

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ULAŞTIRMA BİLİM DALI

ELEKTRİKLİ ARAÇ FİLOLARININ İŞLETİMİNDE PİL DEĞİŞİM
STRATEJİSİNİN ETKİNLİĞİNİN İNCELENMESİ

MERVE EKTİ

DANIŞMAN
DOÇ.DR. MEHMET SİNAN YILDIRIM

MANİSA
2025

**MERVE
EKTİ**

**ELEKTRİKİ ARAÇ FİLOLARININ İŞLETİMİNDE PİL DEĞİŞİM STRATEJİSİNİN ETKİNLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

MERVE EKTİ



ÖZET

Merve EKTİ
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ulaştırma Anabilim Dalı

Danışman
Doç. Dr. Mehmet Sinan Yıldırım

Bu çalışma, elektrikli araç filolarında batarya değişim stratejisinin etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel şarj istasyonlarına kıyasla batarya değişim istasyonlarının filo operasyonları üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve verimlilik açısından sunduğu avantajlar değerlendirilerek elektrikli araçların yaygınlaşmasında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri olan uzun şarj süreleri ve menzil endişesi, batarya değişim strateji kullanılarak aşılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, batarya değişim stratejisinin etkinliğini sınamak amacıyla bir mikro simülasyon modeli geliştirilerek, farklı batarya sayıları, batarya bozulma seviyeleri ve işletim senaryoları altında sistem performansı analiz edilmiştir. Çalışmada Kesikli Olay Simülasyonu (KOS) ve Ajan Tabanlı Simülasyon (ATS) yöntemlerinin bir arada kullanıldığı çok methodlu simülasyon yöntemi ile modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, batarya değişim stratejisinin araçların bekleme sürelerini azalttığını, yolcu taleplerini daha etkin karşıladığını ve filonun yolcu taşıma kapasitesinin ve verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, çalışmada sonucunda batarya sayısının ve batarya sağlığı seviyelerinin sistem performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, elektrikli araç filolarının operasyonel verimliliğini artırmak için pil değişim stratejisinin önemli bir çözüm sunduğunu ve gelecekte bu stratejinin daha geniş uygulama alanlarına sahip olabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Pil Değişim Stratejisi, Mikrosimülasyon, Ajan Tabanlı Simülasyon, Kesikli Olay Simülasyonu.

2025, 63 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.

Merve EKTİ

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Engineering
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Sinan YILDIRIM

This study aims to examine the effectiveness of the battery swapping strategy in electric vehicle fleets. The impacts of battery swapping stations on fleet operations were analyzed and their advantages in terms of efficiency were evaluated in comparison to traditional charging strategies. The battery swapping strategy aims to overcome major challenges hindering the widespread adoption of electric vehicles, such as long charging times and range anxiety.

A microsimulation model was developed in the study, and system performance was analyzed under different battery quantities, battery health levels, and operational scenarios. The modeling was carried out using an integrated approach combining Discrete Event Simulation (DES) and Agent-Based Simulation (ABS). The results demonstrate that the battery swapping strategy reduces vehicle waiting times, meets passenger demands more effectively, and significantly improves fleet efficiency. Additionally, it was found that the number of batteries and battery health levels have a direct impact on system performance. This study reveals that the battery swapping strategy offers a significant solution to enhance the operational efficiency of electric vehicle fleets and highlights its potential for broader application in the future.

Keywords: Electric Vehicles, Battery Swapping Strategy, Microsimulation, Agent-Based Simulation, Discrete Event Simulation

2025, 63 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Sinan Yıldırım'a, tezime değerli katkılar sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tülin ÇETİN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oruç ALTINTAŞ'a, yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olup desteklerini sunan aileme teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Merve EKTİ

Manisa, 2025



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ATS	Ajan Tabanlı Simülasyon
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
PMF	Olasılık Kütle Fonksiyonu
RNG	Rassal Sayı Üretici
KOS	Kesikli Olay Simülasyonu
BEV	Tam Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicles)
PHEV	Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç
IID	Bağımsız ve Aynı Dağılımlı değişkenler

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 2025 ve 2035 yılları arasında tahmin edilen elektrikli araç sayısı (IEA, 2024)	2
Şekil 2. Sırasıyla elektrikli scooter elektrikli kamyon elektrikli uçak ve elektrikli toplu taşıma araçlarının görünüşleri (Volvo, 2024) (Pipitrel, 2024) (Otokar, 2023) ...	9
Şekil 3. Tipik bir batarya değişim istasyonu (Wired, 2024)	12
Şekil 4. Tipik bir batarya değişim istasyonunun görünüşü(Invest in China, 2024) ...	13
Şekil 5. Sistemlerin sınıflandırılması	15
Şekil 6. Üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu ($\lambda=5$ yolcu/saat)	32
Şekil 7. Günlük ortalama başarısız seyahat talebinin batarya sayısı ile değişimi	40
Şekil 8. Ortalama yolcu bekleme süresinin batarya sayısı ile değişimi	41
Şekil 9. Farklı batarya bozulma dereceleri için günlük başarısız yolculuk ortalaması	42
Şekil 10. Farklı batarya bozulma dereceleri için ortalama yolcu bekleme süreleri ...	42
Şekil 11. Farklı batarya bozulma dereceleri için günlük batarya değişim sayıları	43
Şekil 12. Havuzda 5 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı	44
Şekil 13. Havuzda 10 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı	45
Şekil 14. Havuzda 15 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı	45

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Simülasyon modelinde kullanılan bloklar	25
Tablo 2 . Lineer türevsel üreteç yöntemi ile üretilen rassal sayılar	35
Tablo 3. Model işletimi için kabul edilen saatlik yolcu geliş sayıları.....	36
Tablo 4. Farklı batarya sayılarına göre filo performansları	39



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLolar DİZİNİ	VI
İÇİNDEKİLER	VII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Toplu Taşıma ve Elektrikli Araçlar	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	9
3.2. Elektrikli Araçların Gelişimi	10
3.3. Elektrikli Araç Türleri	10
3.4. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları	11
3.5. Batarya Değişim İstasyonları	12
4. YÖNTEM	15
4.6. Sistem Kavramı ve Simülasyon	15
4.7. Model Kavramı ve Modelleme.....	16
4.8. Bilgisayar Simülasyonu.....	18
4.9. Simülasyon Modellerinin Sınıflandırılması	18
4.10. Kesikli Olay Simülasyonu (KOS) Yöntemi	19
4.11. Ajan Tabanlı Simülasyon (ATS).....	20
4.12. Simülasyon Modelinin Bileşenleri	21
4.12.1. Varlıklar (Entities)	21
4.12.2. Attributes (Nitelikler).....	22
4.13. Anylogic Simülasyon Yazılımı	23
4.14. Simülasyon Modelinin Hazırlanması	28
5. SİMÜLASYON MODELİNİN İŞLETİMİ	30
5.1. İşletim Senaryosunun Oluşturulması.....	30
5.2. Simülasyon Modellemesinde Rassal Sayı Üretimi	32
5.3. Yolcu Gelişlerinin Modellenmesi	36
5.4. Simülasyon Modelinin Doğrulanması.....	36

5.5. Performans Ölçütleri	36
6. MODEL İŞLETİM SONUÇLARI.....	39
6.1. Model Doğrulaması Sonuçları.....	39
6.2. Batarya Sayısının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi.....	39
6.3. Batarya Bozulma Senaryosunda Filo Performansı.....	41
6.4. Fosil Yakıtlı ve Elektrikli Araç İşletim Senaryolarını Karşılaştırılması	44
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	47
8. KAYNAKLAR	49



1. GİRİŞ

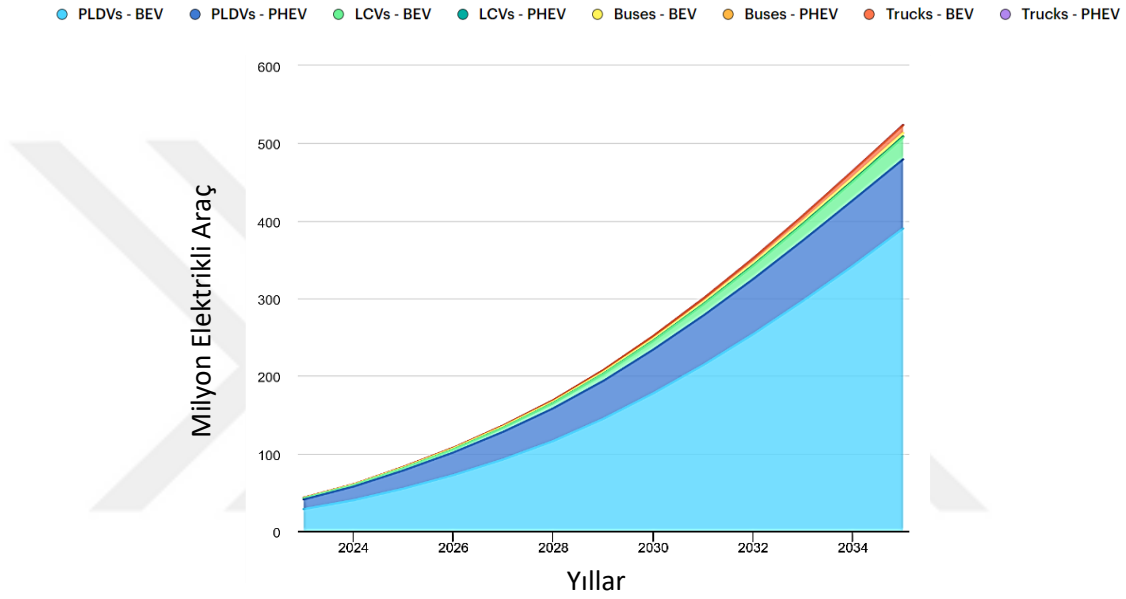
Ulaştırma, insanlığın başlangıcından bu yana, insan ve malların yer değiştirme ihtiyacından kaynaklanan temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmış ve zamanla gelişmiştir. Günümüzde, artan nüfus, küreselleşme ve teknolojik ilerlemeler ile ulaştırma imkanları genişlemekte ve mobilite artmaktadır. Ulaştırma, tarih boyunca medeniyetlerin gelişiminde kritik bir rol oynamıştır; ancak, modern zamanlarda ulaşım sektörünün evrimi, hız ve ekonomik verimlilik gibi insanlığa sunduğu avantajların yanı sıra, özellikle içten yanmalı motorların ve fosil yakıtların kullanımı sonucu, ulaştırma faaliyetleri ciddi bir çevre kirliliği kaynağı haline gelmiştir (Adu-Gyamfi ve ark., 2022).

İçten yanmalı motorlara sahip araçların yerini almak üzere geliştirilen hibrit ve diğer alternatif araç tipleri, çevresel etkiyi azaltma ve enerji verimliliğini artırma potansiyelleri ile dikkat çekmektedir. Hibrit araçlar, içten yanmalı motorlar ve elektrik motorlarını birleştirerek, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltırken, performanstan ödün vermemektedir. Hidrojen yakıt hücreli araçlar gibi diğer alternatifler ise sıfır emisyon potansiyeli sunarak çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır (Felseghi ve ark., 2019). Elektrikli ve hidrojen yakıtlı araçlar, özellikle şehir içi hava kalitesinin iyileştirilmesi ve iklim değişikliği ile mücadelede etkili olabilmektedir.

Elektrikli araçlar fosil yakıtlı taşıtların neden olduğu emisyonların yerine geçebilecek önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Pina ve ark., 2014). Bu noktada, gelişen batarya teknolojileri ile son yıllarda dünyada ve ülkemizde kullanımı giderek artan elektrikli araçlar hem gaz salımı yapmamakta hem de petrol gibi değerli bir kaynağın zararlı gaz dönüşümlerinden kaçınarak, mikro ve makro düzeyde bu kirliliği önleyecek sistemler sunmaktadır. Ancak, elektrikli araçların çevresel faydalarının maksimize edilmesi, enerji üretim süreçlerinin de çevre dostu hale getirilmesini gerektirmektedir. Özellikle karbon emisyonlarını azaltma ve hava kalitesini iyileştirme konusunda büyük potansiyel taşıyan elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle çalıştıkları zaman çevresel etkileri önemli ölçüde düşmektedir (Alaee ve ark., 2023).

Son yıllarda, dünya genelinde elektrikli araç ve batarya teknolojilerinin yaygınlaşması ve birçok ülkenin bu yeni teknolojiye yönelik adımlar atmasıyla elektrikli araçların pazar payı her geçen gün artmaktadır (Muratori ve ark., 2021).

Elektrikli araçların hem bireysel kullanımı hem de toplu taşıma sistemlerinde kullanımı benzer şekilde artış göstermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2021 yılına ait verilere göre, dünyada, elektrikli araç sayısı 2023 yılında 45 milyon altındayken, 2030 yılında 250 milyona, 2035 yılında ise 525 milyona ulaşacaktır. Sonuç olarak, 2035 yılında yollardaki her dört araçtan biri elektrikli olacak. Ortalama olarak, elektrikli araç filo büyüklüğü 2023 ile 2035 yılları arasında yıllık %23 oranında büyüyecektir. 2025 ve 2035 yılları arasında tahmin edilen dolaşımdaki elektrikli araç sayısı Şekil 1'de gösterilmiştir (IEA, 2024).



Şekil 1. 2025 ve 2035 yılları arasında tahmin edilen elektrikli araç sayısı (IEA, 2024)

1.1. Toplu Taşıma ve Elektrikli Araçlar

Toplu taşıma, bireylerin belirli bir ücret karşılığında veya ücretsiz olarak toplu olarak taşınmasını sağlayan kamu veya özel sektör tarafından işletilen bir ulaştırma sistemidir. Toplu taşıma genellikle şehir içi veya şehirler arası seyahatleri kapsar ve otobüs, tren, metro, tramvay, trolleybüs, gemi gibi araçları içerir (Verma ve Ramanayya, 2014) Toplu taşıma sistemleri, trafik yoğunluğunu azaltmak, karbon emisyonlarını düşürmek, yakıt tüketimini optimize etmek ve ulaşımда sosyal adaleti sağlamak gibi çevresel ve ekonomik faydalar sunar. Toplu taşıma, kent içi mobilitayı sağlamanın yanı sıra, trafik yoğunluğunu azaltmayı ve hava kalitesini iyileştirme

açısından kritik yolcu taşıma türüdür (Plant, 2007). Bireysel araç kullanımı yerine toplu taşıma tercihi ile sağlanan çevresel ve maddi faydalar yanında, elektrikli araçların toplu taşıma sistemlerine entegrasyonu, toplu taşımanın çevresel faydalarını maksimize ederek kentlerde yaşam kalitesini arttırabilmektedir. Elektrikli otobüsler ve tramvaylar gibi toplu taşıma araçları, geleneksel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla önemli ölçüde daha az karbon dioksit ve diğer zararlı emisyonlar yaymaktadır. Ayrıca, elektrikli araçların kullanımı, kentlerde gürültü kirliliğini azaltma potansiyeline de sahiptir (Tsoi ve ark., 2023).

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada toplu taşımada elektrikli araç kullanımının yaygınlaştırılması için çalışmalar ve planlamalar sürdürölmektedir. Örnek olarak farklı ölkelerde karar verici kurumlar, hükümet politikaları eşliğinde, toplu taşımada elektrikli ve sıfır emisyonlu otobüsler için yeni finansmanlar kaynakları açıklayarak otobüs filolarının elektrikli hale dönüştürölmesini hedeflemektedir. Örneğın, İngiltere’de, mevcut otobüs filosunun dönüşümü için 129 milyon GBP (160 milyon USD) sağlayan bir dönüşüm program başlatmıştır. Mart 2021’de, başlatılan bu dönüşüm program kapsamında ölkede genelinde otobüslerin geleceğı için bir vizyon ortaya konarak sıfır emisyonlu bir otobüs filosuna geçiş için bir yol haritası belirlenmiştir. Bu program kapsamında İngiltere genelinde 4,200 sıfır emisyonlu otobüs finanse edilmiştir. Ayrıca, sıfır olmayan emisyonlu otobüslerin satışının sonlandırılması da değeriendirilmektedir (Department for Transport, 2023).

