T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLUNDA OLAY ALGILAMA İLE HEMZEMİN GEÇİT VE TREN KONTROLÜ

Ümit KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı

Akıllı Ulaşım Sistemleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan Yardım

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLUNDA OLAY ALGILAMA İLE HEMZEMİN GEÇİT VE TREN KONTROLÜ

Ümit KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 31.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı, Akıllı Ulaştırma Sistemleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Selim DÜNDAR, Üye
İstanbul Okan Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Mustafa Sinan Yardım sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Demiryolunda Olay Algılama ile Hemzemin Geçit ve Tren Kontrolü" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ümit KILIÇ

İmza

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında değerli katkılarını esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, çalışmanın her aşamasında yol gösterici yaklaşımı, yapıcı eleştirileri ve sabrı ile bana büyük destek olmuştur. Ayrıca, bu tezi hazırlama sürecinde bana akademik ve idari anlamda imkân sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmamı sunma fırsatı bulduğum Conf-ITS'25 1. Akıllı Ulaşım Sistemleri Konferansı'nın düzenleyicilerine ve katkıda bulunan tüm katılımcılara teşekkür ederim. 16-17 Nisan 2025 tarihlerinde Ankara'da gerçekleştirilen bu konferans, çalışmamın daha geniş bir akademik çevrede değerlendirilmesine imkân sağlamıştır.

Adı SOYADI

Ümit KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Amaç ve Kapsam 2

1.2 Tezin Hipotezi 3

1.3 Literatür Özeti 3

1.4 Yöntem 5

2 ULAŞTIRMA AĞLARINDA OLAY ALGILAMA SİSTEMLERİ 7

2.1 Karayolunda Olay Algılama 9

2.1.1 Karayolunda radar sistemleri 9

2.1.2 Karayolunda Kamera Sistemleri 10

2.1.3 Karayolunda Döngü Sistemleri 11

2.1.4 Manyetik Sensörler 11

2.2 Havayolunda Olay Algılama 12

2.2.1 Pist Güvenliği ve Olay Algılama 12

2.2.2 Apron Trafiği Yönetimi 13

2.2.3 Yabancı Cisim Kalıntısı (FOD) Tespiti 13

2.3 Denizyolunda Olay Algılama 15
2.4 Demiryolunda Olay Algılama 15
2.4.1 Ray Hattındaki Olası Engellerin Tespiti: Kameralar ve Sensör Sistemleri 16
2.4.2 Tren Geçişinin Belirlenmesi: GPS ve Ray Sistemleri Teknolojisi 16
2.4.3 LIDAR Teknolojisi: Engellerin Tespiti ve Alanın Haritalanması 17
2.4.4 Kamera ve Görüntü İşleme Teknolojileri: Gerçek Zamanlı Engel Tespiti 18
3 DEMİRYOLU OLAY ALGILAMA SİSTEMLERİNİN GENEL MİMARİSİ 19
3.1 Sensörler ve Veri Toplama Birimleri 19
3.2 Veri İşleme ve Olay Algılama 19
3.3 İletişim ve Veri Aktarımı 20
3.4 Merkezi İzleme ve Müdahale 20
3.5 Sistemin İşleyiş Süreci 21
4 HEMZEMİN GEÇİT OLAY ALGILAMA SİSTEMİ İÇİN KULLANILAN MATERYALLER VE TANIMLAR 22
4.1 Hemzemin Geçit Tanımı 22
4.1.1 Kontrol Düzeyine Göre Hemzemin Geçitler 23
4.1.2 Fiziksel Yapısına Göre Hemzemin Geçitler 24
4.2 Olay Algılama Kameraları 25
4.2.1 Olay Algılama Kameraları Çeşitleri 25
4.2.2 Olay Algılama Kameraları İle İlgili Teknolojik Gelişmeler 28
4.3 Hat Ekipman Ünitesi (LEU) 34
4.4 Baliz (Balise) 35
4.5 Baliz Anteni 37

4.6 Baliz İletim Modülü (BTM) 39
4.7 Tren Arayüz Ünitesi (TIU) 41
4.8 Tren Araç Üstü Donanımları (ONBOARD) 43
4.9 Fiber Optik Hat Yapısı 47
5 HEMZEMİN GEÇİT VE TRENE ENTEGRASYON 50
6 DEMİRYOLU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE FİBER OPTİK VE MOBİL AĞLARIN KARŞILAŞTIRILMASI 53
6.1 Fiber Optik Kablo Parazit Dayanıklılığı 53
6.2 Fiber Optik Kablo Veri İletim Kapasitesi 55
6.3 Gecikme Süresi 57
6.4 Bağlantı Güvenliği 58
6.5 Ortam Koşulllarına Dayanıklılık 59
6.6 Uygulama Uygunluğu 60
7 OTOMATİK FRENLEME SİSTEMİNE SAHİP TRENİN DURUŞ HAREKETİNİN MODELLENMESİ 62
7.1 Temel Durma Mesafesi Hesabı 63
7.2 İnsan Faktörü Olarak Tepki Süresi 65
7.3 Çevresel Unsurlar 67
7.3.1 Islak Zemin Koşulları 68
7.3.2 Rüzgâr / Yüksek Hava Direnci 70
7.4 Modelin Genel Formülü 71
8 SENARYO BAZLI BULGULAR VE TARTIŞMA 73
8.1 Senaryo Parametreleri ile Durma Mesafesi Hesabı 73
8.2 Araştırma Sorularının Cevapları 85
8.2.1 1.Araştırma sorusunun cevabı olarak “önerilen entegre sistem ile güvenli ve zamanında durdurma sağlanabilmesi” hususu: 86

8.2.2 2. Araştırma sorusunun cevabı olarak “otomatik frenleme sisteminin, elle frenlemeye göre güvenlik ve tepki süresi açısından verimliliğinin ne olduğu” hususu: 87

8.2.3 3. Araştırma sorusunun cevabı olarak “fiber optik tabanlı bir veri iletim altyapısının, sinyalizasyon sistemlerinde erişilebilirlik ve veri hızı açısından ne tür üstünlük sağladığı” hususu: 88

9 SONUÇ **91**

KAYNAKÇA **93**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **105**

SİMGE LİSTESİ

C_d	Aerodinamik Sürtünme Katsayısı
BW	Bant Genişliği
E	Erişilebilirlik (Accessibility)
F/O	Fiber optik
f	Frekans (MHz)
f_{fren}	Fren Kuvveti
a	Freleme ivmesi
d	Frenleme mesafesi
N	Gürültü Gücü
l_e	Güvenli Durma Mesafesi (m)
f_d	Hava Direnci
ρ	Hava Yoğunluğu
v	Hız (m/s)
V	Hız (km/sa)
C	İletişim Kanalı Kapasitesi
W	İş (J)
E_k	Kinetik Enerji
F	Kuvvet (N)
m	Kütle (kg)
MHz	Megahertz
l	Mesafe (m)
µs	Mikrosaniye
f_r	Ray Teker Sürtünme Katsayısı
S	Sinyal Gücü
S/N	Sinyal Gürültü Oranı
l_t	Tepki Mesafesi (Reaksiyon mesafesi) (m)
t_t	Tepki süresi (Reaksiyon süresi) (s)
A	Trenin Gabari (Cephe) Alanı (m^2)

v_y	Yayılma hızı (m/s)
PL (db)	Yol Kaybı db Cinsinden
T_k	Yıllık kesinti süresi (sa)

KISALTMA LİSTESİ

AIS	Automatic Identification System (Otomatik Tanımlama Sistemi)
BTM	Balise Transmission Module (Baliz İletim Modülü)
CCTV	Closed Circuit Television (Kapalı Devre Televizyon Sistemi)
CNN	Convolutional Neural Networks (Evrişimli Sinir Ağları)
DL	Deep Learning (Derin Öğrenme)
DSM	Digital Surface Models (Dijital Yüzey Modelleri)
EB	Emergency Brake (Acil Durum Frenleme)
EMC	Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMI	Electromagnetic Interference (Elektromanyetik parazit)
ERTSM	European Rail Traffic Management System (Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi)
ETCS	European Train Control System (Avrupa Tren Kontrol Sistemi)
EVC	European Vital Computer (Avrupa Sistem Bilgisayarı)
FOD	Foreign Object Debris (Yabancı Cisim)
GPS	Global Positioning System (Uydu Konumlama Sistemi)
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Rail (Demiryolu İçin Küresel Mobil İletişim Sistemi)
HEGEUS	Hemzemin Geçit Erken Uyarı Sistemi
İHA	İnsansız Hava Araçları
LEU	Line Equipment Unit (Hat Ekipman Ünitesi)
LIDAR	Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Uzaklık Ölçümü)
LoT	Internet of Things (Nesnelerin interneti)
MVB	Multifunction Vehicle Bus (Çok Fonksiyonlu Araç Veri Yolu)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Sentetik Açıklıklı Radar)
SB	Service Brake (Servis Freni)
TIU	Train Interface Unit (Tren Arayüz Ünitesi)
ViT	Vision Transformer (Görsel Dönüştürücü)
YZ	Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Olay algılama sistemi genel akışı……**21**
Şekil 4.1 Hemzemin geçit (MEB, 2012) **23**
Şekil 4.2 Olay algılama kamerası (Bildirici, 2016).....**29**
Şekil 4.4 Baliz ve baliz anteni (Powered by RailSystem, nd.) **38**
Şekil 4.5 Baliz iletim modülü (HollySys, t.y) **39**
Şekil 5.1 Hemzemin geçit otomatik fren sistemi diagramı **51**
Şekil 5.2 Hemzemin geçit otomatik fren sistemi süreç algoritması **52**
Şekil 7.1 Güvenli durma mesafesinin hıza ve ivmeye göre değişimi.....**66**

TABLO LİSTESİ

Tablo 6.1 Fiber optik ve mobil ağ karşılaştırma tablosu **61**
Tablo 7.1 Bazı güvenli durma mesafeleri **67**
Tablo 8.1 Durma mesafesi mesafesi hesabında kullanılan sabit değerler **74**
Tablo 8.2 Kritik durma mesafeleri **75**
Tablo 8.3 Kablolu ve kablosuz sistem karşılaştırması **77**
Tablo 8.4 1. Senaryo: Normal makinist ile seyir (t_t=1,5 s) **79**
Tablo 8.5 2. Senaryo: Dikkati dağılmış makinist ile seyir (t_t=4,0 s) **80**
Tablo 8.6. 3. Senaryo: Dikkati dağılmış makinist ile seyir (t_t =10,0 s) **80**
Tablo 8.7 4. Senaryo: Algılama sistemi + Makinist ile seyir (t_t =2,0 s) **81**
Tablo 8.8 5. Senaryo: Tam otomatik sistem + Mobil + Makinist (t_t =0 s) **83**
Tablo 8.9 6. Senaryo: Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist (t_t =0 sn) **83**
Tablo 8.10 7. Senaryo: Tam otomatik sistem + Fiber + Makinist (Islak zemin) (t_t =0 sn) .. **85**

ÖZET

Demiryolunda Olay Algılama ile Hemzemin Geçit ve Tren Kontrolü

Ümit KILIÇ

Akıllı Ulaşım Sistemleri Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Mustafa Sinan YARDIM

Demiryolu taşımacılığı, yüksek taşıma kapasitesi, güvenilirliği ve çevresel sürdürülebilirliği sayesinde modern ulaşım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Ancak özellikle hemzemin geçitlerde yaşanan kazalar, demiryolu güvenliğini tehdit eden en önemli unsurlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, hemzemin geçitlerdeki güvenlik risklerinin azaltılmasına yönelik olarak geliştirilen kamera tabanlı olay algılama sistemlerinin, tren üzerindeki otomatik fren sistemleriyle bütünleşimini ele alınmaktadır. Yüksek çözünürlüklü kameralar, yapay zekâ destekli görüntü işleme algoritmaları ve gerçek zamanlı veri iletimi sayesinde olağan dışı durumlar saptamakta; bu veriler LEU (Hat Ekipman Ünitesi) ve balizler aracılığıyla trenin sinyalizasyon sistemine aktarılmaktadır. Böylece, tehlikeli durumlarda otomatik frenleme sağlanarak insan hatasına bağlı riskler en aza indirilmekte ve demiryolu güvenliği artırılmaktadır. Bu yaklaşım, dijital demiryolu sistemleri ve tamamen otomatik tren işletmeciliği alanındaki gelişmeleri destekleyen önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Hemzemin geçit, olay algılama, kamera sistemleri, tren araç üstü, otomatik frenleme.

ABSTRACT

Level Crossing and Train Control with Incident Detection on Railroad

Umit KILIC

Department of Intelligent Trasnportaion Systems

Master of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa SinanYARDIM

Railway transportation has become a fundamental component of modern transport systems due to its high capacity, reliability, and environmental sustainability. However, accidents at level crossings remain one of the most critical threats to railway safety. This study addresses the integration of camera-based incident detection systems with onboard automatic braking systems to reduce safety risks at level crossings. Utilizing high-resolution cameras, AI-supported image processing algorithms, and real-time data transmission, abnormal situations are detected and transmitted via LEU and balises to the train's signaling system. In this way, automatic braking is activated during dangerous situations, minimizing human error and enhancing railway safety. This approach can be regarded as a significant step that supports advancements in digital railway systems and fully automated train operations.

