

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİYEL SÜRDÜREBİLİRLİK ANABİLİM DALI

**ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA SİMÜLASYON
PROGRAMLARI VE SİMÜLATÖRLERİN KULLANIMININ ÇEVRESEL
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA BELTEN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞRETİM ÜYESİ YASEMİN SAMAV

BİLECİK, 2025

10739985

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANABİLİM DALI

**ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA SİMÜLASYON
PROGRAMLARI VE SİMÜLATÖRLERİN KULLANIMININ ÇEVRESEL
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA BELTEN

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞRETİM ÜYESİ YASEMİN SAMAV

BİLECİK, 2025

10739985

BEYAN

“Endüstriyel Sürdürülebilirlik Bağlamında Simülasyon Programları ve Simulatörlerin Kullanımının Çevresel Etkilerinin İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.	
DESTEK ALINMIŞTIR	DESTEK ALINMAMIŞTIR
Destek alındı ise;	
Destekleyen kurum;	
Desteğin Türü	Proje Numarası
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	
2- TÜBİTAK	
Diğer;.....	
ETİK KURUL onayı var ise;	
ETİK KURUL karar tarih/sayı:/.....

ÖĞRENCİ ADI VE SOYADI

Mustafa BELTEN

Tarih

.....

İmza

ÖNSÖZ

Tez çalışma sürecinde beni destekleyen, yardım eden, yol gösteren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yasemin SAMAV'a, bilimsel çalışmalarda katkıda bulunan ve her daim yardımcı olan Doç. Dr. Şenay BALBAY'a, fikir veren ve yol gösteren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Enes NAYMAN'a, bana her konuda destek olan değerli eşim Öğr. Gör. Selen BELTEN ve hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda arkamda duran değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Mustafa BELTEN

2025

ÖZET

ENDÜSTRİYEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BAĞLAMINDA SİMÜLASYON PROGRAMLARI VE SİMÜLATÖRLERİN KULLANIMININ ÇEVRESEL ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Endüstriyel faaliyetlerin hızla büyümesi ve teknolojik ilerlemeler, çevresel sürdürülebilirlik konusunda yeni yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. İklim değişikliği, kaynak tükenmesi ve çevresel kirliliği gibi küresel sorunlar, endüstriyel süreçlerin daha verimli ve çevre dostu hale getirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, simülasyon teknolojileri, endüstriyel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Simülasyonlar, üretim süreçlerinin optimizasyonu, enerji verimliliğinin artırılması ve atık yönetimi gibi alanlarda çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olurken, aynı zamanda maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır.

Bu tez, simülasyon teknolojilerinin sürdürülebilirlik odağında doğrudan ve dolaylı emisyonların IPCC ve DEFRA verileri kullanılarak yapılan analizler sonucunda çevresel etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, özellikle askeri araçların çevresel performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve farklı yakıt türlerinin (dizel, biyodizel, hidrojen) karbon ayak izleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, kapalı ve açık kabin simülatörlerinin elektrik tüketimine bağlı emisyon değerleri hesaplanarak, simülasyon tabanlı eğitimlerin geleneksel yöntemlere kıyasla çevresel avantajları ortaya konmuştur.

Tez kapsamında yapılan analizler, simülasyon teknolojilerinin kaynak verimliliğini artırdığı, emisyonları azalttığı ve sürdürülebilir üretim süreçlerine katkı sağladığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, iklim değişikliği odağında simülatörlerin çok farklı uygulamalarda etkin kullanımına yönelik karbon ayak izi odağında stratejiler geliştirilmesine rehberlik edecektir. Bu çalışma, simülasyon teknolojilerinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki rolünü vurgulayarak gelecekteki araştırmalara ışık tutmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Simülasyon Teknolojileri, Karbon Ayak İzi, Askeri Araç Simülatörleri, Enerji, Çevre Kimyası

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE USE OF SIMULATION PROGRAMS AND SIMULATORS IN THE CONTEXT OF INDUSTRIAL SUSTAINABILITY

Rapid growth of industrial activities and technological advances necessitate the development of new approaches to environmental sustainability. Global problems such as climate change, resource depletion and environmental pollution require industrial processes to be made more efficient and environmentally friendly. In this context, simulation technologies stand out as an important tool contributing to industrial sustainability. Simulations help reduce environmental impacts in areas such as optimization of production processes, increasing energy efficiency and waste management, while also providing cost and time savings.

This thesis aims to examine the environmental impacts of simulation technologies as a result of analyses conducted using IPCC and DEFRA data on direct and indirect emissions in the focus of sustainability. In the study, environmental performances of military vehicles in particular were analyzed comparatively and carbon footprints of different fuel types (diesel, biodiesel, hydrogen) were evaluated. In addition, emission values depending on electricity consumption of closed and open cabin simulators were calculated, and the environmental advantages of simulation-based training compared to traditional methods were revealed.

The analyses conducted within the scope of the thesis show that simulation technologies increase resource efficiency, reduce emissions and contribute to sustainable production processes. The findings will guide the development of strategies focused on carbon footprint for the effective use of simulators in many different applications with a focus on climate change. This study aims to shed light on future research by emphasizing the role of simulation technologies in achieving sustainability goals.

Keywords: Sustainability, Simulation Technologies, Carbon Footprint, Military Vehicle Simulators, Energy, Environmental Chemistry

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
GRAFİKLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. SİMÜLASYON KAVRAMININ TARİHÇESİ VE GELİŞİMİ.....	4
2.1. Simülasyon Kavramı.....	4
2.2. Simülasyonların Tarihçesi	4
2.3. Simülasyonların Kullanım Alanları.....	7
2.4. Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Eğitimdeki Yeri	8
3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE SİMÜLASYON	12
3.1. Simülasyon Çalışmalarının Çevresel Faydaları	13
3.2. Simülasyonların Kullanım Alanları.....	15
3.2.1. Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi Azaltımı	17
3.2.2. Enerji Verimliliği ve Simülasyon	18
3.3. Simülasyonların Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkileri.....	19
3.3.1. Kaynak Verimliliği ve Atık Yönetimi	20
3.3.2. Çevresel Sürdürülebilirliğe Katkılar	22
4. EĞİTİM ALANINDA SİMÜLASYON FAALİYETLERİ.....	24
4.1. Simülasyon Tabanlı Eğitim Uygulamaları.....	24
4.1.1. Sürücü Eğitimlerinde Simülasyon Teknolojileri	25
4.1.2. Farklı Hava ve Yol Koşullarının Deneyimlenmesi	26
4.2. Güvenlik Risklerinin Azaltılması.....	27
4.2.1. Kaza Senaryolarının Risksiz Ortamlarda Test Edilmesi.....	27
4.2.2. Sürücülerde Refleks Geliştirme ve Acil Durum Yönetimi.....	29
4.3. Eğitim Simülasyon Teknolojilerinin Avantajları	29
4.3.1. Eğitim Maliyetlerinin Düşürülmesi.....	30

4.3.2. Tekrar Edilebilirlik ve Esnek Senaryolar	31
5. SİMÜLASYON TEKNOLOJİLERİNİN GELECEĞİ	32
5.1. Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Destekli Simülasyonlar.....	33
5.1.1. Dijital İkizlerin Fiziksel Süreçlerle Entegrasyonu	34
5.1.2. Yapay Zekâ ile Gerçek Zamanlı Veri Analizi.....	35
6. ARAÇ SİMÜLASYONLARI.....	37
6.1. Araç Simülasyon Tekniklerinin Genel Avantajları	37
6.1.1. Güvenlik ve Risk Azaltımı	38
6.1.2. Maliyet Etkinliği	39
6.1.3. Zaman Avantajı ve Hızlı Analiz	39
6.1.4. Objektif Veri ve Karar Destek Sistemi.....	39
6.1.5. Tehlikeli ve Ulaşılması Zor Koşulların Analizi.....	39
6.1.6. Eğitim ve Beceri Gelişimi.....	40
6.1.7. Trafik Güvenliği Politikalarına Katkısı	41
7. MATERYAL VE METOT.....	42
7.1. Materyal	42
7.1.1. Taktik Tekerlekli Zırhlı Araçlara Ait Teknik Özellikler	42
7.1.2. Simülatörler.....	50
7.1.2.1. Kapalı Kabin Simülatörü (KK).....	50
7.1.2.2. Açık Kabin Simülatörü (AK).....	53
7.2. Metot.....	56
8. BULGULAR.....	58
8.1. TTZA'lara ait Emiyonlar	58
8.1.1. TTZA'lara ait Doğrudan Emiyonlar	58
8.1.2. TTZA'lara ait Dolaylı Emiyonlar	63
8.2. Similatörlere Ait Emisyonlar	65
9. TARTIŞMA.....	68
10. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKÇA.....	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kriegsspiel Savaş Oyunu Ekipmanları	5
Şekil 2.2. NADS-1 simülatörü	6
Şekil 2.3. ATAK Helikopteri simülatörü	8
Şekil 2.4. VR gözlük destekli simülasyonlar	9
Şekil 2.5. Genişletilmiş Gerçeklik Hiyerarşisi	11
Şekil 3.1. Askeri Alanda Simülasyon Çalışmalarının Çevresel Faydalarına ait Görsel	14
Şekil 3.2. Çeşitli Simülasyon Uygulamaları	16
Şekil 3.3. Karbon Ayak İzi Şematik Gösterimi	17
Şekil 3.4. Simülasyonların Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkilerine Ait Bir Görsel	20
Şekil 3.5. Kaynak Verimliliği ve Atık Yönetimine Ait Görsel.....	21
Şekil 4.1. İtfaiye Personeli Eğitim Simülasyonu	24
Şekil 4.2. Sürücü Eğitimlerinde Simülasyon Teknolojileri	25
Şekil 4.3. Farklı Hava ve Yol Koşullarının Simülasyon Üzerinde Gösterimi	26
Şekil 4.4. Araç Kaza Senaryosu Simülasyonu	28
Şekil 4.5. Eğitimde Simülasyon Uygulamalarına Ait Görsel	30
Şekil 5.1. Gelecekteki Simülasyon Teknolojilerine Ait Görsel	32
Şekil 5.2. Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Destekli Simülasyonlarına Ait Görsel.....	33
Şekil 5.3. Yapay Zekâ ile Gerçek Zamanlı Veriye Ait Görsel.....	36
Şekil 6.1. Araç Simülasyonu.....	37
Şekil 7.1. TTZA-1 Zırhlı Aracı.....	43
Şekil 7.2. TTZA-2 Zırhlı Aracı.....	44
Şekil 7.3. TTZA-3 Zırhlı Aracı.....	45
Şekil 7.4. TTZA-4 Zırhlı Aracı.....	46
Şekil 7.5. TTZA-5 Zırhlı Aracı.....	47
Şekil 7.6. TTZA-6 Zırhlı Aracı.....	48
Şekil 7.7. TTZA-7 Zırhlı Aracı.....	49
Şekil 7.8. TTZA-8 Zırhlı Aracı.....	50
Şekil 7.9. Kapalı Kabin Simülatörü	51
Şekil 7.10. Açık Kabin Simülatörü	54
Şekil 7.11. 2DOF Açık Kabin Simülatörü	55

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 8.1. TTZA Araçlara Ait Dizel Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri...	59
Grafik 8.2. TTZA Araçlara Ait Biyodizel Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri	60
Grafik 8.3. TTZA Araçlara Ait HVO Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri...	61
Grafik 8.4. TTZA Araçlara Ait Hidrojen Yakıt Tüketimine Bağlı Toplam Emisyon Değerleri	62
Grafik 8.5. TTZA Araçlara Ait Farklı Yakıt Türlerinin Tüketimine Bağlı Toplam Emisyon Değerleri.....	63
Grafik 8.6. TTZA Araçların Taşıdığı Yük Durumlarına Bağlı Toplam Emisyon Değerleri ..	64
Grafik 8.7. TTZA Araçların Klima Kullanılması ve Taşıdığı Yük Durumlarına Bağlı Toplam Emisyon Değerleri.....	65
Grafik 8.8. Açık ve Kapalı Kabin Araçlarının Elektrik Tüketimi Kaynaklarına Göre Karbon Ayak İzi Karşılaştırması.....	67

TABLolar LİSTESİ

Tablo 7.1. TTZA-1 Zırhlı Aracı Özellikleri	43
Tablo 7.2. TTZA-2 Zırhlı Aracı Özellikleri	44
Tablo 7.3. TTZA-3 Zırhlı Aracı Özellikleri	45
Tablo 7.4. TTZA-4 Zırhlı Aracı Özellikleri	46
Tablo 7.5. TTZA-5 Zırhlı Aracı Özellikleri	47
Tablo 7.6. TTZA-6 Zırhlı Aracı Özellikleri	48
Tablo 7.7. TTZA-7 Zırhlı Aracı Özellikleri	49
Tablo 7.8. TTZA-7 Zırhlı Aracı Özellikleri	50
Tablo 8.1. TTZA Araçlara Ait Dizel Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri	58
Tablo 8.2. TTZA Araçlara Ait Biyodizel Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri	59
Tablo 8.3. TTZA Araçlara Ait HVO Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri	60
Tablo 8.4. TTZA Araçlara Ait Hidrojen Yakıtı Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri (ton CO ₂ .eşd.)	61
Tablo 8.5. Simulatörlerin Elektrik Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri (ton CO ₂ .eşd.)	66
Tablo 8.6. Açık ve Kapalı Kabin Simulatörlerinin Şebeke Elektrik ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Tüketimine Ait Karbon Emisyon Değerleri	67

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

M	:	Metre
mm	:	Milimetre
cm	:	Santimetre
mj	:	Megajoule
gg	:	Gigagram
H₂	:	Hidrojen
CO₂	:	Karbon Dioksit
CH₄	:	Metan
NO_x	:	Azot Oksitler
SO₂	:	Kükürt Dioksit
VR	:	Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)
AR	:	Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
MR	:	Karma Gerçeklik (Mixed Reality)
XR	:	Genişletilmiş Gerçeklik (Extended Reality)
HVO	:	Hidrojenlenmiş Bitkisel Yağ (Hydrotreated Vegetable Oil)
LCD	:	Sıvı Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
ADAS	:	Gelişmiş Sürücü Destek Sistemleri (Advanced Driver Assistance Systems)
IPCC	:	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
AEB	:	Otomatik Acil Frenleme (Automatic Emergency Braking)
IoT	:	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
BAP	:	Bilimsel Araştırma Projesi
TTZA	:	Taktik Tekerlekli Zırhlı Araç
AK	:	Açık Kabin
RES	:	Yenilenebilir Enerji Kaynakları (Renewable Energy Sources)
GES	:	Güneş Enerjisi Santrali

- Gri H₂** : Fosil yakıtlardan üretilen ve karbon salınımı olan hidrojen
- MaviH₂**: Fosil yakıtlardan üretilen ancak karbon yakalama teknolojisi kullanılan hidrojen
- DEFRA** : İngiltere'nin çevre, gıda ve tarım politikalarından sorumlu bakanlıktır
- NADS**: Ulusal Gelişmiş Sürüş Simülatörü (National Advanced Driving Simulator)
- 2DOF** : 2 Serbestlik Derecesi (2 Degrees of Freedom)
- 6DOF** : 6 Serbestlik Derecesi (6 Degrees of Freedom)
- WTT** : Kuyudan Depoya emisyon değerleri (Well-to-Tank)

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin hızlı büyümesi ve teknolojik ilerlemeler, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. İklim değişikliği, doğal kaynakların tükenmesi ve çevresel kirlilik gibi küresel ölçekteki çevre sorunları, endüstriyel faaliyetlerin sürdürülebilirlik ilkelerine uygun şekilde yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır (Adanma & Ogunbiyi, 2024b; Melnyk vd., 2024). Endüstriyel üretim süreçlerinin çevre üzerindeki baskısı giderek artarken, işletmelerin bu sorunlara çözüm üretmek amacıyla yeni yaklaşımlar benimsemeleri gerekmektedir (Debnath vd., 2024; Farrukh & Sajjad, 2024). Bu bağlamda, sürdürülebilirlik faaliyetleri, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin hayata geçirilmesi noktasında kritik bir rol oynamaktadır (Adanma & Ogunbiyi, 2024a; Donatus Ogbu vd., 2024; Oguanobi & Joel, 2024).

İşletmeler, dünyanın konuştuğu sürdürülebilirlik gerekliliklerini yerine getirebilmek için geleneksel üretim süreçlerinin ötesine geçmek ve teknolojinin sunduğu olanakları en üst düzeyde kullanmak durumundadır (Agarwal & Ojha, 2024; Subramani vd., 2024). Bu noktada simülasyon programları ve simülatörler, endüstriyel süreçlerin çevresel etkilerini azaltma ve verimliliği artırma açısından büyük fırsatlar sunmaktadır (A. R. Ali vd., 2024; Khalili Tari vd., 2023). Fiziksel üretim süreçlerinin yerine dijital ortamda simülasyon kullanımı, enerji tüketiminin ve atık üretiminin azaltılması, kaynakların daha verimli kullanılması gibi birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Böylece simülasyon teknolojileri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir araç haline gelmiştir (Leng vd., 2021).

Simülasyonların sürdürülebilirlikteki potansiyel rolünü anlamak, özellikle çevresel etkiler açısından oldukça önemlidir. Bilgisayar tabanlı simülasyonlar, ürün geliştirme süreçlerinde prototiplerin fiziksel olarak üretilmeden önce test edilmesine olanak tanır (Metkewar, 2024; Stark, 2024). Bu durum, üretim maliyetlerinin ve zamanın azalmasına katkı sağlarken, aynı zamanda çevreye olan olumsuz etkileri de minimize eder. Enerji verimliliğinin artırılması, karbon ayak izinin azaltılması ve sıfır atık hedefine ulaşılması gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, simülasyon teknolojilerinin etkin bir şekilde kullanılmasıyla mümkün olabilir (Du vd., 2024; Hussain vd., 2024a; Nathaniel vd., 2024; Wang vd., 2024). Bilgisayar tabanlı simülasyonların kullanım alanları, yalnızca üretim süreçleriyle sınırlı kalmayıp eğitim ve güvenlik gibi insan odaklı uygulamalarda kendini göstermektedir. Bu kapsamda, özellikle sürüş eğitimlerinde simülasyon kullanımı, önemli bir avantaj sunar (Gong vd., 2024; Jami vd., 2024).

Sürüş eğitimlerinde simülasyon kullanımı, güvenlik risklerini minimize eder. Gerçek araçlarla yapılan eğitimlerde sürücü adayları kaza yapma, maddi hasar verme veya can güvenliğini tehlikeye atma riskleriyle karşı karşıya kalırken, simülatörler bu riskleri tamamen ortadan kaldırır. Böylece sürüş deneyimi, tehlikesiz bir ortamda tekrarlanabilir ve sürücü adayları hatalarını güvenli bir şekilde öğrenme şansı olur (Gangadharaiah vd., 2024a; Himmels vd., 2024; Yang vd., 2022). Aynı zamanda, farklı hava koşulları, trafik yoğunluğu veya zorlu yol koşulları gibi çeşitli senaryolar simülasyon ortamında deneyimlenebilir, bu da sürücülerin farklı koşullara hazırlanmasını sağlar (Amini vd., 2021; Gangadharaiah vd., 2024b; Shangguan vd., 2020; Zahabi vd., 2020).

Simülasyon tabanlı sürüş eğitimleri, yalnızca ekonomik ve güvenlik açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik bağlamında da önemli katkılar sunmaktadır. Fiziksel araçlar yerine simülatörlerin kullanılması, yakıt tüketimi ve karbon salınımını büyük ölçüde azaltarak çevresel etkileri minimize eder. Bu, özellikle büyük filoların eğitimi veya ağır tonajlı araçların kullanıldığı eğitimlerde daha da önemli hale gelir (Matsumoto & Tsurudome, 2014). Gerçek araçlarla yapılan eğitimlerde kullanılan yakıt, araç bakım maliyetleri ve amortisman gibi faktörler göz önüne alındığında, simülasyonlar maliyet avantajı sağlamanın yanı sıra sürdürülebilir bir eğitim modeli sunmaktadır. Bununla birlikte simülasyonların sürüş eğitim süreçlerindeki etkinliğini analiz ederek, geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir bir değerlendirme sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, simülasyon teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği konularındaki potansiyel faydaları üzerine kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş; elde edilen bulgular, gerçek dünya uygulamalarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmaların incelenmesi, simülasyon teknolojilerinin sunduğu fırsatların ve karşılaşılan zorlukların daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Tezde ele alınan temel konular arasında, simülasyonların çevresel sürdürülebilirliğe etkileri, ürün geliştirme süreçlerine sağladığı katkılar ve stratejik karar alma süreçlerindeki rolü yer almaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada simülasyon teknolojilerinin oynadığı kritik önemi vurgulamakta ve gelecekte yapılacak araştırmalar için bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

Tez çalışması kapsamında ise, simülasyon teknolojilerinin sürdürülebilirlik odağında, özellikle 8 farklı Taktik Tekerlekli Zırhlı Araç (TTZA) teknik özelliklerine göre analiz edildi. Askeri araçların karbon ayak izleri hesaplanmış; farklı yakıt türlerinin (dizel, biyodizel, hidrojen) çevresel performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, açık ve kapalı

kabin simülatörlerinin enerji tüketimi ve emisyon değerleri hesaplanarak, bu simülatörlerin elektrik tüketimine bağlı çevresel etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda, simülasyon tabanlı eğitimlerin çevresel açıdan sağladığı avantajlar da ortaya konulmuştur.

2. SİMÜLASYON KAVRAMININ TARİHÇESİ VE GELİŞİMİ

2.1. Simülasyon Kavramı

Simülasyon kelimesi yabancı kökenli bir kelime olup, Türkçede benzetim veya öğretilme olarak ifade edilmiştir (Gürkan Tabak & Ali Göçer, 2013; Zülfikar, 2022). Bazı çalışmalarda ise “sanal gerçeklik” olarak tanımlanmıştır. Simülasyon, gerçek hayatta karşılaşılabilecek bir durumun, bir konunun, bir işleyişin, bir uygulamanın veya bir sistemin yapay ortamlarda taklit edilmesi veya canlandırılmasıdır. Simülasyon, gerçek hayatta karşılaştığımız veya karşılaşmamız muhtemel olan problemlerin çözümüne dair kullanılabilir bir yöntemdir. Simülasyon, yapay bir ortamda bir sistemin veya bir durumun canlandırılarak sebep ve sonuçların analiz edilmesi, oluşabilecek hataların risksiz bir şekilde önceden görülmesi ve gerçek hayatta karşılaşılabilecek durumların yapay ortamda görülerek gerekirse önlem alınması veya buna göre hareket tarzı geliştirilmesi için kullanılır. Simülasyon teknolojileri kullanılarak hem zaman hem de mekân açısından avantajlar elde edilebilmektedir. Araştırma ve inceleme yaparken oluşan sosyal ve ekonomik kaygıların ve gerçek hayatta karşılaşılabilecek risklerin önüne geçilebilmektedir. İyi tasarlanmış bir simülasyon teknolojisi, eğitim alanları için motive edici, ilgi çekici, eğlenceli ve öğreticidir. Bu özellikler, eğitimde kullanılacak bir yöntemde aranılan en önemli özelliklerdir.

2.2. Simülasyonların Tarihçesi

Simülasyon, insanlık tarihi boyunca çeşitli alanlarda kullanılan ve zamanla önemli bir teknik haline gelmiş bir araçtır. İlk kullanımlarının yaklaşık beş bin yıl öncesine, antik Çin'deki "Weich" adlı savaş oyunlarına kadar uzandığı düşünülmektedir. Bu tür oyunlar, askeri stratejilerin test edilmesi ve öğretilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Ayrıca, 1800'lü yıllarda simülasyonlar ordu planlamalarının düzenlenmesinde de önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu dönemde, özellikle savaş stratejilerinin farklı koşullar altında değerlendirilmesi için simülasyonların kullanımı artmıştır. Özellikle Savaş Oyunu 1820'lerde Prusya'da gelişim göstermiş ve iki Prusya subayı (Von Reisswitz ve oğlu) taktik manevraların simülasyonu için yönerge hazırlamışlardır; bu yönerge, Kriegsspiel (Savaş Oyunu) olarak adlandırılan bir formatta tasarlanmıştır. 1824 yılında, Kriegsspiel konsepti Prusya Genelkurmay Başkanı General Von Muffling'e sunulmuş ve bu kişi kavramı ordu içinde tanıtmıştır. Prusya, savaş oyunu kavramını benimseyen ilk ulus olmasına rağmen, kısa sürede diğer ülkeler de bu yöntemi benimsemişlerdir. Kriegsspiel Savaş Oyunu ekipmanları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kriegsspiel Savaş Oyunu Ekipmanları

Kaynak: (History of Wargaming - Wargame Developments, 2025)

Modern simülasyon anlayışının temelleri, 20. yüzyılın başlarına doğru atılmaya başlanmış ve bilgisayar teknolojilerinin gelişimiyle birlikte daha karmaşık ve gerçekçi modeller oluşturulabilmiştir. Literatürde simülasyon, genellikle bilgisayarlar yardımıyla sistemlerin neden-sonuç ilişkilerini modelleyerek, bu sistemlerin gerçek dünyadaki davranışlarını farklı koşullar altında taklit etme teknikleri olarak tanımlanmaktadır (Rosen, 2008).

Simülasyon teknolojilerinin ilk somut örnekleri 1929 yılında Edward Link tarafından geliştirilmiş olan uçak simülatörleriyle ortaya çıkmıştır. Bu simülatörler, 1949'dan sonra ticari amaçlarla kullanılmaya başlanarak özellikle askeri ve sivil havacılık sektörlerinde yaygınlaşmıştır. II. Dünya Savaşı'nda ise simülasyonlar, atom bombasının yapım aşamasında kullanılan nötron çarpışmalarını test etmek gibi tehlikeli ve karmaşık süreçlerin güvenli bir ortamda gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Bu tür uygulamalar, gerçek dünyada gerçekleştirilmesi imkânsız ya da riskli olabilecek deneylerin güvenli bir şekilde yapılmasına olanak tanımıştır (Baarspul, 1990).

Simülasyonun sağlık alanındaki kullanımı ise 1950'lere dayanmaktadır. Başlangıçta, cansız mankenler (phantom) ile gerçekleştirilen anne ve bebek ölüm oranlarını azaltmaya yönelik eğitimler yapılmıştır. Bu dönemden itibaren, sağlık alanında simülasyonlar daha gerçekçi bir hal almış ve cerrahi müdahaleler gibi kritik işlemler üzerinde yapılan eğitimler, daha etkili hale gelmiştir. 1960'lı yıllarda, "Sim One" adıyla anılan ilk insan simülatörünün geliştirilmesiyle sağlık alanında simülasyon kullanımı önemli bir aşamaya gelmiştir. 1980'ler itibarıyla, anestezi uygulamaları ve cerrahi müdahaleler için daha gelişmiş simülatörler piyasaya sunulmuştur. 2000'li yıllarda ise, gerçeğe en yakın simülasyon mankenleri olan "Sim Man" gibi cihazlar kullanılmaya başlanmış ve bu cihazlar halen eğitim süreçlerinde önemli bir

yer tutmaktadır. Teknolojik ilerlemeler, Iowa Enstitüsü'nün 2003 yılında simülasyon platformunun sınırlı hareket problemlerini aşan NADS simülasyonunu tasarlamasını mümkün kılmıştır (Schwarz vd., 2023). NADS simülasyonu Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. NADS-1 simülasyonu

Kaynak: (IOWA College of Engineering, 2012)

Simülasyonlar, özellikle öğrencilerin karar verme ve eleştirel düşünme becerilerini geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğitim süreçlerinde, simülasyonların oyun, rol yapma gibi çeşitli metodolojilerle entegrasyonu, öğrencilerin öğrenme süreçlerini daha verimli ve ilgi çekici hale getirebilmektedir. Bu tür deneyimlerin, öğrencilerin gerçek dünya koşullarında karşılaşılabilecekleri durumlarla ilgili daha fazla bilgi edinmelerine yardımcı olduğu kanıtlanmıştır.

Simülasyon teknolojileri, günümüzde pek çok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları arasında eğitimden araştırma ve geliştirmeye, tasarımdan eğlence sektörüne kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Araştırma ve geliştirme alanında, simülasyonlar yeni ürünlerin tasarım süreçlerinde ve prototiplerin sanal ortamda modellenmesinde önemli bir araç olarak yer almaktadır. Tasarım süreçlerinde de simülasyonlar sanal prototiplerle ürünlerin test edilmesine ve geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Eğitim alanında ise, simülasyon tabanlı eğitimler öğrencilere, belirli sistem ve cihazları gerçek dünyada zarar vermeden kullanabilme deneyimi sunmaktadır. Ayrıca, stratejik karar destek sistemlerinde de simülasyonlar, farklı senaryo ve süreçlerin test edilmesine yardımcı olmakta ve stratejik planlamada önemli veriler sağlamaktadır.

Simülasyonlar, görsel, ses, kontrol ve iletişim gibi çeşitli teknolojilerle desteklenen gelişmiş sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür sistemler, kullanıcıların etkileşimde bulunabileceği ortamları sanal olarak oluşturmakta ve özellikle sağlık, mühendislik ve askeri

alanlarda kritik uygulamaların test edilmesine imkân tanımaktadır (Elsayed, 2024; Turner vd., 2016).

2.3. Simülasyonların Kullanım Alanları

Simülasyonlar, çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Mühendislik: Ürün tasarımı, üretim süreçlerinin optimizasyonu, yapısal analiz (Girmay vd., 2025)
- Tıp: Cerrahi eğitimi, ilaç geliştirme, hastalıkların yayılımının modellenmesi (Bansal & Bhambhwani, 2025)
- Ekonomi: Pazar analizleri, risk yönetimi, finansal modelleme (Villanthenkodath & Pal, 2023)
- Askeriye: Savaş senaryolarının simülasyonu, silah sistemlerinin test edilmesi Atak Helikopteri simülatörü Şekil 2.3.'de gösterilmiştir (Siridol Kjellberg vd., 2024).
- Eğitim: Uçuş eğitimi, sürücü eğitimi, sanal gerçeklik uygulamaları (Krüger vd., 2022)

Simülasyonlar, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir role sahiptir.