İngiltere’nin yanı sıra, mevcut otobüs filolarının elektrikli otobüsler ile dönüştürölmesi birçok farklı ölkede için de değeriendirilmektedir. Hindistan, 2027 yılına kadar toplu taşımada 50,000 elektrikli otobüs bulundurmayı hedeflemektedir. (IEA, 2024). Latin Amerika ölkeleri için planlanan iş birliğı programı kapsamında Medellín, Mexico City, Santiago, ve Sao Paulo gibi büyük kentlerde otobüs filolarının 3,600 adet elektrikli otobüs ile yenilenmesi planlanmıştır (International Council on Clean Transportation, 2019). Şili devleti, ulusal stratejisi gereğı, çeşitli elektrifikasyon hedefleri belirleyerek 2035 yılına kadar otobüs filolarının tamamının sıfır emisyonlu otobüsler ile işletilmesini hedeflemektedir. Ayrıca Şili’de, 2035 yılında satılacak hafif ve orta büyüklükteki toplu taşıma araçlarının tamamı (otobüsler, taksiler ve paylaşımlı taksiler) tamamı sıfır emisyonlu olacak şekilde satışa sunulacaktır (Gobierno de Chile, 2021). Dünyada toplu taşımanın elektrifikasyonu konusunda Çin devleti ciddi planlamalar yapmaktadır. Çin’in Taipei kentinde 2030 yılına kadar toplu taşıma

hizmeti veren otobüs filosunun tamamen elektrikliye dönüştürülmesi planlanmıştır. Ayrıca, Filipinler, Solomon Adaları, Dominik Cumhuriyeti, Nepal, Pakistan ve Panama dahil olmak birçok ülke de otobüs filolarının elektrifikasyonu için çeşitli hedefler belirlemişlerdir (ICE, 2019).

Son yıllarda dünyada ve ülkemizde karayolu taşımacılığında elektrikli otobüsler birçok kentte yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle kent içinde sıfır hava ve gürültü kirliliği sağlamaları nedeniyle yolcular tarafından tercih edilmektedir. Bununla birlikte, elektrikli ve otonom taksi sistemlerinin kullanımı da son yıllarda giderek artmaktadır. Ülkemizde henüz otonom taksi sistemleri bulunmamakla birlikte, taksi filolarında elektrikli araçların kullanımı son yıllarda artış göstermektedir. Örneğin, İzmir ve İstanbul'da elektrikli taksiler mevcut taksi filolarında kullanılmaya başlanmış, ancak tamamen elektrikli taksi filoları henüz oluşturulmamıştır.

Elektrikli taksiler için, filodaki araç sayısının ve filonun kapasitesinin verimli bir şekilde kullanımı ile planlanması büyük önem taşımaktadır. Yoğun yolcu taşımacılığının yapıldığı bölgeler göz önüne alındığında, elektrikli araçların menzil kısıtlamaları ve uzun şarj süreleri, kimi zaman filo içindeki araçların etkin kullanımını azaltmakta ve bu durum, özellikle yolcu talebinin yoğun olduğu zirve saatlerde, yolculara daha az araç ile hizmet verilmesine neden olmaktadır. Bu da yolcu bekleme sürelerinin artmasına yol açmakta ve aynı büyüklükte içten yanmalı motorlu araçlardan oluşan bir taksi filosuna kıyasla daha verimsiz bir işletme sürecinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durum, elektrikli araçların sağladığı ekonomik faydanın göz ardı edilmesine yol açarak tercih edilebilirliğini azaltmakta ve hem sürücüler hem de filo operatörleri açısından güvenilir bir çözüm olarak görülmemesine neden olmaktadır.

Elektrikli araçlarla sunulan taksi hizmetinde verimliliğin artırılması için araçların belirli bir plan çerçevesinde şarj edilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle, şarj istasyonlarının en uygun şekilde konumlandırılması ve şarj planlamasının etkin bir şekilde yapılması, elektrikli araç filosunun operasyonel sürdürülebilirliğini sağlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreçte, gerekli altyapının oluşturulması ve geliştirilmesi, elektrikli taksi sistemlerinin uzun vadeli başarısı için büyük önem arz etmektedir. Elektrikli araçların, fosil yakıtlı araçlarla ekonomik açıdan rekabet edebilir hale gelmesi, şarj istasyonlarına erişim süresi,

müsait bir istasyon bekleme süresi ve bataryayı şarj etmek için harcanan sürenin en aza indirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, elektrikli araç filolarında uzun şarj süreleri nedeniyle ortaya çıkan beklemler ve sistemin kapasite kullanım oranındaki düşüşler, batarya değişim istasyonlarının alternatif bir çözüm olarak kullanılmasıyla azaltılabilmektedir (Vallera ve ark., 2021). Batarya değişim yönteminde, elektrikli araçlar boşalan bataryalarını batarya değişim istasyonlarında dolu bataryalarla değiştirerek şarj sürelerini önemli ölçüde kısaltmakta ve teorik olarak bu süreyi minimum seviyeye indirmektedir. Bu yöntem, elektrikli taksi filolarının operasyonel verimliliğini artırarak sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturulmasına katkı sağlayabilir.

Bu çalışma kapsamında, elektrikli araç filolarında şarj işlemlerinin yanı sıra batarya değişim stratejisinin uygulanmasıyla sağlanabilecek faydaların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, batarya değişim stratejisinin performansının değerlendirilmesi için bir mikro simülasyon modeli geliştirilmiş ve farklı senaryolar altında elektrikli taksi filosunun performansı analiz edilmiştir. Bu tez çalışması çeşitli bölümler halinde yapılandırılmıştır. İlk bölümde, güncel literatür araştırması yapılarak çalışma kapsamında ele alınan problemin tanımı ve ilgili kavramsal çerçeve incelenecektir. Bu bölümde, mevcut araştırmalar değerlendirilerek konunun bilimsel bağlamı ortaya konacaktır. İkinci bölümde, elektrikli araçlarla ve toplu taşıma ile ilgili temel bilgiler sunulacak ve bu araçların taşımacılık sistemlerindeki rolü ele alınacaktır. Elektrikli araç teknolojisi, batarya yönetim sistemleri ve şarj altyapısı gibi konulara yer verilerek çalışmanın teorik temeli oluşturulacaktır. Üçüncü bölümde, modern bir mikrosimülasyon modelinin geliştirilme süreci ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Modelin oluşturulma aşamaları, kullanılan yöntemler ve simülasyon parametreleri detaylandırılacaktır. Dördüncü bölümde, senaryo analizleri gerçekleştirilecek ve farklı işletim stratejileri değerlendirilerek sistemin performansı incelenecektir. Elektrikli araç filolarında kullanılan farklı işletim senaryolarının etkinliği karşılaştırılacak ve elde edilen sonuçlar analiz edilecektir. Son olarak, modal işletim sonuçları değerlendirilecek ve çalışma kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda genel bir değerlendirme yapılacaktır. Bu bölümde, çalışmanın ana çıktıları özetlenecek ve elektrikli araç filolarının verimliliğini artırmaya yönelik öneriler sunulacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dünyada son yıllarda elektrikli araç şarj yönetimi ile alakalı olarak yapılan çalışmaların bazıları aşağıdaki gibidir:

Turan ve ark. (2020) otonom elektrikli araçlardan oluşan bir filoyu işleten ve kâr maksimizasyonu hedefleyen bir ulaşım hizmet sağlayıcısının ortak güzergah planlama, batarya şarjı ve fiyatlandırma sorunlarını ele almıştır. Statik planlama problemiyle başlayan çalışma, zamanla değişmeyen sistem parametreleri altında optimal statik politika belirlemiş, ancak bu politikanın müşteri bekleme sürelerini uzatarak ve kârları düşürerek verimsizliklere yol açabileceği gösterilmiştir. Rastgele seyahat talepleri, yenilenebilir enerji kullanılabilirliği ve elektrik fiyatlarındaki belirsizlikleri yönetebilmek için gerçek zamanlı bir politika önerilmiş ve bu politikanın karmaşık dinamik programlama ile tam olarak çözülemeyeceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, derin pekiştirmeli öğrenme yöntemi kullanılarak yaklaşık optimal bir kontrol politikası geliştirilmiş ve Manhattan ve San Francisco'da yapılan vaka çalışmalarında bu politikanın ağ istikrarı ve kârlılık açısından etkinliği kanıtlanmıştır.

Alam ve ark. (2023) çalışmasında, elektrikli araçların sürücüler arasında benimsenmesinde önemli bir engel olan menzil kaygısını ele almak amacıyla, sürücülerin günlük seyahat desenlerini tahmin etmek için optimizasyon tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, elektrikli araçların şarj ihtiyaçları, ajan tabanlı simülasyon (ATS) yöntemiyle analiz edilmiştir. Çalışma, Chicago şehri örneği üzerinden gerçekleştirilmiş ve sürücü çalışma saatleri ile başlangıç şarj durumuna ilişkin duyarlılık analizleriyle günlük ortalama araç kullanım mesafesi ve mevcut şarj altyapısındaki talep yoğunlukları belirlenmiştir. Bu bulgular, gelecekteki şarj altyapısı yatırımlarının önceliklendirilmesine katkı sağlayarak menzil kaygısının azaltılmasına ve elektrikli araçların benimsenmesine destek olmayı amaçlamıştır.

Rao ve ark. (2015) , elektrikli araçlara enerji sağlamanın önemli bir yöntemi olan batarya değişim stratejisini ele almış ve elektrikli araç kullanıcılarının batarya değişim davranışının batarya değişim istasyonunun şarj davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Sürücünün batarya değişim davranışının enerji şebekesi ve üretim maliyetine olan etkilerini belirlemek amacıyla optimizasyon tabanlı bir şarj yönetimi önerilmiş ve enerji şebekesi ve üretim tarafındaki etkileri simüle edilmiştir. Ampirik sonuçlar, önerilen şarj yönetim stratejisinin enerji şebekesi ve enerji

üreticileri için önemli faydalar sağladığını göstermiştir. Şebekesi tarafından bakıldığında, şarj yönetim, güç yükünü dengelemekte ve tepe-vadi yük farkını azaltmaktadır. Üretim tarafında ise, enerji üreticileri kömür tüketimini ve maliyetlerini azaltmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntem ile enerji şebekesine daha fazla yenilenebilir enerji entegre edilmesine olanak tanımaktadır. Ampirik sonuçlar aynı zamanda elektrikli araçların ölçek ekonomisi özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca elektrikli araç sayısındaki artışla birlikte, şarj yönetiminin enerji şebekesi ve üretim tarafındaki faydaları belirgin ölçüde artacağını altı çizilmiştir.

Jenn (2020) çalışmasında, elektrikli araçların yolcu taşımacılığı hizmetlerinde kullanımının önemli emisyon azaltım faydaları sağlayabileceği belirtilmiştir. Ancak bu faydaların, araç kullanım yoğunluğuna bağlı olduğu ifade edilmiştir. Kaliforniya'da Uber ve Lyft verileri kullanılarak yapılan detaylı analizlerle elektrikli araç kullanımı hakkında önemli bulgular elde edilmiştir. Son iki yılda elektrikli araç kullanımının hızlı bir artış gösterdiği ve oransal olarak küçük bir elektrikli araç filosunun, mevcut şarj altyapısı tarafından sağlanan elektriğin büyük bir kısmını kullanmaya başladığı belirtilmektedir. Elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlarla aynı hizmet seviyesini sunamayacağına dair endişelerin abartıldığı ve iki teknoloji arasında sunulan hizmetler açısından istatistiksel bir fark bulunmadığı ortaya konmuştur. Son olarak, elektrikli araçların potansiyel çevresel ve emisyon azaltım faydalarının, fosil yakıtlı araç kullanımına göre yaklaşık üç kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Lai ve Li (2024) çalışmalarında, elektrikli araçlarla yapılan yolcu taşımacılığı filosunu desteklemek için araç şarj ve batarya değişim istasyonlarının entegre planlanması ele alınmıştır. Optimizasyon modeliyle yolcu talebi, şarj dengesizlikleri ve yoğunluk gibi faktörler değerlendirilmiştir. Manhattan vaka çalışmasında, entegre planlamanın yalnızca batarya değişim veya yalnızca şarj istasyonu planlamalarına kıyasla sırasıyla %11,7 ve %17,5 daha fazla kâr sağladığı tespit edilmiştir.

Wang ve ark (2023) batarya değişim istasyonlarının genel şarj istasyonlarına önemli bir alternatif olduğu vurgulanmış ve istasyon düzeyinde batarya değişim talebinin tahmin edilmesinin istasyonların gerçek zamanlı işletimi için faydalı olacağı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, Pekin'deki 36 batarya değişim istasyonundan toplanan 2.529 batarya değişim olayını içeren gerçek bir veri seti analiz edilerek batarya değişim talep desenleri incelenmiştir. Ayrıca, zaman serisi talep desenlerini

dikkate alarak batarya değişim talebini tahmin etmek amacıyla bir dizi derin öğrenme yöntemi geliştirilmiştir. Kullanılan modeller arasında Uzun Kısa Süreli Bellek , Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek ve Çift Yönlü Gated Recurrent Units yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, bu dört derin öğrenme modelinin Destek Vektör Regresyonu gibi geleneksel makine öğrenimi yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

(Justin ve ark., 2020) elektrikli uçakların batarya değişim ve şarj stratejileri ele almıştır. Çalışmada uçakların batarya değişim stratejilerinin incelenmesi için güç optimizasyonu ve yatırım maliyeti optimizasyonu olarak 2 adet optimizasyon stratejisi önerilmiştir. İlk strateji, şebekeden çekilen tepe güç talebini ve elektrik harcamalarını azaltmayı amaçlarken; ikinci strateji, batarya ve şarj cihazı alım maliyetlerini en aza indirmeyi hedeflemiştir. Her iki strateji de iki adımda uygulanmıştır: uygun batarya ve şarj istasyonu kombinasyonlarının belirlenmesi ve şarj takviminin oluşturulması. Çalışma, optimize edilmemiş stratejilere kıyasla %61'e varan tepe güç talebi azalımı ve %25'e varan elektrik maliyeti tasarrufu sağlamıştır.

Literatür taraması, elektrikli araçların şarj yönetimi analizinde çeşitli modelleme stratejilerinin tercih edildiğini ortaya koymaktadır. Bu stratejiler arasında derin öğrenme algoritmaları, matematiksel modelleme yaklaşımları ve farklı optimizasyon teknikleri öne çıkmaktadır. Ancak batarya değişim stratejilerinin ele alındığı çalışmalar incelendiğinde, mikro simülasyon yöntemlerinin oldukça sınırlı kullanıldığı dikkat çekmektedir. Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunda özellikle toplu taşıma sistemlerine entegre edilmiş elektrikli taksi filoları gibi filo yönetimi senaryolarına odaklanılmadığı görülmektedir. Bu tez çalışması, toplu taşımada elektrikli araçların batarya değişim stratejilerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz ederek, literatüre bu alanda önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araçlar, hareket etmek için birincil veya ikincil güç kaynağı olarak elektrik enerjisinden yararlanan karayolu, su yolu, demiryolu ve havayolu taşıtlarını ifade eder. Geleneksel içten yanmalı motorlar yerine elektrik motorlarıyla çalışan bu araçlar, fosil yakıt tüketimini azaltarak çevre dostu ve enerji verimli bir ulaşım alternatifi sunar. Karayolu ulaşımında elektrikli araçlar; bireysel kullanım, toplu taşıma, ticari taşımacılık ve mikro ulaşım gibi çeşitli alanlarda yaygın şekilde tercih edilmektedir. Gelişen batarya teknolojileri ve şarj altyapısındaki ilerlemeler, bu araçların daha geniş bir kullanım alanına yayılmasını sağlamaktadır. Binek elektrikli araçlar, otomobil ve taksi gibi bireysel ve kısa mesafeli taşımacılıkta yaygın olarak tercih edilirken, elektrikli otobüsler ve minibüsler şehir içi ve şehirlerarası toplu taşıma hizmetlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, elektrikli kamyonlar ve dağıtım araçları, lojistik ve taşımacılık sektöründe çevre dostu ve maliyet etkin çözümler sunar. Mikro ulaşım araçları arasında yer alan elektrikli bisiklet ve scooterler ise kısa mesafelerde pratik ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi sağlamaktadır. Raylı sistemler, örneğin tramvay ve metro araçları da doğrudan elektrik hatlarından güç alarak hareket eder ve şehirlerin ulaşım ağlarının temel bileşenleri arasında yer alır. Şekil 2’de çeşitli elektrikli karayolu araçları görülmektedir.



