve tescil işlemlerinde çeşitli kâğıt tabanlı belge ve bilgiler istenmekte ve ıslak imza onayları kontrol edilerek işlemler yapılabilmektedir (ARTES Bilgi Sistemleri, 2018). E-devlet uygulamaları birçok kurum arasında iş birliğinin ve güvenin sağlanmasında, belge ve bilgilerin doğrulanmasında güvenilir üçüncü taraf olarak önemli bir rol üstlenmiştir. Ancak bu durum birçok işlemde tek nokta hatası ve darboğaz oluşturabilmektedir.

Kurumlar arası veri paylaşımında genellikle hassas verilerin ifşa edilme riski nedeniyle güvensizlik hakimdir. Kurumlar arasında güvene dayalı bir iş birliği ve bilgi paylaşımının yapılması için genellikle üçüncü bir tarafa ihtiyaç duyulur. Bu durum da merkezi bir yapılanma oluşturur. Kurumsal bilgi paylaşımına yönelik kullanılan ağ sistemleri genellikle sunucu-istemci bağlantı modeliyle çalışan merkezi sistemlerdir ve bilgiye erişim, Evrensel Kaynak Konumu (URL) yöntemi ile internet üzerindeki tek sunucu tarafından sağlanmakta ve kontrol edilmektedir. Bu nedenle merkezi yapıda tutulan veriler tek hata noktasına karşı savunmasızdır ve hizmet reddi saldırısı için potansiyel hedef konumundadır (Elisa, Yang, Chao, & Cao, 2023). Kurumların merkezi sistemleriyle ilgili önemli risklerden diğeri de yetkisini kötüye kullanan kurum personeli tarafından veri manipülasyonun yapılabilmesidir. Bu risklere karşı blokzincir teknolojisine dayalı merkezi olmayan veri depolama sistemlerini kullanmak izlenebilirlik ve inkar edilemezlik sağladığı için de önerilmektedir (Athanere & Thakur, 2022).

Literatürde, araçlarla ilgili çeşitli konu ve kapsamdaki bilgilerin kayıt altına alınmasında ve takip ve yönetimindeki zafiyetler ve eksikler nedeniyle ortaya çıkan birçok problem için blokzincir tabanlı çözüm önerileri ve uygulamaların sayısında artış gözlenmektedir. Çoğunlukla ele alınan problemler; ikinci el araç pazarındaki güvensizliğin temel nedeni olarak gösterilen araç geçmişine ait kayıtların olmaması veya yetersizliği (Baumann, Zavolokina, & Schwabe, 2021; Zafar, Hassan, Mohammad, Al-Ahmadi, & Ullah, 2022), aracın kaza geçmişi ve bakım-onarım kayıtlarına erişimdeki zorluklar (Akçi, 2016; Dayı & Hasanoglu, 2023), çalıntı araçların (Das, Banerjee, Ghosh, Biswas, & Bashir, 2021) ya da şasi ve motor numarası değiştirilen araçların satışa sunulması (Leila Benarous, Benamar Kadri, Ahmed Bouridane, & Elhadj Benkhelifa, 2021), ağır hasarlı araçların hurdaya ayrılması gerektiği halde yolsuzluk yapılarak yeniden satışa sunulması (Brousmiche, Heno, Poulain, Dalmieres, & Ben Hamida, 2018), kilometre sayacı sahtekarlığı (Abbade et al., 2020; Car-Pass, 2022; Chanson, Bogner, Wortmann, & Fleisch, 2017; Holler, Barth, & Fuchs, 2019), kurumlar arası veri paylaşımının yetersizliği, kurumsal güç çekişmeleri, veri güvenliği ve veri kalitesindeki sorunlar (Schwabe, 2019) üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmaların büyük bir kısmı sadece belirli problemlerin çözümü için gerekli olan verilerin depolama ve yönetiminde blokzincir tabanlı çözümler önermiş ve uygulamalar geliştirmişlerdir. Önerdiğimiz model geniş kapsamlı birçok verinin depolanması için bir altyapı oluşturmaktadır. Böylece yukarıda bahsi geçen birçok sorunun çözümünde önemli katkılar sağlanması hedeflenmektedir.

Önerilen model merkezi sistemlere ait sorunları önlemek için gizliliği ve bütünlüğü koruyan merkezi olmayan bir veri yönetim çerçevesi sunmaktadır. Blokzincir ve temel bileşeni olan Dağıtık Defter Teknolojisi (DLT) ile IPFS teknolojisi veri güvenliğini artıran merkezi olmayan sistemlerdir. Hyperledger Fabric blokzincir teknolojisinin sağladığı çok kanallı yapının avantajlarıyla birlikte özel IPFS teknolojisinin entegrasyonu sayesinde birçok kurumun ortak bir platform üzerinde iş birliği yapabilmesi mümkündür. Bu sistemde veriler tek sunucuda değil, dağıtılmış çok sayıdaki sunucuda mutabakat mekanizması ile güncellenerek ve doğrulanarak tutulmaktadır.

Önerilen modelde temel amaç, araçların trafiğe çıktığı ilk tescil tarihinden hurdaya ayrılanaya kadar gerçekleştirilen çeşitli işlemlere ait bilgilerinin blokzincir ve IPFS teknolojileri kullanılarak her araç için tanımlanan benzersiz kimlik bilgisi ile zaman damgalı kayıt altına alınması, depolanması ve gerektiğinde istenilen bilgilere erişilebilmesini sağlamaktır.

Bu yenilikçi yaklaşım hem araç sahiplerinin hem de yetkili resmi veya özel kuruluşların bir aracın geçmişine ilişkin bilgilere tek bir kaynaktan erişebilmelerini sağlayacaktır. Aracın geçmişine ilişkin değişmez kayıtların ve kanıtların varlığı sadece şeffaflığı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sistemin denetlenebilirliğini ve güvenilirliğini artırır. Bu verilere erişim, yetkilendirme ve izinlere dayalı olarak düzenlenerek sahtekarlık ve aldatma gibi potansiyel sorunlar da azaltılabilir.

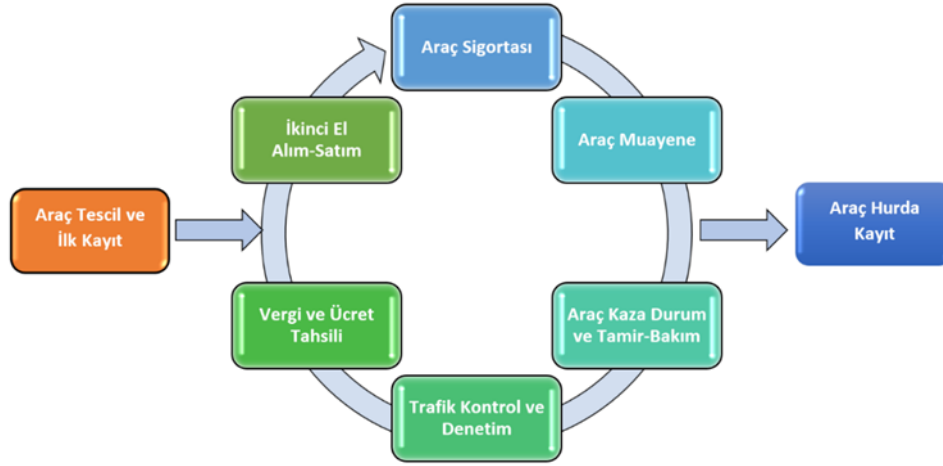
Önerilen modelin uygulanmasında öngörülen faydalar aşağıda özetlenmiştir;