Simülasyonlar, üretim süreçlerindeki boşa harcanan zamanı, enerjiyi ve malzemeyi azaltarak verimliliği artırır. Bu sayede üretim maliyetleri düşer ve çevresel etkiler azalır. Yeni ürünlerin ve proseslerin geliştirilmesi sürecinde simülasyonlar, fiziksel prototiplerin üretilmesine gerek kalmadan test edilmesini sağlar. Bu sayede zaman ve maliyet tasarrufu sağlanırken, aynı zamanda çevreye zararlı atık oluşumu engellenir. Simülasyonlar, olası riskleri ve sorunları önceden tespit ederek işletmelerin daha iyi hazırlıklı olmasını sağlar. Bu sayede kazalar, çevresel felaketler ve mali kayıplar önlenir. Ayrıca, çalışanların çevresel konularda bilinçlendirilmesi ve eğitilmesi için simülasyonlar etkili bir araçtır. Örneğin simülasyon sayesinde bir arızanın nasıl oluşabileceğini ve nasıl müdahale edileceği öğrenilebilir (Bokka vd., 2024; Diaz-Navarro vd., 2024).

Simülasyonlar, bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsünün her aşamasında değer katabilir. Tasarım aşamasında, ürünlerin farklı tasarım alternatiflerinin karşılaştırılmasına ve en uygun tasarımın seçilmesine olanak tanır. Üretim aşamasında, üretim süreçlerinin optimizasyonu, darboğazların tespiti ve üretim hatası risklerinin azaltılması gibi konularda kullanılır. Kullanım aşamasında, ürünlerin kullanımının simülasyonu ile kullanıcı hatalarının önlenmesi ve ürün güvenliğinin artırılması sağlanır. Geri dönüşüm aşamasında ise ürünlerin geri dönüşüm süreçlerinin modellenmesi ve optimize edilmesi için simülasyonlar kullanılabilir.

Simülasyonlar, endüstriyel süreçlerin daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir hale getirilmesinde önemli bir role sahiptir. Simülasyon teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, bu teknolojilerin kullanım alanları ve sunduğu faydalar da sürekli olarak artmaktadır (Frenquelli vd., 2025; Obiuto, Olu-lawal, vd., 2024; Obiuto, Ugwuanyi, vd., 2024).



Şekil 2.3. ATAK Helikopteri simülâtörü

(Göksel Yıldırım, 2025)

2.4. Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Eğitimdeki Yeri

Sanal gerçeklik ve simülasyon teknolojileri, eğitim alanında bireylere teorik bilgilerini gerçeğe yakın bir şekilde test etme ve pratik yapma fırsatı sunarak önemli katkılar sağlamaktadır. Bu teknolojiler, öğrencilerin farklı senaryolarla karşılaşarak gerekli becerileri kazanmalarına olanak tanırken, aynı zamanda etkileşimli bir öğrenme ortamı sunmaktadır. Sanal gerçeklik uygulamaları, öğrencilerin nesnelere etkileşim kurarak problem çözme süreçlerine dahil olmalarını ve gerçek dünyada karşılaşmaları zor olan durumları güvenli bir ortamda deneyimlemelerini sağlamaktadır. Bu tür deneyimler, karar verme ve eleştirel düşünme becerilerinin gelişimine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Özellikle yüksek riskli mesleklerde eğitim gören bireyler için bu teknolojiler, güvenli bir ortamda gerçek hayatta karşılaşılabilecek durumlarla ilgili deneyim kazandırarak etkili bir araç haline gelmiştir.

Sanal Gerçeklik (Virtual Reality- VR), kullanıcıları gerçek dünyadan izole ederek, bilgisayar destekli simüle edilmiş bir ortamda bulunmalarını sağlayan bir teknolojidir. Özel ekipmanlar ve yazılımlar aracılığıyla gerçekçi bir deneyim sunan bu teknoloji, eğitimden sağlığa, tasarımdan eğlenceye kadar birçok alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır. VR

teknolojisi, görsel sistemler, etkileşimli kontroller, duyuşal geribildirim ve yazılımlar gibi bileşenlerden oluşur. Görsel sistemler, VR gözlükleri veya başına takılan ekranlarla kullanıcılara üç boyutlu ve dinamik bir görünüm sağlarken, etkileşimli kontroller joystick ve el hareket sensörleri gibi cihazlarla kullanıcıların sanal ortamda navigasyon yapmalarına olanak tanır. Duyusal geribildirim teknolojileri, sesli, dokunsal ve hareket tabanlı geribildirimler ile deneyimi daha gerçekçi hale getirirken, 3D modelleme ve fiziksel simülasyonlarla çalışan gelişmiş yazılımlar VR dünyasının temelini oluşturur. VR gözlük destekli simülasyonlara ait görsel Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Kasowski & Beyeler, 2022; Nassar vd., 2021; Yin vd., 2021).



Şekil 2.4. VR gözlük destekli simülasyonlar

Kaynak: (Riegler vd., 2022)

Simülasyon tabanlı eğitimler, öğrencilerin hata yaparak öğrenmelerini sağlamakta ve bu süreç hem özgüvenlerini artırmakta hem de teorik bilgilerini pratikte uygulayabilme yeteneklerini geliştirmektedir. Bu eğitimlerde, bilgilerin duyma, görme ve dokunma gibi birden fazla duyuyu harekete geçirecek şekilde sunulması, öğrenmenin daha etkili ve kalıcı olmasını sağlamaktadır. Örneğin, tıp alanında cerrahların yapay ortamlarda müdahale ve operasyon pratiği yapmaları, gerçek hasta üzerinde yapılacak işlemlerden önce tecrübe kazanmalarına olanak tanımaktadır. Benzer şekilde, pilotluk gibi risk faktörü yüksek mesleklerde kullanılan gelişmiş simülatörler hem kaza risklerini azaltmakta hem de maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır.

Eğitim ve simülasyon alanında VR, pilot, cerrah veya askeri personel gibi kritik görevlerdeki bireylerin riskli senaryoları sanal bir ortamda tecrübe etmelerine imkân tanır. Sağlık alanında fiziksel rehabilitasyon süreçlerinde hastalara özel egzersiz senaryoları sunulurken, ruhsal sağlıkta anksiyete ve travma tedavisi için maruz kalma terapileri uygulanır. Eğlence ve medya sektöründe sanal turlar, üç boyutlu oyunlar ve interaktif filmler gibi çözümlerle yeni deneyim alanları yaratılırken, ticaret ve pazarlama alanında mağaza içi deneyimler, ürün demonstrasyonları ve sanal alışveriş gibi yenilikçi uygulamalar desteklenir.

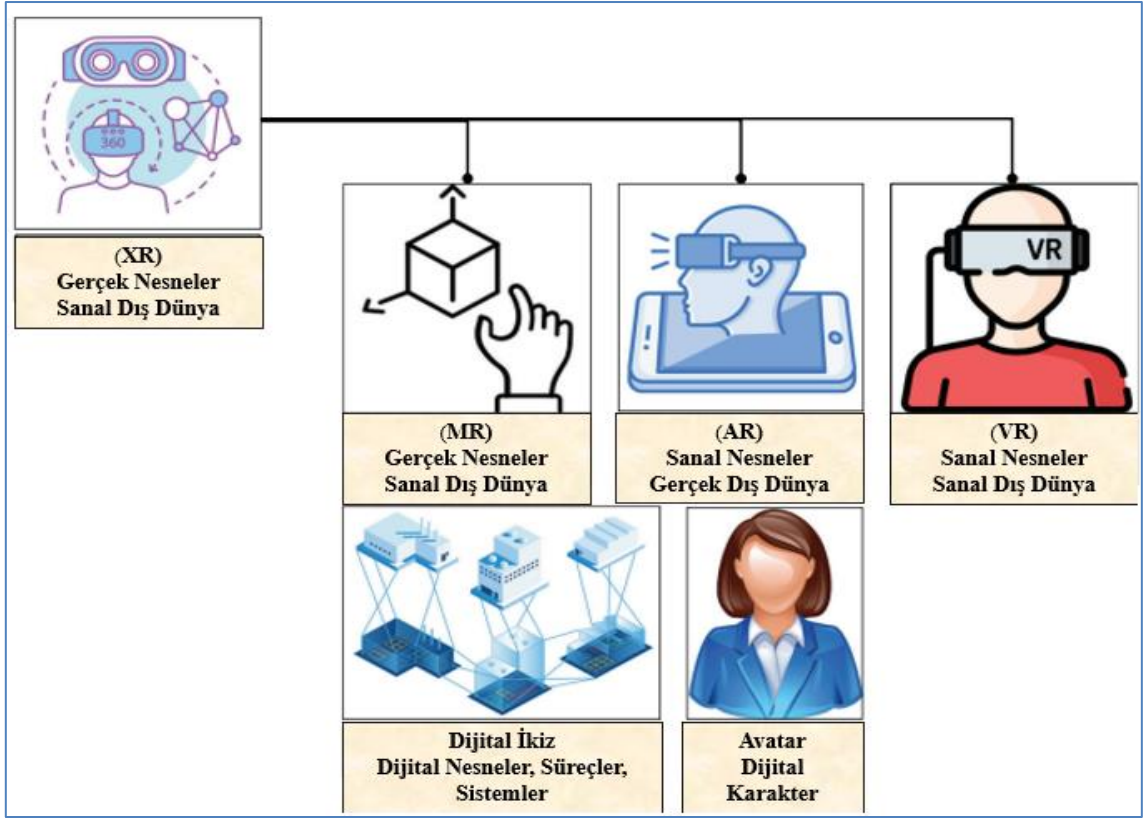
Zihinsel Yükleme Teorisi, eğitimde simülasyon teknolojilerinin kullanımını açıklayan önemli bir yaklaşımdır. Bu teoriye göre insan hafızası sınırlı kapasiteye sahiptir ve aşırı bilgi

yüklenmesi durumunda kavrama performansı düşmektedir. Simülasyon teknolojileri, bilgiyi duylara hitap edecek şekilde düzenleyerek hafızayı gereksiz yere zorlamadan öğrenmenin daha verimli hale getirilmesini amaçlamaktadır. Özellikle karmaşık ve zor konuların öğretiminde, simülasyonlar kullanıcıların dikkatini odaklayarak bilgilerin uzun süreli hafızaya aktarılmasını kolaylaştırmaktadır. Görme, işitme ve dokunma gibi duyları etkin şekilde kullanan bu teknolojiler, öğrenme sürecinde hem teorik hem de pratik becerilerin gelişmesine olanak tanımaktadır.

VR ve simülasyon teknolojileri, risk azaltma, maliyet verimliliği ve erişilebilirlik gibi avantajlar sunarken, yüksek donanım ve yazılım maliyetleri, hareket hastalığı gibi kullanıcı deneyimini etkileyen sorunlar ve teknik altyapı eksiklikleri nedeniyle erişim zorlukları gibi bazı sorunlar da barındırmaktadır. Ancak, gelişen yazılımlar ve donanım çözümleri sayesinde bu teknolojilerin daha kapsayıcı ve uygun maliyetli hale gelmesiyle etkisinin gelecekte daha da artması beklenmektedir. Eğitimden sağlığa, eğlenceden ticarete kadar uzanan geniş bir yelpazede yenilikçi çözümler sunan sanal gerçeklik, bireylerin karar verme ve problem çözme becerilerini geliştirmekte ve öğrenme süreçlerini daha etkili hale getirmektedir.

AR (Augmented Reality), gerçek dünyayı bilgisayarlı görüntüler, sesler veya diğer duysal verilerle zenginleştirerek, kullanıcılara gerçek dünya ile sanal içerik arasında etkileşimli bir deneyim sunar. AR, genellikle mobil cihazlar, gözlükler veya başlıklar gibi taşınabilir aygıtlar aracılığıyla gerçekleştirilir (Berryman, 2012).

MR (Mixed Reality), sanal ve fiziksel dünyaları birleştirerek, dijital ve gerçek öğelerin gerçek zamanlı olarak etkileşimde bulunduğu yeni ortamlar oluşturur. MR, iki dünyanın eş zamanlı olarak var olduğu yerine iki gerçekliğin birleşimini ifade eder.



Şekil 2.5. Genişletilmiş Gerçeklik Hiyerarşisi

Kaynak: (Njoku vd., 2023)

XR (Extended Reality, Genişletilmiş Gerçeklik) olarak da bilinen genişletilmiş gerçeklik hiyerarşisi AR, VR ve MR teknolojilerini kapsayan genel bir terimdir. XR, kullanıcılara gerçeklik deneyimlerini genişleten ve zenginleştiren bir ortam sunar. Buna ait görsel Şekil 2.5.'te gösterilmiştir. Farklı kullanım alanları olmakla beraber örneğin; tıp öğrencileri cerrahi prosedürleri simüle edebilir, mühendisler ürün prototiplerini sanal olarak oluşturabilir ve takım üyeleri farklı coğrafi konumlardan bir araya gelerek sanal toplantılarda iş birliği yapabilir (Herur-Raman vd., 2021; Mourtzis vd., 2024).

3. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE SİMÜLASYON

Sürdürülebilirlik, günümüz mühendislik ve tasarım süreçlerinde önemli bir hedef haline gelmiştir. Özellikle otomotiv ve sanayi sektörlerinde enerji verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve kaynakların verimli kullanımı gibi ilkeler, sürdürülebilirlik stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Bu doğrultuda simülasyon teknikleri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Simülasyonlar, sanayi süreçlerinin çevresel etkilerini en aza indirmek, enerji ve kaynak kullanımını optimize etmek ve ekonomik faydaları artırmak için kullanılmaktadır.

Simülasyon teknolojileri, gerçek ortamlarda test edilmesi zor ya da maliyetli olan süreçlerin güvenli ve kontrollü bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Bu sayede, çevre dostu tasarımlar geliştirilmekte, enerji tasarrufu sağlanmakta ve atıklar azaltılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe, araç performansı ve enerji tüketimi analizleri için kullanılan simülasyonlar, daha verimli ve sürdürülebilir tasarımların hayata geçirilmesine imkân tanımaktadır. Aynı şekilde, sanayi üretim süreçlerinde darboğazların belirlenmesi ve süreçlerin optimize edilmesi için de simülasyonlardan faydalanılmaktadır.

Simülasyonların sağladığı veriler, çevresel etkilerin azaltılmasını ve işletme maliyetlerinin düşürülmesini mümkün kılarken, toplumsal sorumluluk hedeflerinin de hayata geçirilmesine destek olmaktadır. Bu teknolojiler, enerji ve kaynak kullanımını optimize ederek çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirirken, aynı zamanda işletmelerin daha verimli ve yenilikçi yöntemler geliştirmelerine katkıda bulunmaktadır. Böylelikle, sanayi süreçlerinde sürdürülebilirlik stratejileri daha etkin bir şekilde uygulanmakta ve küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınmaya destek sağlanmaktadır.

Sürdürülebilir bir sanayi yapısının oluşturulmasında, işletmelerin enerji verimliliğini artırma, atık yönetimini iyileştirme ve üretim süreçlerini optimize etme gibi stratejiler geliştirmesi kritik önem taşır. Bu süreçte yenilikçi teknolojilerin kullanımı ve çevre dostu malzemelerin tercih edilmesi, doğal kaynakların korunmasına ve sanayinin uzun vadeli geleceğinin güvence altına alınmasına olanak tanır. Aynı zamanda sürdürülebilir iş uygulamaları, şirketlere rekabet avantajı sağlarken toplumsal faydayı da artırmaktadır.

Simülasyon teknolojileri, endüstriyel süreçlerin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesinde önemli bir araçtır. Karmaşık sistemlerin dijital ortamda modellenmesi ve bu modellerin farklı senaryolar altında test edilmesi, süreçlerin daha iyi anlaşılmasını ve iyileştirilmesini mümkün kılar. Üretim hatları, tedarik zincirleri, enerji yönetimi ve atık azaltma

gibi birçok alanda simülasyonlar, süreçlerin çevresel etkilerini minimize ederken ekonomik faydalarını da artırmaktadır. Bu nedenle simülasyon teknolojileri, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Acar & Souri, 2024; Domingo vd., 2021; Pasha vd., 2021; Qazi vd., 2021; Saeid Atabaki vd., 2022).

3.1. Simülasyon Çalışmalarının Çevresel Faydaları

Endüstriyel süreçler, ekonomik büyümeye ve toplumsal gelişime katkıda bulunurken, aynı zamanda çevresel sistemler üzerinde önemli olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu etkiler, sanayileşmenin hız kazandığı 20. yüzyıldan itibaren daha belirgin hale gelmiş ve günümüzde çevresel sürdürülebilirlik için ciddi bir sorun teşkil etmeye başlamıştır. Sanayi faaliyetlerinin çevre üzerindeki temel etkileri arasında şunlar yer almaktadır:

- **Hava Kirliliği:** Sanayi kaynaklı fosil yakıt kullanımı ve üretim süreçleri, karbon dioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot oksitler (NO_x) gibi sera gazlarının yanı sıra, kükürt dioksit (SO₂) ve partikül maddeler gibi kirleticilerin atmosfere salınımına neden olmaktadır. Bu durum, küresel ısınma ve hava kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır.
- **Su Kirliliği:** Sanayi tesislerinden kaynaklanan atık su, kimyasal maddeler ve ağır metallerin su kaynaklarına karışması, su ekosistemlerini olumsuz etkileyerek biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olmaktadır.
- **Toprak Kirliliği:** Endüstriyel atıkların uygun şekilde bertaraf edilmemesi ve kimyasal sızıntılar, tarım arazilerinin verimliliğini düşürmekte ve toprak ekosistemlerini tehdit etmektedir.
- **Kaynak Tüketimi:** Hammadde ve enerji kaynaklarının yoğun bir şekilde tüketilmesi, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve ekosistemlerin dengesinin bozulmasına neden olmaktadır.
- **Atık Yönetimi:** Sanayi süreçlerinden kaynaklanan katı, sıvı ve gaz atıkların artması hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 3.1. Askeri Alanda Simülasyon Çalışmalarının Çevresel Faydalarına ait Görsel

Kaynak: (EUROLAB Laboratory Services, 2025)

Bu etkiler, yalnızca çevre sağlığını değil, aynı zamanda insan sağlığını ve toplumsal refahı da tehdit etmektedir. Dolayısıyla, endüstriyel süreçlerin çevresel etkilerinin yönetilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında acil bir öncelik haline gelmiştir. Sanayi işletmeleri, çevresel etkilerini azaltmak için enerji verimliliği sağlama, temiz üretim teknolojileri benimseme ve atık yönetimi stratejileri geliştirme gibi çeşitli yöntemlere yönelmektedir. Bu yaklaşımlar hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği desteklemek adına kritik bir rol oynamaktadır.

Sürdürülebilirlik hedefleri, sanayi faaliyetlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarda dengeli bir şekilde yürütülmesini amaçlar. Bu hedefler, yalnızca mevcut ihtiyaçları karşılamakla kalmayıp, gelecek nesillerin de kaynaklara erişimini garanti altına almayı hedefler. Sanayi kuruluşları, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için çeşitli stratejiler benimsemektedir. Bu stratejiler, çevresel etkilerin azaltılmasını, kaynak verimliliğinin artırılmasını ve toplumsal faydanın maksimize edilmesini sağlar. Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımları şu başlıklar altında değerlendirilebilir:

- Enerji tüketimi, sanayi sektörünün çevresel etkilerinin önemli bir kaynağıdır. Bu nedenle, enerji verimliliğini artırmaya yönelik teknolojiler geliştirilmesi ve fosil yakıtların kullanımını azaltarak güneş, rüzgâr veya biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapılması kritik bir stratejidir.

- Döngüsel Ekonomi Yaklaşımları: Atıkların azaltılması ve geri dönüşümün artırılması, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Döngüsel ekonomi, atıkların yeni ürünlerin hammaddesi olarak değerlendirilmesini ve böylece çevresel ayak izinin azaltılmasını teşvik eder.

- Temiz Üretim Teknolojilerinin Benimsenmesi: Üretim süreçlerinde çevre dostu teknolojilerin kullanılması, emisyonların ve kirlenici maddelerin azaltılmasına katkıda bulunur. Temiz üretim, aynı zamanda maliyetleri düşürerek işletmelerin rekabet gücünü arttırmaktadır.

- Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetimi: Tedarik zincirinin her aşamasında çevresel ve sosyal etkilerin göz önünde bulundurulması, işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını kolaylaştırır. Bu, çevre dostu hammaddelerin tercih edilmesini ve taşımacılık süreçlerinin karbon ayak izini azaltmayı hedeflemektedir.

- Çalışanların ve Toplumun Katılımını Sağlama: Sürdürülebilirlik, yalnızca teknik uygulamalarla sınırlı değildir. Çalışanların eğitimi ve toplumla iş birliği, sürdürülebilirlik stratejilerinin başarılı bir şekilde uygulanmasında önemli bir rol oynar. Şeffaflık ve sosyal sorumluluk projeleri, toplumsal desteği artırır.

- Karbon Ayak İzi ve Emisyon Azaltımı: İşletmeler, sera gazı emisyonlarını azaltmak için hedefler belirlemekte ve bu doğrultuda karbon dengeleme projeleri geliştirmektedir. Yeşil sertifikasyonlar ve raporlama sistemleri de bu süreçte rehberlik sağlamaktadır.

- Su ve Doğal Kaynakların Korunması: Su kaynaklarının verimli kullanımı, atık suyun geri dönüştürülmesi ve yenilikçi teknolojilerle su tüketiminin azaltılması, sürdürülebilirlik hedeflerinin önemli bir parçasıdır. Aynı şekilde, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi de büyük önem taşımaktadır.

Bu stratejiler, yalnızca çevresel etkilerin yönetimini değil, aynı zamanda ekonomik kârlılık ve toplumsal refah gibi unsurları da kapsamaktadır. İşletmeler, bu yaklaşımlar sayesinde küresel rekabet ortamında avantaj elde edebilir ve sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunabilir (De la Torre vd., 2021; Deviatkin vd., 2021; Fang vd., 2024; Howard vd., 2022; Pamučar vd., 2023; Waudby & Zein, 2021). Askeri alanda simülasyon çalışmalarının çevresel faydalarına ait görsel Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

3.2. Simülasyonların Kullanım Alanları

Simülasyonlar, endüstriyel süreçlerde karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analiz edilmesi için etkili bir yöntemdir. Bu teknolojiler, süreç optimizasyonu, enerji verimliliği ve kaynak kullanımı gibi kritik alanlarda iyileştirmeler sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel

sürdürülebilirliği desteklemektedir. Ayrıca, risklerin azaltılması ve karar verme süreçlerinin iyileştirilmesi açısından güvenli ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Simülasyonların uygulama alanları, üretim hatlarından tedarik zincirlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Çeşitli simülasyon uygulamalarına ait görseller Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

Üretim süreçlerinin dijital simülasyonu, her aşamanın dijital ortamda modellenmesi ve analiz edilmesini sağlar, bu sayede süreçlerin daha verimli hale getirilmesi için önemli bir araçtır. Fiziksel testlerin yerini alarak tasarım hatalarını önceden tespit etmeye, verimsizlikleri ortadan kaldırmaya ve üretim yöntemlerini geliştirmeye olanak tanımaktadır. Dijital ortamda çeşitli senaryolar hızlı bir şekilde test edilerek en verimli üretim yöntemleri belirlenebilmektedir. Bu yaklaşım, üretim süreçlerinin yönetimini etkinleştirir, çünkü gerçek zamanlı verilerle sürekli izleme yapılabilir, böylece anlık müdahaleler mümkün hale gelmektedir. Üretim hattındaki aksaklıklar veya kaynak kayıpları dijital ortamda tespit edilip, fiziksel müdahalelere gerek kalmadan çözülür, bu da zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 3.2. Çeşitli Simülasyon Uygulamaları

Kaynak: (Electric Vehicle Maintenance Simulator, 2025b; Excavator Simulator, 2025)

Dijital simülasyon, aynı zamanda risk yönetimini de iyileştirir. Olası arıza durumları ve sistem aksaklıkları dijital ortamda modellenerek, etkileri önceden öngörülebilir. Bu sayede üretim sürecinin güvenliği artarken, beklenmedik kesintilerin önüne geçilebilir. Yeni ürünlerin üretim süreçlerine entegrasyonu, dijital modelleme ile daha hızlı ve sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu teknolojiler, işletmelere inovatif ve sürdürülebilir üretim yöntemleri geliştirme imkânı sunar, endüstriyel üretimi daha esnek, güvenli ve maliyet etkin hale getirir.

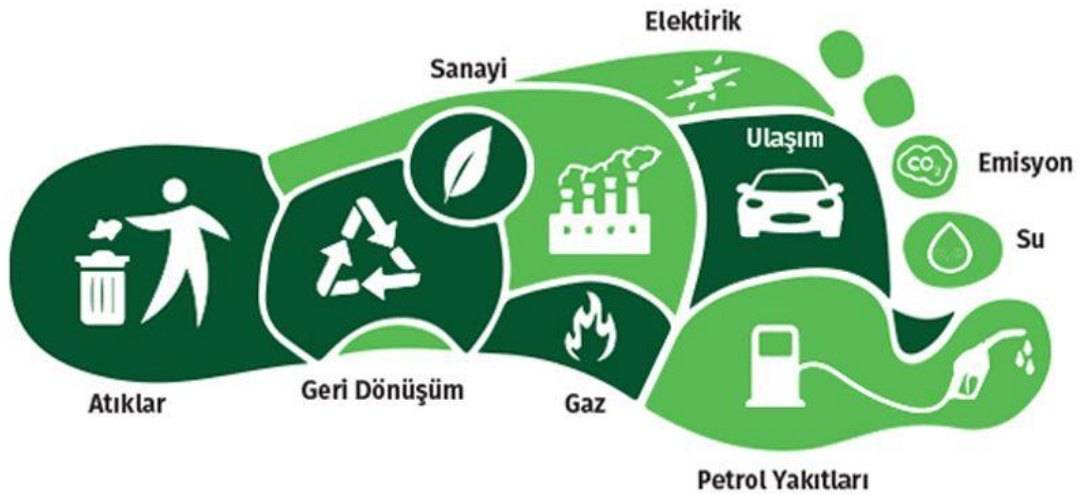
Üretim süreçlerinde simülasyon, üretim hattının verimliliğini artırmak, makine kullanım sürelerini iyileştirmek ve iş gücü dağılımlarını düzenlemek için kullanılır. Üretim hatlarındaki küçük değişiklikler, büyük verimlilik artışları sağlayabilir. Simülasyon yazılımları, bu değişikliklerin olası etkilerini önceden modelleyerek yöneticilerin daha bilinçli kararlar

almasına yardımcı olur. Örneğin, bir otomotiv fabrikasında üretim hattındaki makine arızalarının etkileri analiz edilerek, darboğazlar belirlenebilir. Bu tür simülasyonlar, üretim hattındaki her aşamanın verimliliğini analiz eder ve süreçleri geliştirir (Bretherton vd., 2022; Choi vd., 2021; Collins vd., 2021; Tafidis & Pirdavani, 2023; Zhang vd., 2022).

3.2.1. Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi Azaltımı

Endüstriyel süreçlerin verimliliğini artırmak için dijital modelleme yöntemleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknikler, üretim süreçlerinin analiz edilmesini, darboğazların tespit edilmesini ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Dijital ortamda gerçekleştirilen analizler, gerçek zamanlı performans değerlendirmeleri yaparak maliyet ve zaman tasarrufları sağlar. Böylece, sanayi işletmeleri verimsizlikleri en aza indirerek daha verimli üretim süreçlerine ulaşmaktadır. Erken aşamalarda olası tasarım hatalarının tespit edilmesi ve fiziksel uygulamadan önce çözüm önerilerinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır, bu da hem zaman hem de maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Yüksek risk taşıyan sektörlerde, özellikle kimya ve enerji gibi alanlarda dijital modelleme teknikleri güvenlik yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu araçlar, süreçlerin güvenliğini artırmak için risk analizleri yapmayı ve olası arıza senaryolarını öngörmeyi mümkün kılmaktadır. Gerçek zamanlı izleme ve risk tespiti ile olası aksaklıklar önceden belirlenebilir, böylece sistem güvenliği sağlanır ve arızaların işletmeye zarar vermesi engellenebilmektedir.



Şekil 3.3. Karbon Ayak İzi Şematik Gösterimi

Kaynak: (Karbon ayak izi, 2025)

Yeni ürünlerin tasarım ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi, dijital modelleme teknikleri sayesinde daha hızlı ve düşük maliyetli hale gelmektedir. Dijital ikizler ve yapay zekâ entegrasyonu ile endüstriyel süreçler sürekli olarak izlenebilir ve dinamik analizler yapılabilmektedir. Bu sayede, işletmeler gerçek zamanlı veri analizi yaparak daha doğru kararlar alır ve süreçlerini sürekli geliştirebilmektedir. Bu tür entegrasyonlar, süreçlerin etkin yönetimini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sistemdeki potansiyel iyileştirmeleri de tespit etmede etkili bir araçtır.

Dijital modelleme teknolojileri, çalışanların eğitiminde de önemli bir yer tutar. Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik tabanlı uygulamalar, operatörlerin gerçekçi bir ortamda deneyim kazanmalarına olanak tanımaktadır. Bu eğitim araçları, çalışanların güvenlik riskleriyle ilgili daha bilinçli olmalarını sağlayarak operasyonel verimliliği artırır ve iş gücü performansını iyileştirmektedir. Böylece, işletme ve çalışanlar için sürdürülebilir bir sistem kurulmuş olmaktadır. Bu dijital teknolojiler, endüstriyel süreçlerin daha sürdürülebilir ve rekabetçi hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

Enerji tüketimi ve emisyon değerlerinin iyileştirilmesinde dijital analizler kritik bir rol oynar. Gerçek dünyadaki testlerin maliyetli ve zaman alıcı olduğu durumlarda, sanal ortamda yapılan analizler süreçleri hızlandırır ve daha sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Elektrikli ve hidrojen yakıt hücreli araçların enerji tüketim profilleri gibi alternatif enerji sistemlerinin performansları analiz edilebilir. İçten yanmalı motorlarda karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla geliştirilen yenilikler, sanal ortamda test edilerek daha çevreci tasarımlar elde edilebilir. Araçların sürüş dinamikleri de enerji tüketimini etkileyen önemli bir faktördür; bu parametreler üzerinde yapılan analizler, daha verimli tasarımlar yapılmasını sağlar.

Sera gazı emisyonlarının azaltılması, sürdürülebilirliğin temel hedeflerinden biridir. Endüstriyel süreçlerdeki enerji kullanımının ve çevresel etkilerinin simülasyonu, karbon ayak izinin hesaplanmasında ve emisyonları azaltmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesinde etkili bir araçtır. Bu yöntemler, fosil yakıtların kullanımını en aza indirerek çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır (Lobus vd., 2023; Mondal vd., 2023; Peng vd., 2023; Sarkar vd., 2024; Sharif vd., 2021). Karbon ayak izi şematik gösterimi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.