Şekil 2. Sırasıyla elektrikli scooter elektrikli kamyon elektrikli uçak ve elektrikli toplu taşıma araçlarının görünüşleri (Volvo, 2024) (Pipitrel, 2024) (Otokar, 2023)

3.2. Elektrikli Araçların Gelişimi

Son yıllarda elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedefleri doğrultusunda otomotiv endüstrisinde devrim niteliğinde bir dönüşüm başlatmıştır. Fosil yakıtların neden olduğu karbon emisyonlarını azaltmak, hava kirliliğini önlemek ve enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla yaygınlaştırılan elektrikli araçlar, son yıllarda batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, şarj altyapısının yaygınlaşması ve devlet destekleri sayesinde daha da yaygınlaşmaktadır. İlk örnekleri 19. yüzyıla dayanan elektrikli araçlar, uzun süreli menzil ve yüksek maliyet gibi teknik engeller nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahipti. Ancak lityum-iyon bataryaların geliştirilmesi, hızlı şarj teknolojilerinin yaygınlaşması ve üretim maliyetlerinin azalması, elektrikli araçların erişilebilirliğini artırmıştır. Günümüzde birçok otomobil üreticisi, içten yanmalı motorlu araçların üretimini azaltarak tamamen elektrikli modellere yönelmektedir. Bu dönüşüm, sadece otomotiv sektörünü değil, enerji üretim ve dağıtım ağlarını da kapsayan geniş bir ekosistemin dönüşümünü beraberinde getirmekte ve geleceğin ulaşım altyapısını şekillendirmektedir.

3.3. Elektrikli Araç Türleri

Elektrikli araçlar üç ana kategoriye ayrılırlar: Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicles: HEV), şarj edilebilir elektrikli araçlar (Plug-in Electric Vehicles: PHEV) ve tam elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles: BEV). Hibrit elektrikli araçlar, hem içten yanmalı motor (benzinli veya dizel) hem de elektrik motoru ile çalışan araçlardır. Bu araçlar, yakıt verimliliğini artırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için iki güç kaynağını bir arada kullanır. Elektrik motoru düşük hızlarda ve kısa mesafelerde aracı hareket ettirirken, içten yanmalı motor ise daha yüksek hızlarda ve uzun mesafelerde devreye girer. Diğer elektrikli araçlardan farklı olarak, hibrit araçlar harici bir şarj istasyonuna bağlanmadan kendi içten yanmalı motorlarıyla bataryalarını şarj edebilir. Bu sayede daha uzun menzil sunarlar ve şarj altyapısının yetersiz olduğu bölgelerde bile sorunsuz bir şekilde kullanılabilirler.

Şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PHEV), hem içten yanmalı motor (benzinli veya dizel) hem de şarj edilebilen bir batarya ile çalışan araçlardır. Geleneksel hibrit araçlardan farklı olarak, PHEV'lerin bataryaları harici bir elektrik kaynağına bağlanarak şarj edilebilir ve bu sayede daha uzun bir elektrikli sürüş menzili sunar. Kısa mesafelerde tamamen elektrik gücüyle çalışan bu araçlar, batarya seviyesi düştüğünde içten yanmalı motoru devreye alarak yolculuğa devam edebilir. Bu özellikleri sayesinde PHEV'ler, şehir içi kısa mesafelerde sıfır emisyonlu sürüş sağlarken, uzun yolculuklarda menzil endişesi olmadan yakıtlı motoru kullanarak esneklik sunar. Hem çevre dostu hem de pratik bir çözüm olarak, geçiş sürecinde önemli bir rol oynarlar.

Tam elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles - BEV), yalnızca elektrik motoru ile çalışan ve enerjilerini tamamen şarj edilebilir bataryalardan sağlayan araçlardır. İçten yanmalı bir motor bulundurmazlar ve egzoz emisyonu üretmezler, bu da onları tamamen çevre dostu bir ulaşım seçeneği haline getirir. BEV'ler, bataryalarını harici bir şarj istasyonu veya ev tipi prizler aracılığıyla şarj eder. Şehir içi ve kısa mesafeli yolculuklarda oldukça verimli olan bu araçlar, teknolojinin ilerlemesiyle daha uzun menziller sunmaya başlamıştır. Enerji maliyetlerinin düşüklüğü ve bakım gereksinimlerinin azlığı, BEV'leri ekonomik açıdan da cazip kılar. Ancak, şarj altyapısının yaygınlaşması ve şarj sürelerinin kısalması, bu araçların daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşması için önemli bir faktördür.

3.4. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları

Elektrikli araç şarj istasyonları, elektrikli araçların enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmış altyapı sistemleridir ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin temel bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu istasyonlar, genellikle birden fazla şarj ünitesi ve kontrol mekanizmalarından oluşur ve kullanıcıların araçlarını hızlı ve güvenli bir şekilde şarj etmelerini sağlar. Şarj istasyonlarının teknolojik altyapısı, enerji dağıtımı ve kontrolü gibi unsurları içermekte olup, bazı sistemlerde hareketli şarj cihazları park alanları arasında konumlanarak esneklik sağlamaktadır (Mastoi ve ark., 2022). Ayrıca, şarj istasyonları enerji dalgalanmalarını dengelemek ve elektrik şebekesi üzerindeki yükü optimize

etmek için dinamik fiyatlandırma sistemleri gibi akıllı kontrol mekanizmalarına sahiptir.

3.5. Batarya Değişim İstasyonları

Batarya değişim istasyonları, elektrikli araçların enerji altyapısındaki şarj sürelerini azaltmak ve kullanım kolaylığını artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi bir çözümdür. Geleneksel şarj istasyonlarından farklı olarak, batarya değişim istasyonları, boşalmış bataryaları otomatik sistemlerle tam dolu bataryalarla değiştirerek şarj süresini dakikalara indirir (Liang ve Zhang, 2018). Batarya değişim istasyonlarında, robotik kollar veya özel mekanik sistemler kullanılarak batarya değişimi güvenli ve hassas bir şekilde gerçekleştirilir. Ayrıca, batarya değişim stratejisi, enerji talebini yönetmede esneklik sağlayarak, değiştirilen bataryaların talebin düşük olduğu saatlerde şarj edilmesine olanak tanır ve böylece elektrik şebekesi üzerindeki yük azalmaktadır (Yang ve ark., 2021). Tipik bir batarya değişim istasyonunun görünüşü Şekil 3 ve Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 3. Tipik bir batarya değişim istasyonu (Wired, 2024)



Şekil 4. Tipik bir batarya değişim istasyonunun görünüşü(Invest in China, 2024)

Batarya değişim stratejisi, geleneksel şarj stratejisi ile karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sunar. Batarya değişim stratejisi, geleneksel şarj stratejisi ile karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sunar. Şarj süresini önemli ölçüde kısaltarak araçların daha kısa sürede yeniden hizmete girmesini sağlar ve bu sayede filo verimliliğini artırır. Özellikle yolcu talebinin yoğun olduğu zirve saatlerde, uzun şarj sürelerinden kaynaklanan hizmet kesintilerini önleyerek yolcu bekleme sürelerini azaltır. Şarj altyapısına olan bağımlılığı azaltırken, sınırlı şarj istasyonlarının oluşturduğu kapasite sorunlarını da ortadan kaldırabilir. Ayrıca, batarya değişim istasyonları bataryaların merkezi olarak yönetilmesine olanak tanıyarak batarya ömrünü uzatabilir ve enerji kullanımını optimize edebilir. Bu strateji, elektrikli araçların menzil kaygısını ortadan kaldırarak daha geniş çapta benimsenmesini teşvik eder ve özellikle ticari filolar için sürdürülebilir ve verimli bir işletim modeli sunar. Bu avantajlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Elektrikli araçların bataryalarını değiştirmek, geleneksel şarj yöntemlerine göre çok daha hızlıdır. Elektrikli araçlar, boş bataryalarını dolu bataryalarla birkaç dakika içinde değiştirebilirler (Ahmad ve ark., 2019)
- 2) Batarya değişim istasyonları, bataryaları optimum koşullarda şarj ederek batarya ömrünün uzamasına katkı sağlarlar (Vallera ve ark., 2021).
- 3) Elektrikli araç sahipleri veya filo yöneticileri bataryayı satın almak yerine kiralayarak ilk yatırım maliyetini azaltabilirler (Schmidt, 2021).

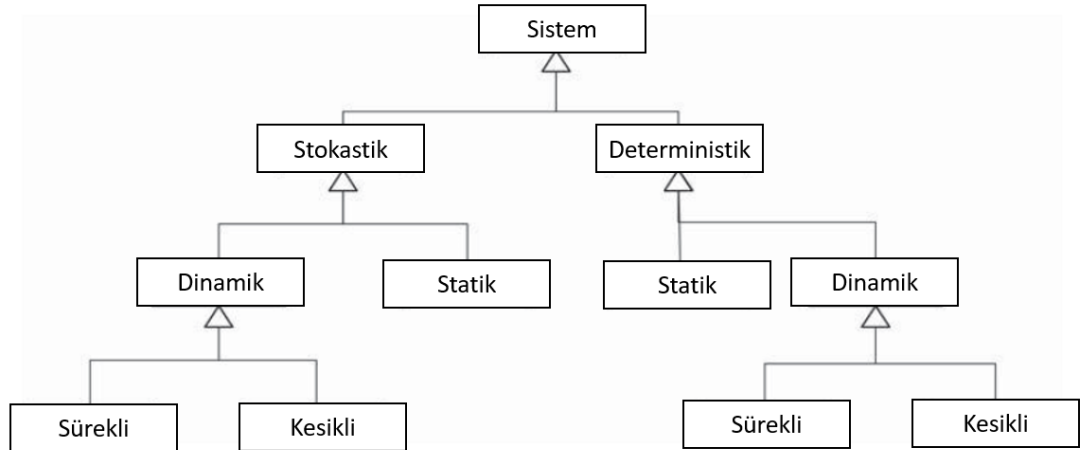
- 4) Batarya değişim istasyonları, elektrik şebekesinin dengesini sağlamak için enerji depolama ve geri besleme sistemleri olarak kullanılabilir (Revankar ve Kalkhambkar, 2021).
- 5) Geleneksel şarj istasyonlarına kıyasla, batarya değişim istasyonları daha az sayıda hızlı şarj ünitesi gerektirir (Ahmad ve ark., 2020).
- 6) Daha etkili batarya yönetimi ve geri dönüşüm mekanizmaları sayesinde karbon ayak izi azalır ve ulaşım endüstrisinin çevresel etkileri azaltılmış olur (Jiang ve ark., 2019).
- 7) Batarya değişim istasyonları, filo araçları ve ticari kullanımlar için daha verimli bir seçenek sunar. Bu istasyonlar, kentlerdeki kısıtlı alanların kullanımını optimize ederek trafik yoğunluğunun azaltılmasına katkı sağlarlar (Zhan ve ark., 2022).
- 8) Batarya değişim stratejisi, uzun vadede işletme maliyetlerini azaltarak enerji maliyetlerini optimize eder.

4. YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, elektrikli taksi gibi toplu taşıma araçları için batarya değişim stratejisinin etkinliğini analiz etmek amacıyla ajan tabanlı bir mikro simülasyon modeli hazırlanmıştır. Modelin oluşturulma süreci ve aşamaları, yöntem bölümünde detaylı olarak açıklanacaktır. Çalışmada öncelikle mikro simülasyon modellemesi yönteminin kavranması amacıyla sistem kavramı model kavramı ve bilgisayar simülasyonu hakkında bilgiler verilecek ve daha sonra simülasyon modelini hazırlanması ve konseptler model hakkında okuyucu bilgilendirilecektir

4.6. Sistem Kavramı ve Simülasyon

Sistem, belirli bir amaca yönelik olarak birbiriyle ilişkili bileşenlerden oluşan ve bu bileşenler arasında belirli kurallar çerçevesinde etkileşimlerin gerçekleştiği bir yapıyı ifade eder. Sistemler, fiziksel veya soyut olabileceği gibi, dinamik veya statik özellikler gösterebilir. Blanchard ve Fabrycky (1981) tarafından verilen tanıma göre, bir sistem, ortak bir amaç doğrultusunda işbirliği yapan birbirine bağlı bileşenler topluluğudur. Şekil 5'te sistemlerin sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 5. Sistemlerin sınıflandırılması

Simülasyon, doğadaki karmaşık sistemleri analiz etmek için günümüzde yaygın olarak kullanılan bir analiz yaklaşımıdır. Simülasyon ile incelenen sistem

hakkında öncelikle basitleştirilmiş bir temsili model oluşturulur. Ardından belirlenmiş hedefler doğrultusunda işletim çalışmaları gerçekleştirilir. Bu hedefler arasında gerçek performansının iyileştirilmesi, maliyet-fayda analizi, duyarlılık analizleri yer alabilir.

4.7. Model Kavramı ve Modelleme

Gerçek hayatta mevcut olan veya konsept olarak tasarlanan bir sistemin bilgisayar ortamında tekrar soyutlamalar yolu ile tasvir edilmesine modelleme adı verilmektedir (Beaverstock ve ark., 2017). Modelleme ile elde edilen sistemin basitleştirilmiş temsili ise model olarak adlandırılır. Modelleme sürecinde, soyutlama ve basitleştirme adımları sıklıkla kullanılmaktadır. Sistemin aynı detayla bilgisayar ortamında modellenmesi yerine yapılan basitleştirme birçok fayda sağlamaktadır. Eğer bir sistemin tüm detayları en ince ayrıntısına kadar modellenmesi durumunda, bilgisayar ortamındaki simülasyon maliyeti, modellemesi yapılan sistemin maliyetine yaklaşabilecektir; bu da modelin başlangıçta oluşturulmasını engelleyici bir faktör oluşturabilmektedir. Modeller aşağıdaki şekillerde sınıflandırılmaktadır: (Altıok ve Melamed, 2007; Rosetti, 2016).

1) Fiziksel model: Gerçek bir nesnenin basitleştirilmiş veya küçültülmüş halidir (örneğin, bir uçağın küçük ölçekli modeli).

2) Matematiksel - Analitik Model: matematiksel değişkenler arasındaki ilişkileri ya da denklemleri içeren bir yapıdır (örneğin, bir fabrika katındaki iş akışını açıklayan denklemler).

3) Simülasyon modeli: Simülasyon modeli, bir sistemin işleyişini temsil eden programlanmış bir yapıdır ve genellikle zaman çizgisi boyunca sistemin nasıl değiştiğini gösterecek şekilde tasarlanır. Bu tür modeller, sistemin dinamiklerini, bileşenler arasındaki ilişkileri ve olasılıksal değişkenleri içerir. Özellikle rastgelelik içeren süreçlerin modellenmesinde, simülasyon modelleri gerçek dünyadaki belirsizlikleri ve değişkenlikleri yansıtabilmek için olasılıksal yaklaşımlar kullanır. Monte Carlo simülasyon modeli, sistemde yer alan rastgele değişkenleri temel alarak birçok farklı senaryoyu simüle eder ve bu senaryoların sonuçlarını analiz ederek karar destek süreçlerinde kullanılır. Örneğin, zaman içinde bir üretim sürecinin işleyişi veya

bir ulaşım sisteminin farklı trafik yoğunluklarına göre performansı Monte Carlo yöntemi ile modellenebilir. Bu yaklaşım, sistemin farklı koşullarda nasıl çalışacağını anlamak ve en uygun stratejileri belirlemek için kritik bir araç olarak kullanılır.

Simülasyon modelleri, genellikle listede sayılan diğer modellere göre daha uygun maliyetli bir modelleme yöntemi olarak kabul edilebilir ve analitik modellemeye önemli bir alternatif olarak değerlendirilir. Matematiksel veya analitik modelleme ile simülasyon modellemesi arasındaki temel ayrım, performans ölçümlerinin hesaplanma şekillerinde yatmaktadır. Analitik model, matematiksel bir sorunun çözülmesini ve ilgili matematiksel formüllerin oluşturulması ile ortaya konur. Simülasyon modeli ise, simülasyon programının çalıştırılmasıyla sistemin işletim süreci boyunca toplanan performans ölçütleri kullanılır (Altiok ve Melamed, 2007)

Analitik modelleme yaklaşımında ise, bir dizi denklemle temsil edilen bir analitik kuyruk sistemi oluşturur ve bu denklemleri çözer. Simülasyon yaklaşımı ise, kuyruk sistemini bilgisayarda temsil eden bir simülasyon modelini işleterek sistemdeki ortalama iş yükü, bekleme süreleri dağılımı gibi performans ölçütleri toplanır (Altiok ve Melamed, 2007). Genelde, bir analitik modelin bir simülasyon modeline tercih edilmesi, analitik modelin çözümünün kolay olması ve hesaplama hızının simülasyon yönteminden hızlı ve maliyetinin simülasyon modelinin geliştirilmesinden düşük olması durumunda gerçekleşir. Sistemin karmaşıklığı arttıkça, simülasyon modellemesi genellikle birkaç sebepten ötürü önerilmektedir. Birincisi, analitik bir modelin varlığı nadiren mümkündür ve model tasarımcısının çözüm geliştirmek için harcadığı süre fazla olabilir. İkinci olarak, matematiksel zorluklar göz önünde bulundurulduğunda, analitik bir çözüme yönelik girişimler verimsiz görünebilir. Üçüncü olarak ise, modelleyici, sistem davranışlarını yeterince temsil edebilecek güçlü bir analitik model oluşturamayabilir.