Keywords: Smart level crossing, event detection, camera systems, train onboard, automatic braking

1
GİRİŞ

Demiryolu taşımacılığı, sanayi devriminden bu yana toplumların ekonomik, sosyal ve endüstriyel kalkınmalarında hayati bir rol üstlenmiş; şehirler arası ve ülkeler arası ulaşımın ana arterlerinden biri olarak tarihteki yerini almıştır. Demiryolları, geniş coğrafi alanları birbirine bağlayan hem yolcu hem de yük taşımacılığında yüksek taşıma kapasitesi sunan, güvenilir ve maliyet açısından etkin bir ulaşım modeli olarak öne çıkmaktadır. Özellikle son yüzyılda yaşanan teknolojik gelişmeler, şehirleşme oranlarındaki artış, nüfus yoğunluğunun büyük kent merkezlerinde toplanması ve küresel ticaret hacminin ciddi boyutlara ulaşması, demiryolu taşımacılığının önemini daha da artırmıştır (İnan & Demir, 2017). Hız, verimlilik, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi unsurlar açısından kara ve hava taşımacılığına karşı önemli üstünlükler sunan bu sistem, modern ulaşım altyapılarının vazgeçilmez bileşeni haline gelmiştir.

Bununla birlikte, demiryolu taşımacılığının hızla büyümesi ve yaygınlaşması, beraberinde çeşitli güvenlik tehditlerini ve işletim zorluklarını da getirmiştir. Özellikle demiryolu hatlarının kara yolları ile kesiştiği hemzemin geçitler, taşıdıkları yüksek kaza riski nedeniyle demiryolu güvenliği açısından önemli bir zayıflık oluşturmaktadır. Hemzemin geçitlerde yaşanan çarpışmalar genellikle araç sürücülerinin ihmali, yetersiz sinyalizasyon, görüş kısıtlılığı, bozuk altyapı ya da zamanlama hataları gibi birçok değişkene bağlı olarak meydana gelmektedir (Akbayır, 2016). Bu tür kazalar, yalnızca ciddi maddi hasarlara yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda can kayıplarına, yaralanmalara ve toplumsal güvenin zedelenmesine neden olabilmektedir.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın temel amacı, hemzemin geçitlerdeki olası çarpışma risklerini en aza indirmek üzere, olay algılama kameraları kullanılarak meydana gelebilecek riskli durumların saptanması ve bu bölgelerde alınan bilginin trene kablolu balizler aracılığıyla iletilmesine yönelik gerekçeli bir sistem mimarisi önerisi sunmaktır. Hemzemin geçitlerdeki kazalar genellikle sürücü hataları, yetersiz sinyalizasyon, teknik arızalar ve çevresel unsurlardan kaynaklanmaktadır. Bu noktada, akıllı kamera sistemleri ve baliz destekli otomatik frenleme yapısı, sistemin insan müdahalesine gerek kalmadan güvenli frenleme düzeneğini tetikleyebilmesini hedeflemektedir.

Türkiye'de 2002 yılı itibari ile 4810 adet hemzemin geçit saptanmış olup, 2019 yılı itibari ile 2788 adete düştüğü gözlemlenmiştir. 2002 ile 2019 yılları arasında %42'lik bir azalma görülmektedir (Kıyıldı, 2022). 2019-2023 verilerine göre ise hemzemin geçitlerde 2019 yılında 26, 2020 yılında 17, 2021 yılında 12, 2022 yılında 21 ve 2023 yılında 15 adet çarpışma kaydedilmiştir (TCDD. (2023a), 2023). Bu tür kazaların başlıca nedenleri arasında sürücü dikkatsizliği, eksik veya yetersiz sinyalizasyon sistemleri ve teknik arızalar öne çıkmaktadır. Geçit sayısının azalmasının tek başına yeterli olmadığını, teknolojik tabanlı güvenlik önlemlerinin entegre edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın kapsamı, hemzemin geçitlerde olay algılama sistemleri ile tehlikeli durumların tanımlanması, bu bilgilerin sahadaki balizler aracılığıyla trenin sinyalizasyon sistemine iletilmesi ve bu sistemin otomatik frenleme düzeneği ile bütünleştirilmesi adımlarını kapsamaktadır. Ayrıca sistemin fiber optik altyapıyla desteklenmesi sayesinde elektromanyetik parazit, hava koşulları ve mesafe kaynaklı sinyal bozulmalarının önüne geçilmekte; böylece sinyalizasyon sistemine veri iletimi daha kararlı, kesintisiz ve düşük gecikmeli bir şekilde sağlanmaktadır. Bu durum, yalnızca güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda sinyal erişilebilirliğini de genişleterek sistemin genel işlevselliğini ve yanıt verme kapasitesini önemli ölçüde artırır.

Bu çalışmada önerilen sistem, Avrupa Tren Kontrol Sistemi ETCS'nin baliz yerleşim standardına uygun olarak, trenin hemzemin geçide 500 metre kala olay algılaması yapacak biçimde tasarlanmıştır. Bu bağlamda, söz konusu iletişimden

sonraki süreçte geçitte oluşabilecek olaylara yönelik durumlar bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

1.2 Tezin Hipotezi

Bu tez çalışması, demiryolu hemzemin geçitlerinde yaşanan güvenlik zayıflığının giderilmesi amacıyla geliştirilen kamera tabanlı olay algılama sistemlerinin, otomatik frenleme düzeneğine entegre edilmesi durumunda elle frenlemeye kıyasla insan etkisinden kaynaklı gecikmeleri ortadan kaldırarak daha hızlı ve güvenilir tepki verme imkânı sunabileceği hipotezine dayanmaktadır.

Ayrıca, sistemin fiber optik altyapı ile desteklenmesi; sinyal iletimindeki parazit, zayıflama ve kesinti risklerini en aza indirerek, hemzemin geçitlerdeki iletişim sistemlerinin erişilebilirliğini artırmakta ve veri aktarım hızını önemli ölçüde yükseltmektedir.

Bu bağlamda çalışmada aşağıdaki araştırma sorularına odaklanılmıştır:

1. Kamera tabanlı olay algılama sisteminden elde edilen bilgiler, otomatik frenleme sistemi ile entegre edildiğinde insan müdahalesine gerek kalmadan güvenli ve zamanında durdurma sağlanabilir mi?
2. Otomatik frenleme sisteminin, elle frenlemeye göre güvenlik ve tepki süresi açısından verimliliği nedir?
3. Fiber optik tabanlı bir veri iletim altyapısı, sinyalizasyon sistemlerinde erişilebilirlik ve veri hızı açısından ne tür üstünlükler sağlar?
4. Bu araştırma soruları doğrultusunda, sistemin hem teorik modeli hem de teknik bileşenleri değerlendirilmiş; sonuçlar, demiryolu güvenliğinde insan etkisini azaltan otomasyon sistemlerinin uygulanabilirliği bağlamında tartışılmıştır

1.3 Literatür Özeti

Teknolojik gelişmelerin sağladığı imkânlardan yararlanarak hemzemin geçit güvenliğinin artırılması, demiryolu taşımacılığında sürdürülebilir güvenlik politikalarının hayata geçirilmesi açısından gerekli hale gelmiştir. Son yıllarda bu doğrultuda geliştirilen ileri düzey kamera tabanlı olay algılama sistemleri, demiryolu güvenliğini artırmaya yönelik en etkili çözümlerden biri olarak kabul görmektedir. Bu sistemler, yüksek çözünürlüklü kameralar, yapay zekâ destekli

görüntü işleme algoritmaları, makine öğrenimi modelleri ve gerçek zamanlı veri iletim altyapıları sayesinde hemzemin geçitlerdeki olağan dışı durumları, araç ve yaya hareketlerini, tehlike arz eden nesne varlıklarını ve muhtemel kazaya yol açabilecek tüm unsurları kısa sürede saptayabilme yeteneğine sahiptir (Taştimur vd, 2017).

Kamera sistemlerinin sunduğu yüksek düzeyli görsel analiz yetenekleri sayesinde, sistem yalnızca durağan görüntülerden bilgi üretmekle kalmaz, aynı zamanda olay bazlı davranışsal analiz gerçekleştirebilir. Örneğin, bir aracın uyarı sinyallerine rağmen ray üzerinde durması ya da yaya hareketliliğinin olağan dışı şekilde artması gibi durumlar, sistem tarafından "olay" olarak algılanarak derhal bir dizi güvenlik önlemi tetiklenebilir (a2techonogy, n.d). Bu ise, yenilikçi teknolojiler, hemzemin geçitlerde meydana gelen kazaların önlenmesinde önemli bir katkı sunabilir. Demiryolu ile karayolu kullanıcılarının kesişim noktalarında daha güvenli bir etkileşim sağlanmasına katkıda bulunarak demiryolu taşımacılığının genel güvenlik düzeyini artırmaktadır.

Ayrıca, erken uyarı sistemi olay algılama kamera sistemi ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalar dikkat çekmektedir. Bildirici (2016), demiryolu ve karayolu trafiğinin kesişim noktalarında meydana gelebilecek kazaları önlemek amacıyla Hemzemin Geçit Erken Uyarı Sistemi (HEGEUS) adıyla bir güvenlik sistemi geliştirmiştir. Yazar tarafından tasarlanan bu sistem, hemzemin geçitlere yerleştirilen akıllı kameralar ve aydınlatma donanımları sayesinde geçitteki olağan dışı durumlar saptanarak, tren makinistlerini ve ilgili kontrol merkezlerini zamanında bilgilendirmeyi hedeflemektedir. Akıllı kameralar, hemzemin geçitte trenin seyrini etkileyebilecek herhangi bir nesne ya da engel saptandığında, otomatik olarak alarm üretmekte, bu alarmın, 3G üzerinden internet bağlantısı bulunan uzak bir noktaya bu alarmın iletilmesi amaçlanmış ve buna yönelik bir yazılım geliştirilmiştir (Bildirici, 2016). İletilen alarm sonucunda makinistin elle fren yapması amaçlanmıştır.

Bir diğer çalışma da ise, Cho ve arkadaşları tarafından geliştirilen sistemin, hemzemin geçitteki engelleri saptayarak, trenin otomatik olarak durmasını sağladığı ve böylece kazaların önlenmesine katkı sunduğu görülmektedir (Cho vd, 2013). Bu sistem; talep (istem), Kapalı Devre Televizyon (Closed Circuit Television- CCTV) kameraları ile engel saptanması, iki yönlü kablosuz iletişim, yol

trafik sinyal kontrolü ile bütünleşimini (entegrasyonunu) ve VMS ekranları gibi bileşenleri içermektedir. Kablosuz iletişim altyapısı, tren ile yer arasındaki veri iletimini sağlamakta ve sistemin gerçek zamanlı izleme için kullanılabilecek altyapıyı oluşturmaktadır. Sistem, tren ile zemin arasında kablosuz iletişim için 3G veya 4G mobil ağlarını kullanmaktadır (Cho vd, 2013). Burada belirli mesafede tren üstü sistemi ile haberleşerek, trenin yavaşlayarak durması amaçlanmıştır.

1.4 Yöntem

Bu tez çalışmasında, demiryolu hemzemin geçitlerinde güvenliğin artırılmasına yönelik geliştirilen hipotezleri test etmek ve ortaya konulan araştırma sorularına bilimsel temellere dayalı yanıtlar üretebilmek üzere hem analitik hem de model odaklı, çok katmanlı bir yöntemsel yaklaşım benimsenmiştir. Araştırma süreci, yalnızca teknik detaylarla sınırlı kalmayıp aynı zamanda kavramsal ve teorik arka planı da içerecek şekilde kapsamlı bir biçimde yapılandırılmıştır. Bu bütünsel yaklaşım, olayların yalnızca görünen yönlerini değil, perde arkasında yatan insan-makine etkileşimi, zamanlama etkisi ve teknolojik sistemlerin müdahale kapasitesini de irdelemeyi hedeflemiştir.

Çalışmada, hemzemin geçitlerde yaşanan olayların temel nedenlerinden biri olan insan kaynaklı gecikmeler ele alınmış, özellikle makinist bazlı elle frenleme süreçleri detaylı biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda; makinistin olay anını fark etme süresi (algılama süresi), bu duruma yönelik bir hareket seçenekleri oluşturma ve kümeden seçim süreci (karar süresi) ve son olarak frene fiziksel müdahale süresi (frenleme başlangıç süresi) gibi önemli süre bileşenleri tek tek tanımlanmış ve toplam tepki süresi bu bileşenler üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen bu elle frenleme verileri, modern teknolojiyle geliştirilen ve olay algılama kameralarıyla entegre çalışan otomatik frenleme sistemlerinin teorik tepkisizlik süresiyle karşılaştırılmıştır. Böylelikle, insan unsurunun sisteme kattığı gecikme ile teknolojik sistemin sunduğu neredeyse anlık müdahale yeteneği arasında nicel bir karşılaştırma yapılmıştır.

Bu karşılaştırma doğrultusunda, frenleme hesaplamaları fiziksel değişkenler ışığında gerçekleştirilmiştir. Trenlerin hareketini belirleyen temel büyüklükler olan ilk hız, baliz (işaret) ile olay noktası arasındaki mesafe, frenleme kuvveti ve durma mesafesi gibi değişkenler esas alınarak kinematik hareket denklemleri kurulmuştur.

Söz konusu denklemler yardımıyla hem elle hem de otomatik frenleme senaryoları ayrı ayrı benzetilmiştir. Bu benzetimlerde, makinist bazlı sistemlerin gecikmeli tepkisiyle karşılaştırıldığında, otomatik sistemlerin özellikle yüksek hızlarda bile daha kısa sürede tepki vererek durma mesafesini önemli ölçüde azaltabileceği ortaya konmuştur.