3.2.2. Enerji Verimliliği ve Simülasyon

Enerji verimliliği, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir bileşenidir ve endüstriyel üretim süreçlerinde büyük bir rol oynar. Enerji kullanımının etkin bir şekilde izlenmesi ve analiz edilmesi, kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanır. Bu analizler, üretim

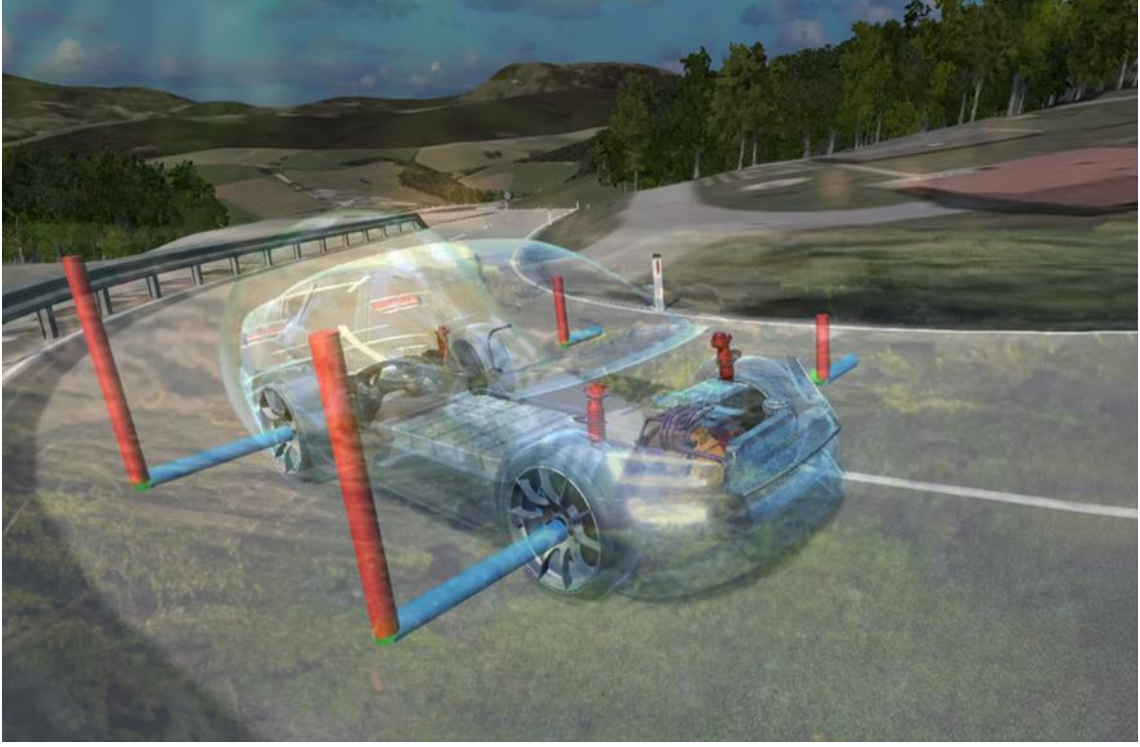
süreçlerinin her aşamasındaki enerji tüketimini belirleyerek, yüksek enerji harcayan noktaların tespit edilmesini sağlar ve bu alanlarda yapılacak iyileştirmeler hem çevresel etkileri azaltır hem de işletmeler için ekonomik faydalar sağlamaktadır. Böylece, enerji tüketimi optimize edilerek, çevre dostu ve maliyet etkin üretim süreçleri oluşturulabilir.

Endüstriyel tesislerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik yapılan analizler, tüketilen enerjinin daha verimli kullanılması için çeşitli stratejiler geliştirilmesine yardımcı olur. Enerji kayıplarının belirlenmesi ve bu kayıpların minimize edilmesi, üretim maliyetlerini düşürürken çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktadır. Enerji verimliliğini artırmak için yapılan iyileştirmeler, sadece enerji maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda işletmelerin çevreye olan etkilerini de önemli ölçüde azaltır. Bu yaklaşım, hem işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarını sağlar hem de üretim süreçlerini daha verimli hale getirir.

3.3. Simülasyonların Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkileri

Simülasyon teknolojileri, endüstriyel süreçlerin sürdürülebilirliğini artırmada önemli bir rol oynar. Bu araçlar, üretim süreçlerinin verimli bir şekilde analiz edilmesini ve optimize edilmesini sağlar, bu da kaynakların daha etkin kullanılmasına olanak tanır. Sınırlı kaynakların daha verimli yönetilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve atıkların minimize edilmesi simülasyonların sunduğu başlıca avantajlardandır. Dijital ortamda yapılan analizler sayesinde, fiziksel denemelere gerek kalmadan üretim süreçlerinde iyileştirmeler yapılabilir ve çevresel etkiler en aza indirgenebilir.

Ayrıca, simülasyonlar ürün tasarım süreçlerinde de sürdürülebilirliği destekler. Yeni ürünlerin geliştirilmesinde, çevresel etkiler dijital ortamda analiz edilerek daha az enerji tüketen, daha az atık üreten ve daha uzun ömürlü tasarımlar yapılabilir. Bu, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca daha sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır. Üretim süreçlerinde verimsizliklerin tespit edilmesi, enerji kayıpları ve hammadde israfı gibi olumsuz faktörlerin minimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, süreçlerin dijital olarak modellenmesi, enerji tüketimi ve çevresel etkileşimlerin önceden belirlenmesini sağlar, böylece daha az zararlı ve daha verimli üretim sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Simülasyonların sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerine ait bir görsel Şekil 3.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Simülasyonların Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkilerine Ait Bir Görsel

Kaynak: (Achieve the Balance, 2025; Çevresel Sürdürülebilirlik Nedir, 2025)

Üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanımı da dijital modelleme ile simüle edilerek döngüsel ekonomi modeline katkı sağlanabilir. Bu yaklaşım hem çevresel etkileri azaltır hem de ekonomik faydalar oluşturur. Simülasyonlar, kaynakların daha verimli kullanılması, enerji tüketiminin azaltılması ve atıkların minimize edilmesi gibi alanlarda sürdürülebilirlik stratejilerinin uygulanmasında önemli bir araçtır. Dijital modelleme, üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirirken daha sürdürülebilir tasarımlar ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesine de olanak tanımaktadır. Bu sayede, endüstriyel süreçler daha çevre dostu hale gelir ve işletmelerin uzun vadede rekabet avantajı elde etmeleri sağlanır (Jang vd., 2022; Javaid vd., 2021; A. A. ; Khan vd., 2022; Ondov vd., 2022).

3.3.1. Kaynak Verimliliği ve Atık Yönetimi

Kaynak verimliliği, endüstriyel süreçlerde doğal kaynakların etkin kullanımını sağlamak için yapılan stratejileri ifade eder. Bu, enerji, su, hammadde ve diğer kaynakların daha az tüketilerek üretim yapılması anlamına gelir. Dijital modelleme ve simülasyonlar, üretim süreçlerinde kaynakların kullanımını optimize ederek verimliliği artırır. Kaynakların daha etkili yönetilmesi hem işletmelerin maliyetlerini düşürür hem de çevresel etkileri azaltır. Özellikle enerji tüketiminin ve su kullanımının minimize edilmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli

hedeflerden biridir. Kaynak verimliliği hem ekonomik hem de çevresel açıdan işletmelere uzun vadeli faydalar sağlamaktadır.

Atık yönetimi, üretim süreçlerinden kaynaklanan atıkların minimize edilmesi ve geri dönüşümünün sağlanması sürecidir. Endüstriyel üretimde atıkların doğru şekilde yönetilmesi çevreye olan zararı azaltır ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlar. Dijital analizler, üretim süreçlerinde atık miktarını azaltmak için farklı senaryoların test edilmesine olanak tanır. Bu sayede, üretim sürecindeki atıklar doğru zamanda ve doğru yöntemlerle kontrol altına alınabilir. Ayrıca, geri dönüşüm süreçleri optimize edilerek atıkların yeniden kullanılabilir hale gelmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.5. Kaynak Verimliliği ve Atık Yönetimine Ait Görsel

Kaynak: (Borusan, 2025)

Kaynak verimliliği ve atık yönetimi, endüstriyel süreçlerde sürdürülebilirliği sağlamada kritik öneme sahiptir. Kaynak verimliliği ve atık yönetimine ait görsel Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Dijital araçlar, bu iki alanı birbirine entegre ederek, süreçlerin çevresel etkilerini minimize eder ve işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur. Atıkların geri dönüşümü ve kaynakların daha verimli kullanılması, çevresel yükleri azaltırken işletmelere de ekonomik avantaj sağlar. Bu iki alanın etkin yönetimi, endüstriyel üretim süreçlerinin daha çevre dostu hale gelmesini ve uzun vadeli rekabet avantajı elde edilmesini sağlamaktadır.

Simülasyon teknikleri, kaynak verimliliği sağlamak ve malzeme israfını minimuma indirmek için etkin araçlar sunar. Bu teknikler, üretim süreçlerini daha verimli hale getirebilir ve aynı zamanda çevresel etkileri azaltabilir. Örneğin, araç tasarımında kullanılan malzemelerin dayanıklılığı ve ağırlığı optimize edilerek daha az malzeme tüketimi sağlanabilir. Üretim süreçlerinde de benzer şekilde, atık miktarını azaltan kesme hızları ve talaşlı imalat yöntemleri uygulanarak verimlilik artırılabilir.

Kaynak verimliliği ve atık yönetimi açısından dijital modelleme, üretim süreçlerinin çevresel etkilerini azaltırken ekonomik faydalar sağlar. Endüstriyel atıkların yönetimi, çevresel etkilerin azaltılması için kritik bir unsurdur. Dijital analizler, üretim süreçlerinde hangi aşamaların daha fazla atık ürettiğini tespit eder ve atıkların azaltılması için stratejiler geliştirir. Ayrıca, su kullanımı da sürdürülebilirliğin önemli bir parçasıdır. Su tüketiminin verimli yönetilmesi ve atık suyun geri kazanımı, sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanır. Bu tür analizler, su kullanımındaki potansiyel tasarrufları belirler ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (U. Ali vd., 2022; Hussain vd., 2024b; X. Li vd., 2023; Udeagha & Ngepah, 2022).

3.3.2. Çevresel Sürdürülebilirliğe Katkılar

Doğal kaynakların korunması ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla endüstriyel süreçlerin şekillendirilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin temel hedeflerinden biridir. Endüstriyel üretim süreçlerinde verimli kaynak kullanımı, enerji tasarrufu ve atıkların doğru yönetilmesi gibi stratejiler benimsenerek çevresel etkiler minimize edilebilir. Dijital araçlar ve modelleme, üretim hattındaki enerji tüketimini, su kullanımını ve hammadde israfını azaltmaya yardımcı olur. Çevresel etkiler, sanal ortamda test edilip optimize edilerek daha sürdürülebilir üretim yöntemleri geliştirilir.

Sürdürülebilir üretim süreçlerinde doğal kaynakların daha verimli kullanılması, çevresel yüklerin azaltılmasına önemli katkı sağlar. Enerji verimliliği, karbon salınımının düşürülmesi ve atıkların geri dönüştürülmesi gibi önlemler, çevresel sürdürülebilirliği doğrudan etkiler. Endüstriyel analizler, üretim sürecindeki potansiyel enerji kayıplarını ve atık üretimini tespit ederek, bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırılmasına yönelik stratejiler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece hem çevresel zararlar azaltılır hem de üretim süreçleri daha verimli hale gelmektedir.

Çevresel sürdürülebilirliğe yönelik iyileştirmeler, doğaya fayda sağlamakla birlikte işletmelerin maliyetlerini de düşürür. Kaynak verimliliği, atık yönetimi ve enerji tasarrufu gibi

unsurların entegrasyonu, üretim maliyetlerini azaltarak ekonomik faydalar sağlar. Bu süreçler, şirketlerin çevresel sorumluluklarını yerine getirirken rekabet avantajı elde etmelerini de mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, çevresel sürdürülebilirliğe katkılar, uzun vadeli ekonomik ve çevresel faydalar sunar, endüstriyel üretimi daha çevre dostu hale getirmektedir.

Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada dijital modelleme tekniklerinin kullanımı giderek artmaktadır. İleri düzey modelleme ve yapay zekâ destekli analizler, daha karmaşık değerlendirmelerin yapılmasına olanak tanır. Bu teknolojiler, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda enerji tüketimi, emisyon azaltımı ve kaynak verimliliği konularında önemli iyileştirmeler sağlar. Gelecekte, akıllı şehirler ve otonom araçlar gibi sistemlerde kullanılan dijital araçlar, çevreye duyarlı çözümler geliştirmeye olanak tanıyacaktır. Bu sayede, sürdürülebilir mühendislikte dijital modelleme ve analizlerin rolü giderek daha kritik hale gelecektir.

4. EĞİTİM ALANINDA SİMÜLASYON FAALİYETLERİ

Eğitim alanlarında simülasyonlar, öğrenme süreçlerini etkinleştirerek riski minimize eder ve teorik bilgilerin pratiğe dökülmesini sağlayarak, katılımcılara gerçek dünya koşullarını taklit eden ortamlar sunmaktadır. Bu sayede, eğitim alanları riskli durumlar içermese de tecrübe kazandıran interaktif senaryolar oluşturulabilmektedir. Güvenlik alanında ise, acil durum yönetimi, kriz senaryoları ve olası tehlikelerle başa çıkma stratejilerinin test edilmesi için kullanılmaktadır. İtfaiye personeli eğitim simülasyonuna ait görsel Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. İtfaiye Personeli Eğitim Simülasyonu

Kaynak: (FLAIM, 2025)

Bu teknolojiler, hataların gerçek dünyada tekrarlanmasını engelleyerek hem bireylerin hem de organizasyonların hazırlıklı olmasını sağlamaktadır. Eğitim simülasyonları, zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayarak daha verimli sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

4.1. Simülasyon Tabanlı Eğitim Uygulamaları

Simülasyon tabanlı eğitim uygulamaları, dijital modelleme ve simülasyon teknolojilerinin eğitim alanına entegrasyonunu sağlamaktadır. Bu yöntemler, öğrencilere teorik bilgilerini pratikte uygulama fırsatı sunarak gerçek dünya, sistem ve süreçlerinin dijital ortamda modellenmesi, katılımcıların güvenli bir şekilde deneyim kazanmalarını mümkün kılmaktadır. Katılımcılar, riskli durumlarla karşılaşmadan farklı senaryolar üzerinde çalışarak öğrenme sürecini hızlandırır ve daha verimli hale getirir. Bu tür eğitimlerin maliyetleri düşürmesi ve süreci hızlandırması, onların tercih edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Eğitimde dijital modelleme, yüksek risk taşıyan sektörlerde özellikle önemlidir. Kimya, enerji ve otomotiv gibi endüstrilerdeki karmaşık süreçler dijital ortamda modellenerek, çalışanların bu süreçleri daha iyi anlamalarını sağlamaktadır. Eğitim sırasında karşılaşılan hatalar dijital ortamda hızla düzeltilebilir, bu da gerçek üretim ortamlarında olası sorunların

önceden belirlenmesini ve çözülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çeşitli senaryolar üzerinde çalışarak, teorik bilgilerin pratikte uygulanabilirliği artırılır.

Bunun yanı sıra, simülasyon tabanlı eğitim iş gücü gelişimi için de büyük avantajlar sunar. Çalışanlar, güvenli bir ortamda kendi hızlarında eğitim alarak becerilerini geliştirebilirler. Eğitim programları, bireysel ihtiyaçlara göre özelleştirilebilir, bu da öğrenme süreçlerini daha verimli kılmaktadır. Ayrıca, bu tür eğitimler, çalışanların teknik bilgi ve becerilerinin yanı sıra problem çözme yeteneklerini de geliştirmelerine olanak tanımaktadır. Böylece, endüstriyel süreçlerde verimlilik artarken, insan hataları da azalır. Dijital modelleme ve simülasyon teknolojileriyle desteklenen eğitimler, daha yetkin ve donanımlı bir iş gücü oluşturulmasını sağlamaktadır (Flandin vd., 2022; Hertel & Millis, 2023; Koukourikos vd., 2021; Wu vd., 2022).

4.1.1. Sürücü Eğitimlerinde Simülasyon Teknolojileri

Sürücü eğitimlerinde dijital modelleme teknolojilerinin kullanımı, sürücülerin çeşitli yol koşullarında güvenli ve etkili bir şekilde eğitim almasını sağlar. Gerçek yol koşullarında karşılaşılan tehlikeli durumlar, dijital ortamda güvenli bir şekilde tekrarlanabilir, bu sayede sürücüler risk almadan bu durumlarla başa çıkma yeteneği kazanır. Ayrıca, farklı hava koşulları, yol tipleri ve acil durum senaryoları gibi çeşitli durumları deneyimlemek, sürücünün teorik bilgilerini pratikte uygulayarak öğrenmesini ve gerçek hayattaki olası tehlikeleri yönetmesini sağlamaktadır. Sürücü eğitimlerinde simülasyon teknolojilerine ait görsel Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sürücü Eğitimlerinde Simülasyon Teknolojileri

Kaynak: (Almallah vd., 2021)

Dijital tabanlı eğitim, öğrenme sürecini hızlandırırken, maliyetleri de düşürür. Geleneksel yöntemlerdeki araç kullanımı ve yolculuk süreleri gibi pratik zorluklar, dijital araçlarla aşılabılır. Sürücüler, simülatörlerde istedikleri zaman ve yerde eğitim alarak becerilerini geliştirebilmektedir. Bu durum, zaman ve kaynak tasarrufu sağlarken, eğitim sürecinin verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, bireysel ihtiyaçlara göre özelleştirilmiş senaryolar, her sürücünün kendi hızında öğrenmesine olanak tanımaktadır.

Eğitimde dijital teknolojilerin kullanılması, güvenliği de artırır. Gerçek araçla yapılan eğitimde karşılaşılan riskli durumlar, dijital ortamda güvenli bir şekilde tekrarlanabilir, böylece sürücüler doğru tepkiler geliştirebilir. Özellikle yeni sürücüler için bu tür eğitimler, deneyim kazanmadan önce çeşitli riskli durumları güvenli bir ortamda yaşama fırsatı sunmaktadır. Bu, trafik kazalarının ve olumsuz olayların önlenmesine yardımcı olmaktadır (Dehghani vd., 2022; Hu vd., 2024a; M. Xu vd., 2023; Z. Xu vd., 2024a).

4.1.2. Farklı Hava ve Yol Koşullarının Deneyimlenmesi

Farklı hava ve yol koşullarının sürücü eğitiminde deneyimlenmesi, sürücülere güvenli araç kullanma becerileri kazandırmada önemli bir rol oynar. Gerçek yol koşullarında ani hava değişimleri ve yol zorluklarıyla karşılaşmak, sürücüler için hazırlıksızlık riski taşır. Dijital eğitim teknolojileri, bu koşulları sanal ortamda oluşturarak sürücülerin bu tür durumlarla başa çıkmalarını sağlamaktadır. Örneğin, yağmur, sis ve kar gibi hava koşullarında araç kullanma becerisi, dijital araçlar ile geliştirilir. Bu eğitim, sürücülerin gerçek hayatta karşılaşılan tehlikeler karşısında daha hızlı ve etkili tepkiler vermelerini mümkün kılmaktadır. Farklı hava ve yol koşullarının simülasyonu Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı Hava ve Yol Koşullarının Simülasyonu Üzerinde Gösterimi

Kaynak: (Driving Life, 2025; Kenneth Wong, t.y.)

Sürücüler, zorlu yol koşullarıyla da dijital ortamda karşılaştırılır. Kaygan, virajlı, engebeli ve dar yollar gibi farklı güzergahlar üzerinde eğitim almak, sürücülerin bu koşullarda doğru sürüş tekniklerini öğrenmelerini sağlamaktadır. Yeni sürücüler, deneyim kazanmadan

önce bu koşullarda eğitim alarak gerçek yolda daha güvenli bir şekilde araç kullanarak öğrenme şansı bulurlar. Bu tür eğitimler, araç kontrolü, hız ayarları ve frenleme tekniklerini doğru şekilde uygulama yeteneğini artırmaktadır.

Eğitim, sürücülerin güvenlik bilincini de geliştirir. Zorlu koşullarda yapılan eğitimler, sadece araç kullanımı becerilerini değil, aynı zamanda riskli durumlarda soğukkanlı kalmayı, panik yapmamayı ve doğru kararlar almayı öğretir. Bu tür eğitimlerin gerçekçi şekilde uygulanması, sürücülerin güvenli sürüş alışkanlıkları edinmesini ve trafik kazalarını azaltmayı sağlamaktadır (Baclet vd., 2023; Hu vd., 2024b; Z. Xu vd., 2024b).

4.2. Güvenlik Risklerinin Azaltılması

Güvenlik risklerinin azaltılması, sürücü eğitimi ve endüstriyel uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir. Riskli durumlarla karşılaşmadan önce bunların dijital ortamda simüle edilmesi, sürücülerin bu durumlara hazırlıklı olmalarını sağlar. Gerçek hayatta karşılaşılması zor veya tehlikeli olan senaryolar, güvenli bir ortamda deneyimlenerek, sürücülerin anlık karar verme becerileri geliştirilir ve kazaların önlenmesine katkı sağlanır.

Zorlu hava koşulları, kaygan yollar veya ani yol değişiklikleri gibi durumlar, sürücüler için ciddi riskler oluşturabilir. Dijital araçlar sayesinde sürücüler, bu tür koşullarda hızla tepki vermeyi öğrenerek olumsuz sonuçların önüne geçme yeteneği kazanmaktadır. Eğitim sırasında yapılan hatalar, gerçek dünyada kaza riski taşımadan düzeltilebilir, bu da güvenliği artırır.

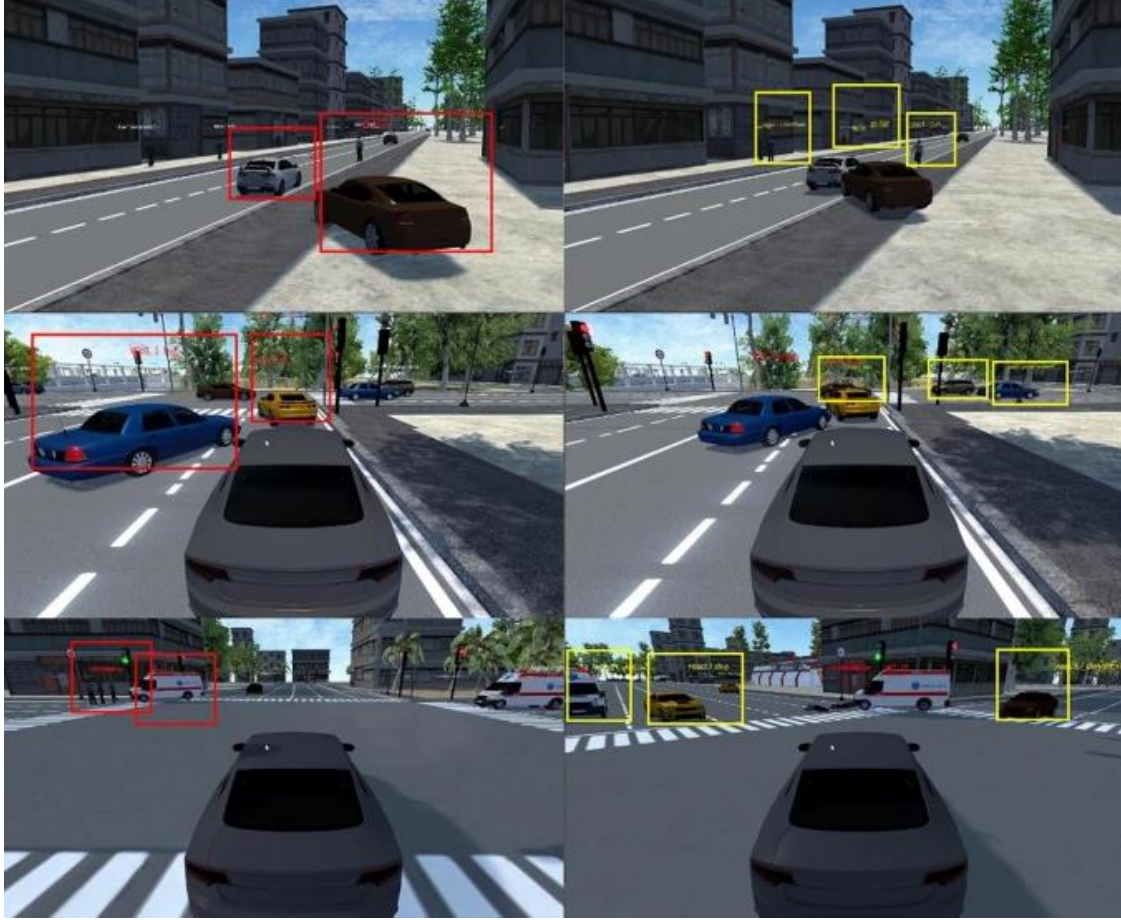
Sürücüler, araç kontrolü ve güvenli sürüş alışkanlıklarını öğrenirler. Temel beceriler, doğru hız ayarlamaları, frenleme ve direksiyon kullanımı gibi alanlarda gelişim sağlar. Riskli durumlarla karşılaşıldığında, sürücüler paniğe kapılmadan doğru müdahalelerde bulunmayı öğrenir, böylece trafik kazalarının oranı azalır.

4.2.1. Kaza Senaryolarının Risksiz Ortamlarda Test Edilmesi

Kaza senaryolarının risksiz ortamlarda test edilmesi, sürücü eğitimi ve endüstriyel süreçlerde güvenlik risklerini azaltmak için etkili bir yöntemdir. Gerçek dünyada meydana gelebilecek tehlikeli durumlar, dijital ortamda güvenli bir şekilde tekrar edilerek sürücüler, bu tür durumlarla karşılaştıklarında nasıl tepki vereceklerini öğrenirler. Bu süreç, sürücülere kazaları ve tehlikeli durumları gerçek bir kaza riski olmadan deneyimleme fırsatı sunar, böylece eğitim süreci daha güvenli hale gelir ve sürücülerin doğru müdahalelerde bulunabilme yetenekleri gelişmektedir.

Kaza anlarında doğru karar verebilme yeteneği, sürücülerin hızla tepki verme becerileriyle doğrudan ilişkilidir. Gerçek kazalar sırasında sürücüler panik yapabilirken, dijital

eğitim araçlarıyla yapılan tekrarlı testler, bu durumlarla başa çıkabilme yeteneklerini geliştirir. Eğitimde, hız, mesafe, yol koşulları ve çevresel faktörler göz önünde bulundurularak sürücülere çeşitli senaryolar sunulabilir. Bu, sürücünün acil durumlarda doğru tepki verme yeteneğini artırırken, kazaların nlenmesine de katkı sağlar. Ayrıca, kaza anı sonrası yapılması gereken güvenli müdahaleler de öğretilir, böylece sürücüler, kazadan önce ve sonrasında nasıl hareket edeceklerini öğrenirler. Araç kaza senaryosu simülasyonuna ait görsel Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Araç Kaza Senaryosu Simülasyonu

Kaynak: (Wen vd., 2020)

Kaza senaryoları üzerinde yapılan eğitim, sürücülerin teknik becerilerinin yanı sıra güvenlik bilincini de artırmaktadır. Bu tür eğitimler, sürücülerin çevresel koşullara uyum sağlama yeteneklerini geliştirirken, kaza risklerini en aza indirir. Sürücüler, daha güvenli ve bilinçli bir Şekilde araç kullanmayı öğrenir, böylece trafik kazalarının nlenmesine önemli bir katkı sağlanır (X. Liu vd., 2025; Pashae & Nahvi, 2023; Zhang vd., 2023; Zhou vd., 2023).

4.2.2. Sürücülerde Refleks Geliştirme ve Acil Durum Yönetimi

Refleks geliştirme ve acil durum yönetimi, sürücülerin güvenli bir şekilde araç kullanabilmesi için kritik öneme sahiptir. Trafikteki ani tehlikeler, sürücünün hızlı ve doğru tepki vermesini gerektirir. Dijital eğitim araçları, bu reflekslerin kazandırılmasında etkili bir yöntem sunar. Sürücüler, çeşitli yol ve hava koşullarında karşılaşılabilecekleri kaza riski taşıyan durumlara karşı eğitilir ve doğru müdahaleleri nasıl yapacaklarını öğrenirler. Bu süreç, sürücülerde panik yapma eğilimini azaltarak, soğukkanlı bir şekilde hareket etmelerini sağlamaktadır.

Eğitimler, sürücülere yalnızca teorik bilgi sunmanın ötesinde, gerçekçi senaryolarla pratik deneyim kazandırır. Zorlu koşullarda doğru hız ayarlamaları, frenleme ve direksiyon manevraları gibi refleks gerektiren durumlar sanal ortamda simüle edilir. Farklı acil durumlar üzerinden yapılan eğitimlerde, sürücüler olası tehlikelere nasıl tepki vereceklerini test ederler. Bu sayede, sürücüler acil durumları daha verimli bir şekilde yönetmeyi öğrenirken, yanlış müdahalelerden kaçınılır.

Acil durum yönetimi eğitimi, sürücünün reflekslerinin yanı sıra stratejik düşünme ve karar alma becerilerini de geliştirir. Sürücüler, tehlikeli bir durumu değerlendirip en uygun müdahaleyi yapma fırsatını bulmaktadırlar. Ayrıca, eğitim sırasında yapılan hatalar gerçek dünyada oluşabilecek kaza risklerini azaltarak sürücülere güvenli sürüş alışkanlıkları kazandırır. Bu yaklaşım, sürücülere her türlü acil durumu doğru bir şekilde yönetme becerisi kazandırır ve trafik güvenliğine katkı sağlamaktadır.

4.3. Eğitim Simülasyon Teknolojilerinin Avantajları

Eğitimde dijital teknoloji kullanımı, katılımcılara teorik bilgilerini uygulamalı olarak geliştirme fırsatı sunar. Gerçek dünyada karşılaşılmaması zor veya tehlikeli olabilecek durumlar sanal ortamda güvenli bir şekilde tekrarlanabilir. Bu sayede, katılımcılar riskleri deneyimleyebilir ve bu durumlarla nasıl başa çıkacaklarını öğrenebilirler. Eğitim süreci sırasında yapılan hatalar, yalnızca öğrenmeye katkı sağlar, çünkü gerçek dünyadaki olumsuz sonuçlar yerine sadece eğitimsel deneyimler yaşanır. Ayrıca, bu yöntem, eğitim maliyetlerini düşürürken süreyi de kısaltır, çünkü katılımcılar, gerçek araç ya da makinelerle uygulamalı eğitim yapmak yerine dijital platformlar üzerinde çalışarak daha fazla deneyim kazanabilirler. Eğitimde simülasyon uygulamalarına ait görsel Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Eğitimde Simülasyon Uygulamalarına Ait Görsel

Kaynak: (Sohel Parvez, 2025)

Dijital eğitim teknolojileri, katılımcılara farklı senaryolar üzerinde çalışma imkânı sunarak, her türlü acil durum ve olağanüstü koşul için hazırlıklı olmalarını sağlar. Etkileşimli eğitimler, katılımcıların sorun çözme yeteneklerini geliştirirken, aynı zamanda onlara stratejik düşünme fırsatı sunar. Bu süreç, güvenlik önlemlerinin artırılmasına ve insan kaynaklı hataların azalmasına katkı sağlar. Katılımcılar, daha hızlı ve doğru kararlar alarak güvenliği artırır.