- Birçok kuruluşun merkezi yapılarıyla ilgili tek nokta hatası riskleri ortadan kaldırılarak, araçlarla ilgili tutulan kayıtların bütünlüğünün, erişilebilirliğinin ve değişmezliğinin garanti altına alınmasını sağlayacaktır.
- Araçlara ait işlem geçmişlerine her istendiğinde kesintisiz bir şekilde ulaşılabilirliğin mümkün olması; bakım onarım kayıtlarının ve yedek parça kullanımlarının takip altına alınmasında, kilometre sayacı sahtekarlıklarının, hurdaya ayrılmış güvensiz araçların yeniden kullanıma sunulmasının engellenmesinde, ikinci el araç pazarındaki bilgi eksikliğinden kaynaklanan güvensizliklerin giderilerek kullanılmış araçların satış fiyatlarının daha doğru belirlenmesinde, hırsızlık, dolandırıcılık gibi zararlı faaliyetlerin önlenmesinde önemli katkılar sağlayacaktır.
- Ortak bir platform üzerinde birçok kurumun güvenli bir şekilde iş birliğiyle veri paylaşımı yapması, kâğıt tabanlı belge ve kimlik doğrulama ihtiyacını ortadan kaldırarak işlemlerle ilgili iş akışı yöntemlerinin değişmesini sağladığı gibi maliyetlerin düşürülmesini, daha az insan gücü kullanımı ve zaman tasarrufu sağlayacaktır.
- Adli ve yasal takip gerektiren durumlarda, ilgili kurumların kanıt hükmündeki güvenilir bilgi ve belgelere erişimi daha kolay hale getirilerek, adli süreçlerin hızlanması ve denetim ve takip işlemlerindeki maliyetlerin azaltılmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

2. Araçlardaki Veri Çeşitliliği ve Önemi

Akıllı Ulaşım Sistemlerinde, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşması, dijital ortamlarda aktarılan, paylaşılan ve depolanan veri hacmini önemli ölçüde artırmıştır. Bu verilerin önemli bir kısmı, akıllı ulaşımında hareketliliğin en önemli bileşenlerinden olan araçlarla ilgilidir. Araçlarla ilgili üretilen bilginin yönetiminde resmi ve özel pek çok kurum görev almaktadır. Bu kurumların her biri kendi özel hedeflerine ve sorumluluklarına göre bilginin toplanması, işlenmesi ve depolanması süreçleri için kendi bilgi yönetim sistemi ve teknolojilerini, kendi veritabanı, yazılım ve donanım kaynaklarını kullanmaktadır. Bu durumda aracın sahibi dahi kendi aracına ait kayıt altına alınan bilgilerin sahibi olamadığı gibi bu bilgilere erişimi de kolay değildir.

Araçların ilk tescil kaydı ile trafiğe çıktığı andan itibaren hurdaya ayrılanaya kadarki süreç içerisinde gerçekleştirilen birçok işleme ait kayıtların tutulması birçok problemin çözümü için oldukça önemlidir. Aracın yaşam döngüsüne ait çoğu zaman periyodik olarak tekrarlanan işlemlerin sınıflandırılmış veri çeşitliliği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Araçların yaşam döngüsündeki sınıflandırılmış işlemler.

Türkiye’de araçların yaşam döngüsü içerisinde zorunlu olarak tutulması gereken kayıtlarda; aracın ilk tescil işlemleri ile ikinci el araç alım-satım işlemlerinde Noterler Birliği, trafik ihlal ve denetim işlemleri ile kaza yönetimi Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Başkanlığı, araç muayene işlemlerinde TÜVTÜRK, zorunlu trafik sigortası ile kaza hasar ödeme ve takip işlemlerinde birçok sigorta kuruluşları, araç tamir, bakım ve servis hizmetlerinde birçok özel kuruluş, vergi ve HGS/OGS otomatik geçiş ücretlendirmeleri ve takibinde resmi ve özel kuruluşlar görev almaktadır. Bu kurumların her biri kendi sorumluluklarıyla ilgili bilgiler için kendilerine ait bilgi yönetim sistem ve teknolojilerini kullanmaktadır. Bu kurumların bir kısmı e-devlet uygulamaları ile belirli seviyede, sınırlı miktarda bilgi paylaşımı yapabilmektedir. A. Mahmutoglu ve ark. (2012) “Trafik Sorununa Bir Çözüm Önerisi: Trafik İzleme Başkanlığı” isimli çalışmasında, bilgi ve iletişim teknolojilerinin sağladığı imkânlar ile her araçla ilgili her türlü verinin kurulacak Trafik İzleme Başkanlığı kurumuna ait merkezi bir sistemde tutulması önerilmektedir. Böylece tek merkezde tutulan verilerin işlenmesi ve analizi ile pek çok problemin çözülebileceği detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Daha geniş kapsamlı olarak M.Tektaş ve ark. (2016) tarafından önerilen Trafik Kontrol Merkezi yerine Ulaşım Kontrol Merkezinin kurularak ulaşımdaki tüm aktörlerden gelecek verilerin yönetilmesi ve değerlendirilmesi için merkezi bir sistem oluşturulmasının önemi vurgulanmıştır (Tektaş et al., 2016).

Günümüzde araçlarda kullanılan son teknoloji sistemler sayesinde aracın durumu ve kullanımı ile ilgili pek çok bilgi elde edilebilmektedir. Örneğin bir trafik kazası anında araç hızının veya emniyet kemeri kullanım bilgisinin tespit edilmesi ve bu bilgilerin inkâr edilememesinin sağlanması, sorumluların tespitinin doğru yapılması ve benzeri durumlara ait işlemlerin kayıt altına alınması büyük önem taşımaktadır (Alsadı, Yıldırım, Gulsecen, Kose, & Coskun, 2019). Bu kayıtların sonradan yapılabilecek müdahalelere karşı da korumalı olması gerekmektedir. Kaza ile ilgili bilgi ve tutanakların gerek ilgili emniyet trafik şube birimlerince gerekse sigorta kurumları tarafından veri bütünlüğü sağlanacak şekilde saklanması, veri sahteciliği ve tutarsızlıklarına karşı korunması ve gerektiğinde kolayca ulaşılabilir olması da oldukça önemlidir.

İkinci el araç alım-satım süreçlerinde güvenilirliğin sağlanması için araçların geçmişine ait bakım, onarım ve teknik servis kayıtları gibi bilgilere erişim de oldukça önemlidir. Sigorta Bilgi ve Gözetim Merkezi web sayfası ya da kısa mesaj (SMS) ile kayıt altına alınmış hasar kayıtlarına ücretli olarak ulaşılabilmesine rağmen, hileli işlemlerin, kayıt altına alınmayan veya bildirilmeyen kaza, tamir ve parça değişimlerinin, tutulan kayıtların manipüle edilme risklerinin varlığı nedeniyle ikinci el araç pazarında halen güvensizlik hakimdir (Tanrıverdi, Uysal, Üstündağ, & Ayaz, 2021).