İletişim altyapısı bakımından ise, demiryolu sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan mobility altyapı ve modern fiber optik kablo altyapısı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmada; veri iletim hızı, sinyal zayıflaması (attenuation), elektromanyetik parazitlere karşı duyarlılık ve genel sistem kararlılığı gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Fiber optik kabloların, ışık tabanlı iletim ilkesi sayesinde bakır temelli sistemlere ve mobil altyapı sistemlerine kıyasla çok daha hızlı ve daha az kayıplı veri aktarımı sağladığı; bu yönüyle sinyalizasyon sistemlerinde daha güvenilir ve anlık veri aktarımına imkân tanıdığı literatürdeki formüller ve modellemeler eşliğinde gösterilmiştir.

Tüm bu irdelemeler hem güncel literatür taramaları hem de uygulama bazlı teknik belgeler dikkate alınarak yürütülmüş; bilimsel geçerliliği yüksek veriler üzerinden modellemeler gerçekleştirilmiştir. Analitik hesaplamalar ve simülasyonlar, mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan MATLAB ve Microsoft Excel yazılımları üzerinde gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular tablo ve grafiklerle detaylandırılarak yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, bu yöntemsel bütünlük içerisinde geliştirilen analizler, kamera tabanlı olay algılama sistemlerinin otomatik frenleme düzeneği ile entegre edilmesinin, hem insan kaynaklı gecikmeleri ortadan kaldırabileceğini hem de trenlerin olaylara çok daha kısa sürede tepki vererek güvenlik düzeyini artırabileceğini sayısal olarak ortaya koymuştur. Ayrıca, fiber optik altyapı sayesinde sinyalizasyon sistemlerinde yüksek hızlı ve düşük kayıplı veri iletimi mümkün olmuş; bu da demiryolu güvenliğinin hem mekanik sistemlerle hem de güçlü bir iletişim altyapısıyla desteklenebileceğini göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, demiryolu sistemlerinin gelecekteki dijital dönüşüm süreçlerine katkı sağlayacak önemli bulgular sunmaktadır.

2
ULAŞTIRMA AĞLARINDA OLAY ALGILAMA SİSTEMLERİ

Ulaştırma ve bilişim altyapılarında olay algılama (incident detection), sistemde meydana gelen olağan dışı durumların saptanmasını sağlayan hassas bir süreçtir. Bu durumlar; sistem kesintileri, verimlilik düzeyinin beklenen düzeyin altına düşmesi, ağ bağlantılarında yaşanan hatalar ya da olası güvenlik tehditleri gibi çeşitli sorunları içerebilir. Olay algılama süreci, çeşitli sensörler, özel yazılımlar ve gelişmiş veri analizi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sayede sistemdeki olağan dışılılık, gerçek zamanlı ya da gerçeğe çok yakın zaman aralıklarında saptanabilir. Böylece sistem yöneticileri, oluşabilecek aksaklıklara hızlı ve etkili bir şekilde müdahale imkânı bulur. Bu tür otomatik tespit sistemleri, özellikle büyük ölçekli altyapılarda insan eliyle yapılan müdahaleyi azaltarak hizmet sürekliliğini korur ve işletim verimliliğini önemli ölçüde artırır (Sun vd, 2015).

Bu süreç, sensörlerden elde edilen veriler, çeşitli ağ protokolleri aracılığıyla aktarılan iletişim bilgileri, zaman serisi veri analizi, sistem kayıtlarının incelenmesi ve yapay zekâ destekli algoritmaların uygulanmasıyla desteklenerek çok katmanlı bir yapıda yürütülmektedir. Söz konusu teknolojiler, muhtemel olağan dışılıkları daha erken aşamada saptayarak müdahale süresini en aza indirir ve sistemin genel güvenilirliğini artırır (Amin vd, 2009). Bu tür olay algılama sistemleri yalnızca fiziksel ulaştırma altyapılarında, örneğin demiryolu veya karayolu sistemlerinde değil; aynı zamanda bilgi teknolojileri altyapılarında da özellikle sunucular, veri merkezleri ve kurumsal ağlar gibi ortamlarda işletim kararlılığının korunması açısından son derece hassas bir rol üstlenmektedir. Böylece hem fiziksel hem de dijital altyapıların kesintisiz ve güvenli bir şekilde hizmet verebilmesi sağlanmaktadır.

Önceleri geleneksel yöntemlerle komut satırından kullanıcı girişimiyle başlatılan telnet bağlantıları hem zaman açısından verimsizdi hem de kullanıcı kaynaklı hatalara açık bir yapı sergiliyordu. Özellikle çok sayıda sistemle etkileşim

kurulması gereken durumlarda, her bir bağlantının elle başlatılması işletim süreçlerinde ciddi gecikmelere ve hata olasılıklarının artmasına neden olmaktaydı. Bu sorunları ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilen "bash betiği (bir tür komut dosyası)", telnet bağlantılarını otomatikleştirerek süreci hem daha güvenli hem de daha hızlı bir şekilde yönetilebilir hâle getirmiştir. Betik, önceden tanımlanmış komut dizilerini sistematik olarak çalıştırarak işlem sürelerini önemli ölçüde azaltmış, aynı zamanda kullanıcı karar ve eyleme geçme süresini en aza indirerek hata oranını düşürmüştür. Bu otomasyon sayesinde, işletim eylemleri daha tutarlı ve standart hale gelmiş, insan kaynağının daha stratejik ve verimli alanlara yönlendirilmesine imkân tanınmıştır (Cardenas vd, 2008). Geliştirilen bu otomasyon çözümü, sistem yöneticilerine yalnızca olaylara daha hızlı ve etkin şekilde müdahale imkânı sunmakla kalmamış, aynı zamanda sistem kayıtların takibi, donanım ve yazılım kaynaklarının kullanım düzeylerinin analizi ile bağlantı başarımının izlenmesi gibi hassas işletim alanlarında da önemli ölçüde görünürlük sağlamıştır. Bu sayede, sistem üzerindeki genel denetim kapasitesi artmış ve verimliliği aksatabilecek olası darboğazlar ve gecikmeler önceden saptanabilir hale gelmiştir. Dolayısıyla, söz konusu çözüm yalnızca bir otomasyon aracı olarak değil, aynı zamanda olay algılama ve karar ve eyleme geçme süreçlerinin etkinliğini artıran bütünleyici bir bileşen olarak değerlendirilmelidir. Bu yönüyle, altyapının genel güvenilirliğini ve sürekliliğini sağlamada kayda değer katkılar sunmakta, sistemin istikrarını destekleyen yol gösterici ve stratejik bir teknoloji unsuru olarak öne çıkmaktadır (Amin vd, 2009).

Bu bağlamda havayolu, karayolu, denizyolu ve demiryolunda da benzer şekilde olay algılama işlemlerini gerçekleştirmektedir. Ulaştırma sistemleri, farklı türlerde her geçen gün daha fazla karmaşıklık ve yoğunluk kazanırken, bu sistemlerin etkin ve güvenli bir şekilde işlemesi için olay algılama uygulamaları büyük bir önem taşımaktadır. Her bir ulaştırma türü, kendine has altyapı ve işletim gereksinimlerine sahip olduğundan, olay algılama sistemleri de her tür için farklı teknik ve yol gösterici yaklaşımlar gerektirmektedir. Karayolu, denizyolu, havayolu ve demiryolu taşımacılığındaki olay algılama süreçleri, her türün karşılaştığı zorluklara ve teknolojik fırsatlara göre şekillenmektedir.

2.1 Karayolunda Olay Algılama

Karayolu ulaştırma sistemlerinde olay algılama teknolojileri, trafik güvenliğinin artırılması ve ulaştırma altyapısının daha etkin bir şekilde yönetilmesi açısından temel bir rol oynamaktadır. Bu sistemler; radarlar, kapalı devre kamera sistemleri (CCTV), döngü dedektörleri ve gömülü manyetik sensörler gibi çeşitli ileri düzey algılama teknolojilerine dayanmaktadır. Söz konusu teknolojiler, trafik akışını sürekli olarak izleyerek olası olağan dışılıkları, trafik kazalarını veya yolda meydana gelebilecek beklenmedik olayları gerçek zamanlı olarak saptama kapasitesine sahiptir. Bu sayede, olaylara müdahale süresi önemli ölçüde kısaltılmakta, acil durum birimlerinin hızlı ve eşgüdüm bir şekilde harekete geçmesi sağlanmaktadır. Erken müdahale, yalnızca ikincil kazaların önlenmesi açısından değil, aynı zamanda trafik tıkanıklıklarının azaltılması ve yol kullanıcılarının güvenliğinin temin edilmesi bakımından da öneme sahiptir. Dolayısıyla, olay algılama sistemlerinin ulaştırma alt yapısı ile uyumlu hale getirilmesi, karayolu ulaşımının sürdürülebilirliği ve etkinliği açısından stratejik bir zorunluluk olarak görülmektedir.

2.1.1 Karayolunda radar sistemleri

Radar sistemleri, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla çevresel verilerin saptamasını mümkün kılan ve özellikle karayolu ulaşımında araçların hareket değişkenlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan sensör teknolojileridir. Bu sistemler, araçların hızını, yönünü, mesafesini ve varlığını yüksek doğrulukla algılayabilme kapasitesine sahiptir. Özellikle Doppler radarlar, elektromanyetik dalgaların hareketli nesnelerden yansıması sırasında ortaya çıkan frekans değişimlerini irdeleyerek araçların hızını saptar. Bu analiz, Doppler etkisi olarak bilinen fiziksel bir çalışma ilkesine dayanır. Doppler etkisi, hareket hâlindeki bir kaynaktan yayılan dalgaların, gözlemciye göre frekansının değişmesi olgusudur. Araçlar hareket ettikçe, radar sisteminden gönderilen sinyallerin yansımalarında meydana gelen frekans kaymaları, aracın hızıyla doğru orantılı olarak değişir. Bu özellik, Doppler radarlarını özellikle hareketli trafik ortamlarında gerçek zamanlı hız ölçümü açısından son derece işlevsel kılmaktadır. Bu bağlamda, radar tabanlı sistemler, trafik izleme, hız ihlali saptaması ve olay algılama gibi önemli uygulamalarda güvenilir veri sağlayarak karar destek düzeneğinin etkinliğini artırmaktadır (Dandıl & Demir, 2020).

Radar sistemleri, zorlu çevresel koşullarda bile yüksek verimliği gösterebilen ve güvenilir veri sağlayan algılama teknolojileridir. Özellikle görüş mesafesinin azaldığı sis, yağmur veya gece gibi durumlarda radarlar, görüntüleme sistemlerine kıyasla daha istikrarlı sonuçlar üretir. Radarın çalışma ilkesi, sistemin bir elektromanyetik sinyal göndermesi ve bu sinyalin çevredeki nesnelerden yansıdıktan sonra tekrar alıcıya ulaşmasına dayanır. Yansıyan sinyalin özellikleri irdelenerek, nesnenin varlığı, uzaklığı, hareket yönü ve hızı gibi değişkenler hassas biçimde hesaplanır. Bu bilgiler, trafik izleme ve olay algılama sistemleri için temel veri kaynağı olarak kullanılır. Radar teknolojisinin uygulama alanları oldukça geniştir. Tünel girişlerinde park hâlinde kalan veya arıza yapan araçların saptaması, otoyollarda ters yönde seyreden araçların erkenden belirlenmesi ve şehir içi kavşaklarda hız limitini aşan sürücülere yönelik uyarı sistemlerinin devreye alınması, radar sistemlerinin etkin kullanıldığı başlıca örnekler arasındadır. Bu yönüyle radarlar hem trafik güvenliğini artırmakta hem de karar destek sistemlerinin doğruluğunu güçlendirmektedir (Çavdar vd, 2008).

2.1.2 Karayolunda Kamera Sistemleri

Kamera sistemleri, karayolu ulaştırmasında görsel tabanlı veri toplama, olay algılama ve trafik denetimi süreçlerinde merkezi bir rol üstlenmektedir. Bu sistemler, trafik akışının yoğun olduğu kavşaklar, trafik ışıkları, otoyol giriş-çıkışları ve diğer önemli noktalara planlı bir biçimde entegre edilerek sürekli gözlem imkânı sunar. Kameralar aracılığıyla elde edilen görsel veriler, yalnızca olayların saptanmasıyla sınırlı kalmayıp aynı zamanda olayların zamana bağlı olarak izlenebilmesini ve kayıt altına alınmasını da mümkün kılar. Böylece trafik kazaları, kural analatikleri veya olağan dışı davranış biçimleri gibi durumlar hem gerçek zamanlı olarak irdeleyerek hem de geriye dönük incelemeler için belgelenmiş olur. Bu sistemlerin etkinliğini artıran en önemli gelişmelerden biri, video analitik teknolojilerinin entegrasyonudur (Lichtsteiner vd, 2008). (Bu değişmez. Entegrason kelimesi kalmalı.) Gelişmiş görüntü işleme algoritmaları sayesinde, ters yönde ilerleyen araçlar, aniden duran taşıtlar, şerit ihlalleri ya da yayaya öncelik vermeyen sürücüler gibi trafik güvenliğini tehdit eden olağan dışılıklar otomatik olarak algılanabilmektedir. Bu tür durumlarda sistem, ilgili birimlere anlık uyarılar göndererek hızlı müdahale imkânı sağlar. Dolayısıyla

kamera sistemleri, yalnızca pasif izleme araçları değil, aynı zamanda etkin karar destek bileşenleri olarak trafik yönetimi altyapısında önemli bir işlev görmektedir.