Endüstriyel alanlarda, özellikle yüksek risk taşıyan sektörlerde, dijital eğitim teknolojileri büyük avantajlar sunar. Kimya, enerji veya otomotiv gibi sektörlerde, karmaşık ve tehlikeli süreçlerin sanal ortamda test edilmesi, çalışanların bu tür durumlarla karşılaştıklarında soğukkanlılıkla hareket etmelerini sağlar. Ayrıca, her katılımcı kendi hızında eğitim alarak, kişiselleştirilmiş bir öğrenme deneyimi elde eder.

4.3.1. Eğitim Maliyetlerinin Düşürülmesi

Eğitim maliyetlerinin düşürülmesi, endüstriyel ve profesyonel eğitim süreçlerinde önemli bir avantaj sağlar. Geleneksel eğitim yöntemleri genellikle yüksek ekipman, materyal ve zaman maliyetleri gerektirirken, dijital eğitim yöntemleri bu giderleri önemli ölçüde azaltır. Gerçek araçlar veya makinelerle yapılan eğitimlerde ekipman hasarı, bakım, yakıt tüketimi ve fiziksel malzeme ihtiyaçları gibi ek giderler ortaya çıkabilir. Dijital ortamda eğitim almak, bu tür masrafları ortadan kaldırır çünkü katılımcılara tecrübe kazandırırken herhangi bir fiziksel kaynak kullanımını gerektirmez.

Eğitim süreleri de dijital eğitim yöntemleriyle kısaltılabilir. Katılımcılar, daha kısa süre içinde daha fazla deneyim kazanabilirler. Yüz yüze eğitimlerde genellikle zaman kaybı yaşanırken, dijital ortamda bireysel eğitim fırsatları sunulur. Bu, grup eğitimlerine kıyasla daha verimli bir öğrenme süreci sağlar ve daha fazla katılımcının kısa sürelerde eğitim almasını mümkün kılar, dolayısıyla maliyetleri azaltır.

Tekrar edilebilirlik, dijital eğitimlerin bir diğer önemli avantajıdır. Gerçek eğitim ortamlarında her senaryo tekrar edilemezken, sanal ortamda aynı senaryo defalarca deneyimlenebilir. Bu, katılımcıların belirli becerileri geliştirmesini sağlar ve eğitimin etkinliğini artırır. Ayrıca, tüm katılımcıların aynı deneyimi yaşaması, eğitimdeki eşitliği artırarak maliyetlerin dengeli dağılımını sağlar. Eğitim kalitesini artırırken, aynı zamanda maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesini sağlar (Chen, 2024; Gulino vd., 2023; Hamad & Jia, 2022).

4.3.2. Tekrar Edilebilirlik ve Esnek Senaryolar

Tekrar edilebilirlik ve esnek senaryolar, dijital eğitim sistemlerinin sağladığı önemli avantajlardır. Gerçek eğitimlerde, belirli bir senaryo ya da durumun tekrar edilmesi genellikle zordur. Ancak sanal eğitim ortamlarında, her türlü senaryo istenildiği kadar tekrarlanabilir. Bu durum, öğrenme sürecinde daha fazla pratik yapma imkânı sunarak, öğrencilerin ya da çalışanların belirli becerileri kazanmalarını hızlandırır. Katılımcılar, aynı senaryoyu defalarca tekrarlayarak hatalarını düzeltebilir ve öğrenmelerini pekiştirebilir, bu da eğitim sürecinin daha etkili olmasını sağlar.

Eğitim süreçlerinde esneklik de önemli bir rol oynar. Farklı durumlar için özelleştirilebilen senaryolar, katılımcılara gerçekçi bir şekilde sunulabilir. Zorlu hava koşulları, trafik kazaları veya makinelerdeki arızalar gibi acil durumlar anında oluşturulabilir ve katılımcıların bu koşullarda nasıl tepki vereceği test edilebilir. Bu esneklik, her katılımcının ihtiyaçlarına göre eğitim almasını mümkün kılar. Ayrıca, senaryolar yalnızca belirli bir duruma odaklanmak yerine birden fazla olasılık ve olayı kapsayacak şekilde tasarlanabilir, böylece katılımcılar daha kapsamlı bir hazırlık süreci geçirir.

Bu özellikler, eğitimlerin kişiselleştirilmesini ve katılımcıların hızlarına uygun şekilde öğrenmelerini sağlar. Senaryolar üzerinde çalışarak becerilerini geliştiren katılımcılar hem teorik bilgi hem de pratik deneyim arasında güçlü bir bağ kurar. Eğitim sonunda, daha yetkin ve bilinçli bireyler yetiştirilmesine olanak tanınır (Ramsey vd., 2022; Stadler vd., 2022; Yan vd., 2021).

5. SİMÜLASYON TEKNOLOJİLERİNİN GELECEĞİ

Teknolojinin hızla gelişen bir alanı olan simülasyon teknikleri, dijitalleşme ve yeni teknolojilerle birleşerek araç simülasyonlarının geleceğini yeniden şekillendiriyor. Yapay zekâ, büyük veri analitiği, dijital ikizler ve otonom sürüş teknolojileri gibi yenilikçi uygulamalar, bu alandaki sistemlerin daha gelişmiş, verimli ve hassas hale gelmesine olanak tanımaktadır. Dijitalleşmenin etkisiyle, simülasyonlar artık yalnızca eğitim alanında değil, endüstriyel üretimden sağlık sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Gelecekte bu teknolojilerin daha yaygınlaşması ve birbirine entegrasyonu beklenmektedir. Gelecekteki simülasyon teknolojilerine ait örnek görsel Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Gelecekteki Simülasyon Teknolojilerine Ait Görsel

Kaynak: (World's biggest computer, 2025)

Gelecekteki simülasyon sistemleri, gelişen teknolojiler sayesinde daha interaktif, özelleştirilebilir ve verimli olacaktır. Kullanıcılar, eğitim süreçlerini bireysel ihtiyaçlarına göre deneyimleyebilme imkânı bulacak, böylece daha hedeflenmiş ve kişiselleştirilmiş bir öğrenme süreci sağlanacaktır. Ayrıca, gelişmiş veri analitikleri ile eğitim sürecinin her aşaması ölçülüp değerlendirilebilecektir, bu da süreçlerin sürekli iyileştirilmesine olanak tanır. Gerçek dünya koşullarına daha yakın, dinamik senaryoların oluşturulabilmesi için sürekli güncellenen veri kaynaklarının entegrasyonu sağlanacaktır.

Yeni teknolojiler, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi uygulamalarla birleşerek, daha sürükleyici ve etkileşimli deneyimler sunacaktır. Katılımcılar eğitimlerini fiziksel dünyadan bağımsız olarak sanal ortamda gerçekleştirebilecektir. Dijitalleşme sayesinde eğitimler daha hızlı, daha ucuz ve daha güvenli hale gelirken, geniş bir kitleye ulaşma potansiyeline sahip olacaktır. Bu entegrasyon, özellikle endüstriyel üretim, sağlık, savunma ve eğitim gibi sektörlerde etkin çözümler sunarak, eğitim ve süreç yönetiminde simülasyonların daha geniş bir rol oynamasını sağlayacaktır.

5.1. Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Destekli Simülasyonlar

Dijital ikiz ve yapay zekâ destekli sistemler, endüstriyel süreçlerin yönetiminde verimliliği artıran ileri düzey teknolojilerdir. Dijital ikiz, gerçek dünyadaki bir nesnenin veya sistemin sanal bir kopyasını oluşturarak, bu modelin gerçek zamanlı verilerle sürekli olarak güncellenmesini sağlar. Bu teknoloji, makinelerden üretim hatlarına kadar çeşitli endüstriyel sistemlerin izlenmesi, analiz edilmesi ve optimize edilmesinde önemli rol oynar. Gerçek zamanlı verilerin entegrasyonu sayesinde dijital ikiz, sürekli gelişen ve doğru içgörüler sunan bir model haline gelir. Yapay zekâ ise bu sistemleri daha akıllı hale getirerek veriler üzerinden anlamlı tahminler yapmayı ve hızlı, doğru kararlar almayı mümkün kılar. Karmaşık endüstriyel ortamlarda, bu iki teknolojinin birleşimi üretim süreçlerinin analizini, aksaklık tahminlerini ve bu aksaklıkların önüne geçmek için önerilerde bulunmayı sağlar. Dijital ikiz ve yapay zekâ destekli simülasyonlarına ait görsel Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Destekli Simülasyonlarına Ait Görsel

Kaynak: (Electric Vehicle Maintenance Simulator, 2025a)

Ayrıca, dijital ikiz ve yapay zekâ destekli sistemler, bakım ve arıza tahminleri gibi önleyici tedbirler için de kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı verilerle sürekli izlenen sistemler, olası arızaları önceden tespit edebilir ve bakım ihtiyaçlarını zamanında belirleyebilir. Bu süreç hem zaman hem de maliyet açısından önemli tasarruf sağlar. Ayrıca bu teknolojiler, eğitim alanında da uygulanabilir. Gerçek dünyadaki riskler ve tehlikeler sanal ortamda tekrarlanarak kullanıcıların bu durumlarla başa çıkma becerilerini geliştirmeleri sağlanabilir. Dijital ikizlerin ve yapay zekânın entegrasyonu, doğruluğu artırarak, daha güvenli ve verimli çalışma koşulları yaratır.

Büyük veri ve yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonu, simülasyon tekniklerinin geleceğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Yapay zekâ, geleneksel yöntemlere kıyasla daha dinamik ve gerçek zamanlı analizler yapabilme kapasitesine sahip olup, veri toplama, kullanıcı davranışları ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak daha doğru ve verimli tahminler yapabilir. Bu, özellikle trafik yönetimi ve yol güvenliği gibi alanlarda büyük avantajlar sağlar. Örneğin, trafik yoğunluğu, hava durumu değişiklikleri ve sürücü davranışları büyük veri kullanılarak analiz edilebilir ve bu veriler üzerinden yeni trafik düzenlemeleri oluşturulabilir.

Dijital ikizler, araçların fiziksel özelliklerini dijital ortamda modelleyerek araç performansı ve güvenliği hakkında sürekli veri toplanmasına olanak tanır. Motorun termal davranışı, batarya şarj döngüleri ve aracın süspansiyon sisteminin tepkileri dijital ikizler sayesinde daha doğru bir şekilde simüle edilebilir. Bu sayede araç üreticileri ve bakım servisleri, araçların performansını daha iyi anlayarak geliştirme ve iyileştirme süreçlerine katkı sağlar. Gerçek zamanlı verilerle sürekli güncellenen dijital ikizler, araçların performansını izlerken olası arızaların önceden tespit edilmesini sağlar.

IoT teknolojilerinin endüstriyel süreçlere entegrasyonu, gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılarak daha doğru veri setlerinin oluşturulmasına olanak tanır. Bu dijitalleşme, üretim süreçlerini daha verimli hale getirir ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında önemli bir hızlandırıcı işlevi görür.

5.1.1. Dijital İkizlerin Fiziksel Süreçlerle Entegrasyonu

Dijital ikizlerin fiziksel süreçlerle entegrasyonu, sanal dünyadaki modellerin gerçek dünya sistemleriyle uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu entegrasyon, fiziksel varlıkların dijital kopyalarının oluşturulması ve bu kopyaların gerçek zamanlı verilerle güncellenmesiyle

mümkündür. Dijital ikizler, gerçek sistemlerin performansını izleyerek, mevcut koşullara dair doğru veriler sunar. Bu sayede, sistemlerin nasıl çalıştığı hakkında derinlemesine bilgiler elde edilebilir ve gelecekteki performansları tahmin edilebilir. Örneğin, bir üretim hattındaki makinelerin dijital ikizleri, bu makinelerin çalışma durumu, verimliliği ve olası arıza riskleri hakkında sürekli bilgi sağlar. Bu, sistemlerin izlenmesi ve iyileştirilmesi için kritik bir adım oluşturur.

Fiziksel süreçlerle entegrasyon, aynı zamanda sistemlerin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Dijital ikizler, üretim süreçlerinde kullanılan makinelerden, enerji tüketimine kadar tüm parametreleri analiz edebilir ve bu analizlere dayanarak optimizasyon önerileri sunabilir. Bu teknoloji, enerji tasarrufu sağlamada, atık yönetimini iyileştirmede ve üretim maliyetlerini düşürmede önemli avantajlar sunar. Ayrıca, dijital ikizler, bakım süreçlerini de optimize edebilir. Sistemlerin dijital kopyaları, makine arızaları veya bakım ihtiyaçları gibi durumları önceden tespit edebilir, böylece bakım ve onarım işlemleri daha verimli hale gelir ve kesintiler en aza indirilir.

Dijital ikizlerin entegrasyonu, endüstriyel süreçlerin sadece izlenmesini değil, aynı zamanda daha etkili bir şekilde yönetilmesini de sağlar. Bu teknoloji sayesinde, sistemlerin durumu sürekli olarak takip edilebilir ve herhangi bir olumsuz durumda hızlı bir şekilde müdahale edilebilir. Dijital ikizler, gerçek dünya verilerinin dijital ortamda simülasyonlarla birleşmesi sayesinde, süreçlerin her aşamasının daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesini mümkün kılar. Böylece hem performans artışı sağlanır hem de süreçlerin daha esnek hale gelmesi mümkün olur. Bu entegrasyon hem üretim süreçlerinde hem de hizmet sektörlerinde daha verimli ve sürdürülebilir sonuçlar elde edilmesini sağlar (Bellapukonda vd., 1M.S.; Ebnali vd., 2023; M. Li vd., 2023; T. Li vd., 2023; J. Xu & Zhang, 2025).

5.1.2. Yapay Zekâ ile Gerçek Zamanlı Veri Analizi

Yapay zekâ ile gerçek zamanlı veri analizi, endüstriyel sistemlerin verimliliğini ve güvenliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknolojilerin birleşimi, büyük miktarda verinin hızlı bir şekilde işlenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılar. Gerçek zamanlı veri, makinelerden, sensörlerden veya diğer sistemlerden sürekli olarak alınan bilgilerden oluşur. Yapay zekâ ise bu verileri analiz ederek anlamlı sonuçlar ortaya koyar. Böylece, sistemler sürekli olarak güncel verilerle beslenir ve anında müdahale gerektiren durumlar tespit edilir. Bu süreç, üretim hatalarının izlenmesi, enerji tüketimi ve makinelerin çalışma durumu gibi pek çok alanda etkili bir şekilde kullanılabilir. Yapay zekâ ile gerçek zamanlı veriye ait görsel Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yapay Zekâ ile Gerçek Zamanlı Veriye Ait Görsel

Kaynak: (Helm.ai, 2025)

Yapay zekâ destekli analizler, yalnızca verilerin toplanmasını değil, aynı zamanda bu veriler üzerinden gelecekteki sorunların öngörülmesini de sağlar. Örneğin, üretim hattındaki makinelerin performansı, geçmiş ve mevcut veriler dikkate alınarak olası arızalar tahmin edilebilir. Bu tahminler, bakım süreçlerinin daha etkili bir şekilde yönetilmesini sağlayarak sistemlerin kesintisiz çalışmasını mümkün kılar. Yapay zekâ, verilerin hızla işlenmesi ve karar destek sistemlerinin güçlendirilmesi noktasında büyük bir avantaj sunar. Ayrıca, karmaşık endüstriyel süreçlerde değişkenlerin tamamını göz önünde bulundurup en uygun çözümü önerme yeteneği, bu teknolojiyi daha etkili kılar.

Bu teknoloji, endüstriyel süreçlerin optimizasyonu açısından da büyük fırsatlar sunar. Gerçek zamanlı verilerin yapay zekâ ile işlenmesi, üretim süreçlerinin her aşamasında daha hızlı ve verimli kararlar alınmasını sağlar. Bu süreç, kaynak kullanımını daha etkin hale getirirken maliyetlerin düşürülmesini ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını mümkün kılar. Yapay zekâ ile yapılan veri analizi, üretim hızını artırırken hata oranlarını da azaltır, böylece verimliliği artırır ve işletmelerin rekabet gücünü pekiştirir. Gerçek zamanlı veri analizi, endüstriyel süreçlerde hızlı adaptasyon ve sürekli iyileştirme için kritik bir araçtır (Y. Liu vd., 2022; Rama Krishna vd., 2023; Villegas-Ch vd., 2024).

6. ARAÇ SİMÜLASYONLARI

Araç simülatörleri ve simülasyon teknikleri, modern mühendislik, lojistik, eğitim ve araştırma süreçlerinde giderek daha önemli hale gelmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisi, askeri uygulamalar ve akademik araştırmalar gibi çeşitli alanlarda bu teknolojiler, sistemlerin verimli, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde geliştirilmesine olanak tanır. Gerçek sistemlerin dinamiklerini analiz etmek ve modellemek, karar alma süreçlerinde kritik bir rol oynar. Araç simülasyonuna ait bir görsel Şekil 6.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Araç Simülasyonu

Kaynak: (Simulation & Motorsport, 2025)

Bu bölümde, araç simülatörlerinin ve simülasyon tekniklerinin teknik avantajları, geçici ve kalıcı dinamiklerinin analizi, sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri ve genel uygulama alanları ele alınacaktır (Jacinto vd., 2024; Ji vd., 2024; Y. Li vd., 2024).

6.1. Araç Simülasyon Tekniklerinin Genel Avantajları

Simülasyon teknikleri, bir sistemin veya sürecin belirli koşullar altında nasıl davrandığını incelemek amacıyla kullanılan modelleme ve analiz yöntemleridir. Bu yöntemler, mühendislik, üretim, lojistik, sağlık, eğitim gibi birçok alanda verimliliği artırmayı ve karar alma süreçlerini iyileştirmeyi hedefler. Karmaşık sistemlerin dinamiklerini anlamak ve optimize etmek amacıyla kullanılan bu araçlar, zaman ve maliyet avantajları sağlarken güvenlik risklerini de azaltır.

6.1.1. Güvenlik ve Risk Azaltımı

Simülasyonlar, gerçek hayatta tehlike oluşturabilecek durumları analiz etme imkânı sunarak, güvenlik risklerini ortadan kaldırır. Özellikle havacılık, otomotiv ve nükleer enerji gibi yüksek risk içeren alanlarda kritik bir rol oynar. Uçuş simülatörleri, pilotların kötü hava koşulları, motor arızaları veya diğer acil durum senaryolarında deneyim kazanmalarını sağlar, böylece gerçek bir uçuşa çıkmadan önce bu durumlarla nasıl başa çıkacaklarını öğrenirler. Araç simülatörleri ise farklı yol ve hava koşullarında sürüş testleri yaparak, sürücülerin ve araçların riskli durumlara nasıl tepki vereceğini güvenli bir şekilde değerlendirir.

Trafik kazaları, küresel ölçekte ciddi bir güvenlik sorunu oluşturmakta ve bu kazaların önlenmesi için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Araç simülatörleri, kazaların sebeplerini ve gelişim süreçlerini analiz etmek için güçlü bir araçtır. Bu simülasyonlar, kazaların nasıl meydana geldiğine dair değerli veriler sunarak, daha güvenli araç tasarımlarının ve etkin trafik düzenlemelerinin geliştirilmesine yardımcı olur.

Kaza senaryolarının oluşturulması, sürücülere farklı acil durumlarda nasıl tepki vermeleri gerektiğini öğretmek için önemli bir yöntemdir. Çarpışmalar, kaymalar ve roll-over gibi kazalar, sürücülerin araçların nasıl tepki verdiğini gözlemleyebilmesi için simüle edilebilir. Bu deneyim, sürücülerin tepkilerini geliştirmelerine ve bu tür durumlarla başa çıkmalarına olanak tanır.

Trafik akışını modelleyerek, sürücü davranışlarını ve etkileşimlerini analiz etmek de kazaların önlenmesinde kritik rol oynar. Hız aşımı, şerit değiştirme gibi tehlikeli sürüş davranışları, trafik düzenlemeleri ve hız limitlerinin optimize edilmesine yardımcı olacak şekilde değerlendirilebilir. Ayrıca, sürücünün karar alma süreçlerini anlamak, bu kararların kaza riskine etkisini analiz etmek için faydalıdır.

Yeni güvenlik teknolojilerinin geliştirilmesi ve test edilmesi açısından araç simülatörleri önemli bir platform sağlar. Gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS), otomatik acil frenleme (AEB) ve şerit takip asistanları gibi sistemlerin etkinliği, simülasyon ortamlarında hızlıca test edilerek kazaların önlenmesine katkı sağlar. Ayrıca, çevresel faktörler, hava durumu ve yol koşulları gibi unsurların etkisi de analiz edilerek, sürücülere güvenli sürüş teknikleri öğretilir (AlJamal vd., 2024; Astarita vd., 2024; Gudavalli & Ravi, 2024; Russo & Rindone, 2024).

6.1.2. Maliyet Etkinliği

Simülasyon teknikleri, gerçek sistemler üzerinde test yapmanın maliyetli olduğu durumlarda ekonomik bir alternatif sunar. Gerçek ortamda yapılan deneyler, yüksek maliyetler ve kaynak tüketimi gerektirirken, sanal ortamda yapılan testler bu maliyetleri düşürür. Örneğin, bir fabrikanın üretim hattının yeniden yapılandırılması gerektiğinde, doğrudan uygulama yapmak maliyetli olabilir. Bunun yerine, farklı senaryoların sanal ortamda test edilmesi, en verimli tasarımın belirlenmesini sağlar. Ayrıca, ilaç geliştirme sürecinde yeni bir ilacın klinik denemeler öncesinde sanal modeller üzerinde test edilmesi hem maliyetleri hem de deneme süresini önemli ölçüde kısaltabilir (K. Liu, 2024; Salahshoori vd., 2024).

6.1.3. Zaman Avantajı ve Hızlı Analiz

Zaman içinde gerçekleşen olayları hızlandırarak, uzun süreli süreçlerin kısa bir zaman diliminde analiz edilmesi, sistemlerin gelecekteki davranışlarını tahmin etmeye ve erken müdahalelerde bulunmaya olanak tanır. Bu yöntem, trafik yönetiminde şehirdeki trafik akışının yıllar içinde nasıl değişeceğini öngörmeye yardımcı olur. Böylece, ulaşım altyapısının gelecekteki ihtiyaçlara uygun şekilde planlanması sağlanabilir. Aynı şekilde, enerji sistemlerinde elektrik şebekelerindeki talep değişikliklerinin zamana bağlı olarak nasıl şekilleneceği incelenebilir, bu da altyapı yatırımlarının daha etkin bir şekilde yapılmasını sağlar.

6.1.4. Objektif Veri ve Karar Destek Sistemi

Karmaşık sistemlerin dinamiklerini analiz etmek, objektif veriler sağlayarak karar alma süreçlerinde etkinlik kazandırır. Bu tür ortamlar, farklı senaryoların test edilmesine olanak tanıyarak, en iyi sonuçları elde edebilecek stratejilerin belirlenmesine yardımcı olur. Örneğin, lojistik sektöründe, teslimat rotalarının performansını analiz ederek, yakıt tüketimini ve teslimat sürelerini minimize eden en uygun yollar tespit edilebilir. Aynı şekilde, tedarik zincirindeki aksaklıklar önceden öngörülerek, depo stok seviyelerinin zamana bağlı değişimi simüle edilebilir ve böylece tedarik süreçleri daha verimli hale getirilebilir (Lim vd., 2024; Schönhofer vd., 2024).

6.1.5. Tehlikeli ve Ulaşılması Zor Koşulların Analizi

Bazı durumlarda, gerçek sistemler üzerinde deney yapmak imkânsız veya tehlikeli olabilir. Bu tür koşullarda, güvenli bir ortamda analiz yapma imkânı sağlar. Örneğin, nükleer santrallerde olası kazaların etkileri önceden değerlendirilerek, santral tasarımı ve acil durum planları optimize edilebilir. Ayrıca, uzay araştırmalarında, uzay araçlarının farklı atmosferik

koşullarda nasıl performans göstereceği sanal ortamda test edilerek, gerçek koşullarda karşılaşılabilecek riskler önceden belirlenebilir (Lv vd., 2024; Yuan vd., 2025).

6.1.6. Eğitim ve Beceri Gelişimi

Simülasyon teknikleri, bireylerin gerçek durumları deneyimlemeden önce sanal bir ortamda öğrenmelerine olanak tanır. Eğitim süreçlerinde bu tekniklerin kullanılması, bireylerin becerilerini geliştirirken gerçek dünyadaki hataların önüne geçilmesini sağlar. Tıp eğitiminde, cerrahi simülatörler doktorların karmaşık ameliyat tekniklerini gerçek bir hasta üzerinde uygulamadan önce öğrenmesini mümkün kılar. Savunma sanayisinde ise askeri personel, savaş senaryolarını sanal ortamda deneyimleyerek stratejik karar alma yeteneklerini geliştirir.

Bu teknikler, sistemlerin dinamiklerini anlamak, maliyetleri düşürmek ve riskleri azaltmak açısından modern teknolojinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Karmaşık sistemlerin analizini kolaylaştıran bu araçlar, karar vericilere güvenilir ve objektif bilgiler sunar. Gerçek dünya uygulamaları, simülasyonların yalnızca teorik bir araç olmadığını, aynı zamanda geniş bir pratik fayda sağladığını gösterir.

Sürücü eğitimi, özellikle yeni sürücüler ve profesyonel araç kullanıcıları için kritik bir süreçtir. Araç simülatörleri, geleneksel eğitim yöntemlerinden daha kapsamlı bir öğrenme ortamı sunarak sürücülere farklı yol koşullarında ve trafik senaryolarında deneyim kazandırır. Bu eğitim, sürücüler için gerçek dünyadaki risklerden korunarak, pratikte karşılaşılabilecekleri zorlukları güvenli bir şekilde öğrenmelerini sağlar.

Gerçekçi trafik senaryoları, araç simülatörlerinin en önemli özelliklerinden biridir. Trafik koşulları, hava durumu ve yol durumu gibi unsurlar, sürücülere değişen çevresel faktörlere uyum sağlama yeteneği kazandırır. Ayrıca, tehlikeli durumlar, örneğin kaygan zeminlerde frenleme veya ani manevra yapma gibi riskli senaryolar, sürücülere bu tür durumlarla başa çıkma becerisi kazandırır. Bu sayede sürücüler, gerçek dünyadaki riskleri deneyimlemeden tecrübe edinirler.

Sürücülerin refleks gelişimi ve acil durum yönetimi, eğitim süreçlerinin diğer önemli bileşenlerindedir. Sürüş simülatörleri, acil fren yapma, araçla yolcu güvenliğini sağlama ve kaza anında doğru tepki verme gibi becerileri geliştirmek için etkili bir ortam sunar. Ayrıca, profesyonel sürücüler için daha karmaşık araç kontrollerini öğrenmek ve özel araç kullanımı gerektiren durumlarla başa çıkmak için de simülatörler idealdir. Bu eğitim yöntemleri, sürücülerin stresli ve tehlikeli koşullarda daha bilinçli ve güvenli kararlar almalarına yardımcı olur.

Araç simülatörlerinin eğitim alanındaki kullanımı, birçok önemli fayda sunar. Gerçek dünya koşullarında eğitim, özellikle profesyonel sürücüler için yüksek maliyetlere neden olabilir. Simülatörler, bu maliyetleri düşürerek sürücülere daha fazla eğitim alma imkânı tanır, böylece hem eğitim sürecinin verimliliği artar hem de bütçeye olan yük azalır.

Tekrar edilebilirlik, simülatörlerin sağladığı bir diğer önemli avantajdır. Aynı koşullar altında yapılan eğitimler, sürücülere zayıf yönlerini tanıma ve bu alanlarda daha fazla pratik yapma fırsatı verir. Bu sayede sürücüler, gelişen ihtiyaçlara göre kendilerini sürekli olarak iyileştirebilir.

İleri seviye eğitim, gerçek dünyada tehlikeli veya zorlayıcı durumların güvenli bir şekilde öğretilmesini sağlar. Şiddetli hava koşulları, yoğun trafik veya acil durum manevraları gibi senaryolar, sürücülere deneyim kazandırarak, onları daha iyi birer profesyonel yapar. Bu durumlar, sürücülerin reflekslerini geliştirirken, gerçek ortamda karşılaşılabilecekleri tehlikeleri önceden simüle ederek güvenli bir şekilde öğrenmelerine olanak tanır (Cherbonnier vd., 2024; Dai vd., 2024; Egonsson & Israelsson, 2024).

6.1.7. Trafik Güvenliği Politikalarına Katkısı

Trafik güvenliği stratejilerinin oluşturulmasında ve iyileştirilmesinde, simülatörler önemli bir araç olarak öne çıkar. Farklı trafik düzenlemeleri, hız limitleri ve güvenlik önlemlerinin etkinliği, bu simülasyonlarla test edilebilir. Örneğin, yeni yol düzenlemeleri ve kavşak dizaynlarının araç sürücülerinin davranışları üzerindeki etkileri simülasyon ortamlarında incelenebilir.

Sürücüler, güvenli sürüş alışkanlıkları geliştirmek için bu teknolojilerden faydalanırken, aynı zamanda araç güvenliği ve trafik yönetimi üzerine de önemli katkılar sağlar. Bu gelişmeler, daha güvenli ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin inşa edilmesine olanak tanır.

Araç simülatörleri, sürücü eğitimi ve trafik güvenliği stratejileri oluşturulmasında kritik bir rol oynar. Güvenli öğrenme ortamları sunarak sürücülere eğitim verirken, aynı zamanda trafik kazalarını önlemeye yönelik yenilikçi stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlar. Sürdürülebilirlik açısından da bu teknolojiler, çevresel etkilerin azaltılması, enerji verimliliği ve kaynak kullanımının optimize edilmesi için etkili bir araçtır. Üretim süreçlerinden tedarik zincirine kadar pek çok alanda kullanılarak bu süreçlerin verimli hale gelmesine yardımcı olur ve gelecekte bu teknolojilerin gelişimiyle daha da etkili sonuçlar elde edilmesi beklenmektedir (M. N. Khan & Das, 2024; Su vd., 2024; Yaibok vd., 2024; Zargiannaki vd., 2024).

7. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma, askeri araçların EN ISO 14064-1 Kurumsal Karbon Ayak izi Standartları gereklilikleri dikkate alınarak doğrudan ve dolaylı emisyon analizleri yapılarak karbon emisyonlarının karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu araçların yakıt tüketimine bağlı olarak Kapsam 1.2 ve Kapsam 3 kategorilerinde karbon emisyon değerleri incelenmiştir. Analizler, farklı yakıt türleri (dizel, biyodizel, hidrojen) ve hidrojenin farklı üretim yöntemleri (RES, GES, Gri H₂, Mavi H₂) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda Taktik Tekerlekli Zırhlı araçların birebir simüle eden simülatörler kullanılarak açığa çıkan emisyonlar Kapsam 2 altında belirlenmiştir.

7.1. Materyal

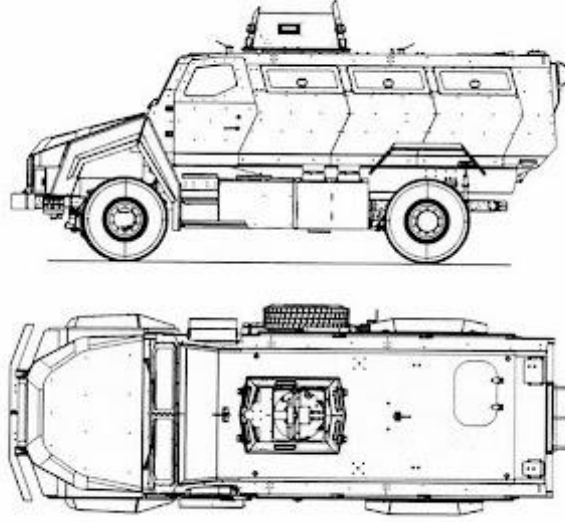
Çalışmada kullanılan veriler, araçların teknik özellikleri, yakıt tüketim değerleri ve emisyon faktörlerini içermektedir. Ayrıca, farklı yakıt türlerinin enerji yoğunlukları, kütle-hacim dönüşümleri ve emisyon katsayıları gibi detaylı veriler IPCC ve DEFRA'dan alınmıştır.

7.1.1. Taktik Tekerlekli Zırhlı Araçlara Ait Teknik Özellikler

Çalışmada dizel yakıt kullanılan 8 adet zırhlı araç TTZA1-TTZA8 arası kodlarla isimlendirilmiştir. Bu araçların teknik özellikleri aşağıda yer almaktadır.

TTZA-1 Zırhlı Aracı

TTZA-1 aracının teknik özellikleri Tablo 7.1'de gösterilmiştir. Bu araç mayın ve balistik korumaya sahip olup, özellikle personelin güvenli taşınmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Yüksek dayanıklılığı, patlamalara karşı güçlü koruması ve arazi şartlarına uyumlu yapısıyla öne çıkar. Genellikle askeri ve güvenlik operasyonlarında kullanılır. TTZA-1 ait görsel Şekil 7.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. TTZA-1 Zırhlı Aracı

Tablo 7.1. TTZA-1 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-1 ZIRHLI ARACI	
Personel	13 kişi
Uzunluk	7350 mm.
Genişlik	2850 mm.
Ağırlık	17.800 kg.
Yükseklik	3765 mm.
Karınaltı Yüksekliği	400 mm.
Aks Açıklığı	4500 mm.
Hız	105 km/s
Menzil	800 km.
Motor	375 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	4x4 Alçak ve Yüksek Hız Seçimi
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	1 m.

TTZA-2 Zırhlı Aracı

TTZA-2 zırhlı aracı TTZA-1 modelinin geliştirilmiş versiyonu olarak daha yüksek koruma, taşıma kapasitesi ve hareket kabiliyeti sunan zırhlı bir personel taşıyıcıdır. Modern güvenlik tehditlerine karşı daha güçlü koruma sağlarken, ergonomik tasarımı ve gelişmiş süspansiyon sistemiyle personelin konforunu artırır. TTZA-2 ait görsel Şekil 7.2.'de, özellikleri ise Tablo 7.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. TTZA-2 Zırhlı Aracı

Tablo 7.2. TTZA-2 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-2 ZIRHLI ARACI	
Personel	13 kişi
Uzunluk	7375 mm.
Genişlik	3000 mm.
Ağırlık	18.142 kg.
Yükseklik	3810 mm.
Karınaltı Yüksekliği	400 mm.
Aks Açıklığı	4300 mm.
Hız	100 km/s
Menzil	750 km.
Motor	375 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	4x4 Alçak ve Yüksek Hız Seçimi
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	1 m.

TTZA-3 Zırhlı Aracı

TTZA-3 zırhlı aracı çevikliği ve çok yönlülüğü ile öne çıkan zırhlı bir araçtır. Hafif ve kompakt yapısı sayesinde farklı arazi koşullarında yüksek manevra kabiliyeti sunar. Modüler tasarımı, farklı görev ihtiyaçlarına uyarlanabilmesine olanak tanırken, personel güvenliğini ön planda tutan zırh korumasına sahiptir. Keşif, devriye ve güvenlik operasyonlarında aktif olarak kullanılmaktadır. TTZA-3 ait görsel Şekil 7.3.'de, özellikleri ise Tablo 7.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. TTZA-3 Zırhlı Aracı

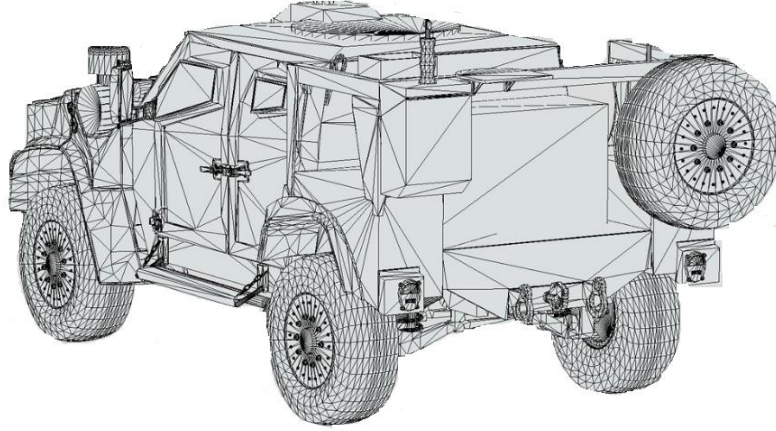
Tablo 7.3. TTZA-3 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-3 ZIRHLI ARACI	
Personel	9 kişi
Uzunluk	5450 mm.
Genişlik	2235 mm.
Ağırlık	6.500 kg.
Yükseklik	2500 mm.
Karınaltı Yüksekliği	400 mm.
Aks Açıklığı	3300 mm.
Hız	115 km/s
Menzil	550 km.
Motor	190 bg.
Vites	4 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 4x4
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	40%
Sudan Geçme	1 m.

TTZA-4 Zırhlı Aracı

TTZA-4 zırhlı aracı, TTZA-3 zırhlı aracına kıyasla daha güçlü koruma, artırılmış taşıma kapasitesi ve gelişmiş arazi performansı sunan zırhlı bir araçtır. Modern tehditlere karşı daha dayanıklı olacak şekilde tasarlanmış olup, esnek yapısı sayesinde farklı görevlerde etkin bir şekilde kullanılabilir. Geliştirilmiş süspansiyon sistemi ve yüksek hareket kabiliyeti ile zorlu arazi koşullarında üstün performans gösterir. Keşif, sınır güvenliği ve operasyonel görevlerde

aktif olarak yer almaktadır. TTZA-4 ait görsel Şekil 7.4.'de, özellikleri ise Tablo 7.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. TTZA-4 Zırhlı Aracı

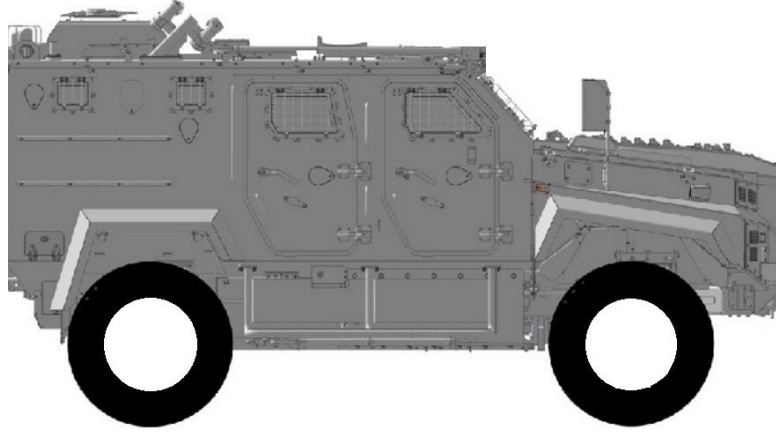
Tablo 7.4. TTZA-4 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-4 ZIRHLI ARACI	
Personel	9 kişi
Uzunluk	6390 mm.
Genişlik	2500 mm.
Ağırlık	12.415 kg.
Yükseklik	3200 mm.
Karınaltı Yüksekliği	400 mm.
Aks Açıklığı	3570 mm.
Hız	110 km/s
Menzil	700 km.
Motor	360 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 4X4
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	1 m.

TTZA-5 Zırhlı Aracı

TTZA-5 zırhlı aracı, yüksek koruma ve üstün arazi kabiliyetiyle öne çıkan zırhlı bir araçtır. Dayanıklı yapısı, zorlu koşullarda güvenli hareket imkânı sağlarken, farklı operasyonel ihtiyaçlara uyarlanabilen modüler tasarımı sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Hem şehir içinde hem de kırsal bölgelerde etkin performans sunarak askeri ve güvenlik güçlerinin

çeşitli görevlerinde aktif olarak kullanılmaktadır. TTZA-5 ait görsel Şekil 7.5.'de, özellikleri ise Tablo 7.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.5. TTZA-5 Zırhlı Aracı

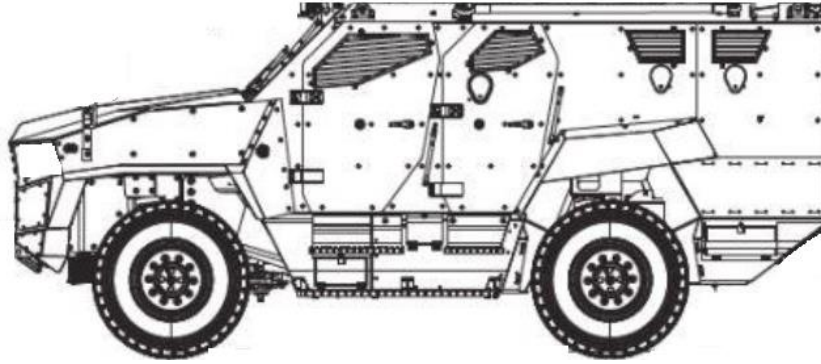
Tablo 7.5. TTZA-5 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-5 ZIRHLI ARACI	
Personel	9 kişi
Uzunluk	5707 mm.
Genişlik	2492 mm.
Ağırlık	14.900 kg.
Yükseklik	3332 mm.
Karınaltı Yüksekliği	461 mm.
Aks Açıklığı	3255 mm.
Hız	120 km/s
Menzil	700 km.
Motor	375 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 4X4
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	0,90 m

TTZA-6 Zırhlı Aracı

TTZA-6 zırhlı aracı, kompakt yapısı ve yüksek manevra kabiliyeti ile dikkat çeken zırhlı bir araçtır. Çeşitli görevlerde esneklik sağlayan tasarımı hem şehir içi hem de zorlu arazi koşullarında etkin kullanım imkânı sunar. Güçlü koruma seviyesi sayesinde personelin güvenliğini ön planda tutarken, çok yönlü yapısı farklı operasyonel ihtiyaçlara uyum

sağlamaktadır. Askeri ve güvenlik güçleri tarafından geniş bir görev yelpazesinde kullanılmaktadır. TTZA-6 ait görsel Şekil 7.6.'de, özellikleri ise Tablo 7.6.'de gösterilmiştir.



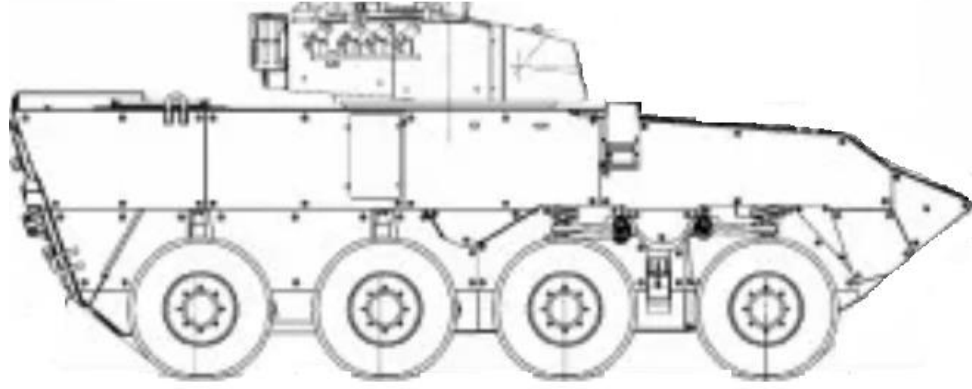
Şekil 7.6. TTZA-6 Zırhlı Aracı

Tablo 7.6. TTZA-6 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-6 ZIRHLI ARACI	
Personel	9 kişi
Uzunluk	6810 mm.
Genişlik	2550 mm.
Ağırlık	18.290 kg.
Yükseklik	3350 mm.
Karmaltı Yüksekliği	400 mm.
Aks Açıklığı	3300 mm.
Hız	110 km/s
Menzil	600 km.
Motor	375 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 4X4
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	0,80 m

TTZA-7 Zırhlı Aracı

TTZA-7 zırhlı aracı yüksek hareket kabiliyeti ve modüler tasarımıyla dikkat çeken zırhlı bir araçtır. Farklı görevler için uyarlanabilen yapısı, geniş operasyonel esneklik sunarken, dayanıklı gövdesi personel güvenliğini ön planda tutar. Hem kara hem de su engellerini aşabilen özellikleri sayesinde zorlu arazi şartlarında etkin bir performans sergilemektedir. Askeri ve güvenlik operasyonlarında çeşitli roller üstlenebilmektedir. TTZA-7 ait görsel Şekil 7.7.'de, özellikleri ise Tablo 7.7.'de gösterilmiştir.



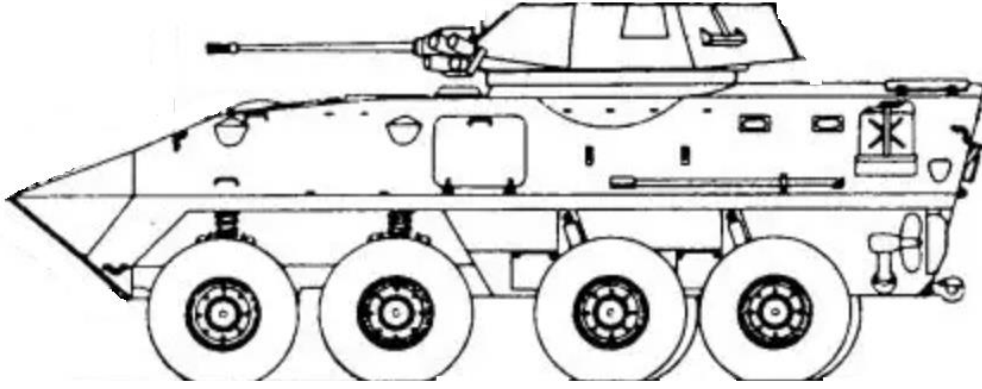
Şekil 7.7. TTZA-7 Zırhlı Aracı

Tablo 7.7. TTZA-7 Zırhlı Aracı Özellikleri

TTZA-7 ZIRHLI ARACI	
Personel	12 kişi
Uzunluk	7350 mm.
Genişlik	2670 mm.
Ağırlık	14500 kg.
Yükseklik	2080 mm.
Karmaltı Yüksekliği	450 mm.
Aks Açıklığı	2200 mm.
Hız	105 km/s
Menzil	700 km.
Motor	449 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 8x8
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	1,50 m

TTZA-8 Zırhlı Aracı

TTZA-8 zırhlı aracı modüler yapısı ve yüksek koruma seviyesiyle öne çıkan taktik tekerlekli zırhlı bir araçtır. Görev ihtiyaçlarına göre farklı konfigürasyonlara uyarlanabilen tasarımı, esnek kullanım imkânı sunar. Dayanıklı şasisi ve gelişmiş hareket kabiliyeti sayesinde hem şehir içinde hem de zorlu arazi koşullarında güvenli ve etkili bir şekilde görev yapabilir. Çeşitli askeri ve güvenlik operasyonlarında aktif olarak kullanılmaktadır. TTZA-8 ait görsel Şekil 7.8.'de, özellikleri ise Tablo 7.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.8. TTZA-8 Zırhlı Aracı

Tablo 7.8. TTZA-7 Zırhlı Aracı Özellikleri

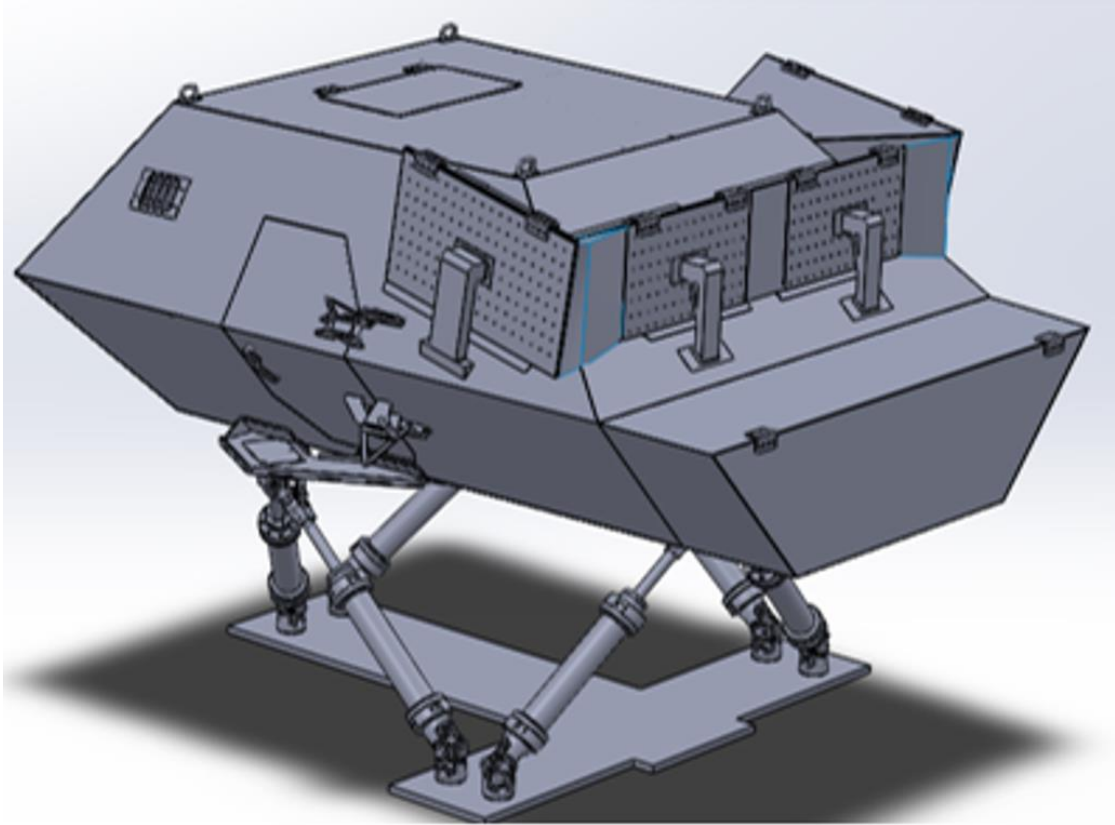
TTZA-8 ZIRHLI ARACI	
Personel	8 kişi
Uzunluk	7930 mm.
Genişlik	2990 mm.
Ağırlık	24500 kg.
Yükseklik	2370 mm.
Karınaltı Yüksekliği	450 mm.
Aks Açıklığı	2200 mm.
Hız	103 km/s
Menzil	1100 km.
Motor	711 bg.
Vites	6 ileri 1 geri tam otomatik
Çekiş	Sürekli 8x8
Tırmanma Eğimi	60%
Yan Eğim	30%
Sudan Geçme	1,50 m

7.1.2. Simülatörler

7.1.2.1. Kapalı Kabin Simülatörü (KK)

Kapalı kabin araç simülatörleri, Taktik Tekerlekli Zırhlı Araçlar (TTZA) için gerçekçi bir eğitim ortamı oluşturmak amacıyla geliştirilmiş ileri düzey simülasyon sistemleridir. Bu sistemler, sürücü, komutan ve nişancı olarak eğitim alacak sürücülerin yetkinlik kazanmasını sağlamak üzere özel bileşenler ve yüksek hassasiyetli hareket sistemleri içermektedir. Simülatör, eğitim sürecinin etkinliğini artırmak, operasyonel becerileri geliştirmek ve gerçek saha ortamına en yakın deneyimi sunmak amacıyla tasarlanmıştır.

Kapalı kabin simülator sistemleri, üç temel bileşenden oluşmaktadır: Simülator Kabini, Eğitim Konsolu ve 6DOF (Altı Serbestlik Derecesi) Hareketli Platform'dur. KK üç ekseninde (x, y, z) yönelim olmak üzere toplam altı serbest hareketini özelliğine sahiptir. Bu bileşenlerin her biri, kullanıcıya gerçekçi bir eğitim deneyimi sunmak ve simüle edilen araç hareketlerini mümkün olan en yüksek doğrulukla yansıtmak için özel olarak tasarlanmıştır. Kapalı kabin simülatorü Şekil 7.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Kapalı Kabin Simülatorü

Simülator kabini, gerçek TTZA araçlarının iç mekân tasarımını ve ergonomisini birebir taklit eden bir yapıya sahiptir. Kabin, sürücü, komutan ve nişancı gibi farklı görev pozisyonları için optimize edilmiştir. Her bir kullanıcı için, gerçek araçlarda bulunan kontrol mekanizmalarının işlevsel karşılıkları simülator içerisine entegre edilmiştir. Sürücüler, gerçek operasyonlar sırasında karşılaşılabilecekleri kontrol senaryolarına yönelik pratik yapabilmektedir. Kapalı kabin simülatorlerinde, sürücülerin dış çevreyi en iyi şekilde algılaması için araç camlarının arkasına monte edilen LCD ekranlar kullanılmaktadır. Bu ekranlar, gerçek zamanlı olarak dış dünya görüntüsünü üç boyutlu olarak yansıtan yüksek çözünürlüklü görselleştirme sistemleriyle donatılmıştır. Simülasyon yazılımı, sürücünün göz hizasına ve bakış açısına uygun şekilde, çevresel etkileşimleri ve hareket algısını en üst düzeye

çıkarmak biçimde görüntüleri oluşturur. Kabin tasarımında ayrıca, gerçek araçlardaki titreşim ve sarsıntı hissini simüle edebilmek amacıyla titreşim motorları ve mekanik geri bildirim sistemleri entegre edilmiştir. Böylece sürücüler, zorlu arazi koşulları, hızlanma, frenleme ve silah kullanımına bağlı geri tepmeleri birebir deneyimleyebilmektedir.

Eğitmen konsolu, simülatör ortamının merkezi yönetimini sağlayan ve eğitim sürecini takip etmeye olanak tanıyan kontrol mekanizmasıdır. Bu konsol, simülasyon sürecinin başlatılması, durdurulması, farklı senaryoların uygulanması ve kullanıcı performanslarının değerlendirilmesi gibi kritik işlevleri yerine getirmektedir. Eğitim, konsol üzerinden sürücülere farklı senaryolar atayabilir, hava ve arazi koşullarını değiştirebilir, acil durum senaryolarını etkinleştirebilir ve sistem üzerinde anlık müdahalelerde bulunabilir. Aynı zamanda, sürücünün yaptığı hatalar ve geliştirilmesi gereken beceriler, konsol üzerinden kaydedilerek detaylı analiz raporları oluşturulabilir.

Kapalı kabin simülatörlerinde 6DOF hareketli platform kullanılarak simüle edilen aracın dinamik hareketleri gerçeğe en yakın şekilde hissedilir hale getirilmektedir. 6DOF sistemi, altı ekseninde hareket kabiliyeti sunarak ileri-geri hareket, yanlara hareket, dikey hareket, yuvarlanma hareketi, eğilme hareketi ve dönme hareketi gerçekleştirebilir. Bu hareket kabiliyeti sayesinde, aracın farklı arazi tiplerinde ilerlerken yaşadığı tüm fiziksel etkiler sürücülere gerçekçi bir şekilde hissettirilmektedir. Engebeli arazide araç sürerken yaşanan sarsıntılar, virajlarda meydana gelen eğilme hareketleri ve frenleme sırasında ortaya çıkan öne doğru yığılma hissi, 6DOF platformu tarafından gerçeğe en yakın şekilde simüle edilmektedir. Bu sistem aynı zamanda, ateşli silah kullanımında oluşan geri tepme etkilerini simüle edebilmek için optimize edilmiştir. Nişancı pozisyonunda bulunan sürücü, ateş ettiğinde silahın geri tepmesini hissederek daha gerçekçi bir eğitim deneyimi yaşar.

Simülatör ortamının görselleştirilmesi, yüksek çözünürlüklü LCD ekranlar ve sanal gerçeklik algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanıcıların gerçek araç içerisindeki görüş alanına uygun şekilde konumlandırılan ekranlar, dış dünyayı gerçeğe en yakın biçimde yansıtmak üzere programlanmıştır. Ayrıca, sistemde göz takip sensörleri bulunarak sürücünün hangi noktaya odaklandığı tespit edilmekte ve simülasyon dinamikleri bu verilere göre optimize edilmektedir. Kullanıcı baş hareketleri ile görüş açısını değiştirebilmekte ve simülasyonun iç dinamikleri, doğal insan göz hareketlerine uygun şekilde yanıt vermektedir.

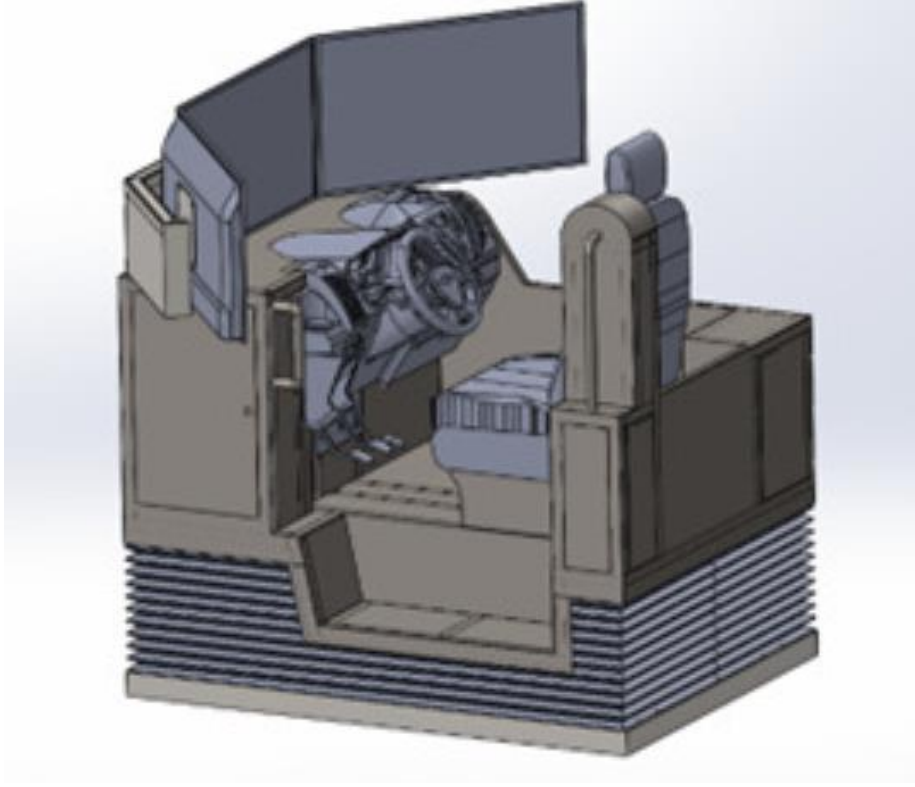
Simülatör kabine giriş, gerçek TTZA araçlarındaki tasarım prensiplerine uygun olarak, kabin arkasında bulunan kapı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım, gerçek dünya operasyonlarında sürücülerin araç içerisine giriş ve çıkış süreçlerini deneyimlemelerini

sağlamak amacıyla yapılmıştır. Ayrıca, simülatör içerisindeki tüm düğmeler, göstergeler ve kontrol sistemleri dokunsal geri bildirim (haptic feedback) mekanizması ile desteklenmiştir. Kullanıcılar, araç içerisindeki tüm buton ve kontrol sistemlerine fiziksel tepki hissiyle etkileşim sağlayarak gerçek dünyadaki kullanım deneyimine en yakın simülasyon ortamını yaşamaktadır.

Kapalı kabin araç simülatörleri, askeri ve güvenlik güçlerinin eğitim ihtiyaçlarına yönelik olarak tasarlanmış, yüksek doğruluk ve gerçekçilik sunan sistemlerdir. 6DOF hareketli platformu, LCD ekranlarla desteklenen görselleştirme sistemi ve eğitmen konsolu gibi gelişmiş bileşenlerle donatılan bu sistemler, sürücülerin gerçek operasyonlara hazır hale gelmesini sağlamaktadır. Bu tür simülasyon sistemleri, saha eğitimine olan bağımlılığı azaltarak maliyetleri optimize ederken, aynı zamanda daha güvenli bir öğrenme ortamı sağlamaktadır. Günümüzde hızla gelişen sanal gerçeklik teknolojileriyle entegre edilen kapalı kabin simülatörleri, gelecekte daha geniş uygulama alanlarıyla eğitim ve operasyonel hazırlık süreçlerinde kritik bir rol oynamaya devam edecektir.