Özet olarak araçlarla ilgili veri kayıt çeşitliliğini şu başlıklar altında listeleyebiliriz;

- **Araç Kimlik ve Tanımlama Bilgileri:** Araç kimlik numarası, (Vehicle Identification Number, VIN), araç plakası, şasi numarası, motor numarası, marka, model, üretim yılı gibi temel ve teknik bilgiler.
- **Sahiplik ve Mülkiyet Bilgileri:** Araç sahibi, önceki sahipler, mülkiyet transfer tarihleri ve tescil kayıt belge ve bilgileri.
- **Bakım ve Onarım Kayıtları:** Periyodik bakım geçerlilik tarihleri, yapılan onarımlar, değiştirilen parçalar ve servis raporları.
- **Yakıt ve Emisyon Verileri:** Yakıt tüketimi, emisyon test sonuçları, egzoz gazı ölçümleri ve çevresel performans kayıtları ile elektrik araçlara ait batarya performans ve değişim bilgileri.
- **Sigorta Kayıtları:** Sigorta şirketi, zorunlu trafik poliçe bilgileri, teminat bilgileri, geçerlilik tarihleri, prim ödemeleri ve hasar talep ve takip bilgileri.
- **Kaza ve Hasar Kayıtları:** Kaza geçmişi, hasar tespit raporları, tamir masrafları ve hasar değerlendirmeleri.
- **Kullanım ve Performans Verileri:** Araç kilometresi, hız, yakıt verimliliği, sürüş alışkanlıkları ve araç performans verileri.
- **Yasal ve Düzenleyici Bilgiler:** Trafik ihlal cezaları, muayene tarihleri ve geçerliliği, yasal belgeler ve düzenleyici uyumluluk bilgileri.

Bu veri kayıtları, araçların güvenliğini, performansını ve yasal uyumluluğunu sağlamak için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, araçların bakımını ve yönetimini daha etkili hale getirir.

3. Materyal ve Yöntemler

Bu bölümde araçlarla ilgili birçok verinin ortak bir platform üzerinde saklanması ve yönetilmesinde etkili ve önemli araç ve teknolojilerin temel özellikleri tanıtılmaktadır.

3.1. Blokzincir Teknolojisi

Blokzincir ilk önce Bitcoin kripto para işlemlerinin, üçüncü bir tarafa güvenmek zorunda kalmadan değiştirilemez kayıtlarını tutmak, işlem sahiplerinin gizliliğini ve veri bütünlüğünü korumak, şeffaf ve denetlenebilir dağıtık bir ağ ortamında depolamak için tasarlanmış ve kullanılmıştır. Bitcoin başta olmak üzere diğer kripto paraların altyapısını oluşturan blokzincir teknolojisinin temel ilkeleri ilk olarak Satoshi Nakamoto'nun 2008 tarihli "Eşler Arası Elektronik Bir Ödeme Sistemi, Bitcoin " (Nakamoto, 2008) başlıklı makalesinde ortaya konmuştur. Blokzincir halka açık, genel kullanımlı ve paylaşımlı bir defter olarak kabul edilebilir ve geçerliliği onaylanmış tüm işlemler zaman damgalı ve birbiri ardına dizilmiş bloklar dizisi olarak saklanır, yeni bloklar eklendikçe büyür. Kullanıcı güvenliği ve defter tutarlılığı için asimetrik kriptografi ve dağıtık mutabakat algoritmaları kullanılmıştır (Zheng, Xie, Dai, Chen, & Wang, 2017).

Blokzincir teknolojisinin yapısal özellikleri olan kriptografik güvenlik, merkeziyetsizlik, şeffaflık, denetlenebilirlik ve mutabakata dayalı, akıllı sözleşmelerle yürütülen işlem onay süreçleri gibi özellikleriyle birçok sektörde iş akış yöntemlerinin iyileştirilmesi ve değiştirilmesinde önemli bir etki oluşturması beklenmektedir. Bu nedenle sayıları giderek artan finans, sağlık ve emlak, kamu yönetimi, enerji ve ulaşım kadar çeşitli sektörlerde kullanılabilecek uygulamalar ve çalışmalar yapılmaktadır (Mendi, 2021).

Blokzinciri teknolojisi yapısal olarak izinli ve izinsiz olarak iki türde kullanılmaktadır. İzinsiz blokzincirleri herkesin anonim olarak ağa katılmasına ve herhangi bir kısıtlama olmaksızın işlem doğrulama süreçlerine katılmasına izin verir. Bu türün önde gelen örnekleri arasında Bitcoin ve Ethereum'un yanı sıra çeşitli diğer kripto para birimleri ve merkezi olmayan ve açık bir yapı sergileyen blokzincir ağ uygulamaları yer alır. İzinsiz blokzincirlerde katılımcılara güven olmadığı için iş kanıtına (Proof of Work, POW) ya da hisse kanıtına (Proof of Stake, POS) dayanan veya Bizans hatalarına (Byzantine Fault Tolerance, BFT) dayanlı mutabakat mekanizmalarıyla ağ sistemine güveni sağlarken izinli blokzincir ağlarında seçilmiş bir grup düğümün mutabakat (Raft, Kafka vb.) ve işlem doğrulaması sağlaması yeterli görülmektedir (Vukolic, 2016). İzinli blokzincirleri katılımcıların kimliklerinin bilinmesini gerektirir ve genellikle üyelik ve erişim için diğer katılımcıların onayının alınmasını zorunlu

kılar. Ayrıca, bazı izinli blokzincirleri ağ içindeki üyelerin yetki düzeylerini ve rollerini tanımlayarak güvenlik ve uyumluluğu artıran daha kontrollü bir ortam oluşturur.

Blokzincir, kripto para ve finans işlemlerinin ötesinde birçok gizlilik ve güvenliğin önemsendiği sistemlerde de başarıyla uygulanmıştır. Blokzincir teknolojisinin, birçok sektör için iş akış ve veri yönetim modellerinde önemli değişimler oluşturabilecek potansiyelde olduğunu düşündüren, değişmezlik, şeffaflık ve izlenebilirlik gibi temel özelliklerinin yanında doğrulama ve onaylamanın güvenilir üçüncü taraflara ihtiyaç duyulmadan yapılabildiği, güvenliği ve güvenilirliği ile öne çıkan bir yöntem sağlamasıdır. Ancak sağladığı faydalar yanında ölçeklenebilirlik, işlemlerin gecikme süreleri, zaman alan mutabakat süreçleri, blok başına sınırlı veri depolama ve işlem kapasiteleri noktasında hala bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Blokzincirde özellikle ölçeklenebilirlik büyük bir endişe kaynağıdır. Örneğin, Bitcoin blok boyutunun 1 MB ile sınırlı olması ve yaklaşık her on dakikada bir blok çıkarılabilmesi, dolayısıyla saniyede en fazla 7 işlem hız sınırına sahip olması, yoğun işlem yükü gerektiren uygulamalar karşısında önemli bir sorun oluşturmaktadır (Zheng et al., 2017).

Blokzincir işlemlerin kaydedilmesinde sipariş-yürütme modelini kullanır. İşlemler sırayla gerçekleştirildiğinden işlem boyut ve sayısının artması bazı darboğaz sorunlarına neden olabilmektedir. Bu durum verimin düşmesi ve gecikmenin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle blokzincirin büyük boyutlu verilerin depolanmasında kullanılması önerilmez. Büyük boyutlu veriler için blokzincirin dışında zincir dışı olarak tanımlanan özellikle IPFS gibi harici veri ve dosya depolama yöntemleri tercih edilebilir (Ali et al., 2022).