2.1.3 Karayolunda Döngü Sistemleri

Döngü dedektörleri, karayolu ulaşımında araçların sayısının, hızının ve trafik yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla yaygın biçimde kullanılan yerleşik algılama sistemlerindendir. Bu dedektörler, yol yüzeyine gömülü şekilde yerleştirilen elektromanyetik alan oluşturan kablo döngülerinden oluşur. Sistem, bu alanın içerisinden geçen bir aracın metal kütlesi nedeniyle elektromanyetik alanda meydana gelen değişimleri saptar. Araç geçtiğinde ya da belirli bir süre döngü üzerinde kaldığında oluşan elektriksel değişim, dedektör devresi tarafından algılanarak yorumlanır. Böylece aracın varlığı, hareket hâlinde olup olmadığı, geçiş süresi ve hızı gibi değişkenler hesaplanabilir. Döngü dedektörleri, sabit noktalarda uzun süreli ölçümler için yüksek doğrulukla veri sağlayabilmeleri nedeniyle özellikle kavşak kontrol sistemlerinde, akıllı trafik ışıklarında ve otoyol yoğunluk analizlerinde sıkça tercih edilmektedir. Bu sistemler, anlık trafik koşullarının izlenmesini ve sinyal zamanlamalarının dinamik olarak ayarlanmasını mümkün kılarak trafik akışının daha verimli yönetilmesine katkı sunar (Sağbaş vd, 2017). Döngü dedektörleri, genellikle trafik ışıklarıyla entegre olarak çalışır ve trafik akışı eniyilemesini yapar. Ayrıca, yoğun trafik durumlarında araçların doğru bir şekilde izlenmesi ve düzenli trafik akışının sağlanması açısından yüksek öneme sahiptir.

2.1.4 Manyetik Sensörler

Manyetik sensörler, karayolu ulaşımında araç algılama amacıyla kullanılan ve taşıtların metalik yapılarından kaynaklanan manyetik alan değişikliklerini ölçmeye dayalı çalışan ileri düzey algılama sistemleridir. Bu sensörler, genellikle yol yüzeyine ya da hemen altına yerleştirilerek çevredeki doğal manyetik alanı referans alır ve bu alanın, araç gibi büyük metal kütlelerin geçişiyle bozulması durumunda sinyal üretir. Böylelikle, bir aracın varlığı, geçiş süresi, hızı ve yönü gibi önemli trafik değişkenleri yüksek doğrulukla saptanabilir. Manyetik sensörlerin döngü dedektörlerine kıyasla sunduğu önemli üstünlükler arasında daha karmaşık yapıya sahip olmaları, yüzeyde daha az alan kaplamaları ve kurulumlarının daha kısa sürede ve düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesi yer alır. Bu özellikler, özellikle kısıtlı fiziksel alanlara sahip kavşaklar veya bakım çalışmalarının en alt düzeyde

tutulması gereken otoyol bölümlerinde, bu sensörleri daha tercih edilebilir kılmaktadır. Manyetik sensörler, trafik hacmi ölçümleri, hız ihlali analizleri ve anlık trafik akışının izlenmesi gibi uygulamalarda etkin biçimde kullanılmakta ve akıllı ulaşım sistemlerine entegre edilerek karar destek süreçlerine katkı sunmaktadır (Pehlivan, 2014).

Algılama sistemlerini çeşitlendirebilir; ancak, burada denizyolu, havayolu ve demiryolunda farklılık gösteren sistemler ele alınacaktır.

2.2 Havayolunda Olay Algılama

Havayolu ulaşımında olay algılama sistemleri, hem uçuş güvenliğini en üst düzeye çıkarmak hem de havalimanı operasyonlarının daha verimli ve kesintisiz bir şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla gelişmiş sensör, radar ve görüntü işleme teknolojileriyle entegre şekilde geliştirilmektedir. Bu sistemler, özellikle pist üzerindeki güvenliğin sağlanması, apron bölgesindeki araç ve uçak trafiğinin anlık olarak izlenerek yönetilmesi ve yabancı cisim tespiti gibi güvenlik açısından son derece yüksek öneme sahip alanlarda etkin rol oynamaktadır. Olası risklerin önceden belirlenerek önlenmesini sağlayan bu sistemler, hem insan kaynaklı hataların azaltılmasına katkı sağlamakta hem de uçuş sürekliliğini destekleyerek hava trafiği yönetiminin etkinliğini artırmaktadır.

2.2.1 Pist Güvenliği ve Olay Algılama

Pist yüzeyinde meydana gelebilecek yabancı cisim kalıntısı (Foreign Object Debris – FOD) zamanında saptayabilmesi, uçuş güvenliğinin sağlanması açısından son derece önemli bir role sahiptir. Özellikle kalkış ve iniş sırasında, bu tür küçük cisimlerin uçak sistemlerine verebileceği zararlar, ciddi kazalara yol açabilecek nitelikte olduğundan, gelişmiş algılama teknolojilerinin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu kapsamda, yüksek çözünürlüklü radar sensörleri ile elektro-optik ve kızılötesi tabanlı görüntüleme sistemleri entegre edilerek, pist üzerinde 3 cm x 3 cm boyutlarında dahi olsa, olası tehlike oluşturabilecek nesnelerin saptamasını mümkün kılınmıştır. Söz konusu sistemler, her 7 saniyede bir 360° tarama yapabilen kapasitesi sayesinde, farklı hava koşullarında dahi kesintisiz ve kapsamlı bir gözetim imkânı sunmaktadır. Böylece, pist üzerinde yer alan risk unsurları anlık

olarak belirlenebilmekte, hava trafik kontrol birimleri tarafından hızlı karar verme ve eyleme geçmesi ile işletim güvenliği düzeyi artırılabilmektedir (Navtech, n.d).

2.2.2 Apron Trafiği Yönetimi

Apron bölgeleri, havaalanı operasyonlarının en yoğun ve koordinasyon gerektiren alanlarından biri olup; uçakların park edilmesi, yolcu indirme ve bindirme işlemleri, yakıt doldurma, kargo yükleme ve boşaltma ile bakım çalışmaları gibi çok sayıda önemli işlemin eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu tür yoğunlukların bulunduğu alanlarda trafik akışının etkin ve güvenli bir şekilde yönetilmesi hem personel ve donanım güvenliği hem de uçuş uygulamalarının zamanında gerçekleştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda geliştirilen yüksek çözünürlüklü radar sistemleri ile, yapay zekâ destekli görüntü işleme ve analiz teknolojileri sayesinde, apron üzerindeki tüm hareketli unsurlar (uçaklar, yer hizmet araçları, personel taşıyıcıları vb.) gerçek zamanlı olarak izlenebilmekte ve anlık durum değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Bu teknolojik altyapı sayesinde, çakışma ihtimali taşıyan hareketlerin önceden saptanarak önlenmesi mümkün hale gelmekte, böylece işletim verimliliği arttırılırken güvenlik riskleri de en aza indirgenmektedir (Navtech, n.d).

2.2.3 Yabancı Cisim Kalıntısı (FOD) Tespiti

Havalimanlarında yer alan pist, taksi yolu ve apron gibi işletim çalışmalarının yoğun şekilde gerçekleştiği alanlarda bulunan yabancı cisim kalınıtıları, uçuş güvenliğini ciddi şekilde tehdit eden unsurlar arasında yer almaktadır. Bu tür cisimler genellikle gevşek metal parçaları, taşlar, bagaj parçaları, bakım donanımları veya kuş gibi doğal engeller olabilir ve uçakların özellikle kalkış ve iniş esnasında motorlarına ya da yapısal bileşenlerine zarar verebilir. FOD kaynaklı olaylar, motor arızalarına, iniş takımı hasarlarına, gövde delinmelerine ve bazı durumlarda can kaybıyla sonuçlanabilecek kazalara dahi neden olabilmektedir. Bu nedenle, FOD saptaması ve yönetimi hem yer hizmetleri ekipleri hem de hava trafik otoriteleri açısından hayati bir sorumluluk alanı olarak kabul edilmekte, havalimanı güvenliğinin sağlanmasında önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Gelişmiş sensör sistemleri, görüntü işleme teknolojileri ve otomatik uyarı düzeneğiyle desteklenen modern FOD algılama çözümleri sayesinde, bu risklerin en aza indirilmesi mümkün hale gelmektedir. FOD saptaması, havacılık

güvenliğinin sağlanmasında önemli bir uygulama olup, başlangıçta büyük ölçüde elle yapılan yöntemlere, yani insan gözetimine dayalı görsel denetimlerle yürütülmekteydi. Bu yaklaşım, normal koşullar altında belirli bir düzeye kadar etkili olabilse de özellikle yoğun yağmur, sis, kar gibi olumsuz hava koşullarında veya gece görüşünün sınırlı olduğu zaman dilimlerinde ciddi kısıtlamalar barındırmaktadır. Ayrıca, insan etkisine bağlı olarak gözden kaçan küçük cisimlerin saptanması zorlaşmakta, bu da sistematik bir güvenlik açığı oluşturmaktadır. Bu zorlukları aşmak amacıyla geliştirilen radar tabanlı algılama sistemleri, hava koşullarından bağımsız olarak daha güvenilir, sürekli ve otomatik FOD saptaması imkânı sunarak, insan eliyle yürütülen denetimlerin yerini almaya başlamıştır. Özellikle milimetre dalga radarları ile sentetik açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar – SAR) teknolojileri, yüksek çözünürlükte yüzey taraması yapabilme yetenekleri sayesinde, pist üzerinde yer alan çok küçük boyutlardaki yabancı cisimleri hassas bir şekilde saptanabilmekte ve bu sayede olası tehlikelere karşı zamanında müdahale edilmesine imkân tanımaktadır (Shan vd, 2025).

Son yıllarda, yapay zekâ (YZ) ve derin öğrenme (DL) temelli yaklaşımlar, havalimanlarında pist güvenliğini tehdit eden FOD saptanmasında önemli bir paradigma değişimine yol açmıştır. Geleneksel görüntü işleme yöntemlerinin sınırlı başarı oranlarını aşmak amacıyla geliştirilen bu teknikler, özellikle karmaşık görsel desenleri tanıma ve düşük kontrastlı nesneleri ayırt etme konusunda üstün verimlilik sergilemektedir. Bu bağlamda, Vision Transformer (ViT) mimarisi gibi son teknoloji derin öğrenme modelleri, pist yüzeylerinden alınan yüksek çözünürlüklü görüntüler üzerinde eğitim alarak, küçük boyutlu ve biçimsel olarak farklılık gösteren FOD'leri yüksek doğrulukla sınıflandırma ve saptama kapasitesine sahiptir. Üstelik, bu tür modellerin dikkat düzeneği sayesinde, yalnızca sınırlı miktarda etiketlenmiş veriyle etkili sonuçlar elde edilebilmekte, bu da veri toplama ve etiketleme sürecindeki maliyetleri ve zaman yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu üstünlük, daha geniş kapsama sahip, ölçeklenebilir ve işletim açısından verimli FOD algılama sistemlerinin geliştirilmesinin önünü açmakta ve havacılık güvenliğini ileri bir düzeye taşımaktadır (Munyer vd. 2022).

2.3 Denizyolunda Olay Algılama

Denizyolu taşımacılığında olay algılama sistemleri, gemi uygulamalarının güvenliğini ve verimliliğini sağlamak amacıyla çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında gemi konum takibi, olası çarpışma senaryolarının önceden belirlenmesi ve önlenmesi, liman ve kıyı güvenliğinin sağlanması ile genel seyir kontrolü gibi önemli işlevler yer almaktadır. Bu tür işlevlerin gerçekleştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan sistemlerin başında Otomatik Tanımlama Sistemi (Automatic Identification System – AIS) gelmektedir. AIS, gemilerin kimlik bilgileri, konumları, hızları, yönleri ve seyir durumları gibi temel verileri sürekli olarak yayınlayarak hem diğer gemilerle hem de kıyı kontrol merkezleriyle gerçek zamanlı bilgi paylaşımına imkân tanır. (MyCarImport, n.d) Bu sistem, deniz trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde olası kaza risklerini azaltmakta, seyir planlamalarını en iyi hale getirmekte ve gerektiğinde olay algılama sistemlerine entegre edilerek anlık müdahalelerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca AIS verileri, büyük veri analizleri ve yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek, olağan dışı davranışların saptanması gibi ileri düzey güvenlik senaryolarında da etkili biçimde kullanılmaktadır.