7.1.2.2. Açık Kabin Simülatörü (AK)

Açık kabin simülatörleri, otobüs ve devriye müdahale araçlarının gerçekçi bir şekilde simüle edilmesi amacıyla tasarlanmış, sürücü eğitimi için özel olarak geliştirilmiş sistemlerdir. Bu simülatörler, sürücülere gerçek dünya koşullarına yakın bir deneyim sunarak, sürüş tekniklerini ve operasyonel yetkinliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Açık kabin simülatörleri, simülasyon yazılımı, otobüs ve devriye müdahale aracı kabinleri ve eğitmen konsolu olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Simülasyon sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için, bu bileşenler arasında yüksek düzeyde entegrasyon sağlanmış ve sistem dinamikleri gerçek sürüş koşullarını en iyi şekilde taklit edecek şekilde tasarlanmıştır. Açık kabin simülatörü Şekil 7.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Açık Kabin Simülâtörü

Simülasyonun temelini oluşturan simülasyon yazılımı, araç hareketlerinin sanal ortama aktarılması ve kullanıcıya gerçekçi bir deneyim sunulması için geliştirilmiş bir platformdur. Eğitim konsolu üzerinden yönetilen bu yazılım, eğitim sürecini yönlendiren çeşitli modülleri içermektedir. Eğitim konsolu modülü, simülasyonun başlatılması, senaryoların yönetimi ve kullanıcı performansının değerlendirilmesi gibi işlevleri yerine getirmektedir. Arazi oluşturma modülü, farklı coğrafi ve meteorolojik koşullara uygun sanal ortamların oluşturulmasını sağlayarak, sürücülerin çeşitli sürüş senaryolarını deneyimlemesine olanak tanımaktadır. Geribildirim (debriefing) modülü, eğitim sonrasında yapılan değerlendirmeler için kayıtları analiz etme ve sürücülere geri bildirim sunma işlevine sahiptir. Ölçme ve değerlendirme modülü, sürücülerin performans verilerini analiz ederek, eğitim sürecinin gelişimine yönelik objektif veriler sağlamaktadır. Tüm bu modüller, eğitmenin inisiyatifi doğrultusunda esnek bir şekilde çalıştırılabilmekte ve eğitim sürecinin verimliliğini artırmaya yönelik olarak uyarlanabilmektedir.

Açık kabin simülâtörlerinde kullanılan araç kabinleri, gerçek araç kokpitlerinin birebir kopyası olacak şekilde tasarlanmış olup, ergonomik yapıları sayesinde sürücü adaylarının eğitim sürecine en iyi şekilde adapte olmalarına yardımcı olmaktadır. Araç kontrol mekanizmaları, direksiyon, pedallar, vites ve diğer işlevsel bileşenler gerçek araçlardaki

hissiyatı verecek şekilde modellenmiş ve dokunsal geri bildirim mekanizmaları ile desteklenmiştir. Bu özellikler, sürücülerin gerçek bir araç kullanıyormuş hissini yaşamasına olanak tanımakta ve eğitim sürecinin etkinliğini artırmaktadır.

Simülâtörün hareket dinamiklerini desteklemek amacıyla, açık kabin simülâtörlerinde 2DOF (İki Serbestlik Derecesi) hareketli platform sistemi kullanılmaktadır. Yani bir araç ya da nesnenin iki ekseninde (x, y) yönelim olmak üzere toplam iki serbest hareketini ifade eder. Bu sistem, aracın ileri-geri ve sağ-sol yönlü hareketlerini simüle ederek, sürüş sırasında yaşanabilecek ivmelenme, frenleme ve viraj dönüşü gibi fiziksel kuvvetleri sürücülere hissettirmektedir. 2DOF hareketli platform, sürüş esnasındaki sarsıntıları ve yol yüzeyinin etkilerini gerçekçi bir şekilde yansıtarak, sürücülerin reflekslerini geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Bu platform üzerine oturtulmuş olan simülâtör kabininin ön ve yan kısımlarına yerleştirilen yüksek çözünürlüklü LCD ekranlar, sanal ortamın kullanıcıya üç boyutlu olarak sunulmasını sağlamaktadır. Kullanıcı, ekran önünde bulunduğu konumdan gerçek araçtaki görüş açısına en uygun perspektifi elde edebilmekte, böylece sürüş deneyimi gerçeğe yakın bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. 2DOF açık kabin simülâtörü Şekil 7.11.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.11. 2DOF Açık Kabin Simülâtörü

Kaynak: (Demirci B, 2023)

Sürücülerin simülâtör kabinine erişimi, gerçek araçlardaki giriş mekanizmalarına uygun olarak tasarlanmıştır. Kabine giriş, arka tarafta bulunan kapı üzerinden gerçekleştirilmekte ve böylece kullanıcıların araca iniş ve biniş süreçleri, gerçek operasyonlardaki koşullara uygun şekilde deneyimlenebilmektedir. Bu tasarım, özellikle otobüs ve devriye müdahale araçlarında sürücü değişimi veya acil tahliye gibi senaryoların eğitim süreçlerine entegre edilmesine olanak

sağlamaktadır. Kullanıcıların simülatör içerisindeki kontrolleri, gerçek araçlardaki kullanım ergonomisine uygun olarak yerleştirilmiş ve sistemin tüm bileşenleri fiziksel geri bildirim sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Simülatörün yönetimi ve eğitim faaliyetlerinin organizasyonu eğitmen konsolu üzerinden gerçekleştirilmektedir. Eğitmen konsolu, sistemin ilk açılması, senaryo yüklenmesi, eğitim sürecinin başlatılması ve değerlendirme aşamalarını yöneten bir kontrol merkezi işlevi görmektedir. Eğitmen, konsol üzerinden farklı sürüş senaryoları tanımlayabilir, trafik yoğunluğu, hava koşulları ve yol yapıları gibi çevresel faktörleri belirleyebilir. Aynı zamanda sürücülerin eğitim sırasında yaptığı hatalar kayıt altına alınarak, bireysel performans analizleri oluşturulabilmektedir. Bu veriler, eğitim sürecinin geliştirilmesine yönelik olarak eğitmen tarafından detaylı bir şekilde değerlendirilebilmekte ve sürücülere geri bildirim sağlanarak eksik yönlerin giderilmesine yönelik stratejiler belirlenebilmektedir.

Açık kabin simülatörleri, otobüs ve devriye müdahale araçları gibi büyük ölçekli taşıtların eğitim süreçlerini optimize etmek amacıyla tasarlanmış olup, gerçekçi fizik motorları, hareketli platformlar ve gelişmiş görselleştirme sistemleri ile donatılmıştır. Bu sistemler, saha eğitimine duyulan ihtiyacı azaltarak, güvenli ve maliyet etkin bir eğitim ortamı sunmaktadır. Günümüz teknolojileri ile entegre edilen sanal gerçeklik ve dokunsal geri bildirim sistemleri sayesinde, açık kabin simülatörleri modern sürüş eğitiminde önemli bir rol oynamakta ve gelecekte daha geniş kullanım alanlarına hitap edecek şekilde geliştirilmeye devam etmektedir.

7.2. Metot

Bu çalışmada, farklı yakıt türleri kullanan TTZA araçların karbon ayak izleri karşılaştırılmış ve simülatörlerin elektrik tüketimine bağlı emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında dizel, biyodizel (ME) ve hidrojen ile işlem görmüş biyodizel (HVO), hidrojen gibi farklı yakıt türleri ile kapalı ve açık kabin simülatörlerinin emisyon değerleri belirlenmiştir. Her bir yakıt türü ve simülatörler için emisyon hesaplamaları, Eşitlik 1 referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Emisyon (kg CO}_2 \text{ eşd.)} = \text{Faaliyet Verisi (FV)} * \text{Emisyon Faktörü (EF)} \quad (1)$$

Dizel yakıt kullanan araçlar için yakıt tüketimi ve yoğunluğu kullanılarak kütleli tüketim hesaplanmıştır. Dizel yakıtın enerji içeriği 45.5 MJ/kg olarak kabul edilmiş ve bu değer kullanılarak toplam enerji tüketimi belirlenmiştir. Emisyon faktörleri, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) için ayrı ayrı hesaplanmış ve bu gazların küresel ısınma potansiyelleri (KIP) dikkate alınarak toplam emisyon değerleri ton CO₂ eşdeğeri (ton CO₂ eşd.)

cinsinden ifade edilmiştir. Ayrıca, dizel yakıtın üretim ve taşıma süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar (Well-to-Tank, WTT) de hesaplamalara dahil edilmiştir.

Dizel yakıt kullanan araçlarda dizel yerine biyodizel (ME ve HVO) yakıtları kullanılırsa oluşacak emisyon hesabı için benzer bir yaklaşım izlenmiştir. Biyodizel yakıtların yoğunluğu ve enerji içeriği dikkate alınarak kütleli tüketim ve toplam enerji tüketimi hesaplanmıştır. Biyodizel yakıtların emisyon faktörleri, dizel yakıtı benzer şekilde CO₂, CH₄ ve N₂O için ayrı ayrı belirlenmiş ve KIP değerleri kullanılarak toplam emisyon değerleri hesaplanmıştır. Biyodizel yakıtların üretim ve taşıma süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar da hesaplamalara dahil edilmiştir.

Dizel yakıt kullanan araçlarda dizel yerine hidrojen yakıtı kullanılırsa oluşacak emisyon hesabı gerçekleştirilmiştir. Gaz halindeki hidrojenin yoğunluğu (8.988×10^{-5} kg/L) ve enerji içeriği (120 MJ/kg) dikkate alınarak kütleli tüketim hesaplanmıştır. Hidrojen yakıtının emisyon faktörü değerleri, üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından (RES) üretilen hidrojen için emisyon faktörü değeri 2 kg CO₂ eşd./kg H₂ güneş enerjisi (GES) ile üretilen hidrojen için 4 kg CO₂ eşd./kg H₂ olarak kabul edilmiştir. Fosil kaynaklardan üretilen gri hidrojen için emisyon faktörü değeri 13 kg CO₂ eşd./kg H₂, mavi hidrojen için ise 10 kg CO₂ eşd./kg H₂ (Simons & Bauer, 2011) olarak alınmıştır. Bu değerler kullanılarak hidrojen yakıtı kullanan araçların toplam emisyon değerleri hesaplanmıştır.

Simülatörlerin elektrik tüketimine bağlı emisyon ölçümleri, kapalı ve açık kabin simülatörleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Kapalı kabin simülatöründe maksimum elektrik tüketimi 23 kW olarak belirlenmiş ve 8 senaryo için toplam 200 dakika çalışma süresi öngörülmüştür. Ayrıca, kapalı kabin simülatöründe 110 - 180 Watt güç tüketen 4 adet ekran bulunmaktadır. Açık kabin simülatöründe ise 2 adet servo motorun gücü 2.36 W, 110 - 180 Watt güç tüketen 3 adet ekran mevcuttur. Emisyon hesaplamaları, tüketilen elektrik miktarı ve emisyon faktörleri kullanılarak yapılmıştır. Kapalı kabin ve açık kabin simülatörlerinin elektrik üretim miktarları sırasıyla 184.72 kWh ve 0.54472 kWh'dır. Emisyon faktörü olarak Enerji Bakanlığı'nın web sayfasından alınan 0.445 ton CO₂ eşd./MWh değeri kullanılmıştır (Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri, 2024).

8. BULGULAR

8.1. TTZA'lara ait Emisyonlar

8.1.1. TTZA'lara ait Doğrudan Emisyonlar

TTZA araçların yakıt tüketimine bağlı olarak Kapsam 1.2 kategorisinde karbon emisyon değerleri incelenmiştir. Kuyudan çıkarılan yakıtın bir firmanın tankına ulaşana kadar geçen süreçte salınan sera gazı emisyonları Well-to-Tank (WTT) hesaplamaları olarak değerlendirilmektedir. Yakıt tüketiminin neden olduğu emisyonların hesabında IPCC'nin mobil yanma EF verisi ve yakıtın birim kütesinin yanması sonucu açığa çıkan enerji miktarını Net Kalorifik Değer (NKD) bilgileri kullanılmıştır. Yakıt özellikleri ve WTT faktörü verileri 2024 yılına ait DEFRA data setinden alınmıştır (*DEFRA Sera gazı raporlaması: dönüşüm faktörleri*, 2024). Emisyon hesaplamaları aşağıda verilen Eşitlik 2 formülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Emisyon (ton CO}_2\text{,eşd.)}=\text{Yakıtın kütlesi}\times\text{NKD}\times\text{EF} \quad (2)$$

Toplam emisyon değeri, kullanım kaynaklı yanma emisyonları ve WTT emisyonlarının toplamı aşağıda verilen Eşitlik 3 formülü ile hesaplanmıştır.

$$E_{\text{toplam}}=E_{\text{kullanım}}+E_{\text{WTT}} \quad (3)$$

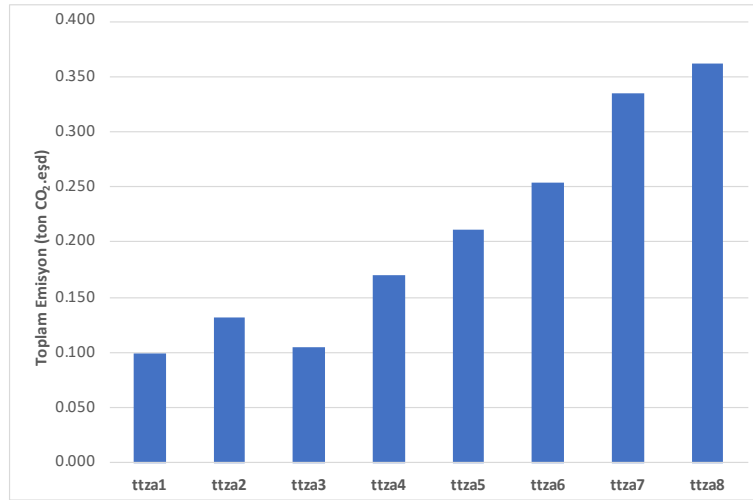
Araçların dizel yakıt tüketimi kaynaklı emisyon, WTT emisyon ve toplam emisyon değerleri Tablo 8.1'de verilmiştir.

Tablo 8.1. TTZA Araçlara Ait Dizel Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri

Araç Türü	Yakıt Tüketimi (L/100 km)	V (lt)	FV (Tj)	Tük. Emis. (tonCO ₂ , eşd)	WTT-emis. Emis. (tonCO ₂ , eşd)	Top. Emis. (tonCO ₂ , eşd)
TTZA1	33	29.7	980.1	0.7799	0.019	0.098
TTZA2	34	30.6	1040.4	0.0823	0.050	0.132
TTZA3	22	19.8	435.6	0.0533	0.052	0.105
TTZA4	30	27	810	0.0726	0.098	0.170
TTZA5	32	28.8	921.6	0.0775	0.133	0.211
TTZA6	34	30.6	1040.4	0.0823	0.172	0.254
TTZA7	40	36	1440	0.0968	0.238	0.335
TTZA8	39	35.1	1368.9	0.0944	0.268	0.362

TTZA araçlarının Kapsam 1.2'de dizel yakıt tüketimini bağlı toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.1'de verilmiştir. TTZA8 aracının 0.362 ton CO₂,eşd. ile en yüksek

emisyona salınımı yaptığı ve TTZA1 aracının ise 0.098 ton CO₂.eşd. ile en düşük emisyona açığa çıkardığı belirlenmiştir.



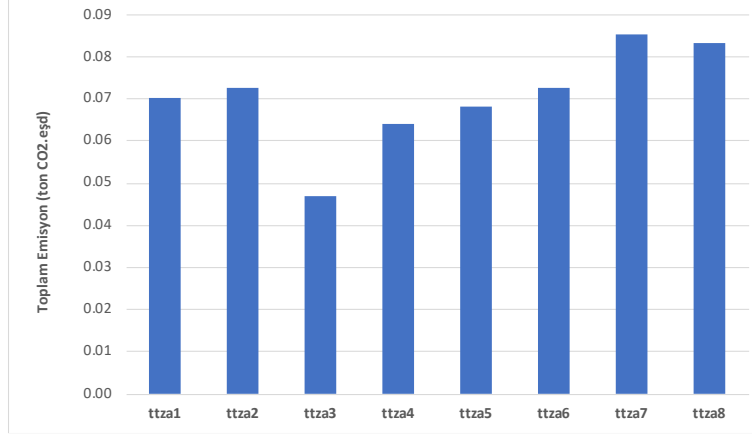
Grafik 8.1. TTZA Araçlara Ait Dizel Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

TTZA araçlarının dizel yakıt yerine biyodizel yakıt tükettiği varsayılarak (Senaryo 1) araçların salacağı toplam emisyonlar hesaplanmıştır. Araçların biyodizel yakıt tüketimi kaynaklı emisyona, WTT emisyona ve toplam emisyona değerleri Tablo 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.2. TTZA Araçlara Ait Biyodizel Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri

Araç Türü	Yakıt Tüketimi (L/100 km)	V (lt)	FV (Tj)	Tük. Emis. (tonCO ₂ . eşd)	WTT-emis. Emis. (tonCO ₂ . eşd)	Top. Emis. (tonCO ₂ . eşd)
TTZA1	33	29.7	980.1	0.0538	0.017	0.070
TTZA2	34	30.6	1040.4	0.0554	0.017	0.073
TTZA3	22	19.8	435.6	0.0359	0.011	0.047
TTZA4	30	27	810	0.0489	0.015	0.064
TTZA5	32	28.8	921.6	0.0522	0.016	0.068
TTZA6	34	30.6	1040.4	0.0554	0.017	0.073
TTZA7	40	36	1440	0.0652	0.020	0.085
TTZA8	39	35.1	1368.9	0.0636	0.020	0.083

TTZA araçlarının Kapsam 1.2’de biyodizel yakıt tüketimini bağlı toplam emisyona değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.2’de verilmiştir. TTZA3 aracının ise 0.047 ton CO₂.eşd. ile en düşük emisyona açığa çıkardığı belirlenmiştir. Diğer araçların toplam emisyona değerleri 0.064-0.085 CO₂.eşd. arasında olduğu tespit edilmiştir.



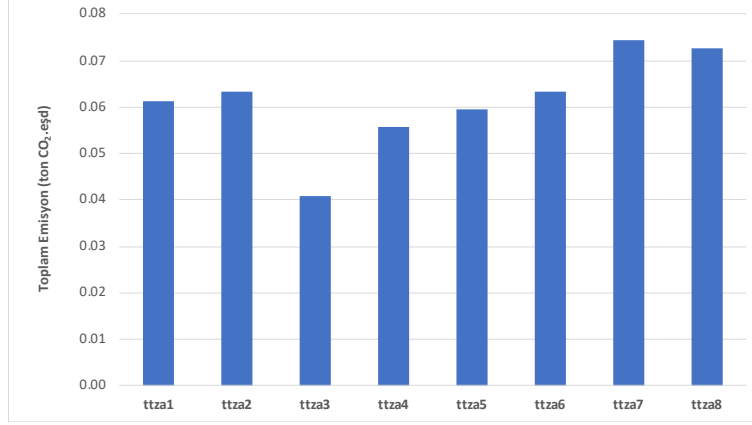
Grafik 8.2. TTZA Araçlara Ait Biyodizel Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

TTZA araçlarının dizel yakıt yerine hidrojenle işlem görmüş biyodizel (HVO) yakıt tükettiği varsayılarak (Senaryo 2) araçların salacağı toplam emisyonlar hesaplanmıştır. Araçların HVO yakıt tüketimi kaynaklı emisyon, WTT emisyon ve toplam emisyon değerleri Tablo 8.3’de verilmiştir.

Tablo 8.3. TTZA Araçlara Ait HVO Yakıt Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri

Araç Türü	Yakıt Tüketimi (L/100 km)	V (lt)	FV (Tj)	Tük. Emis. (tonCO ₂ . eşd)	WTT-emis. Emis. (tonCO ₂ . eşd)	Top. Emis. (tonCO ₂ . eşd)
TTZA1	33	29.7	0.00062548	0.0471	0.014	0.061
TTZA2	34	30.6	0.00064444	0.0486	0.015	0.063
TTZA3	22	19.8	0.00041699	0.0314	0.010	0.041
TTZA4	30	27	0.00056862	0.0429	0.013	0.056
TTZA5	32	28.8	0.00060653	0.0457	0.014	0.060
TTZA6	34	30.6	0.00064444	0.0486	0.015	0.063
TTZA7	40	36	0.00075816	0.0571	0.017	0.074
TTZA8	39	35.1	0.00073921	0.0557	0.017	0.073

TTZA araçlarının Kapsam 1.2’de HVO yakıt tüketimini bağlı toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.3’te verilmiştir. TTZA3 aracının ise 0.041 ton CO₂.eşd. ile en düşük emisyon açığa çıkardığı belirlenmiştir. Diğer araçların toplam emisyon değerleri 0.056-0.074 CO₂.eşd. arasında olduğu tespit edilmiştir.



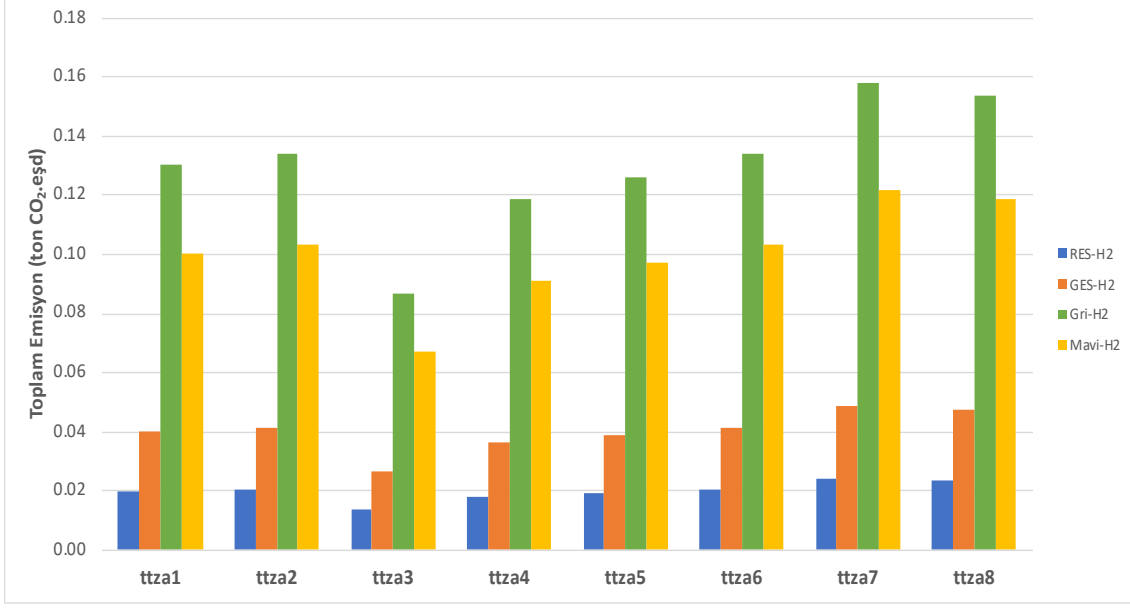
Grafik 8.3. TTZA Araçlara Ait HVO Yakıt Tüketimini Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

TTZA araçlarının dizel yakıt yerine farklı yöntemlerle üretilmiş hidrojen yakıtı tükettiği varsayılarak (Senaryo 3) araçların salacağı toplam emisyonlar hesaplanmıştır. Araçların hidrojen yakıt tüketimi kaynaklı toplam emisyon değerleri Tablo 8.4’de verilmiştir. Rüzgâr enerjisi kullanılarak üretilen hidrojen (RES-H₂), güneş enerjisi kullanılarak üretilen hidrojen (GES-H₂), buhar metan reformu metodu ile fosil kaynaktan üretilen hidrojen (Gri-H₂) ve içten yanmalı motorlarda gaz yağından üretilen hidrojen (Mavi-H₂) kullanıldığı varsayılmıştır.

Tablo 8.4. TTZA Araçlara Ait Hidrojen Yakıtı Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri (ton CO₂.eşd.)

Araç Türü	RES-H ₂	GES-H ₂	Gri H ₂	Mavi H ₂
TTZA1	0.020	0.040	0.130	0.100
TTZA2	0.021	0.041	0.134	0.103
TTZA3	0.013	0.027	0.087	0.067
TTZA4	0.018	0.036	0.118	0.091
TTZA5	0.019	0.039	0.126	0.097
TTZA6	0.021	0.041	0.134	0.103
TTZA7	0.024	0.049	0.158	0.121
TTZA8	0.024	0.047	0.154	0.118

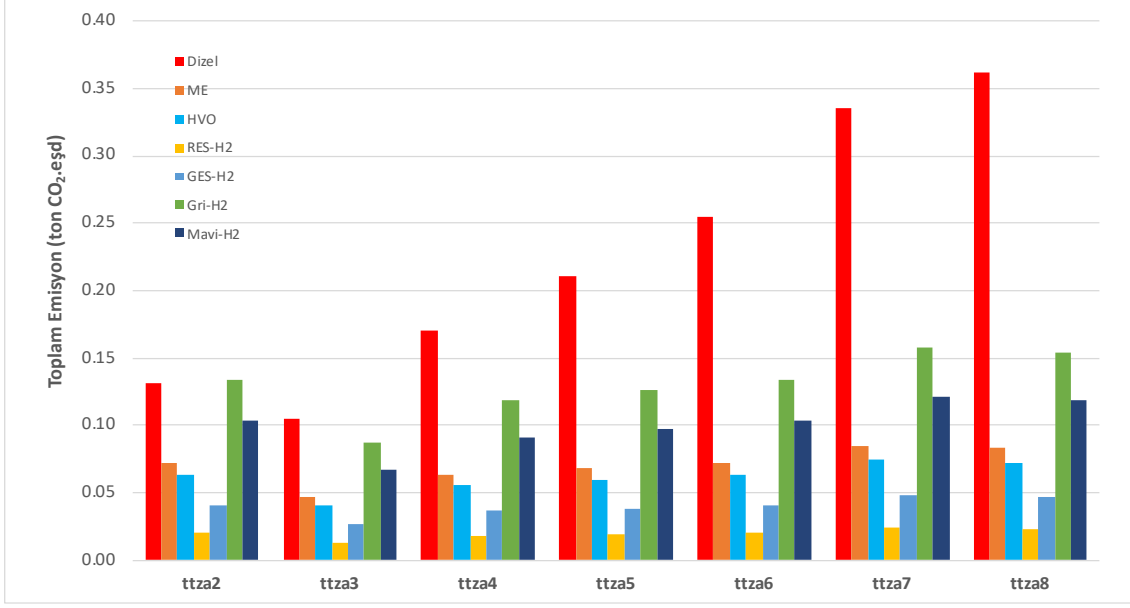
TTZA araçlarının Kapsam 1.2’de hidrojen yakıt tüketimine bağlı toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.4’te verilmiştir. RES kullanılarak elde edilen hidrojenin araçlarda tüketilmesine bağlı açığa çıkan toplam emisyon değerleri <0.024 CO₂.eşd. olduğu gözlenmiştir. En düşük emisyon RES ile üretilen hidrojenin tüketilmesi sonucu oluşmuştur. En yüksek emisyonlar ise buhar metan reformu metodu ile fosil kaynaktan üretilen hidrojenin neden olduğu tespit edilmiştir.



Grafik 8.4. TTZA Araçlara Ait Hidrojen Yakıt Tüketimine Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

TTZA araçlarının farklı yakıt türlerinin tüketimine bağlı toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.5'te verilmiştir. Araçlar dizel yakıt tüketmektedir. Farklı yakıt türlerine bağlı olarak yapılan senaryo çalışmaları gerçekleştirilmiştir. En fazla emisyon salınımının dizel yakıt tüketim sonucu açığa çıktığı gözlenmiştir. İkinci olarak fosil yakıt kullanılarak üretilen hidrojen kaynaklı emisyon salınımının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak dizel yakıt kullanımına bağlı olarak açığa çıkan emisyon değerlerinin Gri-H₂ kullanımından yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. RES-H₂ kullanılarak açığa çıkan toplam emisyon değerlerinin (<0.024 CO₂.eşd.) en düşük olduğu gözlenmiştir. Buna karşılık, hidrojenin farklı üretim yöntemlerine bağlı olarak emisyon değerlerinde önemli farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. Biyodizel ve yenilenebilir enerji bazlı hidrojen türleri ise diğer yakıt türlerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük karbon salınımı ile öne çıkmaktadır.

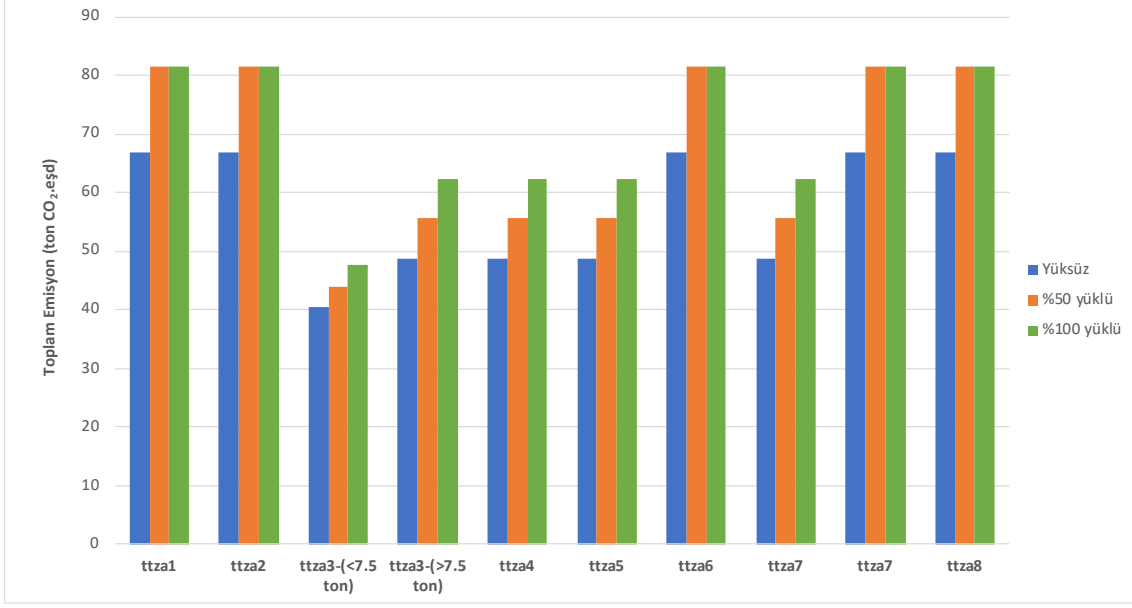
Bu bulgular, karbon ayak izinin azaltılması açısından alternatif yakıt türlerinin önemini ortaya koymaktadır. Dizel yakıtın yüksek emisyon değerleri, alternatif yakıt kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olduğunu göstermektedir. Özellikle biyodizel ve yenilenebilir hidrojen yakıtlarının, karbon salınımını önemli ölçüde azaltarak daha temiz bir ulaşım alternatifi sunduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, farklı yakıt türlerinin çevresel etkilerini karşılaştırarak sürdürülebilir enerji stratejileri geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



Grafik 8.5. TTZA Araçlara Ait Farklı Yakıt Türlerinin Tüketimine Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

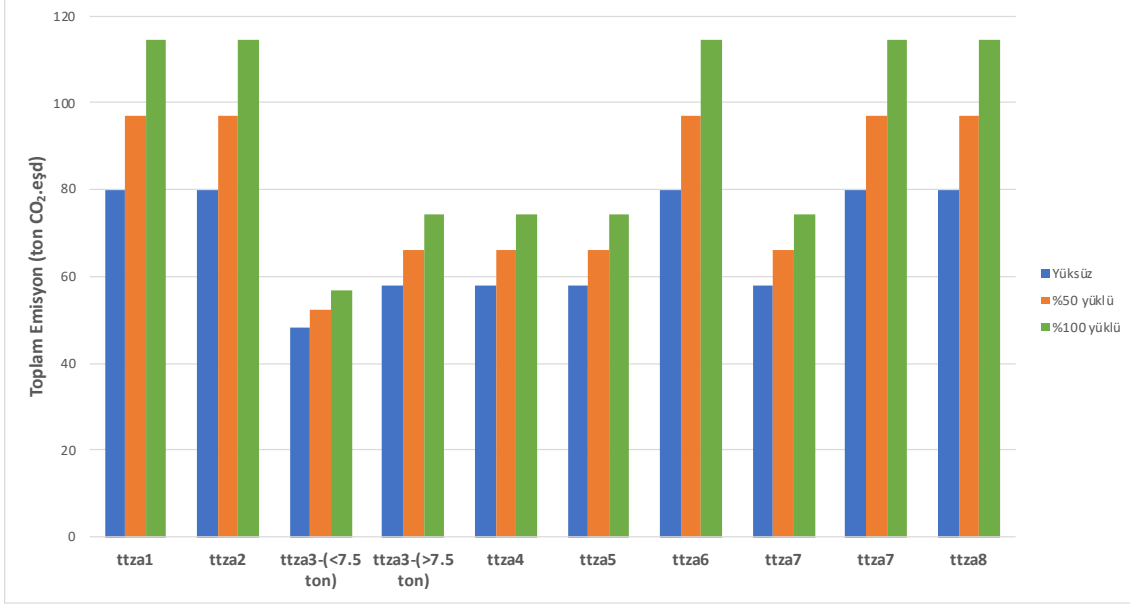
8.1.2. TTZA'lara ait Dolaylı Emisyonlar

TTZA araçların Kapsam 3 kapsamında dizel yakıt tüketimine bağlı olarak araçların ağırlıkları ve arazi koşulları dikkate alınarak açığa çıkabilecek karbon emisyon değerleri incelenmiştir. Araçların taşıdığı yük durumu (%0, %50 ve %100) ve mevsim koşullarına bağlı olarak klima (soğutma yapılması) kullanım şartlarına bağlı EF verileri 2024 yılına ait DEFRA data setinden alınmıştır. Emisyon değerlerine WTT hesaplamaları da dahil edilmiştir. Araçların taşıdığı yük durumlarına bağlı açığa çıkacak toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.6'da verilmiştir. Araçların taşıdıkları yük miktarları >%50 olduğunda açığa çıkan toplam emisyonun arttığı gözlenmiştir.