3.2. Hyperledger Fabric ve Temel Özellikleri

Hyperledger Fabric 2015 yılında Linux Foundation tarafından tanıtılmış ve özellikle kurumsal iş uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş, açık kaynak kodlu, modüler ve ölçeklenebilir özellikleri ile öne çıkan gizlilik ve mahremiyet sağlayan izinli bir blokzincir platformudur. Hyperledger Fabric özelleştirilebilir ve izinli yapısıyla birlikte modüler ve değiştirilebilir mutabakat mekanizması, kimlik sertifika sistemi, güncellenebilir dağıtılmış akıllı sözleşmeleri, özel veri iletişimi ve izinli erişim kontrolü sağlayan özellikleriyle kurumsal uygulamalar için daha çok tercih edilmektedir (HLF Docs, 2024). Birçok blokzincir platformunda kullanılan, işlemlerin deftere kaydedilmesi için sipariş-yürütme modeli Hyperledger Fabric'te farklı olarak yürütme-sipariş-doğrulama modeli şeklinde uygulanır. İzinli Hyperledger Fabric platformunda katılımcılar onay ve yetkileri varsa defterde saklanan bilgilere erişebilmektedir. Hangi katılımcıların onay ve erişim yetkisinde olduğu ağın kurulumunda tanımlanan onay politikaları, kanal üyelik ve konfigürasyon yapılandırmaları ile belirlenir.

3.2.1. Hyperledger Fabric Temel Bileşenleri

Organizasyonlar ve Eş Dğümler (Orgs, Peers): Hyperledger Fabric temel yapı taşlarından olan Organizasyonlar ağın yönetimi, veri kontrolü ve politika belirleme gibi görevleri gerçekleştirirler. Her organizasyon kendilerine ait düğümlerin ve kullanıcılarının kimlik ve sertifika yönetimini ve yetkilerini belirler. Bir veya birden fazla kanal üzerinden farklı organizasyonlarla iş birliği yaparak, belirlenen kanal yapılandırma ve onay politikalarına göre işlemlerin onay süreçlerine katılabilirler. Her organizasyon kendi eş düğümlerini yönetir ve eş düğümler üzerinde özel verilerle birlikte kayıt defterlerinin bir kopyasının tutulmasını sağlar. Eş düğümler ise onaylanmış işlem verilerinin kayıt defterinde ve durum veritabanında tutulmasını ve verilerin güvenliği ve erişilebilirliğini sağlar. Eş düğümler iş kurallarına göre akıllı sözleşme zincir kodunu (chaincode) çalıştırarak işlemlerin onay süreçlerini gerçekleştirir. Diğer eş düğümlerle özel bir protokol üzerinden (Gossip) iletişim kurarak işlem tekliflerinin ağda yayılımını ve kayıt defterlerinin tutarlılığını sağlar. Blokzincir ağında eş düğümlere farklı roller tanımlanabilmektedir. Onaylayıcı eş düğüm (Endorsing Peer) istemciden gönderilen işlem tekliflerini akıllı sözleşme kodlarını yürüterek doğrulmasını yapan ve onay veren düğümlerdir. Taahhüt eden eş düğüm (Committing Peer) işlem onay sürecine katılmaz, oluşturulan bloklardaki işlemleri doğrulayıp kendi kayıt defterlerine ekler. Çapa eş düğüm (Anchor Peer) diğer organizasyonların eş düğümleri ile iletişimi sağlar. Organizasyon içinden seçilen bir lider düğüm (Leader Peer) işlemlerin koordine edilmesi ve diğer eş düğümlere dağıtılması görevini üstlenir.

Sipariş Düğümü (Orderer): Ağda bulunan bir veya birden fazla Orderer düğümü ağdaki farklı eş düğümlerden gelen onaylanmış işlemleri zaman damgaları ve diğer bazı kriterlerine bakarak belirli bir sıraya göre düzenler. Sıralanmış işlemler bloklar halinde gruplandırılır. Daha sonra kayıt defterindeki en son bloğa kriptografik olarak bağlanır ve blokzinciri oluşturulur ve ağda dağıtır. Birden fazla Orderer düğümü varsa ağdaki tüm Orderer düğümlerinin işlemlerin sıralanması ve blok oluşturulmasında karara varabilmeleri için konsensüs mekanizması kullanılır. Hyperledger Fabric, Solo, Kafka, Raft ve Smart BFT konsensüs algoritmalarının kullanımını desteklemektedir.

Kanal (Channel): Hyperledger Fabric’te bulunan çok kanallı ağ yapılandırması kurumsal blokzincir uygulamaları için güçlü ve esnek bir temel oluşturmayı sağlamaktadır. Ağdaki tüm katılımcılar bir veya birden fazla kanala üye olarak birbirleriyle özel ve güvenli iletişim kurabilirler. Her kanalın üyeleri, özellik ve yapılandırmaları farklı olabilir. Katılımcılar birden fazla kanalda rol alabilirler ve böylece farklı iş süreçleri için özel uygulamalar geliştirme imkânı ve ölçeklenebilirlik sağlanır. Her kanalın kendine özel yapılandırılmış ayrı kayıt defteri (Ledger) vardır ve sadece kanal üyeleri tarafından bu deftere erişilebilir. Böylece hassas ve özel veriler aynı kanalda yer almayan diğer üyelere karşı gizlenebilir. Kanal üzerinde yapılacak işlemlerde her üyenin yetkileri ayrı ayrı tanımlandığı gibi kanalda tanımlı Üyelik Hizmet Sağlayıcı (Membership Service Provider, MSP) ile üyelerin ve kullanıcıların sertifika geçerliliği ve kimlik doğrulamaları yapılarak sadece yetkili kullanıcıların deftere erişmesi ve işlem yapması sağlanır. Kanala göre değişen farklı akıllı sözleşmeler (zincir kodları) üzerinden iş süreçleri ve kuralları tanımlanabilir ve güncellemeler yapılabilir.

- **İşlem (Transaction) Veri Yapısı:** Araçlar için kayıt altına alınabilecek bilgi çeşitliliği oldukça fazladır. Önerilen model aracın kimlik bilgisiyle bağlantılı sınıflandırılmış verilerin kaydını sağlamak için bir altyapı oluşturmaktadır. Bu bağlamda araca ait bilgiler anahtar-değer (key-value) çifti şeklinde iki alan tanımlanarak kayıt altına alınır ve sorgulamalar anahtar alanında kullanılan araç kimliğiyle yapılır. Değer alanı içerisinde kaydın sınıf tanımı ile birlikte diğer bilgiler JSON veri yapısında veya dizi şeklinde yapılandırılmaktadır.
- **Kayıt Yeri:** Önerilen modelde kullanılan Hyperledger Fabric blokzincir platformunda işlemler hem durum veritabanında hem de kayıt defteri içinde birbiriyle kriptografik olarak bağlantılı bloklar içerisinde anahtar-değer çifti şeklinde organize edilerek kayıt altına alınmaktadır. Hyperledger Fabric durum veritabanı olarak LevelDB ya da CouchDB’nin kullanımını desteklemektedir. Durum veri tabanları hızlı ve verimli sorgulama ve okuma yapabilmek için optimize edilmiştir ve kriptografik yöntemlerle güvence altına alınmıştır. Kayıt defteri ise tüm işlem geçmişini değiştiremez, kurcalamaya karşı korumalı, kriptografik olarak birbirine bağlı blokzincirleri içerisinde tutmaktadır.