2.4 Demiryolunda Olay Algılama

Demiryolu ulaşımında olay algılama sistemleri, ulaşım güvenliğini ve işletim sürekliliğini sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu sistemler, özellikle hemzemin geçitlerde güvenliğin sağlanması, ray hattı üzerinde bulunan olası engellerin erken saptanması, trenin belirli bir noktadan geçişinin doğrulanması ve altyapının bakım ihtiyaçlarının belirlenmesi gibi çeşitli uygulama alanlarında önemli roller üstlenmektedir. Gelişmiş sensörler, görüntü işleme teknolojileri, radar sistemleri ve yapay zekâ destekli analiz yazılımları sayesinde, bu tür sistemlerle, anlık durum değerlendirmesi yapılarak tren trafiğinin eniyilemesi sağlanırken, aynı zamanda kaza risklerini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, bu teknolojiler bakım planlamalarının daha doğru ve zamanında yapılmasını sağlayarak, demiryolu altyapısının uzun ömürlü ve güvenli şekilde işletilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.4.1 Ray Hattındaki Olası Engellerin Tespiti: Kameralar ve Sensör Sistemleri

Ray hattında meydana gelebilecek olası engellerin erken saptanma, demiryolu sistemlerinin güvenliği açısından yüksek öneme sahiptir. Bu tür engellerin belirlenmesi, kazaların önlenmesi ve demiryolu ulaşımının kesintisiz bir şekilde sürdürülebilmesi için gereklidir. Günümüzde ray hattı izleme süreçlerinde yaygın olarak başvurulan teknolojiler arasında video kameralar, ultrasonik sensörler ve LIDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri öne çıkmaktadır (Rahman vd, 2022). Özellikle video kamera sistemleri, gerçek zamanlı görüntü işleme algoritmaları aracılığıyla ray hattının sürekli olarak izlenmesini sağlar. Görüntü işleme teknikleri sayesinde, sistem herhangi bir fiziksel engel saptandığında makinistleri uyararak gerekli önlemlerin zamanında alınmasına imkân tanır. Bu sayede hem güvenlik artırılmakta hem de işletim aksaklıklarının önüne geçilmektedir.

2.4.2 Tren Geçişinin Belirlenmesi: GPS ve Ray Sistemleri Teknolojisi

Demiryolu ulaşım sistemlerinde, trenin belirli bir noktadan geçişinin doğru ve zamanında saptanması hem trafik yönetimi hem de genel güvenlik açısından hassas bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen teknolojiler, demiryolu ağının verimli, güvenli ve kesintisiz bir şekilde işletilmesine imkân tanımaktadır. Günümüzde tren konum takibinde en yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında GPS (Global Positioning System) tabanlı sistemler ile ray hattına entegre edilmiş çeşitli sensör teknolojileri yer almaktadır (Tunio & Soomro, 2018). GPS, trenin anlık konumunu yüksek doğrulukla belirleyerek coğrafi izleme yapılmasını sağlarken; ray üzerindeki manyetik alan sensörleri gibi fiziksel sensörler, trenin belirli noktalardan geçiş anlarını kaydeder. Bu çift yönlü izleme düzeneği, sadece trenin geçtiği noktaların saptanmasını değil, aynı zamanda hız ve yön bilgilerinin elde edilmesini de mümkün kılar. Böylece olası çarpışmaların önüne geçilmesi, seferlerin eşgüdüm içinde yönetilmesi ve sinyalizasyon sistemlerinin anlık koşullara bağlı olarak olarak kontrol edilmesi sağlanır (Wang vd, 2018). Bununla birlikte, akıllı sinyalizasyon sistemleri, trenin geçişini anlık olarak algılayıp bu bilgiyi merkezi kontrol birimlerine ileterek karar verme süreçlerini destekler. Tüm bu teknolojik bileşenler, modern demiryolu altyapısının ayrılmaz birer parçası haline gelmiş ve sistemin genel etkinliğini artırmada önemli bir rol üstlenmiştir.

2.4.3 LIDAR Teknolojisi: Engellerin Tespiti ve Alanın Haritalanması

LIDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisi, ışık darbeleri (genellikle lazer) kullanarak çevredeki nesnelerin mesafesini yüksek hassasiyetle ölçen bir uzaktan algılama yöntemidir. Demiryolu sistemlerinde LIDAR hem güvenlik önlemlerinin artırılması hem de bakım çalışmalarının etkinleştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, ray hattı boyunca 360 derece kapsamlı bir tarama gerçekleştirerek; ağaçlar, taş bloklar, yapısal bozulmalar, çöküntüler ve benzeri altyapı tehditleri gibi olası engelleri hassas biçimde algılayabilmektedir. Algılanan bu engellerin konum ve boyut bilgileri işlenerek, ray hattının üç boyutlu (3B) dijital haritaları oluşturulur. Böylece bakım planlaması, güzergâh irdelenmesi ve erken uyarı sistemleri daha güvenilir şekilde yürütülebilir hale gelir.

LIDAR sistemleri, genellikle insansız hava araçları (İHA), helikopterler, sabit kanatlı uçaklar veya doğrudan trenler üzerine entegre edilmiş sensörler aracılığıyla kullanılmaktadır. Bu platformlar üzerinden toplanan LIDAR verileri, dijital yüzey modelleri (DSM) ve yüksek çözünürlüklü detaylı haritalar oluşturmak amacıyla işlenir. Elde edilen bu veriler hem altyapı planlama süreçlerine hem de gerçek zamanlı karar destek sistemlerine entegre edilerek; güvenlik, bakım ve güzergâh optimizasyonu gibi önemli alanlarda etkin kullanım imkânı sağlar (andani, Mohammed, Jain, & Ahmadian, 2018). Ayrıca, LIDAR teknolojisinden elde edilen veriler, makine öğrenmesi ve yapay zekâ tabanlı analiz yöntemleriyle entegre edilerek çevresel unsurların otomatik olarak sınıflandırılmasına imkân tanır (Zhao vd, 2020). Bu sayede yalnızca engellerin türü ve konumu belirlenmekle kalmaz, aynı zamanda bakım ve müdahale gerektiren noktalar önceliklendirilerek daha etkili bir altyapı yönetimi sağlanır.

Demiryolunda LIDAR teknolojisinin öne çıkan üstünlükleri arasında, yüksek doğrulukla veri elde edebilme, gece veya gündüz fark etmeksizin kesintisiz veri toplama kapasitesi, geniş alanların kısa sürede taranabilmesi ve zorlu arazi koşullarında güvenilir ölçüm yapabilme yeteneği bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde LIDAR sistemleri, geleneksel görüntüleme teknolojilerine kıyasla çok daha kapsamlı ve detaylı analiz imkânı sunmaktadır. Sensör teknolojilerinde yaşanan gelişmeler ve artan işlem gücüyle birlikte LIDAR, modern demiryolu altyapılarının önemli bir bileşeni haline gelmiş hem bakım çalışmalarının

eniyilenmesi hem de güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesinde vazgeçilmez bir araç olarak konumlanmıştır.

2.4.4 Kamera ve Görüntü İşleme Teknolojileri: Gerçek Zamanlı Engel Tespiti

Demiryolu hatlarında engel ve olay tespiti, tren seyir güvenliğinin sağlanması ve olası kazaların önlenmesi açısından hayati bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen yüksek çözünürlüklü kamera sistemleri, ray hattını kesintisiz olarak izleyerek çevresel tehdit unsurlarını erken aşamada saptanmasını mümkün kılmaktadır. Görüntü işleme algoritmaları, toplanan görsel verileri irdeleyerek ray üzerindeki nesneleri otomatik biçimde algılamakta ve sınıflandırmaktadır. Özellikle derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, bu süreçte üstün verimliliğiyle dikkat çekmektedir. Nitekim, MobileNetV2 mimarisi kullanılarak geliştirilen bir modelin, ray üzerindeki engellerin saptanmasında %97'ye varan doğruluk oranına ulaştığı raporlanmıştır (Zhao vd, 2020). Bu tür yapay zekâ destekli sistemler, klasik denetim yöntemlerine kıyasla hem hız hem de doğruluk açısından önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Bu sistemler yalnızca tren hattındaki engelleri saptamakla kalmaz, aynı zamanda trenin hızını ve yönünü izleyerek olası riskleri önceden belirleyebilir. Yapay zekâ destekli analizler sayesinde düşük ışık, kötü hava koşulları veya karmaşık görsel çevre gibi zorluklar da etkili bir şekilde yönetilebilmektedir. Nitekim, son yıllarda geliştirilen uçtan uca video analiz sistemleri, tren içi yapay zekâ donanımlarıyla birlikte çalışarak gerçek zamanlı engel algılama ve değerlendirme süreçlerini sahada başarıyla uygulamaktadır (Lanner, n.d).

Bununla birlikte, hemzemin geçitlerde olay algılama amacıyla entegre edilen gelişmiş kamera sistemleri, geçit alanında araç, yaya ya da diğer nesnelerin izinsiz, düzensiz veya tehlikeli bir biçimde bulunmalarını gerçek zamanlı olarak saptayabilmektedir. Bu tür sistemler, geçitlerde yaşanabilecek olası çarpışmaların önlenmesi açısından son derece önemli bir rol oynamaktadır. Derin öğrenme tabanlı video analiz algoritmaları; bariyer ihlali, geçit alanında mahsur kalan araçlar, unutulmuş nesneler ya da olağan dışı hareketlilik gibi durumları anında analiz edebilmekte ve bu analizler doğrultusunda otomatik uyarı düzeneğini devreye sokmaktadır. Böylece hem tren makinistlerine hem de merkezi kontrol sistemlerine olay öncesinde müdahale fırsatı sağlanmakta; bu da hem yol güvenliğini artırmakta hem de sistemin genel işletim verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bu sistemler sayesinde elde edilen veriler, geçit güvenliğinin iyileştirilmesine yönelik ileriye dönük analiz ve eniyileme çalışmalarında da kullanılabilmektedir.

3
DEMİRYOLU OLAY ALGILAMA SİSTEMLERİNİN GENEL MİMARİSİ

Demiryolu güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilen olay algılama sistemleri, çeşitli sensörler, iletişim altyapıları ve kontrol merkezleri arasındaki bütünleşimini içerir. Demiryolu güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilen olay algılama sistemleri; sensörler, veri iletişim altyapıları ve kontrol merkezleri gibi çeşitli bileşenlerin entegre çalışmasına dayanır. Bu sistemler, olayların gerçek zamanlı saptanması, bildirilmesi ve müdahale sürecinin eniyilenmesi için tasarlanmıştır.

3.1 Sensörler ve Veri Toplama Birimleri

Ray hattı boyunca yerleştirilen çeşitli sensörler (örneğin, ultrasonik sensörler, LIDAR, manyetik sensörler), çevresel verileri toplar. Bu sensörler, ray üzerindeki engelleri, titreşimleri ve diğer olağan dışı durumları saptayabilir. LIDAR tabanlı sistemler, yüksek hassasiyetle üç boyutlu haritalama yaparak engelin saptanmasını sağlar (Zhao vd, 2020). Aynı şekilde kamera sensörleri de görüntüyü yakalayarak olağan dışı durumları saptar.

3.2 Veri İşleme ve Olay Algılama

Toplanan veriler, yerel işlem birimlerinde ön işleme tabi tutulduktan sonra analiz edilmekte ve önemli kararlar için gerçek zamanlı veri çıkarımı gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmaları, sahadaki normal işletim akışını öğrenerek bu normlardan sapmaları tespit edebilmekte ve olayları önceden tanımlanmış gruplara sınıflandırabilmektedir. Özellikle gelişmiş evrişimli (konvolüsyonel) sinir ağları (CNN) ile transformer tabanlı derin öğrenme modelleri, karmaşık görsel veriler üzerinde yüksek doğrulukla engel saptanması ve olağan dışılıkları analiz etme konusunda öne çıkmaktadır. Bu algoritmalar sayesinde sistemler, değişken çevre koşullarına uyum sağlayarak sadece durağan engelleri değil, aynı zamanda hareketli nesneleri de ayırt

edebilmekte ve işletim güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır (He vd, 2021). Bu tür sistemler, düşük ışık, kötü hava koşulları veya karmaşık görsel çevre gibi zorluklarla başa çıkabilmektedir. Ayrıca, bu teknolojiler sayesinde, sadece durağan engeller değil, aynı zamanda hareketli nesneler de ayırt edilebilmekte ve böylece demiryolu güvenliği daha etkin bir şekilde sağlanmaktadır.

3.3 İletişim ve Veri Aktarımı

Algılanan olaylara ilişkin veriler, endüstriyel Ethernet ağ anahtarları ve fiber optik kablolar aracılığıyla saha kontrol merkezlerine veya ana kontrol merkezine iletilir. Bu iletişim altyapısı, verilerin güvenli ve hızlı bir şekilde aktarılmasını sağlar. Ayrıca, GPS modülleri sayesinde olayın meydana geldiği noktanın kesin konumu belirlenir ve iletilir. Özellikle, endüstriyel Ethernet ağ anahtarları, zorlu çevre koşullarında bile yüksek güvenilirlik ve yüksek verimlilik sunar. Örneğin, TE Connectivity'nin EN50155 uyumlu endüstriyel Ethernet ağ anahtarları, demiryolu uygulamaları için tasarlanmış olup, yüksek titreşim ve sıcaklık değişimlerine dayanıklıdır. Bu ağ anahtarları, M12 bağlantı noktaları ve Gigabit Ethernet desteği ile hızlı ve güvenli veri iletimini mümkün kılar (Te Connectivity, n.d). Fiber optik kablolar, elektromanyetik girişimlere karşı dayanıklı olup, uzun mesafelerde yüksek hızlı veri iletimi sağlar. Bu özellikleri sayesinde, demiryolu sistemlerinde güvenli ve kesintisiz iletişim altyapısı oluşturulmasına katkıda bulunur (Du vd, 2020). GPS modülleri ise, trenlerin ve olayların konumlarının hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar. Bu sayede, kontrol merkezleri, olaylara hızlı ve etkili bir şekilde karar vererek eyleme geçebilir.