Öte yandan, simülasyon modelleme yaklaşımı, belirlenen herhangi bir varsayım seti altında, çeşitli sistem türlerini modelleyebilme kapasitesine sahiptir. Bu yaklaşım, analitik çözümler için gereken ekstra çabayı ortadan kaldırır çünkü model tasarımcısının yapması gereken temelde özgün bir kod yazarak bir simülasyon programı geliştirmektir. Bununla birlikte, zaman zaman, geniş çaplı bir simülasyon modeli geliştirme süreci, insan emeği veya bilgisayar kaynakları açısından kısıtlayıcı olabilir. Bu durumda, modern tasarımcısı, daha basit bir simülasyon modeli

kullanmayı veya daha az etkili bir analitik modeli tercih etmeyi düşünmelidir (Rosetti, 2016).

4.8. Bilgisayar Simülasyonu

Bilgisayar simülasyonu, gerçek ya da önerilen bir sistemin bilgisayar destekli bir modelini tasarlama ve oluşturma sürecidir. Bu süreç, belirli koşullar altında sistemin davranışını daha iyi anlamak amacıyla sayısal deneyler gerçekleştirmek için kullanılır. Bilgisayar Simülasyonu, basit sistemleri incelemek için kullanılabilir de, bu tekniğin gerçek gücü, karmaşık sistemlerin analizinde kendini tam anlamıyla gösterir. Özellikle karmaşık sistemlerin dinamik davranışlarını anlamak ve değerlendirmek için vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır. Simülasyon sayesinde, sistemlerin farklı senaryolar altındaki tepkileri gözlemlenebilir ve daha bilinçli kararlar alınabilir.

Simülasyon, bir modeli incelemek için kullanılabilecek tek araç olmasa da, sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biridir. Bunun temel nedeni, simülasyon modellerinin sistemin doğasını doğru bir şekilde yansıtabilmek için oldukça karmaşık hale getirilebilmesidir. Karmaşıklığa rağmen, simülasyon analizleri uygulanabilir olmaya devam eder. Diğer analiz yöntemleri, çoğu zaman sistem hakkında daha güçlü basitleştirici varsayımlar gerektirir ve bu durum, modelin geçerliliğini sorgulanabilir hale getirebilir.

4.9. Simülasyon Modellerinin Sınıflandırılması

Simülasyon modelleri aşağıdaki şekillerde sınıflandırılabilir (Altiok ve Melamed, 2007)

Statik ve Dinamik Modeller

Statik Modeller: Bu tür modellerde sistem, belirli bir zaman anında değerlendirilir ve zamanla değişen dinamikler dikkate alınmaz.

Dinamik Modeller: Zaman faktörünün kritik olduğu dinamik modellerde sistemin durumu zamanla değişir ve süreçler bu değişim göz önünde bulundurularak incelenir.

Sürekli ve Ayırık Modeller:

Sürekli Modeller: Sistem durumu zaman içinde kesintisiz olarak değişir. Örneğin, bir rezervuardaki su seviyesinin akış, buharlaşma ve yağış gibi faktörlerle sürekli değişmesi bu tür bir modelleme ile açıklanabilir.

Ayrık (Kesikli) Modeller: Ayrık modellerde değişimler belirli zaman noktalarında gerçekleşir. Örneğin, bir üretim hattında makinelerin belirli zaman aralıklarında durması ve tekrar çalışmaya başlaması veya işçilerin belirli aralıklarla molalar vermesi ayrık bir modelleme yaklaşımıdır.

Karma Modeller: Bazı sistemler hem sürekli hem de ayrık değişim unsurlarını içerebilir.

Deterministik ve Stokastik Modeller:

Deterministik Modeller: Rastgelelik unsuru bulunmaz ve sistemin girdileri sabittir.

Stokastik Modeller: Rastgele girdilerin söz konusu olduğu sistemler stokastik olarak değerlendirilir. Örneğin, bir bankada rastgele zaman aralıklarında gelen müşteriler ve değişken hizmet süreleri stokastik bir sistem oluşturur.

Karma Modeller: Hem deterministik hem de stokastik girdiler bir arada bulunabilir. Hangi girdilerin deterministik, hangilerinin stokastik olduğu, modelin doğruluğu ve gerçekçiliği açısından önemlidir.

4.10. Kesikli Olay Simülasyonu (KOS) Yöntemi

Kesikli Olay Simülasyonu (KOS), zaman içerisinde sistemlerin dinamiklerini analiz etmek ve modellemek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Çoğu zaman, günlük yaşamda karşılaştığımız sistemler sürekli ve kesintisiz olarak algılanır. Ancak, her bir olayın belirli bir zaman dilimi içinde gerçekleştiği ve bu olayların çeşitli evrelerden oluştuğu göz önünde bulundurulmalıdır. KOS metodolojisinde, sistemin işleyişindeki kritik noktalar öne çıkarılır ve bu noktalar, bölünemez ve anlık olaylar olarak ele alınır. İki olay arasındaki detaylı süreçler göz ardı edilir, bu da sistem dinamiklerinin daha basit ve yönetilebilir bir yapıda analiz edilmesini sağlar. Bu sayede, sistemin kritik anlarına odaklanılarak daha doğru ve uygulanabilir bilgiler elde edilir (Yıldırım ve ark., 2020).

Örneğin, bir uçağın iniş süreci, alçalma, piste dokunma, pist boyunca yavaşlama ve son olarak kapıya ilerleme gibi bir dizi adımdan oluşur. Benzer şekilde, bir kamyonun liman operasyonları, giriş, yükleme/boşaltma, yüklerin boşaltılması ve çıkışa hazırlık gibi ardışık evrelerden meydana gelir. Ancak bu süreçler, soyutlama düzeyine bağlı olarak "uçak iniş yaptı" veya "kamyon limana ulaştı" gibi tekil olaylar olarak da değerlendirilebilir.

Kesikli olay simülasyonu yaklaşımında, sistemin durumu yalnızca olayların gerçekleştiği belirli zaman dilimlerinde güncellenir. Özellikle değişkenlik ve karmaşıklığın yüksek olduğu konteyner terminalleri ve ulaştırma sistemleri gibi alanlarda Kesinlikle olay simülasyonu gerçek sisteminin basitleştirilmesi için kritik bir rol oynamaktadır. Kesikli olay simülasyon yönteminin temel prensibi, sistemdeki olayların zamanlamalarını belirlemek ve bu olayları bir zaman çizelgesi üzerinde etkin bir şekilde yönetmektir. Örneğin, bir limanda gemilerin varışları ve yükleme boşaltma işlemleri gibi olaylar modellenir, böylece sistemdeki darboğazlar tespit edilir ve genel performans iyileştirmeleri yapılabilir (Yıldırım ve ark., 2020).

KOS, sadece ulaştırma sektörü ile sınırlı kalmayıp, üretim (Trebuna ve ark., 2023), lojistik, telekomünikasyon (Roth ve ark., 1992) ve sağlık hizmetleri (Rupnik ve ark., 2019) gibi çeşitli sektörlerde de başarıyla uygulanmaktadır. Sistemlerin optimizasyonu ve karar destek mekanizmalarının geliştirilmesinde stratejik bir analiz aracı olarak kullanılır, bu yöntemle sistemlerin performansı detaylı bir şekilde incelenir ve iyileştirilir.

4.11. Ajan Tabanlı Simülasyon (ATS)

Konteyner terminalleri, limanlar trafikteki araçların hareketi gibi karmaşık sistemlerin davranışlarını bireysel ajanların etkileşimleri üzerinden modelleyen bir simülasyon yaklaşımıdır. Bu yöntem, her bir ajanın belirli kurallara göre hareket ettiği ve çevresiyle etkileşime girdiği sistemleri incelemek için uygundur (Bonabeau, 2002). ATS, özellikle mühendislik gibi alanlarda karmaşık dinamikleri anlamak ve tahmin etmek için kullanılır. ATS'nin avantajı, makro düzeydeki davranışları mikro düzeydeki etkileşimlerden türetebilmesidir. Bu sayede, sistem genelindeki düzen ve kalıplar, bireysel ajanların basit kurallar dahilindeki davranışlarından ortaya çıkar (Macal ve

North, 2010). Bu simülasyon türü, KOS gibi geleneksel modelleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda etkili bir çözüm sunar. Özellikle doğrusal olmayan, dinamik ve adaptif sistemlerin incelenmesinde ATS önemli bir rol oynar (Railsback ve Grimm, 2019)

Gerçek sistemdeki nesnelerin, problemin çözümü için hangilerinin önemli olduğu belirlenmektedir ve bu nesneler modelde yeniden oluşturulmaktadır. Bu nesnelerin problemle ilgili davranışları analiz edilmekte ve aynı davranışlar modelde programlanmaktadır. Diğer modelleme yöntemlerine kıyasla, soyutlama becerilerinin fazla zorlanmasına gerek duyulmamaktadır ve KOS gibi sürecin sürekli düşünülmesi gerekmemektedir. Bir ajan tabanlı model oluşturma sürecinde, aşağıdaki soruların cevaplanması gerekmektedir (Borshchev, 2013).

- 1) Gerçek sistemde önemli olan nesneler hangileridir? Bu nesneler ajan olarak belirlenmektedir.
- 2) Gerçek nesneler arasında kalıcı ya da kısmen kalıcı ilişkiler mevcut mudur? Mevcutsa, ajanlar arasında uygun bağlantılar oluşturulmaktadır.
- 3) Ajanlar hareketliyse, hızları ve yolları tanımlanmaktadır
- 4) Ajanlar yalnızca dış olaylara mı tepki vermektedir? Bu durumda mesaj işleme ve fonksiyon çağrıları kullanılmaktadır.
- 5) Ajanların bir durum kavramı mevcut mudur? Durum diyagramları kullanılmaktadır.
- 6) Ajanların iç zamanlaması mevcut mudur? Zaman aşımı geçişleri ya da olaylar kullanılmaktadır.
- 7) Ajan içinde herhangi bir süreç mevcut mudur? Süreç akış diyagramları oluşturulmaktadır.

4.12. Simülasyon Modelinin Bileşenleri

4.12.1. Varlıklar (Entities)

Simülasyon modellerindeki varlıklar (Entity), sistemde hareket eden, durum değiştiren ve diğer varlıklarla ya da sistemin genel durumu ile etkileşime giren unsurlardır. Varlıklar, sistemin performans ölçütlerini doğrudan etkileyen dinamik nesneler olarak kabul edilir. Genellikle sistemde oluşturulurlar, belirli bir süre hareket ederler ve sistemden ayrıldıklarında yok edilirler. Ancak bazı varlıklar, sistemden hiç ayrılmadan sürekli döngüsel hareket halinde olabilir (Greasley, 2017).

Simülasyon bağlamında varlıklar gerçek (somut) ve yapay (soyut) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılabilir. Gerçek varlıklar, fiziksel dünyada somut bir karşılığı bulunan ve genellikle doğrudan gözlemlenebilir unsurlardır. Örneğin, bir üretim hattında işlem gören parçalar, bir taşıma sisteminde hareket eden araçlar ya da hizmet bekleyen müşteriler, gerçek varlıklara örnek olarak verilebilir. Aynı türden birden fazla varlığın aynı anda sistemde bulunması mümkündür. Yapay varlıklar ise fiziksel bir karşılığı olmayan, ancak sistemde belirli olayları veya durumları temsil etmek amacıyla tasarlanan soyut unsurlardır.

Bir simülasyon modelinin başarısı, varlıkların doğru bir şekilde tanımlanmasına ve sistem içindeki rollerinin net olarak belirlenmesine bağlıdır. Varlıkların sistem içindeki hareketleri, etkileşimleri ve süreçleri açıkça tanımlanmadığı takdirde, simülasyonun doğruluğu ve güvenilirliği ciddi şekilde azalabilir. Bu nedenle, bir sistemi modellemeye başlamadan önce, varlıkların türleri, etkileşimleri ve sistem üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmelidir.

4.12.2. Attributes (Nitelikler)

Simülasyon modellerinde varlıkları (entities) bireyselleştirmek ve özgün özellikler kazandırmak için onlara nitelikler (attributes) atanır. Nitelikler, tüm varlıklar için ortak olan, ancak her bir varlık için farklı değerlere sahip olabilen karakteristik özelliklerdir. Örneğin, bir üretim sistemindeki parçalar, son teslim tarihi (Due Date), öncelik (Priority) ve renk (Color) gibi niteliklere sahip olabilir. Bu nitelikler, her bir varlığın benzersiz özelliklerini tanımlamak ve onları bireyselleştirmek için kullanılır.

Bir sistem modeli oluşturulurken, hangi niteliklere ihtiyaç duyulduğu, bu niteliklerin nasıl adlandırılacağı ve hangi değerlerin atanacağı modelleyici tarafından belirlenir. Aynı zamanda, bu değerlerin uygun durumlarda değiştirilmesi ve

gerektiğinde kullanılması da modelleme sürecinin bir parçasıdır. Bilgisayar programlama bağlamında, nitelikler genellikle yerel değişkenler (local variables) olarak kabul edilir. Her bir nitelik, yalnızca kendisine atanan varlık için geçerli olup, diğer varlıklarla doğrudan paylaşılmaz.

4.13. Anylogic Simülasyon Yazılımı

Bu tez çalışmasında, AnyLogic simülasyon platformu kullanılarak bir simülasyon modeli tasarlanmıştır. AnyLogic, karmaşık sistemlerin dinamiklerini analiz etmek ve simüle etmek amacıyla geliştirilen kapsamlı bir mikrosimülasyon aracı olup, çeşitli endüstrilerde geniş kullanım alanına sahiptir. Bu yazılım, Kesikli Olay Simülasyonu (KOS), Sistem Dinamikleri ve Ajan Tabanlı Simülasyon (ATS) olmak üzere üç temel modelleme paradigmasını desteklemektedir. AnyLogic, farklı modelleme yaklaşımlarını tek bir simülasyon ortamında entegre edebilme özelliğiyle, gerçek dünyadaki sistemlerin daha bütüncül ve gerçekçi şekilde modellenmesine olanak tanır. Örneğin, Kesikli Olay Simülasyonu üretim hatları, lojistik süreçler ve kuyruk yönetimi gibi sistemlerin modellenmesi için kullanılırken, Ajan Tabanlı Simülasyon, bireylerin ve varlıkların etkileşimlerini ayrıntılı bir şekilde incelemek için tercih edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde AnyLogic, karmaşık ve çok katmanlı sistemlerin davranışlarını daha etkin bir şekilde analiz etme ve optimizasyon çalışmaları yapma imkânı sunmaktadır (Borshchev, 2013).

AnyLogic, lojistikten ulaştırmaya, sağlık hizmetlerinden üretime ve hizmet yönetimine kadar çeşitli sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu program, süreçleri optimize etme, maliyetleri azaltma ve daha etkin kararlar alma konularında kullanıcılara destek sağlar. Özellikle tedarik zinciri yönetimi, taşıma ağlarının optimizasyonu ve üretim süreçlerinin değerlendirilmesi gibi alanlarda ciddi faydalar sağlamaktadır. AnyLogic'in temel öğeleri ve akış diyagramı blokları, simülasyon modelleri geliştirmek için kullanılan temel araçlar ve yapı taşlarıdır. Bu öğeler, kullanıcıların çeşitli sistemler üzerinde modellemeler yapmalarını mümkün kılar. AnyLogic'in ana bileşenleri ve modelleme blokları şu şekilde sıralanabilir (Borshchev, 2013).

1) Ajanlar

Sistemdeki nesneleri veya varlıkları temsil eden temel modelleme bileşenleridir. Ajanlar, birbirleriyle ve çevresel faktörlerle etkileşime girerek sistemin dinamik yapısını oluşturur. Her ajan, kendine özgü özelliklere, davranışlara ve karar mekanizmalarına sahip bağımsız bir bileşendir. AnyLogic'in Ajan Tabanlı Simülasyon (ATS) özelliği sayesinde, ajanlar bireysel olarak modellenenebilir ve dinamik bir ortamda etkileşime girebilir. Her ajanın konumu, hareketi, karar alma süreçleri ve çevreyle etkileşimleri belirli kurallar çerçevesinde modellenir. Lojistik ve terminal operasyonları modelinde, kamyonlar, sürücüler, konteynerler veya liman vinçleri birer ajan olarak tanımlanabilir.

2) Akış Diyagramı Blokları

Sistemdeki süreçlerin görsel olarak modellenmesini sağlayan yapı taşlarıdır. Bir işlemin nasıl gerçekleştiğini, hangi adımların takip edildiğini ve süreçlerin nasıl birbirine bağlandığını tanımlamak için kullanılır. Bu bloklar, her bir sürecin zaman içindeki akışını görselleştirme açısından kritik bir öneme sahiptir ve kesikli olay simülasyonu (KOS) modellerinde sıklıkla kullanılır. Örnek olarak Liman operasyonlarında, bir konteynerin gemiden boşaltılması, depolanması, gümrük işlemlerinden geçmesi ve kamyonu yüklenmesi süreci bir akış diyagramı ve blokları ile modellenenebilir. Çalışmada kullanılan Anylogic akış diyagramı blokları Tablo 1'de gösterilmektedir.