Sertifika Otoritesi (Certificate Authority, CA) ve Üyelik Hizmet Sağlayıcı (MSP): Hyperledger Fabric mimarisinde her kuruluş, düğüm ve son kullanıcıların dijital sertifika (x.509) veya kimlik doğrulama (Identity Mixer, Idemix) teknolojileri ile sağlanan sertifikalar ile dijital bir kimliğe sahip olması gerekmektedir. Fabric ağında kullanıcıların ve düğümlerin yetkileri ve özellikleri sertifikalar aracılığıyla tanımlanmaktadır. Bu nedenle sertifikaların güvenilir olması ve güvenilir bir kaynaktan üretilmeleri oldukça önemlidir. Hyperledger Fabric mimarisinde sertifikaların üretilmesi ve dağıtılması için Fabric CA sertifika yetkilisi kullanılabilirdiği gibi başka sertifika üretimi sağlayan (Openssl, Trusted CA vb.) araçlarda tercih edilebilmektedir. Hyperledger Fabric mimarisinde Açık Anahtar Altyapısı (Public Key Infrastructure, PKI) yöntemleri ile dijital sertifikaların üretilmesi, dağıtılması, kullanılması, yenilenmesi, iptal edilmesi ve doğrulanması gibi süreçlerin yönetimi için her kuruluş için MSP modülü kullanılmaktadır. Hyperledger Fabric’te sertifika yönetimi ve açık anahtar altyapısının merkezi olması, katılımcı düğüm sayısı çok arttığında ve kullanıcılar aynı anda büyük hacimli işlemler gerçekleştirmeye çalıştığında bir darboğaz oluşabilmekte verim düşüklüğü ve ölçeklenebilirliğin azalması söz konusu olabilmektedir (Abubakar, McCarron, Jaroucheh, Al Dubai, & Buchanan, 2021).

Akıllı Sözleşmeler (Smart Contract): Blokzincir ağında dağıtık kayıt defterine kaydedilecek işlemlerin oluşturulması için, tanımlanan koşullara göre tetiklenen, taraflar arasındaki sözleşme koşullarına göre merkezi bir otoriteye ihtiyaç olmadan işlemleri otomatik olarak yürütebilen, geri dönük değişimin mümkün olmadığı bilgisayar programlarıdır. Blokzincir ağ uygulamasına gömülü olan Akıllı

Sözleşme kodları ağdaki tüm düğümler tarafından dağıtık defter kaydı ve işlem verileri ile birlikte depolanmakta ve düğümlerdeki sunucular üzerinde çalıştırılmaktadır.

Hyperledger Fabric'te akıllı sözleşmeler, zincir kodu (chaincode) olarak bilinir. Zincir kodu tanımlanan bir kanal üzerinde, onay politikalarına göre yetkilendirilmiş kuruluşların eş düğümlerine kurulur ve senkronize edilir. Gerekğinde yetkili bir kuruluş tarafından zincir kodu güncellenebilir. Zincir kodunda yer alan algoritma belirlenen iş mantığının doğru yürütülmesi için bir güvence sağlar. Hyperledger Fabric'te Zincir Kodları Java, Golang, TypeScript ve Javascript programlama dilleri ile programlanabilmektedir.

3.3. Dağıtık Dosya Depolama Sistemi (Interplanetary File System, IPFS)

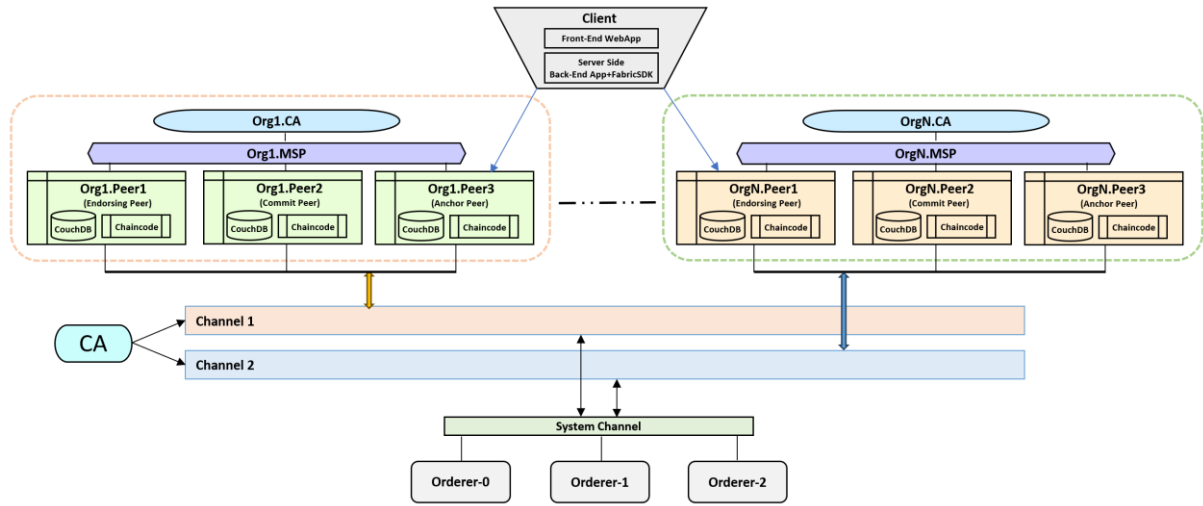
IPFS, merkezi olmayan, dağıtık, eşler arası bir dosya depolama protokolüdür, İlk sürümü 2015 yılında yayınlanmış ve açık kaynak kodlu dağıtık bir dosya depolama sistemi olarak kullanıma sunulmuştur. Blokzincir ve DLT uygulamalarında zincir dışı veri ve dosya depolama ortamı olarak tercih edilebilir. Merkezi sistemlerin tek hata noktası gibi sorunlarını çözen, bütünlüğün korunmasında etkili bir yöntem sunan IPFS, mevcut web sisteminin dağıtık web'e dönüşmesini ve sansüre dayanıklı web sitelerinin oluşmasına katkı sağlaması beklenmektedir. İnternet ortamında genel bir kullanıma sahip olduğu gibi, izole edilmiş özel bir ağda dosya paylaşım sistemi olarak da kullanılabilir. IPFS'in herkese açık ağ yapısına sahip olması nedeniyle, depolanacak dosyaların önceden şifrelenmesi verilerin ifşasını korumak ve gizlemek için gereklidir. Aksi halde dosya erişim bilgisine sahip herkes tarafından dosyalara erişilebilir. IPFS'in kurumsal kullanımları için özelleştirilmesi ve sadece izin verilen düğümler arasında veri paylaşımının yapılması gizliğin de korunmasına katkı sağlayacaktır (Abdullah Lajam & Ahmed Helmy, 2021; Ali et al., 2022).

4. Önerilen Modelin Temel Bileşenleri ve Özellikleri

4.1. Hyperledger Fabric Blokzincir Platformu

Hyperledger Fabric, kurumsal uygulamalar için güçlü bir blokzincir platformudur. Gizlilik, ölçeklenebilirlik, esneklik, güvenlik ve entegrasyon gibi avantajları sayesinde, birçok farklı sektörde ve farklı ihtiyaçlardaki kurumsal uygulamalar için uygun bir çözüm sunar.