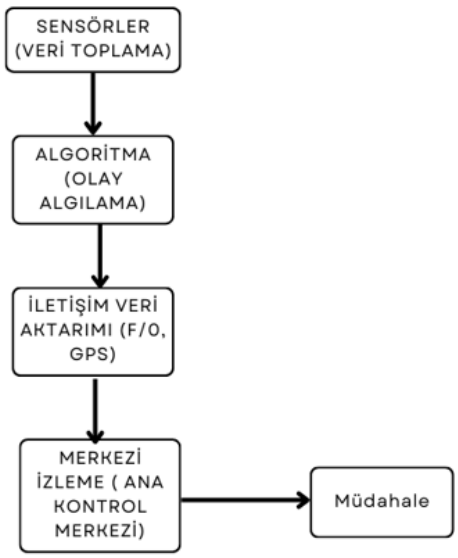
3.4 Merkezi İzleme ve Müdahale

Ana kontrol merkezinde, sahadan gelen veriler entegre bir izleme yazılımı aracılığıyla değerlendirilir. Bu yazılımlar, olayların ciddiyetine göre otomatik uyarılar oluşturarak ilgili ekipleri bilgilendirir. Ayrıca, geçmiş verilerin analizi sayesinde bakım ve güvenlik stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanır. Özellikle akıllı tren kontrol ve izleme sistemleri, tahmine dayalı bakım ve güvenli iletişim özellikleriyle, demiryolu operasyonlarını daha güvenli ve verimli hale getirmekte; gerçek zamanlı veri analizi ve otomatik uyarı düzeneği sayesinde olası arızaların önceden saptanması sağlanarak bakım süreçlerini eniyilemektedir. (Alamsyah,

2025). Diğer taraftan, bakım kontrol odalarında karar verme süreçlerinin modellenmesine yönelik yapılan çalışmalar, otomatik analizlerin demiryolu güvenliği ve sürekliliği açısından yüksek önem taşıdığını ortaya koymaktadır (Wilson & Norris, 2020).

3.5 Sistemin İşleyiş Süreci

Sistemin işleyişi, olayın algılanmasıyla başlar; sensörler veya dedektörler çevresel verileri toplar. (Şekil 3.5.1) Bu veriler, belirli algoritmaların süzgecinden geçerek işlenir. Algoritmaların doğru şekilde tanımlanması ve verilerin bu süzgeçten geçirilmesi oldukça önemlidir. Algoritma, olağanüstü durumlar saptandıktan sonra, olaya dair karar verilir. Karar verildikten sonra, gerekli sinyal iletim hattı üzerinden iletilir. Sinyalin iletimi fiber optik kablolar veya GPS sistemleri aracılığıyla sağlanır. Geçen sinyal, merkezi panolara, izleme odalarına ya da müdahalenin yapılması gereken alana (örneğin araç içi) yönlendirilir. Son olarak, sistem tarafından veya kullanıcı girişimiyle yani elle olaya müdahale edilir.



Şekil 3.1 Olay algılama sistemi genel akışı

4
HEMZEMİN GEÇİT OLAY ALGILAMA SİSTEMİ İÇİN KULLANILAN MATERYALLER VE TANIMLAR

4.1 Hemzemin Geçit Tanımı

Hemzemin geçit karayolu ile demiryolu arasındaki kavşak noktasını ifade eden bir terimdir. Bu geçitlerde, demiryolu hattı yol yüksekliğine (seviyesine) kadar iner ve karayolu ile aynı düzeyde kesişir (MEB, 2013). Hemzemin geçitler, demiryolu ile karayolunun kesiştiği önemli noktalar olarak, ulaşım altyapısının güvenliği ve etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır (Şekil 4.1). Hemzemin geçitlerin tasarımında dikkat edilmesi gereken unsurlar, güvenlik önlemleri (örneğin sinyalizasyon sistemleri, bariyerler ve uyarı levhaları) ve yolun kullanım yoğunluğuna bağlı olarak optimizasyon gerekliliklerdir. Bu geçitlerde, demiryolu hattı, karayolu ile aynı düzleme inerek bir kesişim noktası oluşturur. Bu tür geçitlerin inşa edilmesi, her iki ulaşım sisteminin güvenli bir şekilde entegre edilmesi için oldukça büyük bir öneme sahiptir. İki farklı ulaştırma türünün bir arada kullanılabilmesi, ancak belirli standartlara ve tasarım gerekliliklerine uygun şekilde yapılabilir. Bu bütünleşim süreci, sadece fiziksel bir düzenleme değil, aynı zamanda her iki ulaşım türünün kullanıcıları için güvenli bir yolculuk deneyimi sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir dizi güvenlik önlemini de içerir. Geçitlerin tasarımında temel güvenlik önlemleri arasında mekanik bariyerler, ışıklı ve sesli uyarı sistemleri, yol işaretlemeleri ve yansıtıcı yüzey uygulamaları yer almaktadır. Mekanik bariyerler, araçların demiryolu hattına girmesini engellerken, ışıklı ve sesli uyarı sistemleri sürücüleri yaklaşan trenler hakkında bilgilendirir. Yansıtıcı yüzeyler ve doğru yol işaretlemeleri ise özellikle gece ve kötü hava koşullarında sürücünün yolu daha net bir şekilde görmesini sağlar (UAB, 2021). Hemzemin geçitler, demiryolu ile karayolunun aynı düzeyde kesiştiği noktalar olarak ulaşım güvenliği açısından yüksek öneme sahiptir. Bu geçitler, kontrol sistemleri ve fiziksel özelliklerine göre farklı türlere ayrılmaktadır (UAB, 2021). Kontrol

sistemleri açısından bakıldığında; pasif korumalı ve aktif korumalı olarak 2 çeşittir (UAB, 2021). Fiziksel yapısına göre ise tek hat geçiş ve çift hat geçiş olarak ayırabilir.



Şekil 4.1 Hemzemin geçit (MEB, 2012)

4.1.1 Kontrol Düzeyine Göre Hemzemin Geçitler

Kontrol düzeyine göre hemzemin geçitleri; pasif korumalı hemzemin geçitler ve aktif korumalı hemzemin geçitler olarak ikiye ayrılır. Pasif korumalı hemzemin geçitler; kontrolsüz geçit levhaları, yaklaşım levhaları ve "DUR" trafik işaret levhaları ile işaretlenmiş, mekanik veya otomatik koruma sistemlerinin yer almadığı serbest geçitler olarak tanımlanırken, aktif korumalı hemzemin geçitler daha gelişmiş teknolojik uyarı sistemleriyle donatılmaktadır. Bu kapsamda, bariyersiz fakat flaşörlü ve çanlı uyarı sistemlerinin kullanıldığı geçitler ile flaşörlü-çanlı uyarı sistemlerinin yanı sıra otomatik ya da bekçili bariyer sistemleriyle desteklenen geçitler, aktif korumalı yapı içinde yer almaktadır. Her iki sistem de trafik ve demiryolu kesişim noktalarında güvenliğin sağlanması açısından yüksek öneme sahip olup, kaza risklerini azaltma ve müdahale süresini eniyileme hedefiyle tasarlanmıştır (UAB, 2021).

Bariyerli geçitler, mekanik veya otomatik bariyer sistemleriyle donatılmış olup, araç ve yaya güvenliğini sağlamada en etkili yöntemlerden biridir. Sinyalli geçitler ise trafik ışıkları ve sesli uyarı sistemleriyle desteklenmekte olup, sürücüleri görsel ve işitsel olarak uyarmaktadır (UIC, 2022). Bu sinyaller, geçidin tehlike oluşturabilecek bir durumda bulunduğunu gösterdiği için, sürücüler ve yayalar bu uyarılara dikkat etmelidirler. Bekçili geçitler, demiryolu hattı üzerinde bir personelin sürekli olarak devriye gezdiği ve treni kontrol eden geçitlerdir. Bu personel, treni beklerken araçların güvenli şekilde geçmesini sağlamakla birlikte,

tehlikeli durumlar anında müdahale edebilir. (UAB, 2021). Son olarak, kontrolsüz geçitler, herhangi bir kontrol sistemi veya uyarı olmaksızın, yalnızca yol işaretlemeleriyle kullanıcıları bilgilendiren geçitlerdir. Bu tür geçitler, diğer türlere göre daha yüksek riskler taşır çünkü sürücüler ve yayalar, yaklaşan trenleri zamanında fark etmeyebilirler (European Union Agency for Railways (ERA), 2024). Bu tür geçitlerin her birinin farklı güvenlik önlemleri ve tasarım gereklilikleri vardır, ancak her birinde temel amaç, demiryolu ile karayolunun kesişiminde meydana gelebilecek kazaları en aza indirgemek ve ulaşım güvenliğini sağlamaktır. Hemzemin geçitlerdeki güvenlik önlemleri, sadece fiziksel yapılarla değil, aynı zamanda kullanıcıların eğitimleri ve bilinçlendirilmesiyle de desteklenmelidir.

4.1.2 Fiziksel Yapısına Göre Hemzemin Geçitler

Demiryolu hatları fiziksel yapısına göre ise tek ve çift hat veya çok hatlı olarak sınıflandırılabilir. Tek hatlı geçitler, tek bir demiryolu hattının karayolu ile kesiştiği geçitlerdir. Bu geçitler, genellikle daha basit bir yapıya sahiptir çünkü tek bir demiryolu hattının karayolu ile etkileşimi söz konusu olduğunda, sinyalizasyon ve güvenlik önlemleri daha az karmaşıktır. Tek hatlı geçitlerde güvenlik önlemleri çoğunlukla basit uyarı levhaları ve sinyalizasyon sistemleriyle sağlanır. Bununla birlikte, bu geçitlerde de kullanıcı güvenliği için yeterli önlemler alınmalıdır. Genellikle kırsal alanlarda ve düşük trafik yoğunluğuna sahip bölgelerde tercih edilen sistemlerdir. Bu tür geçitlerde tren geçiş sıklığı görece düşük olduğundan, sinyalizasyon ve otomatik bariyer gibi sistemler sınırlı olabilir. Ancak yine de sürücüler ve yayalar için yüksek dikkat gerektirir (MEB, 2012).

Çok hatlı geçitler ise birden fazla demiryolu hattının karayolu ile kesiştiği geçitlerdir. Bu tür geçitlerde, sinyalizasyon sürelerinin daha uzun tutulması gerekebilir çünkü birden fazla hattın kesişimi, trafiğin daha karmaşık hale gelmesine yol açar. Çok hatlı geçitlerde güvenlik önlemleri daha kapsamlı olmalıdır. Aynı anda birden fazla trenin geçiş yapacağı durumlarda, trafik düzenlemeleri dikkatli bir şekilde yapılmalı ve sinyalizasyon sistemleri verimli bir şekilde çalışmalıdır. Çift ya da çok hatlı geçitlerin tasarımında kullanılan güvenlik önlemleri, genellikle daha karmaşık olup, bu geçitlerin işleyişi daha dikkatli bir planlama gerektirir (UAB, 2022). Çift hat geçitlerde, genellikle güvenlik sistemlerinin daha gelişmiş ve entegre olması gerektiği için, bu geçitlerin

tasarımında modern teknolojiler ve otomatik kontrol sistemleri kullanılır. Bu tür geçitlerin verimli çalışabilmesi için, hemzemin geçitlerin düzenli bakımı ve izlenmesi büyük önem taşır.

4.2 Olay Algılama Kameraları

Demiryolu ulaştırması, dünya genelinde hızlı, güvenli ve verimli bir taşımacılık yöntemi olarak büyük bir öneme sahiptir. Ancak, özellikle hemzemin geçitlerde meydana gelen kazalar, demiryolu güvenliği için ciddi bir tehdit oluşturmakta ve bu tür olaylar, daha geniş bir ulaşım ağı açısından önemli riskler taşımaktadır. Bu noktada, gelişen teknoloji ile birlikte olay algılama kameraları, hemzemin geçitlerdeki güvenliği arttırmak için yenilikçi ve etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel güvenlik kameralarından farklı olarak, olay algılama kameraları yalnızca sahnedeki görsel değişimlere odaklanmakla kalmaz, aynı zamanda yüksek hızda ve düşük gecikme ile veri işleme kapasitesine sahiptir. Bu özellikler, demiryolu sistemlerinin çevresindeki değişimleri hızlı bir şekilde algılamasına, hareketli ortamlarda trenlerin güvenliğini sağlamak adına önemli durumlara zamanında müdahale etmelerini mümkün kılar. Nesne tanıma algoritmalarıyla güçlendirilmiş bu kameralar, hemzemin geçitlerdeki araçları, yayaları, engelleri ve diğer muhtemel tehlikeleri saptayarak, olası kazaların önüne geçilmesine önemli bir katkı sağlar. Hemzemin geçitlerdeki hareketli nesneleri doğru bir şekilde algılayan bu sistemler, trenlerin hızlarına ve çevresel koşullara göre daha akıllıca tepki vermelerine imkân tanır. Bu tür sistemler, sadece demiryolu güvenliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda işletim verimliliğini de eniyiler. Bu teknolojiler, özellikle yoğun demiryolu hatlarında hassas bir rol oynar, çünkü doğru ve hızlı müdahale, kazaların ve aksaklıkların önlenmesinde anahtar bir unsurdur. Sonuç olarak, olay algılama kameraları, demiryolu güvenliğinin geleceğini şekillendirecek önemli bir yenilik olarak, daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir demiryolu taşımacılığı için büyük bir adım teşkil etmektedir.