3) Sistem Kaynakları

Sistem içinde belirli işlemleri gerçekleştiren ve sınırlı sayıda bulunan bileşenleri temsil eder. Kaynak yönetimi, sistemin verimli çalışmasını sağlamak açısından büyük önem taşır ve optimizasyon çalışmaları için temel bir unsurdur. Örnek olarak, Liman operasyonlarında, konteynerlerin taşınmasını sağlayan vinçler ve çekiciler birer kaynak olarak modellenenebilir. Terminalde bulunan giriş kapıları, yükleme boşaltma noktaları veya depo alanları, sistem içindeki sınırlı kaynaklar olarak ele alınabilir.

4) Kuyruklar

Sistem içinde ajanların belirli bir işlem için bekleme sürelerini tanımlayan bileşenlerdir. Gerçek dünyadaki birçok süreçte olduğu gibi, simülasyon modellerinde de kaynakların sınırlı olması nedeniyle bazı ajanların belirli bir noktada beklemesi gerekebilir. Kuyruk analizi, sistemde oluşabilecek darboğazların belirlenmesi ve hizmet süreçlerinin iyileştirilmesi açısından önemli bilgiler sağlar. Kuyruk yönetimi, sistem performansı, verimlilik ve müşteri memnuniyeti açısından kritik bir faktördür. Örnek olarak liman operasyonlarında, giriş veya çıkış kapılarında bekleyen kamyonlar bir kuyruk bloğunda modellenebilir veya bir havaalanında, yolcuların güvenlik kontrolünden geçmek için sıraya girmesi bir kuyruk sürecini ifade eder.

5) Grafikselsel Kullanıcı Arayüzü (GUI)

Simülasyon modellerinin analizini daha anlaşılır hale getirmek ve kullanıcı etkileşimini artırmak amacıyla grafikselsel bileşenler kullanılabilir. Bu bileşenler, haritalar, grafikler, tablolar ve görsel göstergeler içerebilir. Örnek olarak lojistik modellerinde, harita tabanlı görselleştirme ile kamyonların hareketleri gerçek zamanlı olarak takip edilebilir. Bu çalışmada ise, grafik kullanıcı arayüzü olarak bir trafik ağını temsil eden düğüm noktalarından oluşan bir ağ yapısı kullanılmıştır. Bu ağ, trafik akışını, araç hareketlerini ve yol kesişimlerini görselleştirmek amacıyla tasarlanmıştır.

Tablo 1. Simülasyon modelinde kullanılan bloklar

Blok	Adı	Kullanım amacı
	Source	Yolcuların üretilmesi
	Seize	Araçların yolcular tarafından çağırılması ve rezervasyonu batarya değişim istasyonlarını rezerve edilmesi
	Delay	Batarya değişiminin gecikme olarak modellenmesi

	Release	Taksilerin ve batarya değişim istasyonunun serbest bırakılması
	Sink	Seyahatleri bittikten sonra yolcuların sistemden çıkarılması
	Resources	Batarya değişimi istasyonundaki kaynakların modellenmesi

Anylogic ile simülasyon modelinin hazırlanması temel olarak aşağıdaki basamaklar kullanılır (Borschev, 2013).

1) Modelin Amacını Belirleme

Trafik simülasyonu hazırlarken, öncelikle modelin amacını net bir şekilde tanımlamak gerekir. Örneğin, batarya değişim istasyonları kapasitesini tayin etmek veya belirli istasyon sayısı ve batarya sayısı ile sistemin verimliliğini gibi amaçlar da göz önünde bulundurulabilir.

2) Modelleme Yöntemini Seçme

Geliştirilecek simülasyon modeli için kullanılacak yöntemler sistemin davranışları ve karakteristik özelliklerine göre seçilmelidir. Bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi kesikli olay simülasyonu ve ajan tabanlı simülasyon beraber kullanılmıştır kesinlikle olan simülasyonu batarya değişim istasyonlarının operasyonlarının modellemesinde ve ajan tabanlı simülasyon ise araçların trafikteki hareketleri ve aynı zamanda yolcuların taşımacılık operasyonlarının modellemesini kullanılmıştır. Kesinlikle olan simülasyonu tek bir bekleme kuyruğu içeren batarya değişim istasyonundaki operasyonu modellemek için uygundur

3) Model Bileşenlerini Tanımlama

Geliştirilen simülasyon modelinin temel bileşenleri model varlıkları veya ajanlarıdır. Modeldeki ana ajanlar yolcular araçlar bataryalar batarya değişim istasyonu ve trafik ağıdır. Her bir bileşen, sistemin bir parçasını temsil eder ve belirli davranışlara sahiptir.

4) Ajanların Davranışlarını Tanımlama

ATS ile model hazırlarken, terminalde çalışan ajanların (örneğin, gemiler, konteynerler) davranışları ve etkileşimleri tanımlanmalıdır. Bu aşamada, gemilerin terminale giriş ve çıkış kuralları, yüklerin taşınma yöntemleri ve terminal çalışanlarının görevleri gibi unsurlar belirlenmelidir. Ajanların karar alma süreçleri ve etkileşim kuralları, simülasyonun gerçekçiliğini artıracaktır.

5) Parametreler ve Değişkenlerin Tanımlanması

Modelde kullanılacak parametreler ve değişkenler, simülasyonun gerçekliği için kritik öneme sahiptir. Terminal simülasyonu için, gemi varış süreleri, yükleme kapasiteleri, bekleme süreleri ve ekipman verimlilik oranları gibi değişkenler tanımlanmalıdır. Bu parametreler, modelin performansını ve sonuçlarını doğrudan etkileyebilir.

6) Simülasyon Senaryolarının Oluşturulması

Simülasyonu başlatmadan önce, süresi, başlangıç koşulları ve sistemin ne kadar süre işletileceği edileceği gibi ayarlar yapılmalıdır. Örneğin, bir gün veya haftalık bir süre boyunca simülasyon gerçekleştirmek, farklı senaryoların analiz edilmesine yardımcı olacaktır.

7) Modeli Test Etme ve Doğrulama

Model tamamlandıktan sonra, simülasyonun doğru çalışıp çalışmadığını test etmek önemlidir. Simülasyonu çalıştırarak sonuçları gözlemleyebilir ve modelin sistemin gerçek dünyadaki davranışını yansıtıp yansıtmadığını kontrol edebilirsiniz. Beklenen sonuçlarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, modelin doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilebilir.

8) Sonuçların Analizi ve Raporlama

Simülasyon sonuçları elde edildikten sonra, bu sonuçların analiz edilmesi ve raporlanması gereklidir. Simülasyon sonucu elde edilen veriler kullanılarak performans ölçütlerinin ortalama değerleri grafikler aracılığıyla sunulur ve analiz edilir.

4.14. Simülasyon Modelinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılacak simülasyon modelinin hazırlanması aşamasında KOS ve ATS yöntemlerinin entegre edilmesi ile oluşturulan simülasyon yöntemi kullanılmıştır. KOS ile modelde batarya değişim istasyonlarındaki operasyonlar modellenmiş ve ATS yöntemi ile de araçların trafik ağındaki hareketleri detaylı bir biçimde modellenmiştir.

Simülasyon modeli hazırlanırken işletimi hızlandırmak amacı ile birtakım basitleştirmeler yapılmıştır. Model için kabuller ve basitleştirmeler aşağıdaki gibidir:

1) Yolcu Gelişleri: Yolcu gelişleri, Poisson geliş sürecine uygun olarak Negatif Üstel Dağılım ile modellenmiştir (Rosetti, 2016). Bu dağılım, yolcu varışlarının rastgele ve sabit bir ortalama hızla gerçekleştiğini varsayar.

2) Araç Hızları: Araçların ortalama hızları 25 km/saat olarak kabul edilmiştir. Bu hız, simülasyon boyunca sabit ve değişmez bir değer olarak alınmıştır.

3) Trafik Koşulları: Trafik ağındaki gecikmeler ve trafik yoğunluğu göz ardı edilerek, ağı serbest akış koşullarında işletildiği varsayılmıştır.

4) Yolcu Kuyruk Yönetimi: Hizmet bekleyen yolcular, "İlk Gelen İlk Hizmet Alır" (First Come, First Served - FCFS) prensibine dayalı bir kuyruk sisteminde beklemektedir.

5) Batarya Değişim Kuyruk Yönetimi: Batarya değişim istasyonlarında araçlar, yine "İlk Gelen İlk Hizmet Alır" (First Come, First Served - FCFS) prensibine göre yönetilen bir kuyrukta hizmet beklemektedir.

6) İstasyon Gecikme Süreleri: Araçların istasyonlarda hazırlık, kuyrukta hareket ve istasyondan ayrılma süreleri tek bir toplam gecikme süresi olarak ele alınmış ve bu süre 4 dakika olarak sabitlenmiştir.

7) Batarya Tüketimi: Araçların bataryalarının boşalması, operasyon süresi ile doğru orantılı olarak hesaplanmıştır. Yol koşullarının batarya tüketimi üzerinde herhangi bir değişikliğe yol açmadığı kabul edilmiştir.

8) Trafik Ağı Tasarımı: Simülasyon modelinde trafik ağı, belirli düğüm noktaları ve bu noktaları birbirine bağlayan bağlantı linkleri ile tasvir edilmiştir. Her düğüm noktası arası mesafe 1 km olarak kabul edilmiştir.

9) Yol Altyapısı: Caddeleri tasvir eden bağlantı linkleri, iki yönlü trafiğe uygun olarak işletilmekte ve araçların çift yönlü hareketine olanak tanımaktadır.

Simülasyon modelinde, ajanların davranışları belirli akış diyagramları ve durum diyagramları kullanılarak yapılandırılmıştır. Araçların ve yolcuların etkileşimi, merkezi bir sistem tarafından yönetilmekte ve araç-yolcu eşleştirmeleri bu sistem aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Araçlar, kendilerine atanan yolcu talepleri doğrultusunda yolcu konumuna doğru hareket eder ve yolcuyu aldıktan sonra, belirlenen hedef düğüm noktasına taşırlar. Yolculuk tamamlandıktan sonra araçlar, operasyonlarının bir parçası olarak batarya seviyelerini kontrol ederler. Batarya seviyesi, belirlenen minimum eşik değerinin altına düştüğünde, araçlar batarya değişim istasyonuna yönlendirilir.

Batarya değişim istasyonuna ulaşan araçlar, mevcut bataryalarını istasyona bırakarak, bataryalarının yeniden şarj edilmesini sağlar ve dolu bir batarya ile operasyonlarına devam ederler. Bu süreç, araçların operasyon sürekliliğini ve sistem performansını sürdürülebilir kılmak amacıyla tasarlanmıştır.

Bu modelleme yaklaşımı, her aracın bireysel davranışlarını belirleyen açık kurallar çerçevesinde sistemin dinamiklerini analiz etmeyi ve optimize etmeyi amaçlamaktadır.

5. SİMÜLASYON MODELİNİN İŞLETİMİ

5.1. İşletim Senaryosunun Oluşturulması

Çalışmada, işletim senaryoları tipik bir taksi filosu operasyonunu canlandırılması amacı ile hazırlanmıştır. Senaryolar kapsamında modelin işletim süresi, ağdaki araç sayısı, yolcu geliş dağılımı ve geliş aralıkları gibi senaryo değerleri belirlenerek farklı işletim senaryoları oluşturulmuştur.

Yolcu Gelişlerinin Modellenmesi:

Modelde yolcuların geliş aralıklarının belirlenmesi aşamasında Poisson olasılık dağılımı kullanılmıştır. Poisson dağılımı, belirli bir zaman diliminde veya alanda meydana gelen olayların sayısının dağılımını modelleyen bir olasılık dağılımıdır. Bu dağılım, ortalama olay sayısı λ (lambda) ile tanımlanır ve olayların sabit bir hızla, bağımsız olarak gerçekleştiği varsayılır. Poisson dağılımının olasılık kütle fonksiyonu (PMF), Denklem 1 ile ifade edilir.

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (1)$$

Denklemde $P(X = k)$ belirli bir zaman diliminde “k” sayıda olayın gerçekleşme olasılığını, λ belirli bir zaman dilimindeki ortalama olay sayısını (oranını), k olay sayısını ve “e” değeri ise doğal logaritma tabanını ($e=2.71828$) temsil etmektedir. Poisson dağılımı, olayların birbirinden bağımsız ve belirli bir ortalama oranla gerçekleştiği durumlarda kullanılmaktadır. (Örnek: Bir restoranın bir saat içinde aldığı müşteri sayısı veya bir fabrikada bir gün içinde oluşan arızaların sayısı). Poisson dağılımının karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir.

1) Bağımsız olaylar: Model örneğinde, yolcu gelişlerinin Poisson dağılımı ile modellenmesi durumunda, her bir yolcunun gelişinin, önceki veya sonraki yolcunun gelişinden bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Diğer bir deyişle, trafik ağında, bir yolcunun geliş anı diğer yolcuların geliş saatlerini etkilemez. Eğer trafik ağına 10 dakika boyunca ortalama 5 yolcu geliyorsa, bu 10 dakikada gelen 5 yolcunun gelişinin birbirinden bağımsız olduğu varsayılır.

2) Sabit Olay Oranı Poisson sürecinde, olayların sabit bir hızla gerçekleştiği varsayımına dayanmaktadır. Model özelinde, belirli bir zaman diliminde yolcuların geliş oranı (λ) değişmemektedir. Örnek olarak $\lambda = 3$ yolcu ifadesi birim zamanda sisteme ortalama 3 yolcu geldiği anlamı taşımaktadır.

3) Ayrık Olaylar: Poisson sürecinde, bir olayın belirli bir zaman diliminde gerçekleşme olasılığı, o zaman diliminin uzunluğu ile orantılıdır ve olayların zamanlar arası gerçekleşme süreleri sürekli değişkenlerdir. Ancak, her bir olay kendi başına ve zaman dilimi içerisinde ayrı bir noktada gerçekleşir, yani olayların zamanları "ayrık" noktalardır. Örneğin, bir saat içinde ortalama olarak 10 yolcunun geldiği bir taksi durağında, iki yolcunun tam olarak aynı saniyede durağa gelmesi matematiksel olarak ihmal edilebilir bir ihtimaldir. Bu, sürekli zaman aralığında, herhangi bir sonsuz küçük zaman diliminde yalnızca bir olayın gerçekleşme olasılığı olması, ancak birden fazla olayın aynı anda gerçekleşme olasılığının sıfır olması anlamına gelir.

Poisson dağılımı ile ilişkili olarak geliş aralığı zamanı dağılımı, Poisson sürecinde olayların bağımsız ve sabit bir oranla gerçekleşmesi durumunda kullanılır. Bu süreçte, belirli bir zaman dilimi içerisinde ortaya çıkan olayların sayısı Poisson dağılımına uygun olarak modellenirken, ardışık iki olay arasındaki süre olan ara geliş zamanı ise genellikle Üstel dağılım ile modellenir (Akinkunmi, 2019).

Üstel dağılım, Poisson sürecinin doğal bir sonucudur ve Poisson dağılımı ile doğrudan bağlantılıdır. Bu dağılım, sürekli ve pozitif değerler alır ve tek bir parametre ile karakterize edilir. Üstel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 2 ile ifade edilir.

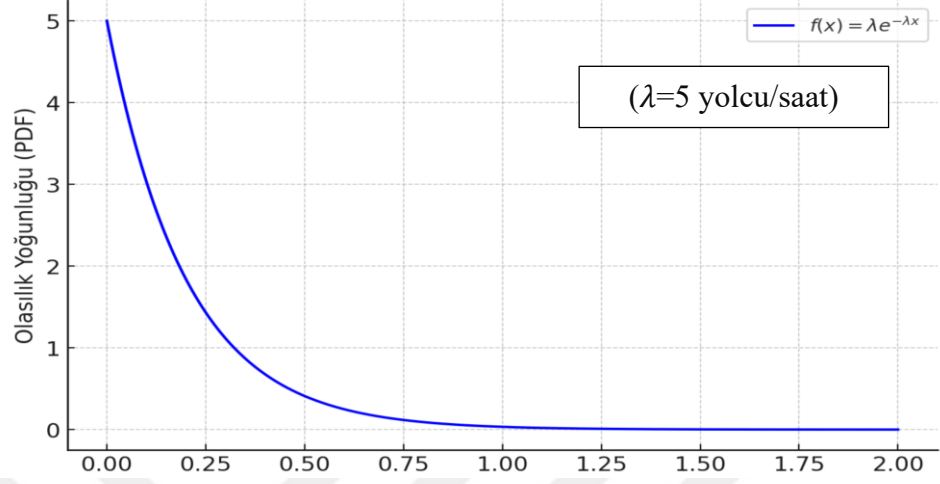
$$f(t; \lambda) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Denklemde, t geliş zaman aralığını ifade etmektedir. Üstel dağılımın $E[X]$ ve varyansı $Var[X]$ aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$E[X] = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

$$Var[X] = \frac{1}{\lambda^2} \quad (4)$$

Üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu $\lambda=5$ yolcu/saat değeri için Şekil 6’de gösterilmiştir.