Önerilen modelde araçlarla ilgili işlem kayıtlarının tutulması ve veri yönetiminde altyapı oluşturmak için Hyperledger Fabric blokzincir platformu kullanılmıştır. Araçlarla ilgili işlemlerde rol alan birçok kuruluş ve çok sayıda kullanıcı vardır. Çok sayıda katılımcının olduğu ortak bir platformda iş birliğini sağlamak ve işlemlerin güvenli ve güvenilir bir kaydını tutabilmek için gelişmiş bir kimlik doğrulama ve denetlenebilir ve izlenebilir bir veri yönetimine ihtiyaç vardır. Hyperledger Fabric platformunun yapısal özellikleri bu ihtiyaçları karşılayabilecek potansiyeldedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, çoklu organizasyon ve her organizasyonun kontrolünde çok sayıda katılımcının yer aldığı, iki kanallı bir Hyperledger Fabric blokzincir ağ mimarisi tasarlanmıştır. İki kanallı blokzincir ağında kanal 1, ağdaki kullanıcıların üyelik ve kimlik bilgilerinin saklandığı kayıt defterinin yönetimini, kanal 2 ise araçlarla ilgili işlem kayıtlarının tutulduğu kayıt defterinin yönetimini sağlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 2. Önerilen blokzincir mimarisini

İstemci Yazılımı (Client-WebApp): İstemci yazılımı, web arayüzü (front-end) ve sunucu yazılımı (back-end) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Web arayüzü, kullanıcı ile etkileşim kurmak, sunucu yazılımına bilgi girişi ve sorgu göndermek için mobil telefon ya da bilgisayar üzerinde çalışan javascript tabanlı uygulamadır. Sunucu yazılımı ise Hyperledger Fabric ağına bağlanmak ağıdaki eş düğüm ve akıllı sözleşme zincir kodlarıyla etkileşim kurmak için Fabric SDK ve API'lerini kullanan Node.js, Java ya da Go programlama dillerinde yazılmış bir uygulamadır. Hyperledger Fabric istemci yazılımları, güvenli ve izinli bir ağda çalıştığı için tüm işlemler ve etkileşimler sertifikalarla doğrulanır ve dijital imza yöntemleriyle güvence altına alınır.

İstemci yazılımı, her organizasyonun görev ve sorumluluklarına göre özel olarak tasarlanır. Blokzincir kayıt defterinde kayıt altına alınmak istenen işlemlere ait bilgiler anahtar-değer çifti oluşturacak şekilde ve JSON veri yapısında düzenlenmelidir. Kanal-1 üzerindeki kayıt defteri ağıdaki kullanıcıların yönetimi için kullanılmaktadır. Kullanıcılara ait hesap bilgileri kaydedilmek istendiğinde Anahtar alanı kullanıcı kimliği olmalı ve değer alanı ise kullanıcının detay bilgilerini içermelidir. Kanal-2 üzerindeki kayıt defteri ise araçlara ait verilerin yönetimi için kullanılmaktadır. Araçlarla ilgili gerçekleştirilen işlem bilgileri kaydedilmek istendiğinde Anahtar alanı araç kimliği (VIN) olmalı ve değer alanı ise gerçekleştirilen işleme ait detay bilgilerini içermelidir.

Kullanıcı ve Sertifika Yönetimi: Araçlara ait işlemler için bilgi giriş ve sorgulamaları çeşitli yetki ve sorumluluklara sahip kullanıcılar tarafından yapılmaktadır. Her organizasyon kendi sorumluluk alanındaki işlemleri yapması için öncelikle kullanıcılarını tanımlayan yetki ve rollerini belirleyen kayıt kanal-1'deki kayıt defterine girmelidir. Ağ üzerinde işlemlerin yapılması için dijital sertifika ve dijital imzalar kullanılmaktadır. Her organizasyonun sahip olduğu sertifika yöneticisi (Org1.CA) kendi eş düğüm ve kullanıcılarına geçerliliği kontrol edilebilen bir sertifika sağlamakla görevlidir. Bu sertifika ve dijital imzalar ağ içerisinde, iletişimin güvenliğini sağlama ve işlemlerin doğrulanmasında kullanılmakta, Organizasyona ait Üyelik Servis Sağlayıcı (Org1.MSP) tarafından sertifika ve dijital imzaların geçerliliği kontrol edilmektedir. Önerilen modelde, araç sahipleri, özel/resmî kurumların yetkili personelleri, sigorta acente çalışanları, oto servis ve tamir-bakım yetkilileri ve araçlara ait veri aktarımı yapan IoT cihazları kullanıcı olarak tanımlanır ve atanan yetki, rolleri ve sertifikaları ile Kanal-1'e ait kayıt defterine kaydedilir.

Organizasyon ve Eş Düğümler: Hyperledger Fabric, kullanımda olan ağa yeni organizasyon ve eş düğümlerin eklenmesine imkân veren esnek bir yapıdadır. Bu özellik, önerilen model için araçlarla ilgili yeni işlemlerin kaydını yapabilmeyi, çeşitli hizmetler için veri yönetimini sağlamayı mümkün hale getirecektir. Ağa yeni organizasyonların eklenebiliyor olması ağın, merkeziyetsiz özelliğini daha da geliştireceği gibi, yük dengeleme, tek nokta hatalarına karşı daha dirençli hale gelme, yedekliliğin artması ve iş birliği potansiyelini artırmaya yönelik birçok fayda sağlayacaktır. Şekil 2'de önerilen

mimari yapı birçok organizasyon çok kanallı bir platform üzerinde birlikte çalışabilirliğini göstermektedir. Eş düğümler (peers) organizasyona göre değişen sayılarda tanımlanabilir, sonradan ekleme de yapılabilir. Eş düğümler üyesi olunan kanala ait kayıt defterlerinin bir kopyasını tutmaktadır. Kanal onay politikalarına, akıllı sözleşme kod kurallarına ve yapılandırmaya göre kayıt defterine yazılması için işlem teklifi ve sorgulama için durum veri tabanına (CouchDB veya LevelDB) erişim sağlayabilirler. Her eş düğüm, ağda yayımlanan ve yeni oluşturulan blokların işlem ve geçerlilik doğrulamalarını yaparak kendi kayıt defterlerindeki blokzincirini günceller.

Önerilen modelde organizasyonlar ve görevleri:

- **Org1 (Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Başkanlığı):** Araç tescil işlemleri, plaka işlemleri, kaza takip işlemleri, trafik denetim, ihlal ve ceza işlemleri, yasal takip ve sorgulamalar. İl ve ilçelere, işlem yük dağılımına göre çok sayıda eş düğüm tanımlama ve yönetme. Araç sahibi ve yetkili personel için kullanıcı kayıt ve yönetimi.
- **Org2 (Noterler Birliği):** Trafik tescil işlemleri, araç alım-satım tescil işlemleri. Eş düğüm yönetimi. Araç sahibi ve yetkili kullanıcı kayıt ve yönetimi.
- **Org3 (Sigorta Şirketleri):** Zorunlu trafik sigortası, araç kaza ve hasar yönetimi. Yetkili acente personeli kullanıcı yönetimi.
- **Org4 (Araç Muayene Şirketleri):** Araç muayene işlemleri, egzoz emisyon ölçüm işlemleri. Yetkili personel kullanıcı yönetimi.
- **Org5 (Oto Servis ve Tamirhaneler):** Araç tamir, bakım ve yedek parça değişim işlemleri. Özel servis yetkilileri, onarım ve bakım için kayıt girme yetkisi almış tamirhane personeli kullanıcı yönetimi.
- **Org6 (Diğer Kurumlar):** Diğer ihtiyaç duyulan hizmetler için tutulacak kayıtlar. HGS/OGS otomatik geçiş takip, Araç içi veri takibi için IoT cihaz yönetimi vb.

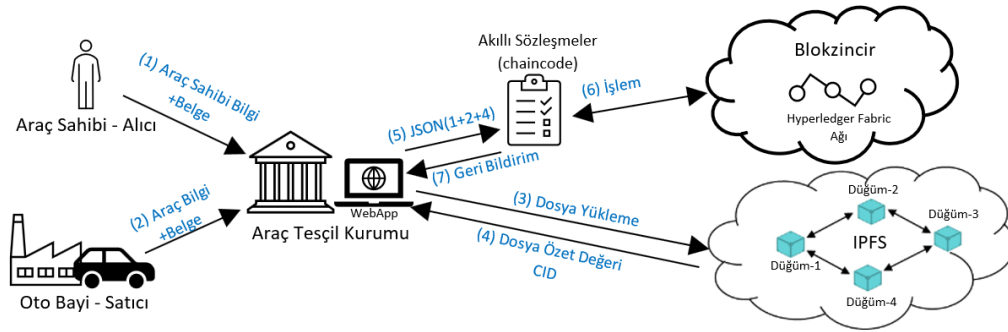
4.2. Özel Dağıtık Dosya Depolama (Private IPFS)

IPFS, kurumsal uygulamalarda veri dayanıklılığı, güvenlik, maliyet tasarrufu, performans, şeffaflık ve merkeziyetsizlik gibi birçok avantaj sunar. Bu avantajlar, IPFS'i özellikle büyük veri setleri, hassas bilgiler ve merkezi olmayan uygulamalarla çalışan kurumlar için cazip bir seçenek haline getirir (Majdak, 2023).