4.2.1 Olay Algılama Kameraları Çeşitleri

Geleneksel kameralar, sahneyi belirli aralıklarla tam çerçeve olarak yakalayarak her kareyi kaydederken, olay algılama kameraları yalnızca sahnedeki görsel değişiklikleri saptayıp kaydeder. Bu farklı yaklaşım, görüntü işleme sürecinde büyük bir verimlilik sağlar, çünkü her bir değişen öğe, yalnızca ilgili piksel

düzeyinde işlenir. Böylece, gereksiz veri kaydının önüne geçilmiş olur ve bu da veri hacmini önemli ölçüde azaltır. Azalan veri miktarı, daha hızlı veri iletimi ve depolama gereksinimlerini beraberinde getirirken, aynı zamanda daha az işlem gücü ile daha hassas ve doğru analizlerin yapılmasına imkân tanır. Bu sistem, hareketli nesnelerin ve dinamik değişimlerin daha hızlı ve doğru bir şekilde takip edilmesine imkân verir. Ayrıca, olay algılama kameralarının bu özellikleri, özellikle yüksek hızda hareket eden nesnelerin, trenler gibi büyük araçların takibinde büyük öneme sahiptir. Yüksek hızda bile sahnedeki değişimleri kesintisiz ve anlık olarak algılayabilme yeteneği, bu teknolojiyi geleneksel kameralardan çok daha etkili ve güvenilir kılar (Gallego vd, 2022).

Olay algılama sistemlerinde kullanılan kamera teknolojileri, işlevsel özelliklerine ve kullanım senaryolarına göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Bu teknolojiler genel olarak; ısı (termal) kameraları, görüntü işleme algoritmalarıyla desteklenen akıllı kameralar, hareket algılayıcı sensörlerle entegre edilmiş IP tabanlı kameralar ve derin öğrenme teknikleriyle geliştirilen video analiz sistemleri olmak üzere dört ana başlık altında sınıflandırılabilir. Isı kameraları, özellikle gece saatlerinde veya sis, duman gibi düşük görüş koşullarının hâkim olduğu ortamlarda, ısıya duyarlı sensör yapıları sayesinde çevresel nesneleri ve hareketleri etkili bir şekilde saptayabilme kapasitesine sahiptir. Öte yandan, görüntü işleme tabanlı akıllı kamera sistemleri, önceden tanımlanmış davranış örüntülerini irdeleyerek belirli olayları sınıflandırmakta ve muhtemel tehdit veya olağan dışı bir durum saptandığında, önceden yapılandırılmış otomatik karar verme ve eyleme geçme düzeneğini devreye sokarak güvenlik süreçlerini eniyilemektedir.

Isı kameraları, özellikle gece saatlerinde ya da yoğun sis, duman ve yağmur gibi görüş mesafesini ciddi şekilde kısıtlayan çevresel koşullarda, ısıya duyarlı sensör teknolojileri sayesinde yüksek düzeyde algılama yeteneği sunmaktadır. Görsel spektrumun ötesinde, kızılötesi radyasyonu saptayarak çalışan bu kameralar, geleneksel optik kameralara kıyasla ışık miktarından bağımsız olarak görüntüleme gerçekleştirebilme üstünlüğüne sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, düşük ya da sıfıra yakın aydınlatma düzeyine sahip ortamlarda dahi insan, hayvan veya taşıt gibi ısı yayan nesneleri yüksek doğrulukla algılayabilmekte ve bu sayede güvenlik, askeri uygulamalar, afet yönetimi ve endüstriyel denetim gibi birçok alanda hassas bir rol üstlenmektedir. Yüksek hassasiyetle çalışan bu sistemler, güvenlik tehditlerini

erken aşamada belirleyerek olaylara zamanında müdahale edilmesini mümkün kılar (Yoon & Cho, 2022).

Görüntü işleme tabanlı akıllı kamera sistemleri, güvenlik teknolojilerinde önemli bir dönüşümü temsil etmekte olup, önceden tanımlanmış davranış örüntülerini analiz edebilme yetenekleri sayesinde çeşitli olayları otomatik olarak sınıflandırma kapasitesine sahiptir. Bu sistemler, normalden sapma gösteren hareketleri, olağan dışı insan davranışlarını veya şüpheli etkinlikleri saptayarak, gerçek zamanlı karar destek düzeneğinin etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Özellikle nesne tanıma, yüz tanıma, insan sayma, hareket yönü analizi ve hız ölçümü gibi ileri düzey görüntü işleme işlevleriyle donatılmış olan bu kameralar, entegre algoritmalar aracılığıyla sürekli bir veri analizi gerçekleştirmekte ve muhtemel tehdit algılandığında önceden yapılandırılmış otomatik müdahale protokollerini devreye sokmaktadır. Bu sayede, hem olayların erken aşamada saptanması sağlanmakta hem de güvenlik süreçlerinin insan müdahalesine gerek kalmadan daha verimli ve tutarlı bir şekilde yürütülmesi mümkündür. (Dilek & Dener, 2023).

Hareket algılayıcı sensörlerle entegre edilen IP tabanlı kamera sistemleri, fiziksel ortamda meydana gelen hareketleri yüksek hassasiyetle saptayabilmekte ve bu hareketlere bağlı olarak anlık uyarılar üretebilmektedir. Üretilen bu uyarılar doğrultusunda ilgili zaman aralığına ait görüntüler otomatik olarak kaydedilmekte ve belirlenen veri depolama alanlarına aktarılmaktadır. Bu tür sistemler, özellikle geniş alanların—örneğin kampüsler, otoparklar, sanayi tesisleri veya kamuya açık açık alanlar—etkin bir şekilde gözetim altında tutulması gereken durumlarda oldukça işlevsel bir çözüm sunmaktadır. IP (Internet Protocol) altyapısı sayesinde elde edilen video verileri gerçek zamanlı olarak internet üzerinden merkezi sunuculara iletilebilmekte; böylece uzaktan erişim, canlı izleme ve merkezi kontrol imkânları sağlanarak güvenlik uygulamalarının kapsamı ve etkinliği önemli ölçüde artırılmaktadır. Ayrıca bu sistemler, düşük maliyetli dağıtılmış izleme yapıları kurmak için de uygun bir seçenek oluşturmaktadır (Dupuis vd, 2016).

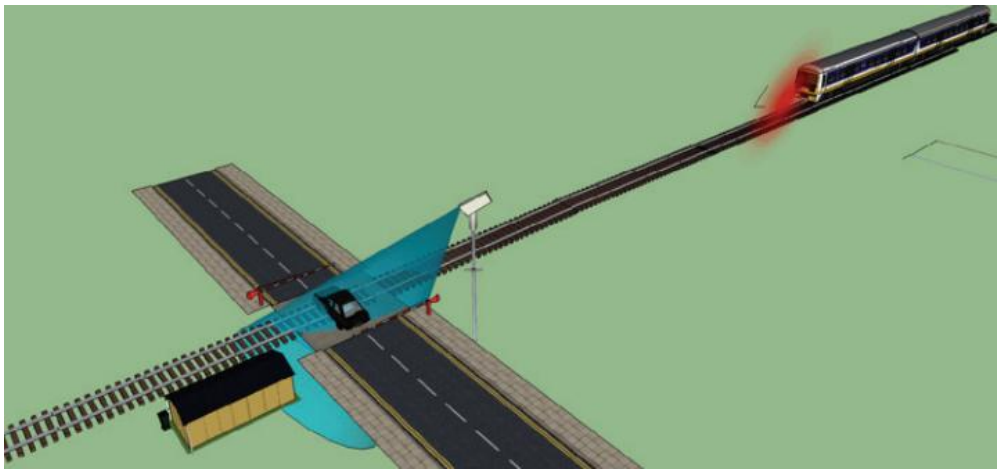
Derin öğrenme teknikleriyle geliştirilen video analiz sistemleri, büyük ve çeşitli veri setleri üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı eğitim süreçleri sayesinde, görsel veriler içerisindeki olayları yüksek doğrulukla tanıma ve sınıflandırma yeteneği kazanmaktadır. Bu sistemler, yalnızca basit hareketleri algılamakla kalmayıp, aynı zamanda görüntüde yer alan nesneleri, bu nesnelerin davranış örüntülerini ve

birbirleriyle olan ilişkilerini analiz ederek daha karmaşık olayları da yorumlayabilmektedir. Örneğin, trafik kazalarının otomatik olarak algılanması, şüpheli kişilerin belirlenmesi, hırsızlık gibi güvenlik ihlallerinin erken aşamada saptayabilmesi veya kalabalık kontrolü gibi karmaşık senaryoların analiz edilmesi bu sistemlerin başlıca uygulama alanları arasında yer almaktadır. Derin öğrenme tabanlı bu çözümler, klasik görüntü işleme yöntemlerine kıyasla çok daha esnek ve güçlü bir yaklaşım sunarak, gerçek zamanlı olay analizi ve erken uyarı sistemleri açısından güvenlik oprarasyonlarının verimliliğini ve etkililiğini önemli ölçüde artırmaktadır (Azfar vd, 2022).

Bu teknolojik sistemler, olay algılama süreçlerinde insan müdahalesini azaltarak güvenliği artırmakta ve ulaşım altyapılarında hızlı, doğru ve etkili karar düzeneği temelini oluşturmaktadır.

4.2.2 Olay Algılama Kameraları İle İlgili Teknolojik Gelişmeler

Gelişen görüntü işleme teknikleri, yapay zekâ algoritmaları ve sensör donanımları sayesinde olay algılama kameraları, geleneksel gözetim sistemlerinden çok daha ileri düzeyde analiz ve tepki yeteneklerine sahip hale gelmiştir. Olay algılama kameraları, geleneksel çerçeve tabanlı görüntüleme sistemlerinin yerine bir seçenek olarak geliştirilen ve sahnedeki değişiklikleri eşzamansız (asekron) bir şekilde kaydeden yenilikçi sensör teknolojileridir (Şekil 4.2). Bu kameralar, her bir pikselin parlaklık değişimini bağımsız olarak izleyerek yalnızca çevredeki değişiklikleri saptar ve kaydeder. Bu çalışma ilkesi sayesinde, sistem sürekli bir çerçeve kaydetme yerine yalnızca sahnede meydana gelen anlık değişimleri algılar. Sonuç olarak, bu sayede çok daha hızlı ve düşük gecikmeli veri elde edilmesi sağlanır. Geleneksel görüntüleme sistemlerine göre daha verimli olan bu yapılar, çevresel unsurlardaki değişimlere anında tepki verebilir ve önemli anlarda hızlı veri iletimi gerçekleştirebilir. Bu özellik, özellikle yüksek hızlı demiryolu ulaşımı gibi hızlı hareket eden sistemlerde, gerçek zamanlı güvenlik önlemlerinin alınmasına imkân tanır. Olay algılama kameralarının bu üstünlüğü, onları modern güvenlik uygulamaları için en elverişli bir çözüm haline getirmektedir (Lichtsteiner vd, 2008).



Şekil 4.2 Olay algılama kamerası (Bildirici, 2016)

Sürücü destek sistemleri, güvenlik kameraları ve daha pek çok alanda bu sensörlerin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir. Özellikle, sürücü destek sistemleri, trafik güvenliğini artırmak ve sürücülerin karar alma süreçlerini iyileştirmek için olay algılama kameralarından faydalanmaktadır. Bu sistemler, yol koşullarındaki ani değişiklikleri, muhtemel tehlikeleri veya engelleri hızlıca saptayarak sürücüyü uyarır ve kazaların önlenmesine yardımcı olur. Aynı zamanda güvenlik kameraları, özellikle otobüs, metro veya tramvay gibi toplu taşıma araçlarında yolcuların güvenliğini sağlamak amacıyla bu sensörleri kullanmaktadır. Olay algılama kameraları, araç içindeki hareketliliği ve dışarıdaki çevresel değişimleri anında izleyerek, güvenlik ihlallerine karşı anında müdahale edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, kamusal alanlarda, ticari binalarda veya park yerlerinde de güvenlik izleme sistemlerinin etkinliğini artırmak için bu sensörler giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu kullanım alanları, olay algılama kameralarının, yalnızca demiryolu taşımacılığı değil, geniş bir yelpazede güvenlik, trafik yönetimi ve acil durum müdahale alanlarında da hayati bir rol oynadığını göstermektedir.

Olay algılama kameralarının önemli üstünlüklerinden biri de düşük güç tüketimi sağlamalarıdır. Bu sensörler, her pikselin bağımsız olarak çalışarak yalnızca sahnedeki parlaklık değişimlerini kaydetmesi ilkesiyle enerji verimliliğini arttırır. Çerçeve tabanlı görüntüleme sistemlerine kıyasla, sürekli olarak tam görüntü kaydeden sistemlere ihtiyaç duyulmaz, böylece daha az enerji harcanır. Bu özellik, özellikle taşınabilir cihazlar ve batarya ile çalışan sistemler için büyük üstünlük sunar. Enerji tasarrufu, batarya ömrünü uzatırken, aynı zamanda cihazın uzun süreli ve güvenilir kullanımını sağlar. Bu tür sensörlerin verimliliği, özellikle mobil

güvenlik kameraları, dronelar, giyilebilir cihazlar ve diğer taşınabilir teknolojilerde büyük bir öneme sahiptir. Posch ve arkadaşları (2011) tarafından geliştirilen ve QVGA çözünürlüğe sahip 143 dB dinamik aralıklı görüntü sensörü, bu alandaki önemli yeniliklerden biridir. Bu sensör, piksel düzeyinde kayıpsız video sıkıştırması ve zaman ekseninde bozulmasız (korozyonsuz) örnekleme özellikleri sunarak, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda görüntü kalitesinden ödün vermeden yüksek verimlilik sergiler. Bu sayede, taşınabilir ve batarya ile çalışan cihazlar, daha uzun süre etkin kalarak, güvenlik ve veri toplama işlemlerinde yüksek verimlilik sağlar (Posch vd, 2011).