Grafik 8.6. TTZA Araçların Taşdığı Yük Durumlarına Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

Araçların klima kullanımı ve taşıdığı yük durumlarına bağlı açığa çıkacak toplam emisyon değerlerinin karşılaştırılması Grafik 8.7’de verilmiştir. Araçların taşıdıkları yük miktarları >%50 olduğunda açığa çıkan toplam emisyonun arttığı gözlenmiştir. Klimanın kullanılmadığı ve kullanıldığı durumlarda araçların açığa çıkaracağı emisyonlar değerlendirildiğinde klima kullanımının toplam emisyon değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. %100 yüklü olduğu durumlarda klima kullanımının toplam emisyon değerini yaklaşık 10-20 ton CO₂. eşd. artırdığı belirlenmiştir.



Grafik 8.7. TTZA Araçların Klima Kullanılması ve Taşıdığı Yük Durumlarına Bağlı Toplam Emisyon Değerleri

8.2. Similatörlere Ait Emisyonlar

Simülasyon araçların elektrik tüketimine bağlı olarak Kapsam 2 kategorisinde karbon emisyon değerleri incelenmiştir. Emisyon hesaplamaları aşağıda verilen Eşitlik 4 formülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Emisyon (ton CO}_2\text{.eşd.)} = FV * EF \quad (4)$$

Elektrik tüketiminden kaynaklı EF verileri T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı web sayfasından alınmıştır. Elektrik iletimi ve dağıtım kaynaklı EF verileri Uluslararası Elektrik Ajansı 2024 yılında yayınladığı sayfadan kullanılmıştır (International Energy Agency, 2024).

Toplam emisyon değeri, tüketim kaynaklı emisyonlar, elektrikliğin iletimi ve dağıtım kaynaklı emisyonların ele alındığı aşağıda verilen Eşitlik 5 formülü ile hesaplanmıştır.

$$E_{\text{toplam}} = E_{\text{kullanım}} + E_{\text{iletim}} + E_{\text{dağıtım}} \quad (5)$$

Çalışma boyunca eğitimler süresince kapalı kabin (KK) ve açık kabin (AK) olarak iki farklı simülasyonun elektrik tüketimine bağlı olarak açığa çıkardığı toplam emisyonlar belirlenmiştir (Tablo 8.5). Kapalı kabin simülasyonu için bu değer 0.1631 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanırken, açık kabin simülasyonu için 0.0005 ton CO₂ eşd. olarak bulunmuştur. Kayıplardan kaynaklı emisyonlar ise elektrik üretimi ve iletimi sırasında oluşan kayıplar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar için uluslararası elektrik faktörleri dosyasından alınan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Kapalı kabin simülasyonu için tüketim kaynaklı emisyon 0.082 ton CO₂ eşd., açık kabin simülasyonu için ise 0.00024 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8.5. Simülatörlerin Elektrik Tüketimine Bağlı Emisyon Değerleri (ton CO₂eşd.)

Araç Türü	FV(Mwh)	Tüketim Kaynaklı Emisyon	Üretim Kaynaklı Emisyon	İletim Kaynaklı Emisyon	Top. Emisyon (tonCO ₂ eşd.)
KK	0.18472	0.0822004	0.078293572	0.00261545	0.1631
AK	0.00054472	0.0002424	0.00023088	0.00000771269	0.0005

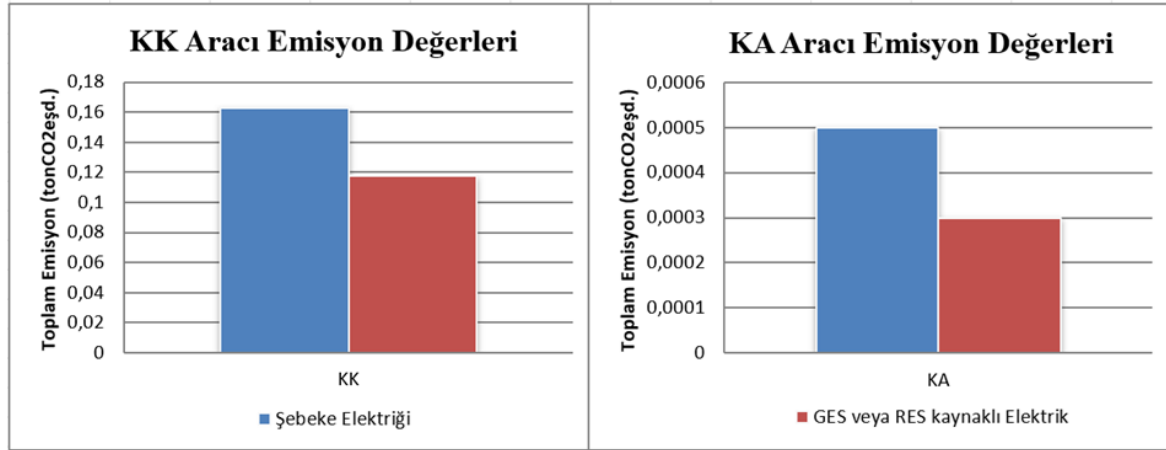
Açık kabin simülatörlerinde enerji tüketimi farklı bir yapıya sahiptir ve temel olarak servo motorlar tarafından belirlenmektedir. Bu yapı, enerji tüketiminin kapalı kabin sistemlerine kıyasla farklı bir dağılım göstermesine neden olmaktadır. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, kapalı kabin simülatörlerinin enerji tüketiminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, kapalı kabin ortamındaki klima sistemleri, ses izolasyonu ve tamamen kapalı bir ortamda çalışmanın getirdiği ek enerji ihtiyacından kaynaklandığı düşünülmektedir. Açık kabin simülatörleri ise daha verimli bir enerji kullanımı sağlayarak toplam emisyon seviyesini nispeten düşük tutmaktadır.

Simülatör sistemlerinin karbon ayak izini azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme, daha verimli elektrik motorları kullanımı ve sistemlerin gereksiz enerji tüketimini önleyecek şekilde optimize edilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda, enerji verimliliğini artırıcı önlemler alınması hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak hem de uzun vadede işletme maliyetlerini düşürecektir. Yapılan analizler, simülatör teknolojilerinin geliştirilmesi sürecinde enerji tüketimi ve karbon emisyonları konularının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Tablo 8.6’da kapalı kabin simülatöründe şebeke elektriği kullanımıyla ortaya çıkan toplam karbon emisyonu 0,1631 ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanırken, aynı sistemde yenilenebilir enerji kaynakları (GES veya RES) kullanıldığında bu değer 0,1172 ton CO₂ eşdeğerine düşmektedir. Açık kabin simülatöründe ise şebeke elektriği kullanımı ile ortaya çıkan karbon emisyonu 0,0005 ton CO₂ eşdeğeri olarak belirlenmiş, yenilenebilir enerji kullanımında ise bu değer 0,0003 ton CO₂ eşdeğerine azalmıştır.

Tablo 8.6. Açık ve Kapalı Kabin Simülatörlerinin Şebeke Elektriği ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Tüketimine Ait Karbon Emisyon Değerleri

Araç Türü	Top. Emisyon (tonCO ₂ eşd.)	
	Şebeke Elektriği	GES veya RES kaynaklı Elektrik
KK	0.1631	0.1177
KA	0.0005	0.0003

Grafik 8.8.'de açık ve kapalı kabin similatörlerin elektrik tüketimine bağlı toplam emisyon dağılımı gösterilmiştir.



Grafik 8.8. Açık ve Kapalı Kabin Araçlarının Elektrik Tüketimi Kaynaklarına Göre Karbon Ayak İzi Karşılaştırması

Bu veriler değerlendirildiğinde, kapalı kabin simülatörünün açık kabine kıyasla daha yüksek karbon emisyonuna neden olduğu açıkça görülmektedir. Bunun temel sebepleri arasında kapalı ortamda çalışmanın gerektirdiği ek enerji ihtiyacı ve ilave 6DOF hareketli kullanımı öne çıkmaktadır. Öte yandan, her iki sistemde de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, karbon emisyonlarını belirgin şekilde azaltmakta olup özellikle kapalı kabin simülatörlerinde bu azalma daha yüksek oranda gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, simülatör sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olacaktır.

9. TARTIŞMA

Bu çalışma, sürdürülebilirlik ve simülasyon teknolojilerinin çevresel etkileri üzerine odaklanarak, özellikle askeri araçların karbon ayak izlerini ve enerji verimliliğini analiz etmiştir. Elde edilen bulgular, simülasyon teknolojilerinin endüstriyel süreçlerde hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle enerji tüketimi, karbon emisyonları ve atık yönetimi gibi alanlarda simülasyonların etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu teknolojiler, gerçek dünyada test edilmesi zor veya maliyetli olan süreçlerin güvenli bir şekilde analiz edilmesine olanak tanırken, çevre dostu tasarımların geliştirilmesine ve enerji tasarrufunun sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.

Sanayi devriminden bu yana artan çevresel baskılar, endüstriyel büyümenin beraberinde getirdiği karbon emisyonları, doğal kaynak tükenmesi ve atık yönetimi gibi sorunları daha da belirgin hale getirmiştir. Bu sorunlar, yeni teknolojik yaklaşımları zorunlu kılmakta ve simülasyon teknolojileri bu noktada geleneksel yöntemlere alternatif olarak öne çıkmaktadır. Simülasyonlar, fiziksel testler ve prototipleme süreçlerinin yerini alarak maliyetleri düşürmekte, enerji verimliliğini artırmakta ve karar alma süreçlerini optimize etmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe, araç performansı ve enerji tüketimi analizleri için kullanılan simülasyonlar, daha verimli ve sürdürülebilir tasarımların hayata geçirilmesine imkân tanımaktadır.

Bu çalışmada, TTZA araçlarının farklı yakıt türleri (dizel, biyodizel, hidrojen) ve simülatörlerin elektrik tüketimine bağlı emisyonlarının hesaplanması sonucu elde edilen bilgilerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sağlamıştır. Özellikle hidrojen yakıtının yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi durumunda, karbon emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabileceği görülmüştür. Bu bulgular, gelecekte hidrojen gibi alternatif yakıtların yaygınlaşması ve simülasyon teknolojilerinin daha etkin kullanılması durumunda, endüstriyel süreçlerin çevresel etkilerinin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir.

Sanayi süreçlerinde simülasyon kullanımının en çarpıcı kazanımlarından biri, karbon ayak izinin azalmasıdır. Geleneksel fiziksel testlerin yerini alan dijital modelleme ve analiz yöntemleri, üretim aşamasındaki enerji tüketimini minimize ederek çevresel etkileri azaltmaktadır. Başlangıç yatırım maliyetlerinin yüksek oluşu, simülasyon sistemlerinin sanayi içinde yeterince benimsenmemesinin temel nedenlerinden biri olarak görülmektedir. Ancak uzun vadede, enerji tasarrufu ve verimlilik artışı ile bu maliyetlerin dengelenebileceği öngörülmektedir.

10. SONUÇLAR

Bu tez çalışması, günümüz endüstrisinin ve teknolojik gelişmelerin getirdiği çevresel etkiler ile sürdürülebilirlik sorunlarına, özellikle askeri araçlar ve simülasyon teknolojileri bağlamında kapsamlı bir çözüm perspektifi sunmayı amaçlamıştır. Çalışmanın temel odağı, Taktik Tekerlekli Zırhlı Araçların (TTZA) karbon ayak izlerini EN ISO 14064-1 Kurumsal Karbon Ayak İzi Standartları doğrultusunda analiz etmek ve simülasyon tabanlı eğitimlerin çevresel sürdürülebilirlik potansiyelini ortaya koymaktır. Gerçekleştirilen analizler, doğrudan ve dolaylı emisyonları (Kapsam 1.2, Kapsam 3 ve Kapsam 2) kapsayarak, farklı yakıt türleri ve simülatör kullanımlarının çevresel etkilerini nicel verilerle karşılaştırmıştır.

Çalışma kapsamında, 8 farklı TTZA modelinin teknik özellikleri ve yakıt tüketim verileri kullanılarak, dizel, biyodizel (ME ve HVO) ve farklı yöntemlerle üretilen hidrojen (RES-H₂, GES-H₂, Gri-H₂, Mavi-H₂) yakıt türlerinin emisyon değerleri IPCC ve DEFRA verileri temel alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca, kapalı ve açık kabin simülatörlerinin elektrik tüketimine bağlı emisyonları, Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri ile Uluslararası Elektrik Ajansı verileri referans alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamlı metodoloji sayesinde, elde edilen bulgular, askeri operasyonlarda ve eğitim süreçlerinde sürdürülebilirliğe yönelik stratejik kararlar alınmasına önemli bir temel oluşturmaktadır.

Bu tez çalışması sonucunda, askeri araçların ve simülatörlerin çevresel etkilerine dair önemli bulgulara ulaşılmıştır:

- **Askeri Araçların Karbon Ayak İzleri ve Yakıt Türlerinin Karşılaştırmalı Analizi**

Dizel Yakıt Kullanımı: Mevcut dizel yakıt tüketimi baz alındığında, TTZA'lar arasında en yüksek emisyon salınımının 0.362 ton CO₂ eşd. ile TTZA8 aracında, en düşük emisyonun ise 0.098 ton CO₂ eşd. ile TTZA1 aracında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Genel olarak dizel yakıt, alternatif yakıtlara kıyasla en yüksek karbon emisyonuna neden olmaktadır.

Biyodizel ve HVO Yakıtların Etkisi: Dizel yerine biyodizel (ME) kullanılması durumunda TTZA3 aracının emisyonu 0.047 ton CO₂ eşd.'ye, HVO kullanıldığında ise 0.041 ton CO₂ eşd.'ye düşerek önemli düşüşler göstermiştir. Bu durum, biyodizel ve HVO gibi alternatif yakıtların karbon emisyonunu kayda değer ölçüde azalttığını kanıtlamıştır.

Hidrojen Yakıtının Potansiyeli: Farklı üretim yöntemleriyle elde edilen hidrojen yakıtlarının emisyon profilleri incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından (RES ve GES) üretilen hidrojenin en düşük emisyon değerlerini sağladığı görülmüştür. Özellikle RES

ile üretilen hidrojen kullanan bir aracın, dizel yakıtıya kıyasla yaklaşık %80 daha düşük emisyon değerleri ürettiği belirlenmiştir (<0.024 ton CO₂ eşd.). Fosil kaynaklardan elde edilen Gri-H₂ dahi dizel yakıtıya kıyasla yaklaşık 2 kat daha düşük emisyon salınımı yapmaktadır. Bu bulgu, hidrojenin, özellikle yeşil hidrojenin, askeri araçlar için yüksek sürdürülebilirlik potansiyeli taşıdığını ortaya koymuştur.

Genel Yakıt Karşılaştırması: Yapılan senaryo çalışmalarında, dizel yakıtın en fazla emisyon salınımına neden olduğu, bunu fosil yakıt kullanılan hidrojenin takip ettiği belirlenmiştir. Biyodizel ve yenilenebilir enerji bazlı hidrojen türleri ise diğer yakıt türlerine kıyasla çok daha düşük karbon salınımı ile öne çıkmaktadır.

- **TTZA Kapsam 3 Emisyonları (Yük Durumu ve Klima Kullanımı)**

Araçların taşıdığı yük miktarı %50'yi aştığında toplam emisyon değerlerinde artış gözlenmiştir.

Klima kullanımının, özellikle %100 yüklü durumlarda, toplam emisyon değerini yaklaşık 10-20 ton CO₂ eşd. artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, operasyonel yük yönetimi ve enerji verimliliği stratejilerinin önemini vurgulamaktadır.

- **Simülatörlerin Enerji Tüketimi ve Karbon Emisyonları (Kapsam 2)**

Simülatör Tipleri Arası Farklar: Kapalı kabin simülatörünün elektrik tüketimine bağlı toplam emisyonu 0.1631 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanırken, açık kabin simülatörünün bu değeri 0.0005 ton CO₂ eşd. olarak bulunmuştur. Kapalı kabin simülatörünün maksimum 23 kW elektrik tüketimiyle çalışmasına karşın, açık kabin simülatörünün sadece 2.36 W elektrik tüketmesi, açık kabin simülatörlerinin enerji verimliliği açısından önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Bu durum, kapalı kabin simülatörlerinin, klima sistemleri, ses yalıtımı ve 6DOF hareketli platform gibi ek bileşenler nedeniyle daha yüksek enerji tükettiği ve dolayısıyla daha fazla emisyonla neden olduğu belirlenmiştir.

Yenilenebilir Enerjinin Rolü: Her iki simülatör sisteminde de yenilenebilir enerji kaynaklarının (GES veya RES) kullanılması, karbon emisyonlarını belirgin şekilde azaltmaktadır. Özellikle kapalı kabin simülatörlerinde şebeke elektriği kullanımına göre %28'lik bir azalma (0.1631'den 0.1172 ton CO₂ eşd.'ye) gözlenirken, açık kabin simülatöründe de benzer bir oranda azalma (0.0005'ten 0.0003 ton CO₂ eşd.'ye) sağlanmıştır. Bu bulgular, simülasyon teknolojilerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir.

- **Simülasyon Tabanlı Eğitimlerin Yakıt Tüketimi ve Karbon Salınımına Etkisi**

Gerçek araç kullanımının yerine simülatörlerin kullanılması, yakıt tüketimi ve karbon salınımını büyük ölçüde azaltarak önemli çevresel faydalar sağlamaktadır. Bu durum, eğitim maliyetlerini düşürmenin yanı sıra, doğal kaynakların korunmasına ve askeri birimlerin karbon ayak izlerinin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunmaktadır. Simülasyon teknolojileri, güvenli, tekrarlanabilir ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir eğitim modeli sunmaktadır.

- **Literatüre ve Uygulamaya Katkıları**

Bu çalışma, askeri araçların karbon ayak izlerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve farklı yakıt türleri ile simülatör kullanımının çevresel etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi noktasında literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle, askeri araçların emisyon profillerinin detaylı incelenmesi ve simülasyon tabanlı eğitimlerin çevresel avantajlarının nicel verilerle ortaya konulması, bu alandaki bilgi boşluğunu doldurmaya yardımcı olmuştur. Elde edilen bulgular, askeri ve güvenlik sektöründeki sürdürülebilirlik stratejilerinin geliştirilmesinde, alternatif yakıt politikalarının belirlenmesinde ve eğitim programlarının çevresel etkilerinin optimize edilmesinde rehberlik edebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının simülatör sistemlerine entegrasyonunun emisyon azaltımındaki potansiyeli, gelecek yatırımlar için somut veriler sunmaktadır.

- **Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar**

Bu tez çalışması, askeri araçların belirli teknik özelliklerine ve mevcut yakıt türlerine odaklanmış olup, tüm askeri araç tiplerini veya gelecekteki potansiyel yakıt teknolojilerini kapsamamaktadır. Ayrıca, simülatörlerin kullanım senaryoları belirli eğitim süreleri ve enerji tüketim profilleriyle sınırlıdır. Bu çalışma, simülasyon teknolojilerinin çevresel etkilerini azaltmak için açık kabin sistemlerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kapalı kabin simülatörlerinin enerji verimliliğini artırmaya yönelik teknolojik çalışmaların artırılması, bu sistemlerin çevresel etkilerini azaltmak açısından önemli bir adım olacaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda hem açık hem de kapalı kabin sistemlerinin enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi, simülasyon teknolojilerinin sürdürülebilirliğini artıracak ve çevresel etkilerini minimize edecektir. Ayrıca, otonom askeri sistemlerin emisyon profillerini, hibrit ve elektrikli askeri araçların çevresel etkilerini, farklı operasyonel koşulların (arazi, iklim vb.) emisyonlar üzerindeki daha detaylı etkilerini inceleyebilir. Simülasyon sistemlerinin yaşam döngüsü analizi (LCA) perspektifinden incelenmesi, bu teknolojilerin çevresel sürdürülebilirlik

açısından daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlayabilir. Elde edilen sonuçlar, askeri alanda sürdürülebilir bir gelecek inşa etmek için önemli bir adım teşkil etmekte ve bu alandaki araştırmalara yeni kapılar açmaktadır.

KAYNAKÇA

- Acar, E., & Souri, M.** (2024). Engineering Simulations and Sustainability. *Authorea Preprints*.
<https://doi.org/10.22541/AU.173557444.48929541/V1>
- Achieve the Balance.** (2025, Nisan 1). <https://www.avl.com/en/simulation-solutions/vehicle-simulation/vehicle-system-and-chassis-simulation>
- Adanma, U. M., & Ogunbiyi, E. O.** (2024a). A comparative review of global environmental policies for promoting sustainable development and economic growth. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(5), 954-977.
<https://doi.org/10.51594/IJARSS.V6I5.1147>
- Adanma, U. M., & Ogunbiyi, E. O.** (2024b). Evaluating the effectiveness of global governance mechanisms in promoting environmental sustainability and international relations. *Finance & Accounting Research Journal*, 6(5), 763-791.
<https://doi.org/10.51594/FARJ.V6I5.1151>
- Agarwal, A., & Ojha, R.** (2024). Prioritizing implications of Industry-4.0 on the sustainable development goals: A perspective from the analytic hierarchy process in manufacturing operations. *Journal of Cleaner Production*, 444, 141189.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141189>
- Ali, A. R., Bartie, N., Husmann, J., Cerdas, F., Schröder, D., & Herrmann, C.** (2024). Simulation-based life cycle assessment of secondary materials from recycling of lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107384.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107384>
- Ali, U., Guo, Q., Kartal, M. T., Nurgazina, Z., Khan, Z. A., & Sharif, A.** (2022). The impact of renewable and non-renewable energy consumption on carbon emission intensity in China: Fresh evidence from novel dynamic ARDL simulations. *Journal of Environmental Management*, 320, 115782. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115782>
- AlJamal, M., Mughaid, A., Al shboul, B., Bani-Salameh, H., Alzubi, S., & Abualigah, L.** (2024). Optimizing risk mitigation: A simulation-based model for detecting fake IoT clients in smart city environments. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 43, 101019. <https://doi.org/10.1016/J.SUSCOM.2024.101019>
- Almallah, M., Hussain, Q., Reinolsmann, N., & Alhajyaseen, W. K. M.** (2021). Driving simulation sickness and the sense of presence: Correlation and contributing factors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 78, 180-193.
<https://doi.org/10.1016/J.TRF.2021.02.005>
- Amini, R. E., Michelaraki, E., Katrakazas, C., Al Haddad, C., de Vos, B., Cuenen, A., Yannis, G., Brijs, T., & Antoniou, C.** (2021). Risk scenario designs for driving simulator experiments. *2021 7th International Conference on Models and Technologies for*

Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2021. <https://doi.org/10.1109/MT-ITS49943.2021.9529268>

- Astarita, V., Guido, G., Haghshenas, S. S., & Haghshenas, S. S.** (2024). Risk Reduction in Transportation Systems: The Role of Digital Twins According to a Bibliometric-Based Literature Review. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 3212, 16(8), 3212. <https://doi.org/10.3390/SU16083212>
- Baarspul, M.** (1990). A review of flight simulation techniques. *Progress in Aerospace Sciences*, 27(1), 1-120. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(90\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(90)90006-6)
- Baclet, S., Khoshkhal, K., Pourmoradnasseri, M., Rumpler, R., & Hadachi, A.** (2023). Near-real-time dynamic noise mapping and exposure assessment using calibrated microscopic traffic simulations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 124, 103922. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2023.103922>
- Bansal, S., & Bhambhwani, V.** (2025). Evaluation of a simulation-based ophthalmology education workshop for medical students: a pilot project. *BMC medical education*, 25(1), 153. <https://doi.org/10.1186/S12909-025-06712-Y/TABLES/2>
- Bellapukonda, P., Vijaya, G., Subramaniam, S., & Chidambaranathan, S.** (1M.S.). Security and Optimization in IoT Networks Using AI-Powered Digital Twins. <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/979-8-3693-3234-4.ch024>, 327-340. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3234-4.CH024>
- Berryman, D. R.** (2012). Augmented Reality: A Review. *Medical Reference Services Quarterly*, 31(2), 212-218. <https://doi.org/10.1080/02763869.2012.670604>
- Bokka, L., Ciuffo, F., & Clapper, T. C.** (2024). Why Simulation Matters: A Systematic Review on Medical Errors Occurring during Simulated Health Care. *Journal of Patient Safety*, 20(2), 110-118. <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000001192>
- Borusan.** (2025, Şubat 16). <https://www.jaguar-kktc.com/about-jaguar/jag-style/jag-life/surdurulebilir-tasarima-dunyadan-ornekler>
- Bretherton, C. S., Henn, B., Kwa, A., Brenowitz, N. D., Watt-Meyer, O., McGibbon, J., Perkins, W. A., Clark, S. K., & Harris, L.** (2022). Correcting Coarse-Grid Weather and Climate Models by Machine Learning From Global Storm-Resolving Simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(2), e2021MS002794. <https://doi.org/10.1029/2021MS002794>
- Chen, Z.** (2024). Exploring the application scenarios and issues facing Metaverse technology in education. *Interactive Learning Environments*, 32(5), 1975-1987. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2133148;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Cherbonnier, A., Hémon, B., Michinov, N., Jamet, E., & Michinov, E.** (2024). Collaborative Skills Training Using Digital Tools: A Systematic Literature Review. *International*

Journal of Human-Computer Interaction, 41(7), 4155-4173.
<https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2348227>;CTYPE:STRING:JOURNAL

Choi, H. S., Crump, C., Duriez, C., Elmquist, A., Hager, G., Han, D., Hearl, F., Hodgins, J., Jain, A., Leve, F., Li, C., Meier, F., Negrut, D., Righetti, L., Rodriguez, A., Tan, J., & Trinkle, J. (2021). On the use of simulation in robotics: Opportunities, challenges, and suggestions formoving forward. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(1), e1907856118.
https://doi.org/10.1073/PNAS.1907856118/SUPPL_FILE/PNAS.1907856118.SAPP.PDF

Collins, J., Chand, S., Vanderkop, A., & Howard, D. (2021). A review of physics simulators for robotic applications. *IEEE Access*, 9, 51416-51431.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068769>

Çevresel Sürdürülebilirlik Nedir. (2025, Nisan 1). <https://surdurulebilirevren.com/cevresel-surdurulebilirlik-nedir/>

Dai, C. P., Ke, F., Pan, Y., Moon, J., & Liu, Z. (2024). Effects of Artificial Intelligence-Powered Virtual Agents on Learning Outcomes in Computer-Based Simulations: A Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, 36(1), 1-37. <https://doi.org/10.1007/S10648-024-09855-4/FIGURES/5>

De la Torre, R., Onggo, B. S., Corlu, C. G., Nogal, M., & Juan, A. A. (2021). The Role of Simulation and Serious Games in Teaching Concepts on Circular Economy and Sustainable Energy. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 1138, 14(4), 1138.
<https://doi.org/10.3390/EN14041138>

Debnath, B., Taha, M. R., Siraj, M. T., Jahin, M. F., Ovi, S. I., Bari, A. B. M. M., Islam, A. R. M. T., & Raihan, A. (2024). A grey approach to assess the challenges to adopting sustainable production practices in the apparel manufacturing industry: Implications for sustainability. *Results in Engineering*, 22, 102006.
<https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102006>

DEFRA Sera gazı raporlaması: dönüşüm faktörleri. (2024, Temmuz 8). <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024>.