Önerilen modelde IPFS teknolojisinin kullanılmasının amacı, araçlarla ilgili gerçekleştirilen işlemlerde gerekli olan ek bilgi ya da kanıt hükmündeki belge, fotoğraf, ses ve görüntü gibi her türlü dosya türünün dağıtık bir ağda saklanarak erişilebilirliğini ve bütünlüğünü korumak ve çoklu yedeklilik sağlamaktır. Böylece dosyaların birden fazla kopyası dağıtık bir ağda tutulduğu için veri kayıp riski azaltılmış, tek nokta hatasından kaynaklanabilecek problemler ortadan kaldırılmış, her daim hızlı bir şekilde erişilebilirlik sağlanmış olacaktır.

Önerilen Modelde Özel IPFS Ağının Kullanımı:

Kullanıcılar, işlemlere ait bilgileri web arayüzü üzerinden blokzincir ağına göndermeden önce işlemlerle ilgili çeşitli türdeki dijital belge ve dosyaları özel IPFS ağına yükler. IPFS ağına yüklenen her dosyanın hash değeri ile oluşturulmuş olan CID bilgisi işlem verilerine dahil edilerek blokzincir ağına, araç kimlik bilgisi ile birlikte JSON veri yapısında gönderilir. Daha sonra yapılacak sorgulamalarda CID bilgisi IPFS ağında dosyaya erişmek için kullanılır. Özel IPFS ağına gönderilen dosyalar ağda bulunan tüm düğümlere dağıtılmaktadır. Özel IPFS ağındaki dosyalara genel IPFS ağından erişim sağlanmadığı gibi özel ekip anahtarı (swarmkey) olmayan düğümlerle iletişim de kurulmadığı için gizlilik ve güvenlik korunmuş olur.



Şekil 3. Araç tescil kaydına ait bilgi ve belgelerin yüklenmesinde işlem akış sıralaması

IPFS ağına dosya yükleme süreci, araç tescil kaydı işlemi üzerinde örneklenerek Şekil 3'de gösterilmektedir. Araç alım-satım süreciyle ilgili araç tescil kaydına ait işlemlerde; (1) alıcı ve (2) satıcı kimlik bilgileriyle birlikte araca ait istenen bilgi ve belgelerle araç tescil kurumuna başvurur. Araç tescil kuruluşundaki yetkili personel blokzincir ve IPFS ağıyla etkileşim kurmak için gerekli sertifika ve dijital imzalara sahiptir. Yetkili personel, kurumun WebApp kullanıcı arayüzü üzerinden tescil kaydı için gerekli bilgileri girer. Kâğıt tabanlı belgeler dijital dosyaya dönüştürülerek (3) IPFS ağına yüklenir. IPFS ağına yüklenen her dosya için (4) dosyaya ait hash değeri (CID) WebApp arayüzüne döndürülür. WebApp arayüzü üzerinde (5) toplanan bilgiler Blokzincir ağına ilgili akıllı sözleşme zincir koduna gönderilir. Akıllı sözleşme zincir kodu işlemleri yürüterek doğrular, (6) kayıt defterine yazılması için blokzincire gönderir ve (7) yürütülen işlem sonucunu WebApp' ye bildirir.

IPFS ağına yüklenen dijital belge ve dosyaların hash değerleri işlem kaydı içerisinde akıllı sözleşme koduna gönderilmiş ve doğrulanan işlemlerle birlikte kayıt defterinde saklanmıştır. Daha sonra işlem kaydı sorgulandığında hash değeri ile IPFS ağındaki ilgili dosyaya erişim sağlanabilecektir. Dosyalara ait hash değerinin bilinmesi dosyanın içeriğine ulaşmak için yeterli olduğundan hassas veriler içeren dosyalar için gizlilik problemi olacaktır. Gizliliğin sağlanması için dosyaların IPFS ağına yüklenmeden önce şifrelenmesi ve şifre anahtarının da korunması için ayrı bir mekanizmanın oluşturulmasına ihtiyaç vardır.

5. Sonuç

Yapılan çalışmada araçlarla ilgili kayıt altına alınan bilgi çeşitliliği ve veri yönetimi için literatürdeki çalışmalar ve geliştirilen uygulamalar için kullanılan yöntem ve teknolojiler incelenmiştir. Bu çalışmada önerilen araçların blokzincir tabanlı veri yönetim modeli, aracın yaşam döngüsü içerisinde gerçekleştirilen birçok işlemde rol alan resmi ve özel birçok kurumun, şeffaf, güvenli ve güvenilir bir platform üzerinde iş birliği yaparak veri takibi ve yönetimini yapabilmemesini hedefleyen kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Modelin temel amacı, aracın tarihçesini oluşturmak için, araçla ilgili gerçekleştirilen işlemlere ait kayıtların, aracın ilk tescil kaydında belirlenen benzersiz araç kimlik numarası ile ilişkilendirilerek zaman damgalı ve değiştirilemez bir şekilde, dağıtık bir ağda depolanmasını sağlamaktır. Bu sayede araçların birçok işlem için izlenebilirliğini ve denetlenebilirliğini kolaylaştırarak sahte ve hileli işlemlerin, dolandırıcılık ve hırsızlık gibi sorunların engellenmesine, veri eksikliği ve kanıt ve belge yetersizliğinden kaynaklanan güvensizliklerin ortadan kalkmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Önerilen model, ikinci el araç alım-satım işlemleri, çeşitli tescil işlemleri, zorunlu araç sigortası ve muayenesi, araç kaza ve hasar yönetimi, bakım onarım ve yedek parça değişim işlemleri, trafik ihlal ve ceza işlemleri gibi birçok hizmetin takip ve yönetiminde kullanılabilirliği gibi, modelin ölçeklenebilir ve genişletilebilir özellikteki altyapısı sayesinde, araç kiralama, filo yönetimi, paylaşımlı hareketlilik, park yönetimi, bağlantılı araçlar, elektrikli yada otonom araçlara ait özel hizmetler ile köprü yada otoyol otomatik geçiş takip ve yönetimi gibi bir çok hizmetin de daha güvenli ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır. Ancak mevcut potansiyelin tam olarak kullanılabilir olması ve sistemin başarısı için sistemde rol alan kurum ve kuruluşların kullanılan teknolojileri benimsemesi, iş

birliğinin sağlayacağı faydalara güvenmeleri ve veri girişlerinde gerekli hassasiyeti göstermeleri gereklidir.

Sonuç olarak tasarlanan ve önerilen model, Hyperledger Fabric ve IPFS gibi yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu ile araçların yaşam döngüsüne ait tüm tarihçesinin ilgili paydaşlar tarafından yetki ve sorumluluklarına göre daha verimli ve güvenli bir şekilde izlemelerine ve yönetmelerine imkân vererek, kurumların mevcut geleneksel iş modelleri üzerinde önemli bir dönüşüm gerçekleştirme potansiyeline sahiptir.