Şekil 6. Üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu ($\lambda=5$ yolcu/saat)

5.2. Simülasyon Modellemesinde Rassal Sayı Üretimi

Simülasyon modellemesinde rassal sayılar, rastgele değişkenlerin örneklemeleri ve belirli olasılık kurallarına uygun stokastik süreçleri modellemek için kullanılır. Örneğin, bir taksi sistemine gelen yolcu gelişleri Poisson sürecine uygun olarak modellenmektedir. Bu süreçte, yolcu gelir aralıkları birbirinden bağımsız ve üstel dağılıma uygun olduğu kabul edilir. Her ne kadar, belirli bir sürede sisteme gelen yolcu sayısının Poisson dağılımına uyduğu kabul edilse de, simülasyon modellemesi sırasında ara geliş sürelerini üretmek çok daha pratiktir.

Simülasyon modelinde yolcuların üretimi, rastgele sayıların kullanıldığı bir süreçle gerçekleştirilir. Bu amaçla, RNG (Random Number Generator) olarak adlandırılan bir rastgele sayı üretici kullanılır. RNG, belirli bir algoritma aracılığıyla 0 ile 1 değerleri arasında uniform dağılıma sahip rastgele sayılar üretir. Bu süreçte üretilen rastgele sayılar, IID (Independent and Identically Distributed) yani Bağımsız ve Aynı Dağılımlı değişkenler olarak kabul edilir. IID ifadesi, üretilen sayıların birbirlerinden bağımsız olduğunu ve aynı olasılık dağılımından geldiklerini belirtir. Bu özellik, simülasyon sürecinde rastgele sayıların tutarlı ve öngörülebilir bir şekilde kullanılmasına olanak tanır.

Rastgele sayıların IID özelliklerini taşıması, modelde yolcu taleplerinin gerçek dünya senaryolarına uygun olarak dağıtılmasını sağlar. Bu yöntem, yolcu varış süreleri, talep yoğunluğu ve mekânsal dağılım gibi parametrelerin doğru bir şekilde modellenmesine katkıda bulunur ve simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini artırır. Simülasyon modelinde üretilen rastgele sayılar, belirli bir dağılıma uygun hale getirilmek amacıyla matematiksel dönüşümlerden geçirilir. "Rastgele" ifadesi her ne kadar sayıların üretim sürecini tanımlamak için kullanılsa da, bu sayılar gerçekte tam anlamıyla rastgele değildir. Aslında, deterministik bir algoritma ile üretilirler ve aynı başlangıç koşulları (tohum değeri) kullanıldığında aynı sayı dizisini yeniden üretmek mümkündür.

Bir rastgele sayı üretici, sayı dizisini yeniden oluşturulabilir bir şekilde deterministik bir hesaplama yöntemi kullanarak oluşturur. Üreteç, matematiksel olarak karmaşık algoritmalarla çalışır ve sonuçta elde edilen sayıların, rastgelelik özelliklerini istatistiksel açıdan sağlaması beklenir. Üretilen sayıların rastgele olarak kabul edilmesi, bu sayıların belirli istatistiksel testleri başarıyla geçmesine bağlıdır. Bu testler, üretilen sayıların (1) Homojen (Uniform) dağılım göstermesi (0 ile 1 arasında eşit olasılıkla dağılması), (2) Birbirlerinden bağımsız olması (Bir sayının diğerini öngörmemesi) gibi koşulları sağlar. Eğer bir rastgele sayı üretici bu testlerden başarıyla geçerse, üretilen sayı dizisi istatistiksel anlamda rastgele kabul edilir ve simülasyon modellerinde güvenle kullanılabilir. Bu yaklaşım, modelin güvenilirliğini ve elde edilen sonuçların tutarlılığını artırarak, gerçek dünya süreçlerinin daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanır.

Simülasyonun işletiminde, rastgele sayı üretici, çeşitli programlama dillerinde bilgisayar algoritması olarak kodlanır ve kullanıcılara prosedür çağrıları veya simgeler aracılığıyla sunulur. Sayı üretici algoritmalarının yaygın kullanılan bir tip türevsel üreteçlerdir. Lineer türevsel üreteç yöntemi, tamsayı değişkenlerle çalışan yinelenen bir düzendir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$x_i = [ax_{i-1} + c](mod\ m), i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Denklem de x_0 değerine tohum (Seed) adı verilir. Denklem kullanılarak 0 ile “ $m-1$ ” aralığında tam sayılar üretilmektedir. Üretilen tam sayı dizisi $[x_n]$ kullanılarak

standart bir rassal sayı üretici çıktısı $[u_n]$ oluşturmak için 0 ile 1 arasında aşağıdaki transformasyon denklemi kullanılmaktadır.

$$u_i = \frac{x_i}{m} \quad (6)$$

Oluşturulan rastgele sayı dizisi $[u_n]$ aslında sonlu bir dizidir ve belirli bir periyot içerisinde kendini tekrar eden bir yapı sergiler. Rastgele sayı üreticileri, matematiksel olarak deterministik algoritmalar kullanarak sayı dizilerini oluşturduklarından, belirli bir süre sonra aynı sayı dizisini üretmeye başlarlar. Bu tekrar eden yapı, üreticinin dönemi (periyodu) olarak adlandırılır. İyi bir rastgele sayı üretici, yalnızca istatistiksel rastgelelik testlerini geçmekle kalmamalı, aynı zamanda oldukça uzun bir döneme sahip olmalıdır. Uzun bir dönem, dizinin tekrar etmeden önce mümkün olduğunca fazla benzersiz sayı üretebilmesini sağlar ve bu da özellikle büyük ölçekli ve uzun süreli simülasyonlar için kritik bir gerekliliktir.

Bir rastgele sayı üreticinin dönemi kısa olduğunda, üretilen sayıların tekrarı nedeniyle simülasyon sonuçlarının güvenilirliği ve doğruluğu azalır. Örneğin, Tablo 2' de üretilen rastgele sayı dizisinde üretilen sayıların 8. adımında tekrar etmeye başladığını göstermektedir. Bu durum üreticinin periyodunun 8 olduğunu ve bu sürenin pratik simülasyon uygulamaları için kabul edilemez derecede kısa olduğunu ortaya koymaktadır.

Uzun dönemli rastgele sayı üreticileri, büyük veri kümeleri ve karmaşık sistemlerin modellenmesi için daha güvenilirdir çünkü tekrar döngüleri sistemin doğal rastgeleliğini bozmaz ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, simülasyon modellerinde tercih edilen üreticileri hem uzun dönemli hem de istatistiksel testleri başarıyla geçen üreticiler olması büyük önem taşımaktadır.

Tablo 2 . Lineer türevsel üretç yöntemi ile üretilen rassal sayılar

Adımlar (i)	x_i	u_i
0	3	0.75
1	6	0.625
2	5	0
3	0	0.875
4	7	0.25
5	2	0.125
6	1	0.5
7	4	0.375
8	3*	0.75
9	6*	0.625
10	5*	

* Tekrar edilen sayı dizisi

Simülasyon modelinde yolcu gelişleri modellenirken esnasında bir rassal sayı üretici kullanılarak öncelikle 0 ile 1 arasında bir kök sayı “ u ” üretimi gerçekleştirilir. Örnek olarak üstel dağılım kullanılarak kök sayıları Denklem 7 ve Denklem 8 ile üretilir (Law ve Kelton, 2015).

$$u = 1 - e^{-\lambda t} \quad (7)$$

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u) \quad (8)$$

Denklem 8 de “ x ” değeri negatif üstel olasılık dağılımından elde edilen rassal sayı için üretilen bir geliş aralığı değeridir. Simülasyon modellerinde rastgele sayı üretimi hakkında daha detaylı bilgi edinmek isteyen okuyucular, Altiook ve Melamed (2007)’nin kitabına başvurabilir.

5.3. Yolcu Gelişlerinin Modellenmesi

Model işletim senaryosunda, yolcu gelişlerinin Poisson sürecine uyumlu olduğu kabul edilmiş ve kamyonlar arasındaki geliş aralıkları negatif üstel dağılım ile ifade edilmiştir. Model işletimi için kabul edilen saatlik yolcu geliş sayıları Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Model işletimi için kabul edilen saatlik yolcu geliş sayıları

	Zaman Pencereleeri					
	1	2	3	4	5	6
Saat	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
λ (yolcu/saat)	5	7	5	12	7	6

5.4. Simülasyon Modelinin Doğrulanması

Model çıktılarının karşılaştırılmadan önce, işletim senaryolarına uygun şekilde çalıştığıının doğrulanması amacıyla bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama sürecinde, modelin işletimini basitleştirmek için araçların elektrikli yerine fosil yakıtlı olduğu varsayılmış ve böylece operasyon süresince batarya değişimi için bekleme yapmadıkları kabul edilmiştir. Model, bu koşullar altında çalıştırılarak performans çıktıları olarak ortalama yolcu bekleme süresi ve başarısız yolcu talepleri değerlendirmeye alınmıştır.

5.5. Performans Ölçütleri

Simülasyon modelleri, karmaşık sistemlerin performans ölçütlerini değerlendirmek için güçlü bir araçtır. Bu modellerden elde edilen performans çıktılarının güvenilir bir şekilde analiz edilebilmesi simülasyon çıktılarındaki

gözlemlerin merkezi eğilim değerini temsil eder ve sistemin genel performansı hakkında bilgi sağlar.

Simülasyonda replikasyon, bir simülasyon modelinin aynı başlangıç koşulları ve parametrelerle birden fazla kez çalıştırılması anlamına gelir. Replikasyonun temel amacı, rastgelelikten kaynaklanan değişkenliği azaltmak, istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar elde etmek ve modelin performans ölçümlerine ilişkin belirsizliği değerlendirmektir. Öte yandan, standart sapma simülasyon replikasyon sonuçlarının ortalamadan ne kadar sapma gösterdiğini ölçer ve sistem performansının tutarlılığı veya değişkenliği hakkında önemli bir içgörü sunar.

Düşük bir standart sapma değeri, modelin çıktılarının daha tutarlı olduğunu gösterirken, yüksek standart sapma, performansın daha değişken ve tahmin edilmesi zor olduğunu işaret eder. Simülasyon tabanlı performans analizlerinde, bu iki ölçütün bir arada değerlendirilmesi, davranışını daha kapsamlı bir şekilde anlama ve iyileştirme fırsatı sunar. Performans ölçütlerinin değerlendirilmesinde replikasyon ortalaması aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (9)$$

Denklemde x_i simülasyonun i-nolu replikasyonunun çıktısı ve N ise toplam replikasyon sayısıdır. Replikasyon sonuçlarının standart sapmaları aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (10)$$

Çalışmada taksi servisinin hizmet kalitesi ortalama yolcu bekleme süresi değeri ile ölçülmektedir. Bu performans ölçütü aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$D_p = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_p} (T_a - T_p) \quad (11)$$

denklemden T_a : Yolcuya taksinin atandığı veya yolcunun sistemden çıkarıldığı zaman, T_p : Yolcunun oluşturulma zamandır. Denklemden yolcunun 10 dakika içinde hizmet alamaması durumunda $T_a - T_p$ değeri olarak 10 dakika olarak kabul edilmektedir. Modelde kullanılan bir diğer performans ölçütü ise işletim süresi boyunca kaydedilen hizmet verilemeyen yolcu sayısıdır ve N_f ifadesi ile gösterilmektedir.

6. MODEL İŞLETİM SONUÇLARI

6.1. Model Doğrulaması Sonuçları

Doğrulama çalışması amacı ile model işletim senaryosu dahilinde farklı yedek batarya sayıları için ve 10 adet elektrikli araç ile işletilen bir filo senaryosu göz önüne alınarak işletim çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda performans göstergeleri için ortalama değerler hesaplanarak olarak Tablo 4’de gösterilmiştir

Tablo 4. Farklı batarya sayılarına göre filo performansları

	Batarya Sayısı = 6				Batarya Sayısı= 8				Batarya Sayısı= 10			
	Min	Maks	$\bar{x}$	s	Min	Maks	$\bar{x}$	s	Min	Maks	$\bar{x}$	s
N_f /gün	8.41	10.98	9.69	0.61	7.34	9.55	8.65	0.54	7.23	10.10	8.40	0.62
N_t /gün	279.22	285.96	282.07	1.68	278.68	285.83	282.21	1.55	279.97	285.48	283.21	1.51
D_p (dk)	1.12	1.39	1.26	0.06	1.03	1.23	1.12	0.04	1.02	1.25	1.15	0.05
N_s /gün	23.76	23.89	23.82	0.03	26.71	26.85	26.77	0.03	26.87	27.03	26.97	0.04

N_f : hizmet verilemeyen yolcu sayısı, N_t üretilen yolcu sayısı, N_s batarya değişimi sayısı

Tablo 4’te görüldüğü üzere, üç farklı batarya senaryosunda da günlük olarak benzer sayıda yolcu üretilmiştir. Bu durum, modelin her senaryoda tutarlı bir şekilde yolcu üretimi gerçekleştirdiğini göstermekte olup, modelin istikrarını doğrulamaktadır.

Simülasyon sonuçları, havuzda bulunan batarya sayısının artmasıyla birlikte, günlük hizmet verilemeyen yolcu sayısının ve ortalama yolcu bekleme sürelerinin azaldığını ortaya koymaktadır. Bu beklenen bir durum olup, modelin tutarlı sonuçlar ürettiğini ve sistemin öngörülen davranışını başarıyla yansıttığını göstermektedir.

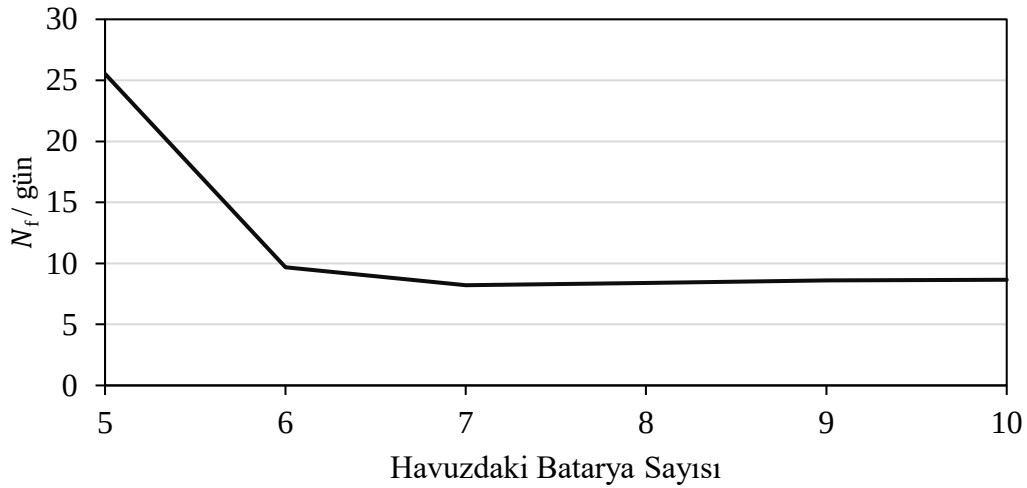
6.2. Batarya Sayısının Sistem Performansına Etkisinin İncelenmesi

Batarya havuzunda 6 batarya bulunması durumunda hizmet verilemeyen yolcu sayısı 9.69 yolcu/gün, 8 batarya durumunda 8.65 yolcu/gün, 10 batarya senaryosunda ise 8.40 yolcu/gün seviyesine düşmüştür. Ancak, batarya sayısındaki artışla birlikte hizmet verilemeyen yolcu sayısındaki azalma giderek daha sınırlı hale gelmektedir. Bu durum, batarya sayısının belirli bir eşiğin üzerine çıkarılmasının sistem

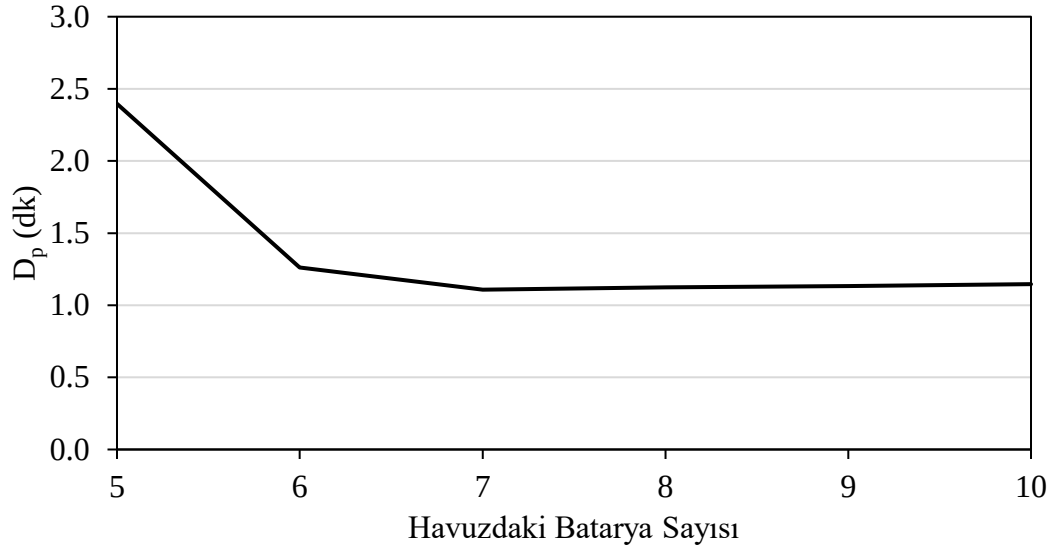
performansı üzerinde azalan marjinal bir iyileştirmeye neden olduğunu göstermektedir.