Dehghani, M., Trojovská, E., & Trojovský, P. (2022). A new human-based metaheuristic algorithm for solving optimization problems on the base of simulation of driving training process. *Scientific Reports*, 12(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/S41598-022-14225-7>;SUBJMETA=166,639,705;KWRD=ENGINEERING,MATHEMATICS+AND+COMPUTING

Demirci B. (2023). *İki Serbestlik Dereceli Araç Simülatörü Analizi ve Uygulaması*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Deviatkin, I., Kozlova, M., & Yeomans, J. S.** (2021). Simulation decomposition for environmental sustainability: Enhanced decision-making in carbon footprint analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*, 75, 100837. <https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2020.100837>
- Diaz-Navarro, C., Jones, B., Pugh, G., Money Penny, M., Lazarovici, M., & Grant, D. J.** (2024). Improving quality through simulation; developing guidance to design simulation interventions following key events in healthcare. *Advances in Simulation*, 9(1), 1-5. <https://doi.org/10.1186/S41077-024-00300-8/TABLES/1>
- Domingo, D., Palka, G., & Hersperger, A. M.** (2021). Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102833. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102833>
- Donatus Ogbu, A., Ozowe, W., Heavens Ikevuje, A., & Harcourt, P.** (2024). Data science's pivotal role in enhancing oil recovery methods while minimizing environmental footprints: An insightful review. *Computer Science & IT Research Journal*, 5(7), 1621-1633. <https://doi.org/10.51594/CSITRJ.V5I7.1348>
- Driving Life.** (2025). *Driving Life*. <https://traxion.gg/driving-life-is-what-happens-when-you-combine-the-sims-with-forza-horizon/>
- Du, Q., Yang, M., Wang, Y., Wang, X., & Dong, Y.** (2024). Dynamic simulation for carbon emission reduction effects of the prefabricated building supply chain under environmental policies. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105027. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2023.105027>
- Ebnali, M., Ahmadi, N., Nabiyouni, E., & Karimi, H.** (2023). AI-powered Human Digital Twins in Virtual Therapeutic Sessions. *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 12(1), 1-4. <https://doi.org/10.1177/2327857923121000>
- Egonsdotter, G., & Israelsson, M.** (2024). Computer-Based Simulations in Social Work Education: A Scoping Review. *Research on Social Work Practice*, 34(1), 41-53. https://scholar.google.com/scholar_url?url=https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/10497315221147016&hl=tr&sa=T&oi=ucasa&ct=ufr&ei=HSUZaIeYHsCSieoPirCQIQ&scisig=AAZF9b99-GxFxxOFMjHNTC8Ex36b
- Electric Vehicle Maintenance Simulator.** (2025a, Ocak 16). <https://cademdigital.com.tr/dijital-ikiz-nedir/>
- Electric Vehicle Maintenance Simulator.** (2025b, Mart 25).
- Elsayed, E. E.** (2024). Atmospheric turbulence mitigation of MIMO-RF/FSO DWDM communication systems using advanced diversity multiplexing with hybrid N-SM/OMI M-ary spatial pulse-position modulation schemes. *Optics Communications*, 562, 130558. <https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2024.130558>

EUROLAB Laboratory Services. (2025, Nisan 20).

Excavator Simulator. (2025, Mart 12). <https://sanlab.net/simulator-systems/vr-excavator-simulator-training/>

Fang, X., He, W., Wen, F. G., An, M., Song, M., Wang, B., & Ramsey, T. S. (2024). Simulation study on the effect of differentiated carbon tax adjustment on CO2 emissions reduction in China from the perspective of carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140071. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.140071>

Farrukh, A., & Sajjad, A. (2024). Investigating sustainability tensions and resolution strategies in the plastic food packaging industry—A paradox theory approach. *Business Strategy and the Environment*, 33(4), 2868-2889. <https://doi.org/10.1002/BSE.3637>

FLAIM. (2025, Mart 5). https://www.draeger.com/it_it/Safety/flaim

Flandin, S., Vidal-Gomel, C., & Becerril Ortega, R. (Ed.). (2022). *Simulation Training through the Lens of Experience and Activity Analysis*. 30. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89567-9>

Frenquelli, E., Real, J. P., Llabot, J. M., Pierella, L., Palma, S. D., & Real, D. A. (2025). Determination of Mixing Efficiency in Various Laboratory-Scale Semi-Solid Formulation Techniques Through Computational Fluid Dynamics and Finite Volume Simulations. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 20(2), 1-19. <https://doi.org/10.1007/S12247-025-09963-W/TABLES/6>

Gangadharaiah, R., Brooks, J. O., Mims, L., Rosopa, P. J., Dempsey, M., Cooper, R., & Isley, D. (2024a). Exploring the Benefits of a Simulator-Based Emergency Braking Exercise with Novice Teen Drivers. *Safety 2024, Vol. 10, Page 14, 10(1)*, 14. <https://doi.org/10.3390/SAFETY10010014>

Gangadharaiah, R., Brooks, J. O., Mims, L., Rosopa, P. J., Dempsey, M., Cooper, R., & Isley, D. (2024b). Exploring the Benefits of a Simulator-Based Emergency Braking Exercise with Novice Teen Drivers. *Safety 2024, Vol. 10, Page 14, 10(1)*, 14. <https://doi.org/10.3390/SAFETY10010014>

Girmay, N., Poulos, A., & Miranda, E. (2025). Evaluation of directionality in physics-based ground motion simulations of strike-slip earthquakes. *Earthquake Spectra*, 41(1), 436-456. <https://doi.org/10.1177/87552930241270555>

Gong, A., Cheng, Y., Su, J., & Zhang, L. (2024). Research on hybrid synchronization methods in multi-user collaborative VR simulation medical surgery training system. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 36(11), e8008. <https://doi.org/10.1002/CPE.8008>

Göksel Yıldırım. (2025). *Atak pilotlarını önce teknoloji uçuracak.* <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/atak-pilotlarini-once-teknoloji-ucuracak-/1514948>

- Gudavalli, S., & Ravi, V. K.** (2024). *Enhancing Data Security and Privacy in Cloud, SAP, and IoT Environments*. <https://papers.ssrn.com/abstract=5068395>
- Gulino, C., Fu, J., Luo, W., Tucker, G., Bronstein, E., Lu, Y., Harb, J., Pan, X., Wang, Y., Chen, X., Co-Reyes, J. D., Agarwal, R., Roelofs, R., Lu, Y., Montali, N., Mouglin, P., Yang, Z., White, B., Faust, A., ... Sapp, B.** (2023). Waymax: An Accelerated, Data-Driven Simulator for Large-Scale Autonomous Driving Research. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *36*, 7730-7742.
- Gürkan Tabak, & Ali Göçer.** (2013). *Yabancılara Türkçe öğretiminde benzetim (simülasyon) tekniğinin kullanımı*. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/369203>
- Hamad, A., & Jia, B.** (2022). How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives: An Overview of the Current and Potential Applications and Limitations. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, Vol. 19, Page 11278, 19(18), 11278. <https://doi.org/10.3390/IJERPH191811278>
- Helm.ai.** (2025). <https://www.businesswire.com/news/home/20250417581693/en/Helm.ai-Introduces-Helm.ai-Driver-Vision-Only-Real-Time-Path-Prediction-Neural-Network-for-Urban-Driving>
- Hertel, J. P., & Millis, B. J.** (2023). Using Simulations to Promote Learning in Higher Education: An Introduction. *Using Simulations to Promote Learning in Higher Education: An Introduction*, 1-182. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003448594/using-simulations-promote-learning-higher-education-john-paul-hertel-barbara-millis>
- Herur-Raman, A., Almeida, N. D., Greenleaf, W., Williams, D., Karshenas, A., & Sherman, J. H.** (2021). Next-Generation Simulation—Integrating Extended Reality Technology Into Medical Education. *Frontiers in Virtual Reality*, *2*, 693399. <https://doi.org/10.3389/FRVIR.2021.693399/BIBTEX>
- Himmels, C., Venrooij, J., Parduzi, A., Peller, M., & Riener, A.** (2024). The bigger the better? Investigating the effects of driving simulator fidelity on driving behavior and perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *101*, 250-266. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2024.01.007>
- History of Wargaming - Wargame Developments.** (2025). <https://wargamedevelopments.org/wargaming/history-of-wargaming/>
- Howard, M., Yan, X., Mustafee, N., Charnley, F., Böhm, S., & Pascucci, S.** (2022). Going beyond waste reduction: Exploring tools and methods for circular economy adoption in small-medium enterprises. *Resources, Conservation and Recycling*, *182*, 106345. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106345>
- Hu, X., Li, S., Huang, T., Tang, B., Huai, R., & Chen, L.** (2024a). How Simulation Helps Autonomous Driving: A Survey of Sim2real, Digital Twins, and Parallel Intelligence.

- IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 593-612.
<https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3312777>
- Hu, X., Li, S., Huang, T., Tang, B., Huai, R., & Chen, L.** (2024b). How Simulation Helps Autonomous Driving: A Survey of Sim2real, Digital Twins, and Parallel Intelligence. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 593-612.
<https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3312777>
- Hussain, D. I., Elomri, D. A., Kerbache, D. L., & Omri, D. A. El.** (2024a). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105247.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105247>
- Hussain, D. I., Elomri, D. A., Kerbache, D. L., & Omri, D. A. El.** (2024b). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105247.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105247>
- IOWA College of Engineering.** (2012). <https://dsri.uiowa.edu/nads-1>.
- Jacinto, M., Pinto, J., Patrikar, J., Keller, J., Cunha, R., Scherer, S., & Pascoal, A.** (2024). Pegasus Simulator: An Isaac Sim Framework for Multiple Aerial Vehicles Simulation. *2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2024*, 917-922.
<https://doi.org/10.1109/ICUAS60882.2024.10556959>
- Jami, A., Razzaghpour, M., Alnuweiri, H., & Fallah, Y. P.** (2024). Augmented driver behavior models for high-fidelity simulation study of crash detection algorithms. *IET Intelligent Transport Systems*, 18(3), 436-449. <https://doi.org/10.1049/ITR2.12373>
- Jang, D., Kim, J., Kim, D., Han, W. B., & Kang, S.** (2022). Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies. *Energy Conversion and Management*, 258, 115499.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2022.115499>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S.** (2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 312-322.
<https://doi.org/10.1016/J.AIEPR.2021.07.005>
- Ji, Y., Zhou, Z., Yang, Z., Huang, Y., Zhang, Y., Zhang, W., Xiong, L., & Yu, Z.** (2024). Toward autonomous vehicles: A survey on cooperative vehicle-infrastructure system. *iScience*, 27(5). <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2024.109751>
- Karbon ayak izi.** (2025, Nisan 19). https://www.zirai.org/karbon-ayak-izi_138.htm
- Kasowski, J., & Beyeler, M.** (2022). Immersive Virtual Reality Simulations of Bionic Vision. *ACM International Conference Proceeding Series*, 82-93.

<https://doi.org/10.1145/3519391.3522752>;TAXONOMY:TAXONOMY:CONFERENCE-COLLECTIONS;WGROUPE:STRING:ACM

- Kenneth Wong. (t.y.).** *Rainmakers for Autonomous Driving*. Geliş tarihi 08 Mayıs 2025, gönderen <https://www.digitalengineering247.com/article/rainmakers-for-autonomous-driving/cfd>
- Khalili Tari, M., Reza Faraji, A., Aslani, A., & Zahedi, R. (2023).** Energy simulation and life cycle assessment of a 3D printable building. *Cleaner Materials*, 7, 100168. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2023.100168>
- Khan, A. A. ; Abonyi, J., Pieroni, P., Kravchenko, M., Khan, A. A., & Abonyi, J. (2022).** Simulation of Sustainable Manufacturing Solutions: Tools for Enabling Circular Economy. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 9796, 14(15), 9796. <https://doi.org/10.3390/SU14159796>
- Khan, M. N., & Das, S. (2024).** Advancing traffic safety through the safe system approach: A systematic review. *Accident Analysis & Prevention*, 199, 107518. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2024.107518>
- Koukourikos, K., Tsaloglidou, A., Kourkouta, L., Papathanasiou, I. V., Iliadis, C., Fratzana, A., & Panagiotou, A. (2021).** Simulation in Clinical Nursing Education. *Acta Informatica Medica*, 29(1), 15. <https://doi.org/10.5455/AIM.2021.29.15-20>
- Krüger, J. T., Höffler, T. N., Wahl, M., Knickmeier, K., & Parchmann, I. (2022). Two comparative studies of computer simulations and experiments as learning tools in school and out-of-school education. *Instructional Science*, 50(2), 169-197. <https://doi.org/10.1007/S11251-021-09566-1/TABLES/10>
- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021).** Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119-137. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2021.05.011>
- Li, M., Chen, C., Yang, X., Zhou, J. T., Zhang, T., & Li, Y. (2023).** Toward Communication-Efficient Digital Twin via AI-Powered Transmission and Reconstruction. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 41(11), 3624-3635. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3310089>
- Li, T., Jiang, F., Yu, Q., Huang, W., Jiang, T., & Jin, D. (2023).** *How AI-driven Digital Twins Can Empower Mobile Networks*. <https://arxiv.org/pdf/2311.12273>
- Li, X., Wang, F., Al-Razgan, M., Mahrous Awwad, E., Zilola Abduvaxitovna, S., Li, Z., & Li, J. (2023).** Race to environmental sustainability: Can structural change, economic expansion and natural resource consumption effect environmental sustainability? A novel dynamic ARDL simulations approach. *Resources Policy*, 86, 104044. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.104044>

- Li, Y., Yuan, W., Zhang, S., Yan, W., Shen, Q., Wang, C., & Yang, M.** (2024). Choose Your Simulator Wisely: A Review on Open-source Simulators for Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3374044>
- Lim, K. Y. H., Dang, L. Van, & Chen, C. H.** (2024). Incorporating supply and production digital twins to mitigate demand disruptions in multi-echelon networks. *International Journal of Production Economics*, 273, 109258. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2024.109258>
- Liu, K.** (2024). Design and application of real-time traffic simulation platform based on UTC/SCOOT and VISSIM. *Journal of Simulation*, 18(4), 539-556. <https://doi.org/10.1080/17477778.2023.2233464>
- Liu, X., CHAI, L., Yang, X., MA, S., Wang, Y., & Yan, X.** (2025). *Is Hands-Free Calling Risk-Free? A Driving Simulator Study Considering Varying Cognitive Loads*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.5168350>
- Liu, Y., Zhang, Q., & Lv, Z.** (2022). Real-Time Intelligent Automatic Transportation Safety Based on Big Data Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 9702-9711. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3106388>
- Lobus, N. V., Knyazeva, M. A., Popova, A. F., & Kulikovskiy, M. S.** (2023). Carbon Footprint Reduction and Climate Change Mitigation: A Review of the Approaches, Technologies, and Implementation Challenges. *C 2023, Vol. 9, Page 120*, 9(4), 120. <https://doi.org/10.3390/C9040120>
- Lv, H., Gu, Y., Zhou, R., Pei, P., & Cai, Z.** (2024). An integrated quantitative method of risk analysis and decision making for safety manipulation of a forest firefighting aircraft by using physical models of multi-hazard factors. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E38341/ASSET/621807C4-A23E-454F-8264-B1106092ED00/MAIN.ASSETS/GR15.JPG>
- Matsumoto, Y., & Tsurudome, D.** (2014). Evaluation of Providing Recommended Speed for Reducing CO2 Emissions from Vehicles by Driving Simulator. *Transportation Research Procedia*, 3, 31-40. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2014.10.088>
- Melnyk, L., Koblianska, I., Dehtyarova, I., & Kubatko, O.** (2024). Navigating Sustainability and Ecosystem Management Through a Systemic Lens. *Ecosystem Management*, 353-396. <https://doi.org/10.1002/9781394231249.CH11>
- Metkewar, P. S.** (2024). Industrial Excellence Through Virtual Factory Simulation and Digital Modeling Innovations for Next-Generation Manufacturing System Design. *Digital Twins in Industrial Production and Smart Manufacturing: An Understanding of Principles, Enhancers, and Obstacles*, 277-295. <https://doi.org/10.1002/9781394195336.CH12>
- Mondal, S., Faruk, F. Bin, Rajbongshi, D., Efaz, M. M. K., & Islam, M. M.** (2023). GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction.

- Mourtzis, D., Ong, S. K., Wang, X. V., Panopoulos, N., Stark, R., & Wang, L.** (2024). Modelling, Design and Simulation as-a-Service Based on Extended Reality (XR) in Industry 4.0. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Part F2256*, 99-143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54034-9_4
- Nassar, A. K., Al-Manaseer, F., Knowlton, L. M., & Tuma, F.** (2021). Virtual reality (VR) as a simulation modality for technical skills acquisition. *Annals of Medicine and Surgery*, 71. <https://doi.org/10.1016/J.AMSU.2021.102945>
- Nathaniel, S. P., Ahmed, Z., Shamansurova, Z., & Fakher, H. A.** (2024). Linking clean energy consumption, globalization, and financial development to the ecological footprint in a developing country: Insights from the novel dynamic ARDL simulation techniques. *Heliyon*, 10(5), e27095. <http://www.cell.com/article/S2405844024031268/fulltext>
- Njoku, J. N., Nwakanma, C. I., Amaizu, G. C., & Kim, D. S.** (2023). Prospects and challenges of Metaverse application in data-driven intelligent transportation systems. *IET Intelligent Transport Systems*, 17(1), 1-21. <https://doi.org/10.1049/ITR2.12252>
- Obiuto, N. C., Olu-lawal, K. A., Ani, E. C., Ugwuanyi, E. D., & Ninduwezuor-Ehiobu, N.** (2024). Chemical engineering and the circular water economy: Simulations for sustainable water management in environmental systems. <https://wjarr.co.in/sites/default/files/WJARR-2024-0647.pdf>, 21(3), 001-009. <https://doi.org/10.30574/WJARR.2024.21.3.0647>
- Obiuto, N. C., Ugwuanyi, E. D., Ninduwezuor-Ehiobu, N., Ani, E. C., & Olu-lawal, K. A.** (2024). Advancing wastewater treatment technologies: The role of chemical engineering simulations in environmental sustainability. <https://wjarr.co.in/sites/default/files/WJARR-2024-0649.pdf>, 21(3), 019-031. <https://doi.org/10.30574/WJARR.2024.21.3.0649>
- Oguanobi, V. U., & Joel, O. T.** (2024). Geoscientific research's influence on renewable energy policies and ecological balancing. *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, 7(2), 073-085. <https://doi.org/10.53022/OARJMS.2024.7.2.0027>
- Ondov, M. ;, Rosova, A. ;, Sofranko, M. ;, Feher, J. ;, Cambal, J. ;, Feckova Skrabulakova, E., Saniuk, S., Grabowska, S., Ondov, M., Rosova, A., Sofranko, M., Feher, J., Cambal, J., & Feckova Skrabulakova, E.** (2022). Redesigning the Production Process Using Simulation for Sustainable Development of the Enterprise. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 1514, 14(3), 1514. <https://doi.org/10.3390/SU14031514>
- Pamučar, D., Durán-Romero, G., Yazdani, M., & López, A. M.** (2023). A decision analysis model for smart mobility system development under circular economy approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 86, 101474. <https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2022.101474>

- Pasha, M. K., Dai, L., Liu, D., Guo, M., & Du, W.** (2021). An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 1-23. <https://doi.org/10.1186/S13068-021-01977-Z/FIGURES/2>
- Pashaee, M., & Nahvi, A.** (2023). Evaluation of Drivers' Hazard Perception in Simultaneous Longitudinal and Lateral Control of Vehicle Using a Driving Simulator. *Communications in Computer and Information Science*, 1883 CCIS, 94-119. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43763-2_7
- Peng, T., Ren, L., & Ou, X.** (2023). Development and application of life-cycle energy consumption and carbon footprint analysis model for passenger vehicles in China. *Energy*, 282, 128412. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128412>
- Qazi, A., Shamayleh, A., El-Sayegh, S., & Formanek, S.** (2021). Prioritizing risks in sustainable construction projects using a risk matrix-based Monte Carlo Simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102576. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102576>
- Rama Krishna, S., Rathor, K., Ranga, J., Soni, A., Srinivas, D., & Anil Kumar, N.** (2023). Artificial Intelligence Integrated with Big Data Analytics for Enhanced Marketing. *6th International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2023 - Proceedings*, 1073-1077. <https://doi.org/10.1109/ICICT57646.2023.10134043>
- Ramsey, D., Bouscayrol, A., Boulon, L., Desreveaux, A., & Vaudrey, A.** (2022). Flexible Simulation of an Electric Vehicle to Estimate the Impact of Thermal Comfort on the Energy Consumption. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 2288-2298. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3144526>
- Riegler, A., Riener, A., & Holzmann, C.** (2022). Towards Personalized 3D Augmented Reality Windshield Displays in the Context of Automated Driving. *Frontiers in Future Transportation*, 3. <https://doi.org/10.3389/FFUTR.2022.810698>
- Rosen, K. R.** (2008). The history of medical simulation. *Journal of Critical Care*, 23(2), 157-166. <https://doi.org/10.1016/J.JCRC.2007.12.004>
- Russo, F., & Rindone, C.** (2024). Methods for Risk Reduction: Training and Exercises to Pursue the Planned Evacuation. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 1474*, 16(4), 1474. <https://doi.org/10.3390/SU16041474>
- Saeid Atabaki, M., Mohammadi, M., & Aryanpur, V.** (2022). An integrated simulation-optimization modelling approach for sustainability assessment of electricity generation system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102010. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102010>
- Salahshoori, I., Golriz, M., Nobre, M. A. L., Mahdavi, S., Eshaghi Malekshah, R., Javdani-Mallak, A., Namayandeh Jorabchi, M., Ali Khonakdar, H., Wang, Q., Mohammadi, A. H., Masoomah Sadat Mirnezami, S., & Kargaran, F.** (2024).

Simulation-based approaches for drug delivery systems: Navigating advancements, opportunities, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 395, 123888. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2023.123888>

Sarkar, S., Naug, A., Luna, R., Guillen, A., Gundecha, V., Ghorbanpour, S., Mousavi, S., Markovikj, D., & Babu, A. R. (2024). Carbon Footprint Reduction for Sustainable Data Centers in Real-Time. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 38(20), 22322-22330. <https://doi.org/10.1609/AAAI.V38I20.30238>

Schönhofer, T., Kaltenhäuser, B., & Bogenberger, K. (2024). Simulation Approach to Estimate the Potential of High-Occupancy Toll Lanes on German Freeways. *Transportation Research Record*. https://doi.org/10.1177/03611981241248163/ASSET/7C1E9D72-7DD1-4E80-84F7-ACA757C76D32/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_03611981241248163-FIG12.JPG

Schwarz, C., Ahmad, O., Brown, T., Gaspar, J., Wagner, G., McGehee, D. V., & Potel, M. (2023). The Long and Winding Road: 25 Years of the National Advanced Driving Simulator. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 43(4), 121-128. <https://doi.org/10.1109/MCG.2023.3277228>

Shangguan, Q., Fu, T., & Liu, S. (2020). Investigating rear-end collision avoidance behavior under varied foggy weather conditions: A study using advanced driving simulator and survival analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 139, 105499. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2020.105499>

Sharif, A., Meo, M. S., Chowdhury, M. A. F., & Sohag, K. (2021). Role of solar energy in reducing ecological footprints: An empirical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126028. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126028>

Simons, A., & Bauer, C. (2011). Life cycle assessment of hydrogen production. *Transition to Hydrogen: Pathways Toward Clean Transportation*, 13-57. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139018036.006>

Simulation & Motorsport. (2025, Şubat 17). <https://www.heason.com/industries/simulation-motorsport>

Siridol Kjellberg, L., Karlsson Hagnell, M., & Chaar, N. (2024). *Modelling, simulation and analysis of multi-wheeled military vehicles*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-353869>

Sohel Parvez. (2025, Şubat 2). *Simulation Software*. <https://spca.education/simulation-software-for-learning/>

Stadler, C., Montanari, F., Baron, W., Sippl, C., & Djanatljev, A. (2022). A Credibility Assessment Approach for Scenario-Based Virtual Testing of Automated Driving

- Functions. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 3, 45-60. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3140493>
- Stark, J. (2024).** *Digital Twins in the Ideation and Definition Phases of the Product Lifecycle*. 103-127. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63207-5_4
- Su, Y., Ghaderi, H., & Dia, H. (2024).** The role of traffic simulation in shaping effective and sustainable innovative urban delivery interventions. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 13, 100130. <https://doi.org/10.1016/J.EJTL.2024.100130>
- Subramani, R., Mustafa, M. A., Ghadir, G. K., Al-Tmimi, H. M., Alani, Z. K., Rusho, M. A., Rajeswari, N., Haridas, D., Rajan, A. J., & Kumar, A. P. (2024).** Exploring the use of Biodegradable Polymer Materials in Sustainable 3D Printing. *Applied Chemical Engineering*, 7(2), 3870-3870. <https://doi.org/10.59429/ACE.V7I2.3870>
- Tafidis, P., & Pirdavani, A. (2023).** Application of surrogate safety measures in higher levels of automated vehicles simulation studies: A review of the state of the practice. *Traffic Injury Prevention*, 24(3), 279-286. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15389588.2023.2176711>
- Turner, C. J., Hutabarat, W., Oyekan, J., & Tiwari, A. (2016).** Discrete Event Simulation and Virtual Reality Use in Industry: New Opportunities and Future Trends. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(6), 882-894. <https://doi.org/10.1109/THMS.2016.2596099>
- Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri. (2024, Aralık 9).** <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>
- Udeagha, M. C., & Ngepah, N. (2022).** Dynamic ARDL Simulations Effects of Fiscal Decentralization, Green Technological Innovation, Trade Openness, and Institutional Quality on Environmental Sustainability: Evidence from South Africa. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 10268, 14(16), 10268. <https://doi.org/10.3390/SU141610268>
- Villanthenkodath, M. A., & Pal, S. (2023).** How economic globalization affects the ecological footprint in India? A novel dynamic ARDL simulations. *Journal of Economic and Administrative Sciences*, 41(2), 680-700. <https://doi.org/10.1108/JEAS-01-2022-0005/FULL/PDF>
- Villegas-Ch, W., Garcia-Ortiz, J., & Sanchez-Viteri, S. (2024).** Toward Intelligent Monitoring in IoT: AI Applications for Real-Time Analysis and Prediction. *IEEE Access*, 12, 40368-40386. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3376707>
- Wang, Z., Dong, B., Wang, Y., Li, M., Liu, H., & Han, F. (2024).** Analysis and evaluation of fuel cell technologies for sustainable ship power: Energy efficiency and environmental impact. *Energy Conversion and Management: X*, 21, 100482. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2023.100482>

- Waudby, H., & Zein, S. H.** (2021). A circular economy approach for industrial scale biodiesel production from palm oil mill effluent using microwave heating: Design, simulation, techno-economic analysis and location comparison. *Process Safety and Environmental Protection*, *148*, 1006-1018. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2021.02.011>
- Wen, M., Park, J., & Cho, K.** (2020). A scenario generation pipeline for autonomous vehicle simulators. *Human-centric Computing and Information Sciences*, *10*(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/S13673-020-00231-Z/FIGURES/7>
- World's biggest computer.** (2025, Ocak 5). <https://www.independent.co.uk/tech/worlds-most-powerful-computer-simulation-ai-b1760338.html>
- Wu, Q., Wang, Y., Lu, L., Chen, Y., Long, H., & Wang, J.** (2022). Virtual Simulation in Undergraduate Medical Education: A Scoping Review of Recent Practice. *Frontiers in Medicine*, *9*, 855403. <https://doi.org/10.3389/FMED.2022.855403/XML/NLM>
- Xu, J., & Zhang, Y.** (2025). AI-Powered Digital Twin Technology for Highway System Slope Stability Risk Monitoring. *Geotechnics* *2025*, Vol. 5, Page 19, 5(1), 19. <https://doi.org/10.3390/GEOTECHNICS5010019>
- Xu, M., Niyato, D., Chen, J., Zhang, H., Kang, J., Xiong, Z., Mao, S., & Han, Z.** (2023). Generative AI-Empowered Simulation for Autonomous Driving in Vehicular Mixed Reality Metaverses. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, *17*(5), 1064-1079. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2023.3293650>
- Xu, Z., Wang, C., Jiang, T., & Zheng, N.** (2024a). Impediments to Environmental Awareness in Autonomous Driving Systems and Its Effect on User Adoption. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3373773>
- Xu, Z., Wang, C., Jiang, T., & Zheng, N.** (2024b). Impediments to Environmental Awareness in Autonomous Driving Systems and Its Effect on User Adoption. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3373773>
- Yaibok, C., Suwanno, P., Pornbunyanon, T., Kanjanakul, C., Luathep, P., & Fukuda, A.** (2024). Improving urban intersection safety insights from simulation analysis. *IATSS Research*, *48*(4), 523-536. <https://doi.org/10.1016/J.IATSSR.2024.10.005>
- Yan, X., Feng, S., Sun, H., & Liu, H. X.** (2021). *Distributionally Consistent Simulation of Naturalistic Driving Environment for Autonomous Vehicle Testing*. <https://arxiv.org/pdf/2101.02828>
- Yang, K., Haddad, C. Al, Yannis, G., & Antoniou, C.** (2022). Classification and Evaluation of Driving Behavior Safety Levels: A Driving Simulation Study. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, *3*, 111-125. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3149474>

- Yin, K., He, Z., Xiong, J., Zou, J., Li, K., & Wu, S. T.** (2021). Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives. *Journal of Physics: Photonics*, 3(2), 022010. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ABF02E>
- Yuan, J., Liu, J., Li, C., Zhao, Z., & Cao, H.** (2025). Calculation and analysis of the hazardous area of Three-Dimensional aircraft wake vortices under crosswind conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2965(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2965/1/012049>
- Zahabi, M., Park, J., Razak, A. M. A., & McDonald, A. D.** (2020). Adaptive driving simulation-based training: framework, status, and needs. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 21(5), 537-561. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2019.1698673>
- Zargiannaki, E., Tzouras, P. G., Antoniou, E., Karolemeas, C., & Kepaptsoglou, K.** (2024). Assessing the impacts of traffic calming at network level: A multimodal agent-based simulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11(1), 41-54. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2023.01.003>
- Zhang, X., Ren, W., & Peng, H.** (2022). Urban land use change simulation and spatial responses of ecosystem service value under multiple scenarios: A case study of Wuhan, China. *Ecological Indicators*, 144, 109526. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.109526>
- Zhang, X., Tao, J., Tan, K., Törngren, M., Sánchez, J. M. G., Ramli, M. R., Tao, X., Gyllenhammar, M., Wotawa, F., Mohan, N., Nica, M., & Felbinger, H.** (2023). Finding Critical Scenarios for Automated Driving Systems: A Systematic Mapping Study. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 49(3), 991-1026. <https://doi.org/10.1109/TSE.2022.3170122>
- Zhou, R., Huang, H., Lee, J., Huang, X., Chen, J., & Zhou, H.** (2023). Identifying typical pre-crash scenarios based on in-depth crash data with deep embedded clustering for autonomous vehicle safety testing. *Accident Analysis & Prevention*, 191, 107218. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2023.107218>
- Zülfikar, H.** (2022). Türkçenin Yabancılaşmasında Gelineen Düzey. *TRT Akademi*, 146-157. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/trta/issue/67975/1054625>