Önerilen modelin araçlara ait işlemleri gerçekleştiren özel ve resmî kurumlar tarafından benimsenmesi ve uygulanması halinde, özellikle ikinci el araç pazarında yaşanan güvensizliklerin giderilmesini, dolandırıcılık faaliyetlerinin azaltılması, sahte ve hileli işlemlerin önüne geçilmesini, araç takip ve denetimlerinin daha kolay yapılabilmesini, kilometre sayacı manipülasyonlarının, sigorta dolandırıcılıklarının engellenmesini sağlayabilir. Ulaşım ve otomotiv sektörünün daha güvenli ve verimli çalışmasına katkı sağlayarak, ulaşım sistemlerinin ve kurumsal süreçlerin dijitalleşmesinde, kâğıt tabanlı belge kullanımının azaltılmasında, maliyetlerin azaltılmasında trafik güvenliğinin artırılmasında önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Çalışmada herhangi bir destek alınmamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu makale, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojisi Ana Bilim Dalı bünyesinde hazırlanan Doktora tezinden üretilmiştir. Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Abbate, L. R., Ribeiro, F. M., Da Silva, M. H., Morais, A. F. P., Morais, E. S. de, Lopes, E. M., . . . Rodrigues, J. J. P. C.** (2020). Blockchain Applied to Vehicular Odometers. *IEEE Network*, 34(1), 62–68. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900162>
- Abdullah Lajam, O., & Ahmed Helmy, T.** (2021). Performance Evaluation of IPFS in Private Networks. In *2021 4th International Conference on Data Storage and Data Engineering* (pp. 77–84). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/3456146.3456159>
- Abubakar, M., McCarron, P., Jaroucheh, Z., Al Dubai, A., & Buchanan, B.** (2021). Blockchain-based Platform for Secure Sharing and Validation of Vaccination Certificates. In *2021 14th International Conference on Security of Information and Networks (SIN)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIN54109.2021.9699221>
- Akçi, Y.** (2016). İkinci El Otomobil: Tüketici Bakışıyla. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 329. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.68749>
- Ali, H., Ahmad, J., Jaroucheh, Z., Papadopoulos, P., Pitropakis, N., Lo, O., . . . Buchanan, W. J.** (2022). Trusted Threat Intelligence Sharing in Practice and Performance Benchmarking through the Hyperledger Fabric Platform. *Entropy (Basel, Switzerland)*, 24(10). <https://doi.org/10.3390/e24101379>
- Alsadı, M., Yıldırım, S., Gulsecen, S., Kose, B. O., & Coskun, V.** (2019). Akıllı Araç Ekosistemlerinde Blockchain Tabanlı Güvenli Veri Yönetim Modeli. In *3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies: Ankara, Turkey, October 11-13, 2019* (pp. 1–5). Piscataway, NJ: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932885>
- ARTES Bilgi Sistemleri** (2018). Araç Tescil Sistemi (TescilGerekliEvrak). Retrieved from <https://portal.tnb.org.tr/Artes/Sayfalar/TescilGerekliEvrak.aspx>
- Athanere, S., & Thakur, R.** (2022). Blockchain based hierarchical semi-decentralized approach using IPFS for secure and efficient data sharing. *Journal of King Saud University, Computer and Information Sciences*, 34(4), 1523–1534. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.019>
- Baumann, J., Zavolokina, L., & Schwabe, G.** (2021). *Dealers of Peaches and Lemons: How Can Used Car Dealers Use Trusted Car Data to create value?* HICSS. <https://doi.org/10.5167/uzh-192651>
- Brousmiche, K. L., Heno, T., Poulain, C., Dalmieres, A., & Ben Hamida, E.** (2018). Digitizing, Securing and Sharing Vehicles Life-cycle over a Consortium Blockchain: Lessons Learned. In M. & S. IFIP International Conference on New Technologies (Ed.), *2018 9th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility & Security: Proceedings of NTMS 2018 Conference and Workshop : 26-28 February 2018, Paris, France* (pp. 1–5). Piscataway, NJ: IEEE. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2018.8328733>
- Car-Pass** (2022). Car-Pass annual report 2022 - News about Car-Pass. Retrieved from <https://www.car-pass.be/en/news/car-pass-annual-report-2022>
- Chanson, M., Bogner, A., Wortmann, F., & Fleisch, E.** (2017). Blockchain as a privacy enabler. In *Lee, Takayama et al. (Ed.) 2017 – Proceedings of the 2017 ACM* (pp. 13–16). <https://doi.org/10.1145/3123024.3123078>
- Das, D., Banerjee, S., Ghosh, U., Biswas, U., & Bashir, A. K.** (2021). A decentralized vehicle anti-theft system using Blockchain and smart contracts. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(5), 2775–2788. <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01097-3>

- Dayı, F., & Hasanoğlu, T.** (2023). Türkiye’de İkinci El Otomobil Fiyatlarını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 14(38), 436–457. <https://doi.org/10.21076/vizyoner.1193474>
- Elisa, N., Yang, L., Chao, F., & Cao, Y.** (2023). A framework of blockchain-based secure and privacy-preserving E-government system. *Wireless Networks*, 29(3), 1005–1015. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1883-0>
- HLF Docs** (2024). Hyperledger Fabric. Retrieved from <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/whatis.html>
- Holler, M., Barth, L., & Fuchs, R.** (2019). Trustworthy Product Lifecycle Management Using Blockchain Technology—Experience from the Automotive Ecosystem. In J. Stark (Ed.), *Decision Engineering. Product lifecycle management. (Volume 4): The case studies / John Stark, editor* (pp. 13–19). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16134-7_2
- Leila Benarous, Benamar Kadri, Ahmed Bouridane, & Elhadj Benkhelifa** (2021). Blockchain-based forgery resilient vehicle registration system. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/ett.4237>
- Majdak, M.** (2023). IPFS Private Network. Retrieved from <https://startup-house.com/blog/ipfs-private-network-guide>
- Mendi, A. F.** (2021). Blokzincir Uygulamaları ve Gelecek Öngörülleri. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, 4(1), 76–88. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/aist/issue/56936/862936>
- Nakamoto, S.** (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *Satoshi Nakamoto*. Retrieved from <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Schwabe, G.** (2019). The role of public agencies in blockchain consortia: Learning from the Cardossier. *Information Polity*, 24(4), 437–451. <https://doi.org/10.3233/IP-190147>
- Tanrıverdi, M., Uysal, M., Üstündağ, M. T., & Ayaz, Z.** (2021). Araç Cüzdanı: Motorlu Araçların Teknik Servis ve Bakım Kayıtlarının Blokzinciri Üzerinde Yönetilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 9(4), 1358–1373. <https://doi.org/10.29130/dubited.904757>
- Tektaş, M., Korkmaz, K., & Erdal, H.** (2016). Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Geleceği (Ekonomik ve Çevresel Faydaları). *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 561–577. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/bsbd/issue/43860/539514>
- Vukolic, M.** (2016). The Quest for Scalable Blockchain Fabric: Proof-of-Work vs. BFT Replication. In J. Camenisch & D. Kesdoğan (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science. Open problems in network security* (Vol. 9591, pp. 112–125). New York NY: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39028-4_9
- Zafar, S., Hassan, S. F. U., Mohammad, A., Al-Ahmadi, A. A., & Ullah, N.** (2022). Implementation of a Distributed Framework for Permissioned Blockchain-Based Secure Automotive Supply Chain Management. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(19). <https://doi.org/10.3390/s22197367>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (Eds.)** (2017). *An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends*.