Özellikle 10 bataryadan sonra, eklenen ilave bataryaların sistem performansında anlamlı bir iyileşme sağlamadığı ve sistemde batarya kaynaklı bir darboğazın artık oluşmadığı anlaşılmıştır. Bu bulgular, batarya havuzu büyüklüğünün optimum seviyede tutulmasının hem operasyonel verimlilik hem de kaynakların etkin kullanımı açısından kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Batarya havuzundaki batarya sayısının hizmet verilemeyen yolcu sayısı ve ortalama yolcu bekleme süresine etkisinin daha detaylı incelenmesi amacıyla batarya sayıları 5 adet bataryadan 10 adet batarya için tek tek artırılarak simülasyon modeli tekrar işletilmiştir. Performans göstergelerinin günlük ortalamalarının batarya sayısı ile değişimi Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Günlük ortalama başarısız seyahat talebinin batarya sayısı ile değişimi

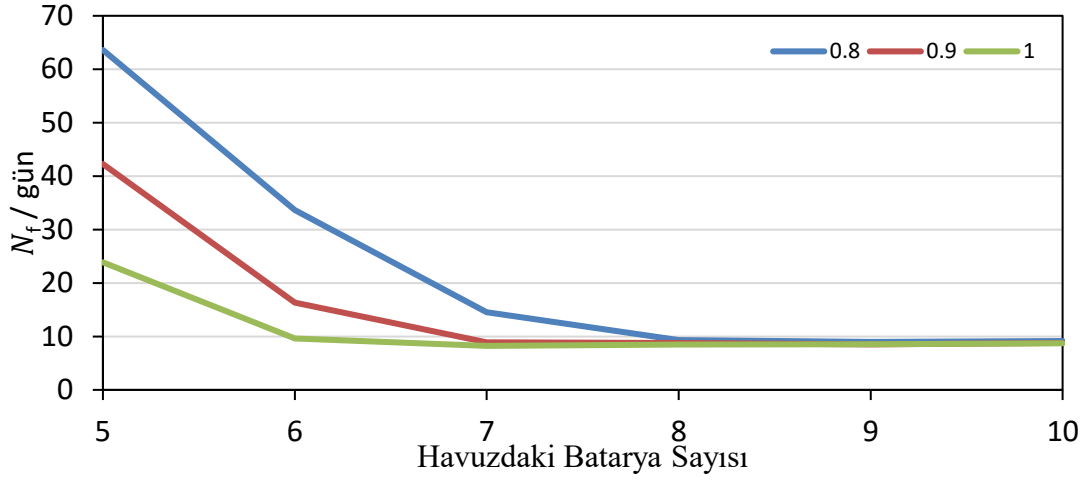


Şekil 8. Ortalama yolcu bekleme süresinin batarya sayısı ile değişimi

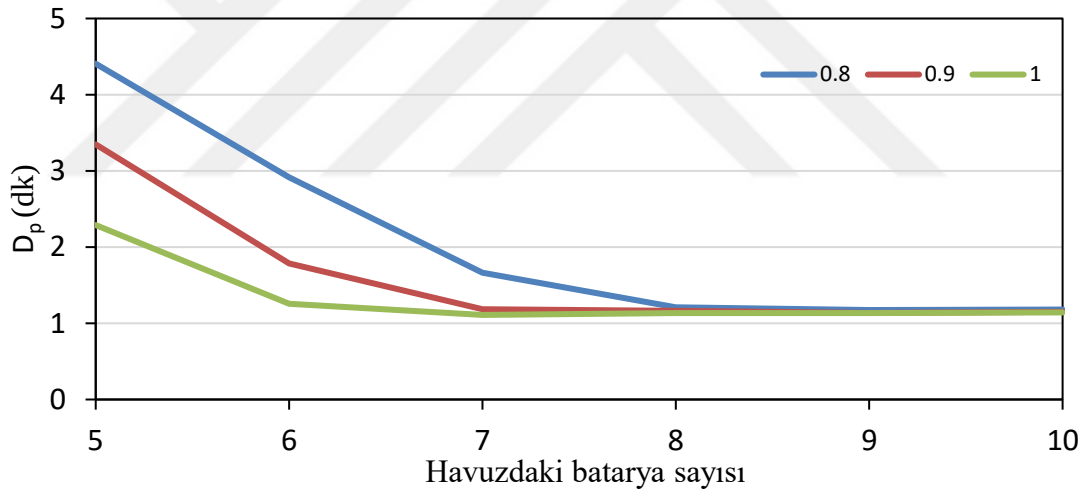
6.3. Batarya Bozulma Senaryosunda Filo Performansı

Elektrikli araç bataryaları, zaman, kullanım tarzı ve kat edilen kilometreye bağlı olarak kapasitelerinde kademeli bir düşüş yaşar ve ilk kullanıldıkları zamanki performanslarını sürdüremezler. Bu duruma bataryanın zamana ve kullanıma bağlı bozulması adı verilir. Tipik bir bataryanın kapasite kaybı beklenen bir durumdur ve özellikle batarya değişimi maliyetli bir operasyon olarak kabul edilir. Her ne kadar batarya teknolojileri, bataryaların uzun süre boyunca kapasitelerini ve verimliliklerini korumasına olanak sağlasa da, belirli bir kilometre sonrasında şarj tutma kapasitelerinde belirgin düşüşler yaşanır.

Bu senaryo kapsamında, elektrikli araçların batarya sağlığı oranları %100, %90 ve %80 olarak ele alınmış ve bu oranlar üzerinden benzer yolculuk talebi ve filo büyüklüğü senaryoları oluşturulup analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, her senaryo için hizmet verilemeyen yolcu sayısı ve ortalama yolcu bekleme süreleri değerlendirilmiş ve bu değerlerin 100 replikasyon üzerinden hesaplanan ortalama sonuçları Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. Farklı batarya bozulma dereceleri için günlük başarısız yolculuk ortalaması

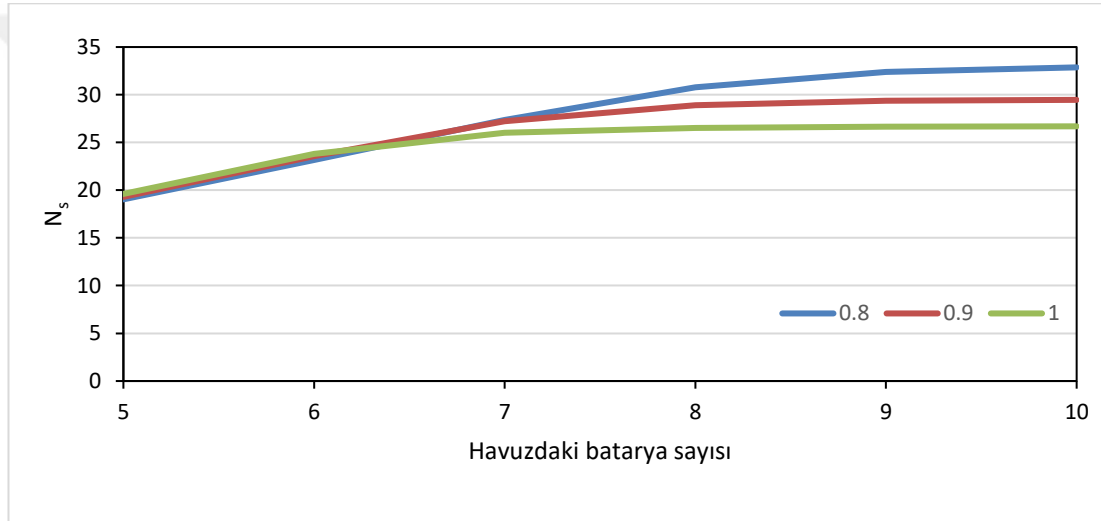


Şekil 10. Farklı batarya bozulma dereceleri için ortalama yolcu bekleme süreleri

Şekillerde, mavi çizgi %80 batarya sağlığı, kırmızı çizgi %90 batarya sağlığı ve yeşil çizgi %100 batarya sağlığı senaryolarını temsil etmektedir. Elde edilen bulgular, batarya sağlığı seviyelerinin filo performansı ve hizmet kalitesi üzerinde önemli etkileri olduğunu ve batarya performansındaki azalmaların operasyonel verimliliği sınırladığını göstermektedir. Şekiller incelendiğinde, batarya sayısının artmasıyla birlikte farklı batarya bozulma dereceleri için benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Batarya sayısının azalmasıyla birlikte batarya bozulma

oranlarının filo performansı üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiş ve bu durum, ortalama yolcu bekleme sürelerinin artmasına neden olmuştur. Bu bulgular, batarya sağlığı seviyelerinin özellikle düşük batarya sayısı senaryolarında filo performansı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Filodaki taksilerin operasyonel performansını değerlendirmek amacıyla, simülasyon modeli üzerinde günlük ortalama batarya değişim sayıları kaydedilmiştir. Şekil 11’de farklı batarya bozulma seviyeleri için günlük ortalama batarya değişim sayılarının, batarya sayısındaki değişime bağlı olarak nasıl şekillendiği görselleştirilmiştir.



Şekil 11. Farklı batarya bozulma dereceleri için günlük batarya değişim sayıları

Şekil 11’de görüldüğü üzere, batarya sayısının artması durumunda günlük batarya değişim sayıları, batarya bozulma derecelerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, 6 bataryanın kullanıldığı bir senaryoda günlük batarya değişim sayıları 23,7 seviyesine yakınsamaktadır. Ancak, 10 bataryanın kullanıldığı ve batarya bozulma oranının olmadığı bir senaryoda bu değer 26,6’dan 32,87’ye yükselmektedir. Bu durum, az sayıda bataryanın operasyonel süreçlerde bir darboğaz oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

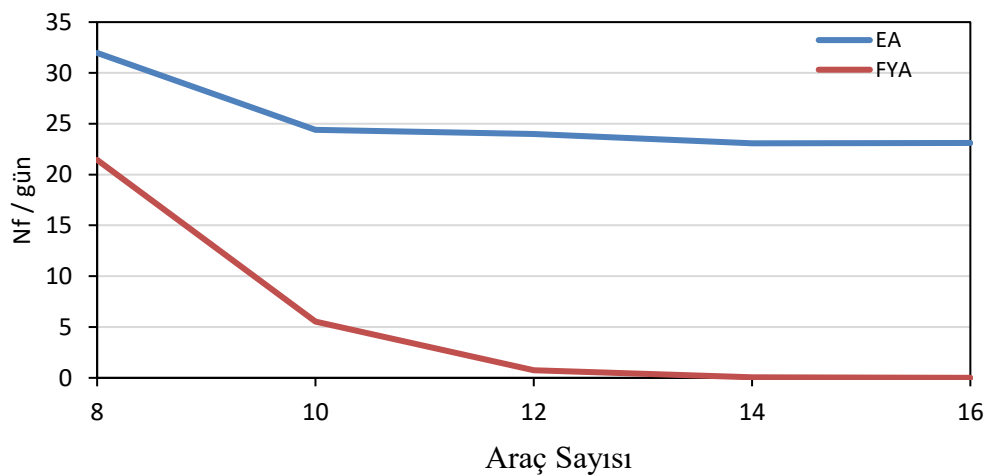
Öte yandan, envanterde daha fazla batarya bulunması (örneğin 9 veya 10 batarya) batarya bozulma derecelerinin operasyonel verimliliği olumsuz etkileyerek araçların daha sık batarya değiştirme ihtiyacı duymasına neden olmaktadır. Bu

senaryoda, batarya değiştirme ortalamasının artmasıyla birlikte araçlar batarya değişim istasyonlarına daha sık gitmekte ve bu durum operasyonel sürekliliği olumsuz etkilemektedir.

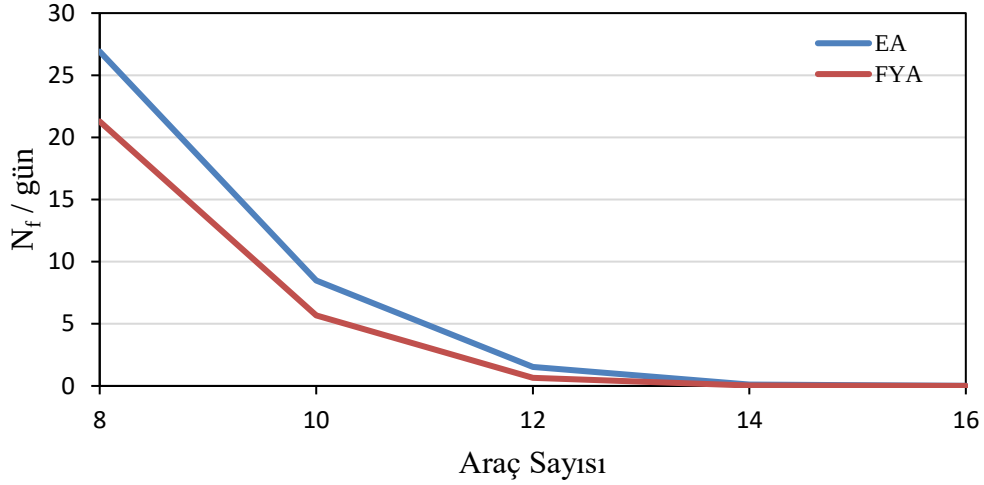
Araçların batarya değişim istasyonlarında daha fazla zaman geçirmesi, filo genelinde müsait araç sayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, yolcuların yeterli sayıda araç bulamamasına yol açarak başarısız yolculuk taleplerinin ve ortalama yolcu bekleme sürelerinin artmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, batarya sayısındaki artış ve batarya sağlığı seviyelerindeki düşüş, filo operasyonlarında verimliliği sınırlayan önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır.

6.4. Fosil Yakıtlı ve Elektrikli Araç İşletim Senaryolarını Karşılaştırılması

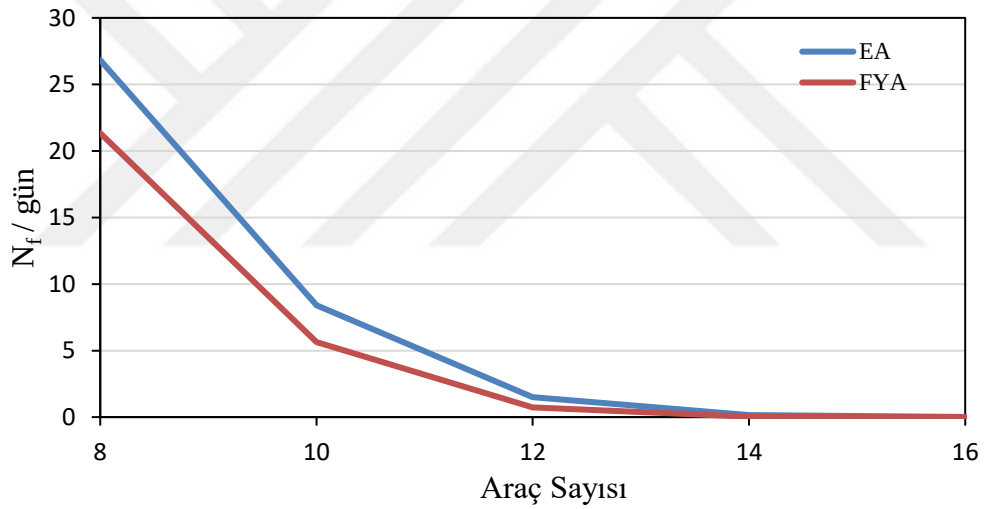
Çalışma, farklı batarya değişim senaryolarında elektrikli ve fosil yakıtlı araçların operasyonel performanslarını karşılaştırarak, hangi senaryolarda sistem verimliliğinin maksimum seviyeye ulaştığını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu senaryo kapsamında, elektrikli ve fosil yakıtlı araçların yolcu taşımacılığında işletilmesi durumunda verimlilik ve filo performansları, önceden belirlenmiş performans ölçütleri doğrultusunda analiz edilmiştir. İşletim alışması, 120 günlük bir simülasyon süresi boyunca gerçekleştirilmiş ve 100 replikasyon ortalaması alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Araç tiplerine göre değişen performans ölçütleri havuzda 5, 10 ve 15 batarya olması senaryoları için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçlar şekil 12, şekil 13 ve şekil 14’de görselleştirilmiştir.



şekil 12. Havuzda 5 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı



Şekil 13. Havuzda 10 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı



Şekil 14. Havuzda 15 adet batarya bulunması senaryosu için hizmet verilemeyen yolcu sayısı

Şekil 12’ de mavi renkle gösterilen çizgi elektrikli araçları, kırmızı renkle gösterilen çizgi ise fosil yakıtlı araçları temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde, 5 adet batarya kullanımının filo işletim senaryolarında yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir. Filo araç sayısının artırılması durumunda, fosil yakıtlı araçların sisteme gelen yolcu talebini başarıyla karşıladığı anlaşılmaktadır. Özellikle 8, 10 ve 12 araçlık daha küçük filo senaryolarında, fosil yakıtlı araçlarla yapılan işletmelerde günlük hizmet verilemeyen yolcu sayıları sırasıyla 21.44 yolcu/gün, 5.52 yolcu/gün ve 0.73

yolcu/gün olarak hesaplanmış ve filo araç sayısının 16'ya çıkarılmasıyla bu değer sıfıra yakınsamıştır.

Buna karşılık, elektrikli araç kullanımında araç sayısı artırılrsa dahi batarya sayısının 5 ile sınırlandırılması filo performansını iyileştirmemektedir. Bu durum, batarya havuzundaki batarya sayısının sistem performansı açısından ana kısıtlayıcı faktör olduğunu ve filo performansı üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Araç sayısının 14 ve 16'ya yükseltildiği senaryolarda, fosil yakıtlı araçlarla oldukça düşük hizmet verilemeyen yolcu sayıları elde edilirken, elektrikli araçlarla günlük hizmet verilen yolcu sayıları sırasıyla 23.07 yolcu/gün ve 23.02 yolcu/gün olarak kaydedilmiştir. Bu durum, batarya sayısının artırılmamasının filo performansındaki iyileşmeyi sınırladığını ve elektrikli araçların operasyonel verimliliğini kısıtladığını ortaya koymaktadır.

Havuzdaki batarya sayısının artırılmasıyla birlikte, sistemdeki darboğaz ortadan kalkmış ve fosil yakıtlı araçlarla benzer taşımacılık performansı elde edilmiştir. Örneğin, Şekil 13 ve Şekil 14'de görüldüğü gibi batarya havuz büyüklükleri sırasıyla 10 ve 15 batarya olarak belirlendiğinde iki araç tipi için de benzer taşımacılık performansları gözlemlenmiştir. Ancak yeterli sayıda batarya bulunmasına rağmen, elektrikli araçların batarya değişim istasyonlarına daha sık uğramaları ve batarya değiştirme sürelerinin artması, özellikle araç sayısının sekiz ile on iki arasında olduğu senaryolarda fosil yakıtlı araçların daha başarılı bir performans sergilemesine yol açmıştır. Bu durum, günlük karşılanamayan yolcu talebinin azalmasına katkı sağlamıştır. Öte yandan, araç sayısının on dört ve on altıya yükseldiği filo senaryolarında, filo büyüklüğünün artmasıyla birlikte elektrikli ve fosil yakıtlı araçların operasyonel performansları arasındaki fark azalmış ve her iki sistem de benzer filo başarımları göstermiştir.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Model işletim senaryosunda, 10 elektrikli araç ve farklı batarya sayıları (6, 8 ve 10) için filo performansı analiz edilmiştir. Sonuçlar, batarya sayısının artırılmasının hizmet verilemeyen yolcu sayısını ve yolcu bekleme sürelerini azalttığını göstermiştir. 6 batarya ile günlük hizmet verilemeyen yolcu sayısı 9.69 yolcu/gün, 8 batarya ile 8.65 yolcu/gün ve 10 batarya ile 8.40 yolcu/gün olarak hesaplanmıştır. Ortalama yolcu bekleme süreleri de sırasıyla 1.26, 1.12 ve 1.15 dakika olarak kaydedilmiştir. Batarya değişim sayıları ise batarya sayısına paralel olarak artarak 23.82'den 26.97 değişim/gün seviyesine yükselmiştir. Ancak batarya sayısındaki artışın marjinal faydası giderek azalmış ve 10 bataryadan sonra eklenen bataryaların sistem performansında belirgin bir iyileşme sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, optimum batarya havuz büyüklüğünün belirlenmesinin operasyonel verimlilik ve kaynak kullanımında kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Elektrikli araçların batarya sağlığı oranlarının (%100, %90, %80) filo performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve batarya sağlığının düşmesiyle hizmet verilemeyen yolcu sayısının ve yolcu bekleme sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ortalama yolcu bekleme süresi her üç senaryoda yaklaşık 8.75 dakika olarak hesaplanmış, ancak batarya sağlığının %80'e düşmesiyle birlikte araçların batarya değişim sıklığı artarak operasyonel darboğazlara yol açmıştır. Az sayıda batarya ve düşük batarya sağlığı seviyeleri, araçların batarya değişim istasyonlarında daha fazla zaman geçirmesine ve filo genelinde araçların müsaitlik oranlarının azalmasına neden olmuştur. Bu durum, hizmet verilemeyen yolcu taleplerini artırarak operasyonel verimliliği sınırlamıştır. Batarya sayısının artırılması operasyonel darboğazları hafifletmiş, ancak yüksek bozulma oranlarında bu iyileşme sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, batarya sağlığı seviyelerinin korunması ve batarya sayısının optimum düzeyde tutulması, filo performansı ve operasyonel sürekliliğin sağlanması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Çalışmada, elektrikli ve fosil yakıtlı araçların operasyonel performansları farklı batarya değişim senaryoları altında karşılaştırılmış ve sistem verimliliği analiz edilmiştir. 5 bataryalı senaryoda elektrikli araçlar, hizmet verilemeyen yolcu taleplerini karşılamada yetersiz kalmış ve filo performansı sınırlı düzeyde kalmıştır. Araç sayısının artırılmasıyla fosil yakıtlı araçlar, yolcu taleplerini daha etkin şekilde

karşılarken, elektrikli araçların performansı batarya sayısının sınırlı olması nedeniyle iyileşememiştir. Araç sayısının 14 ve 16'ya çıkarıldığı senaryolarda, fosil yakıtlı araçlar günlük hizmet verilemeyen yolcu sayısında daha iyi sonuçlar elde ederken, elektrikli araçlar benzer iyileşmeler gösterememiştir. Batarya havuzunun büyütülmesi (10 ve 15 batarya) darboğazları önemli ölçüde azaltmış ve elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlarla benzer performans göstermesine olanak tanımıştır. Ancak, batarya değişim sürelerinin uzunluğu ve batarya değişim sıklığının artması, elektrikli araçların performansını özellikle küçük ve orta büyüklükteki filo senaryolarında sınırlamıştır. Büyük filo senaryolarında ise performans farkı giderek azalmış ve iki sistem benzer sonuçlar göstermiştir. Sonuç olarak, elektrikli araç filolarında optimum batarya sayısının sağlanması ve operasyonel darboğazların minimize edilmesi, fosil yakıtlı araçlarla eşit performans elde edilmesi açısından kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

8. KAYNAKLAR

- Adu-Gyamfi, G., Song, H., Obuobi, B., Nketiah, E., Wang, H., & Cudjoe, D. (2022). Who will adopt? Investigating the adoption intention for battery swap technology for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111979>
- Ahmad, F., Alam, M. S., Alsaidan, I. S., & Shariff, S. M. (2020). Battery swapping station for electric vehicles: Opportunities and challenges. In *IET Smart Grid* (Vol. 3, Issue 3). <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0059>
- Ahmad, F., Alam, M. S., & Shariff, S. M. (2019). A Cost-Efficient Energy Management System for Battery Swapping Station. *IEEE Systems Journal*, 13(4). <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2890569>
- Akinkunmi, M. (2019). Introduction to Statistics Using R. In *Synthesis Lectures on Mathematics and Statistics* (Vol. 11, Issue 4). <https://doi.org/10.2200/S00899ED1V01Y201902MAS024>
- Alaee, P., Bems, J., & Anvari-Moghaddam, A. (2023). A Review of the Latest Trends in Technical and Economic Aspects of EV Charging Management. *Energies*, 16(9), 3669. <https://doi.org/10.3390/en16093669>
- Alam, M. R., Hou, C., Aeschliman, S., Zhou, Y., & Guo, Z. (2023). Optimization-based trip chain emulation for electrified ride-sourcing charging demand analyses. *Transportation Letters*, 15(6). <https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2070092>
- Altioik, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modeling and analysis with ARENA*. Elsevier.
- Beaverstock, M., Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). Applied simulation modeling and analysis using FlexSim. In *Technometrics* (Vol. 46, Issue 3).
- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (1981). Systems Engineering and Analysis. In *Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering*.
- Borschev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. <https://www.amazon.com/Big-Book-Simulation-Modeling-Multimethod/dp/0989573176>
- Department for Transport. (2023). *Zero emission bus funding guidance*. <https://www.gov.uk/government/publications/apply-for-zero-emission-bus-funding-zebra-2/apply-for-zero-emission-bus-funding-zebra-2>
- Felseghi, R. A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., Trufin, C. N., & Filote, C. (2019). Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications. In *Energies* (Vol. 12, Issue 23). <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- Gobierno de Chile. (2021). *National Electromobility Strategy Launch: Government announces that only electric vehicles will be sold in Chile by 2035 -*

Gob.cl. <https://www.gob.cl/en/news/national-electromobility-strategy-launch-government-announces-only-electric-vehicles-will-be-sold-chile-2035/>

Greasley, A. (2017). Simulation modelling for business. In *Simulation Modelling for Business*. <https://doi.org/10.4324/9781315243085>

IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-electric-mobility>

International Council on Clean Transportation. (2019). *Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator Partnership*. <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/transportation/zero-emission-rapid-deployment-accelerator-zebra-partnership/>

Invest in China. (2024). *Battery swaps could boost EV adoption, say industry experts* | [investinchina.chinadaily.com.cn](https://investinchina.chinadaily.com.cn/s/202105/17/WS60a24e65498e7a02c6f6bbdc/battery-swaps-could-boost-ev-adoption-say-industry-experts.html). <https://investinchina.chinadaily.com.cn/s/202105/17/WS60a24e65498e7a02c6f6bbdc/battery-swaps-could-boost-ev-adoption-say-industry-experts.html>

Jenn, A. (2020). Emissions benefits of electric vehicles in Uber and Lyft ride-hailing services. *Nature Energy*, 5(7). <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0632-7>

Jiang, Z., Li, W., Ma, C., Ma, L., Zhang, B., Lu, K., & Li, W. (2019). Joint operation of renewable energy and battery switch station considering the benefits of different subjects. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/app9081679>

Justin, C. Y., Payan, A. P., Briceno, S. I., German, B. J., & Mavris, D. N. (2020). Power optimized battery swap and recharge strategies for electric aircraft operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.027>

Lai, Z., & Li, S. (2024). Towards a multimodal charging network: Joint planning of charging stations and battery swapping stations for electrified ride-hailing fleets. *Transportation Research Part B: Methodological*, 183, 102928. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.102928>

Law, M., & Kelton, W. (2015). *Simulation modeling and analysis* (5th ed.). McGraw Hill.

Liang, Y., & Zhang, X. (2018). Battery swap pricing and charging strategy for electric taxis in China. *Energy*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.082>

Mastoi, M. S., Zhuang, S., Munir, H. M., Haris, M., Hassan, M., Usman, M., Bukhari, S. S. H., & Ro, J. S. (2022). An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. In *Energy Reports* (Vol. 8). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>

Muratori, M., Alexander, M., Arent, D., Bazilian, M., Dede, E. M., Farrell, J., Gearhart, C., Greene, D., Jenn, A., Keyser, M., Lipman, T., Narumanchi, S.,

- Pesaran, A., Sioshansi, R., Suomalainen, E., Tal, G., Walkowicz, K., & Ward, J. (2021). The rise of electric vehicles-2020 status and future expectations. In *Progress in Energy* (Vol. 3, Issue 2). <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abe0ad>
- Otokar. (2023). *Otokar Busworld Türkiye 2022'de yeni elektrikli otobüs ailesini tanıtacak* | Otokar. <https://www.otokar.com.tr/haberler/guncel-haberler/otokar-busworld-turkiye-2022de-yeni-elektrikli-otobus-ailesini-tanitacak>
- Pina, A., Baptista, P., Silva, C., & Ferrão, P. (2014). Energy reduction potential from the shift to electric vehicles: The Flores island case study. *Energy Policy*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.120>
- Pipitrel. (2024). *Velis Electro - Pipistrel*. <https://www.pipistrel-aircraft.com/products/velis-electro/>
- Plant, J. F. (2007). Handbook of transportation policy and administration. In *Handbook of Transportation Policy and Administration*. <https://doi.org/10.1201/9781420017021>
- Rao, R., Zhang, X., Xie, J., & Ju, L. (2015). Optimizing electric vehicle users' charging behavior in battery swapping mode. *Applied Energy*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.125>
- Revankar, S. R., & Kalkhambkar, V. N. (2021). Grid integration of battery swapping station: A review. *Journal of Energy Storage*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102937>
- Rosetti, M. (2016). *Simulation modelling and Arena* (2nd ed.). Wiley.
- Roth, P. F., Ilyas, M., & Mouftah, H. T. (1992). SIMULATION: A powerful tool for prototyping telecommunications networks. *SIMULATION*, 58(2). <https://doi.org/10.1177/003754979205800202>
- Rupnik, B., Narding, R., & Kramberger, T. (2019). Discrete event simulation of hospital sterilization logistics. *Tehnicki Vjesnik*, 26(5). <https://doi.org/10.17559/TV-20180614102011>
- Schmidt, S. (2021). Use of battery swapping for improving environmental balance and price-performance ratio of electric vehicles. *ETransportation*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100128>
- Trebuna, P., Pekarcikova, M., Duda, R., & Svantner, T. (2023). Virtual Reality in Discrete Event Simulation for Production–Assembly Processes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/app13095469>
- Tsoi, K. H., Loo, B. P. Y., Li, X., & Zhang, K. (2023). The co-benefits of electric mobility in reducing traffic noise and chemical air pollution: Insights from a transit-oriented city. *Environment International*, 178, 108116. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108116>

- Turan, B., Pedarsani, R., & Alizadeh, M. (2020). Dynamic pricing and fleet management for electric autonomous mobility on demand systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102829>
- Vallera, A. M., Nunes, P. M., & Brito, M. C. (2021). Why we need battery swapping technology. *Energy Policy*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112481>
- Verma, A., & Ramanayya, T. V. (2014). Public Transport Planning and Management in Developing Countries. In *Public Transport Planning and Management in Developing Countries*. <https://doi.org/10.1201/b17891>
- Volvo. (2024). *Volvo electric truck range*. <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/electric.html>
- Wang, S., Chen, A., Wang, P., & Zhuge, C. (2023). Short-term electric vehicle battery swapping demand prediction: Deep learning methods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103746>
- Wired. (2024). *Better Place Unveils an Electric Car Battery Swap Station | WIRED*. <https://www.wired.com/2009/05/better-place/>
- Yang, X., Shao, C., Zhuge, C., Sun, M., Wang, P., & Wang, S. (2021). Deploying battery swap stations for shared electric vehicles using trajectory data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102943>
- Yıldırım, M. S., Aydın, M. M., & Gökkuş, Ü. (2020). Simulation optimization of the berth allocation in a container terminal with flexible vessel priority management. *Maritime Policy and Management*, 47(6), 833–848. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1730994>
- Zhan, W., Wang, Z., Zhang, L., Liu, P., Cui, D., & Dorrell, D. G. (2022). A review of siting, sizing, optimal scheduling, and cost-benefit analysis for battery swapping stations. *Energy*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124723>