Olay algılama kameraları, sahip oldukları yüksek dinamik aralık (HDR) özellikleri sayesinde çok geniş bir ışık spektrumunda üstün işleyiş kapasitesi sergileyebilirler. Geleneksel çerçeve tabanlı kameralara kıyasla, bu kameralar düşük ışık koşullarında veya aşırı parlak ortamlarda dahi kaliteli ve net görüntüler elde etmeyi mümkün kılar. Bu özellik, özellikle zorlu aydınlatma koşullarında, örneğin gece sürüşü sırasında veya doğrudan güneş ışığının kamera lensine yansıdığı durumlarda büyük üstünlük sunar. Olay algılama kameralarının yüksek dinamik aralıkları, sensörlerin sahnedeki en karanlık ve en aydınlık alanları aynı anda net bir şekilde kaydetmesine imkân tanır. Bu sayede, görüntülerdeki detaylar kaybolmaz ve görüntü kalitesi korunur. Brandli ve arkadaşlarının 2014 yılında gerçekleştirdiği bir çalışmada, olay tabanlı sensörlerin yüksek dinamik aralık özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, bu sensörlerin 120 dB'e kadar dinamik aralık sunduğu ve bu özelliğin, sensörlerin geniş bir ışık spektrumunda etkin verimlilik sergilemelerine yardımcı olduğu vurgulanmıştır. Bu dinamik aralık, olay algılama kameralarının hem aşırı aydınlık hem de çok karanlık alanlarda, çevresel ışık koşullarına bağlı olarak görüntü kalitesinden ödün vermeden veri toplamasını sağlar. Bu özellik, güvenlik uygulamalarında, özellikle zorlu çevresel koşullarda etkili ve güvenilir veri elde edilmesini mümkün kılar, bu da olay algılama sistemlerinin her türlü ışık koşulunda etkin bir şekilde çalışmasını sağlar (Brandli vd, 2014).

Olay algılama kameralarının uygulama alanları oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Bu sensörler, özellikle robotik ve otonom sistemlerde önemli bir rol oynamaktadır. Hızlı tepki verme yetenekleri sayesinde, bu kameralar robotların çevresindeki engelleri hızla saptanmasına ve bu engellerden kaçınmalarına imkân

tanır. Ayrıca, hareketli nesneleri takip etme görevlerinde de oldukça başarılıdırlar. Otonom araçlar, bu tür kameralar sayesinde çevresindeki değişken unsurları algılayarak, trafik akışına uygun şekilde hareket edebilir ve güvenli bir şekilde engellerden kaçınabilir. Olay algılama kameraları, gerçek zamanlı verileri hızlı bir şekilde işleyebildikleri için otonom sistemlerin çevrelerine karşı anlık tepkiler vermesini sağlar. Bu kameraların sağladığı yüksek hızda veri işleme, yalnızca robotlar için değil, aynı zamanda endüstriyel otomasyon sistemlerinde de önemli bir üstünlük sağlar. Örneğin, üretim hattındaki robotlar, hareketli parçaları ve engelleri anında algılayarak üretim sürecinde kesintisiz bir akış sağlamak için bu kameraları kullanabilirler. Ayrıca, insansız hava araçları (dronlar) ve insansız kara araçları da olay algılama kameralarından faydalanarak, çevrelerindeki engelleri ve hareketli nesneleri doğru şekilde takip edebilir ve güvenli bir navigasyon sağlarlar. Bu geniş uygulama yelpazesi, olay algılama kameralarının teknoloji dünyasında ne kadar önemli bir bileşen haline geldiğini ve gelecekte daha fazla alanda kullanılacaklarını göstermektedir. (Flanga vd, 2020).

Ayrıca, güvenlik kameraları ve sürücü destek sistemleri gibi alanlarda da olay algılama sensörlerinin kullanımı hızla artmaktadır. Bu sensörler, sadece güvenliği sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel unsurlara hızlı ve doğru bir şekilde tepki verebilirler. Örneğin, hemzemin geçitlerde, araçların, yayaların veya diğer engellerin hızlı bir şekilde algılanması, olası kazaların önlenmesinde önemli bir rol oynar. Olay algılama kameraları, bu tür önemli güvenlik uygulamalarında önemli bir işlev üstlenmektedir. Hemzemin geçitlerde, bu kameralar, trenlerin yaklaşmakta olduğu sırada herhangi bir engel saptadığında, hızlı bir şekilde alarm verebilir ve sürücüyü uyarabilir. Bu sistem, demiryolu ulaşımında güvenliği artırırken, aynı zamanda trenlerin güvenli bir şekilde hareket etmelerini sağlayan bir önlem düzeneği olarak işlev görür. Olay algılama kameralarının bu tür güvenlik uygulamalarındaki başarıları, diğer alanlarda da artan kullanım taleplerine yol açmaktadır. Sürücü destek sistemlerinde, bu kameralar, yol koşullarındaki değişiklikleri veya trafikle ilgili tehlikeleri anında algılayarak sürücüyü bilgilendirebilir ve kazaları engellemeye yardımcı olabilir. Özellikle, yoğun trafikli bölgelerde veya zorlu hava koşullarında, bu sensörlerin sağladığı hızlı tepki ve hassas algılama, sürücülerin güvenliğini büyük ölçüde artırmaktadır.

Bu sensörlerin kullanımı, gelecekteki otonom taşıma sistemlerinde de önemli bir bileşen haline gelecektir, çünkü araçlar çevresel değişimlere anında tepki verebilmek için yüksek doğrulukla çalışan algılama sistemlerine ihtiyaç duyacaktır (Zhu A. vd, 2018).

Sensörlerin en dikkat çekici özelliklerinden biri de düşük gecikme süreleridir. Her pikselin bağımsız olarak eşzamansız çalışması sayesinde, bu kameralar mikro saniye mertebesinde veri sağlama kapasitesine sahiptir. Bu düşük gecikme, sensörlerin çevresel değişimlere hemen tepki vermesini sağlar ve veri iletiminde düşük gecikme ile yüksek hızlı uygulamalarda mükemmel verimlilik kapasitesi sergiler. Gerçek zamanlı sistemlerde, bu özellik önemli üstünlük sağlar çünkü herhangi bir gecikme, tepkilerin yavaşlamasına ve sonuç olarak sistemin verimliliğinin düşmesine neden olabilir. Yüksek hızlı uygulamalarda, özellikle otomatik sürüş, otonom robotlar ve güvenlik sistemlerinde, hızlı veri işleme ve tepki verme gerekliliği çok önemlidir. Olay algılama kameralarının düşük gecikme süresi, bu tür sistemlerin çevreye karşı anında tepki vererek hızlı ve güvenli bir şekilde işlem yapabilmesini sağlar. Örneğin, otonom araçlar veya insansız hava araçları, çevrelerinde meydana gelen değişiklikleri hemen algılayarak hızla tepki verebilirler ve bu da kazaların önlenmesinde veya engellerden kaçınmada büyük rol oynar. Düşük gecikmeli veri iletimi, bu tür uygulamalarda güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda verimli ve etkili bir uygulama alanı sağlar (Lichtsteiner vd, 2008).

Olay algılama kameralarının veri çıktıları, geleneksel görüntü verilerinden farklı bir yapıya sahiptir, bu nedenle bu verilerin işlenmesi için özel algoritmalar gereklidir. Bu kameralar, sahnedeki değişiklikleri ve hareketi eşzamansız bir şekilde kaydettiğinden, geleneksel çerçeve tabanlı görüntüleme sistemleriyle karşılaştırıldığında veri yapısı çok daha yoğun ve farklıdır. Bu nedenle, olay verilerinin doğru ve etkin bir şekilde işlenebilmesi için yeni nesil algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda, derin öğrenme tabanlı teknikler, olay verilerinin işlenmesinde büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Özellikle, derin sinir ağları ve evrişimli sinir ağları (CNN'ler), olay tabanlı verilerin anlamlı bir şekilde analiz etmeye imkân tanır. Bu alandaki önemli gelişmelerden biri, EV-FlowNet gibi modellerin ortaya çıkmasıdır. EV-FlowNet, olay verilerinden optik akış kestirimi yaparak, hareketli nesnelerin izlenmesini mümkün kılar. Bu model, her bir olayın

(pikselin) bağımsız olarak işlenmesini ve hareketin doğru bir şekilde takip edilmesini sağlayarak, yüksek hızda veri işleme yeteneği sunar. Optik akış kestirimi, özellikle sürekli değişkenlik gösteren ortamlarda ve hızlı hareketli nesnelerin takip edilmesinde hassas bir rol oynar. Bu sayede, olay algılama kameraları, geleneksel kameraların zorlandığı durumlarda bile hareketli nesneleri yüksek doğrulukla izleyebilir ve çevresel değişikliklere hızlı tepki verebilir. Derin öğrenme tekniklerinin bu alandaki başarısı, olay algılama kameralarının veri işleme kapasitesini büyük ölçüde artırırken, aynı zamanda güvenlik, otonom sistemler ve diğer hızlı tepki gerektiren uygulamalar için önemli bir adım teşkil etmektedir. Bu tür gelişmeler, olay tabanlı sensörlerin gelecekte daha fazla alanda kullanılmasına ve daha karmaşık görevleri yerine getirmesine imkân tanıyacaktır (Zhu A. vd, 2018).

Olay algılama kameralarının geliştirilmesi ve uygulanması sürecinde, pek çok zorlukla karşılaşılmaktadır. Bu sensörlerin ürettiği veri formatı, geleneksel görüntü verilerinden oldukça farklıdır. Geleneksel kameralar, her bir görüntüde tüm sahneyi çerçeve olarak kaydederken, olay algılama kameraları sadece sahnedeki değişiklikleri kaydeder. Bu, yeni algoritmaların geliştirilmesini ve işleme tekniklerinin uyarlanmasını zorunlu kılar. Geleneksel video işleme yöntemleri, olay tabanlı verilerle uyumsuz olabileceğinden, bu sensörlerin verilerini işleyebilmek için özgün, yenilikçi algoritmalar gereklidir. Bunun yanı sıra, olay verilerinin gürültüye duyarlılığı önemli bir sorundur. Olay algılama sensörleri, özellikle düşük ışık koşullarında veya yüksek hızda hareket eden nesnelerde gürültü üretme eğilimindedir. Bu, verilerin doğruluğunu etkileyebilir ve yanlış algılama veya hatalı veri üretimine yol açabilir. Gürültü filtreleme tekniklerinin geliştirilmesi ve doğru algılama için doğru verilerin seçilmesi önemli bir ihtiyaçtır. Bir diğer teknik sınırlama ise düşük çözünürlük meselesidir. Olay algılama kameraları, genellikle daha düşük çözünürlükle çalışır çünkü her pikselin bağımsız olarak hareketi kaydetmesi gerekir. Bu da özellikle uzak ve küçük nesnelerin algılanmasında zorlanmaya neden olabilir. Ancak çözünürlük arttıkça, veri işleme gücü ve hesaplama ihtiyacı da artar, bu da tasarımda daha karmaşık yapılar gerektirebilir. Yine de daha yüksek çözünürlük elde edebilmek, olay algılama kameralarının verimliliğini ve doğruluğunu artırmak adına önemli bir adımdır. Sonuç olarak, olay algılama kameralarının kapasitesini işlevsel bir biçimde kullanabilmek için, bu

zorlukların üstesinden gelmek adına sürekli olarak yeni algoritmalar geliştirilmesi ve teknik iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu süreç, daha verimli, doğru ve güvenilir sistemlerin tasarımına katkı sağlayacaktır (Orchard vd, 2015).

4.3 Hat Ekipman Ünitesi (LEU)

Hat Ekipman Ünitesi (Lineside Electronic Unit-LEU), hat kenarındaki sinyalizasyon donanımları ile Eurobalise'ler arasında bir arayüz görevi görerek, trenlerin güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır. LEU, Avrupa Tren Kontrol Sistemi'nin (ETCS) önemli bir bileşeni olarak, demiryolu sinyalleri ile trenler arasında hayati ve sürekli veri iletimi sağlayan önemli bir sistemdir. Bu birimler, kilitleme (interlocking) sisteminden aldığı bilgileri dikkatle işler ve bu verileri uygun formatta bilgi paketleri (telegram) olarak Eurobalise'lere ileterek, trenin araç üstü sistemine güvenli ve doğru bir şekilde aktarılmasını temin eder. Bu süreç, trenlerin hız, duraklama ve diğer önemli işletme parametreleriyle en yüksek güvenlik düzeyinde çalışmasını garanti altına alır. LEU'lar, mevcut sabit sinyaller ile ETCS bileşenleri arasında etkili bir köprü oluşturarak, sistemlerin birlikte çalışabilirliğini önemli ölçüde artırır ve böylece demiryolu ağlarının modernizasyonuna katkı sağlar. Bu entegrasyon sayesinde, farklı sinyalizasyon sistemlerine sahip demiryolu hatlarının ETCS standartlarına uyumlu hale getirilmesi mümkün olur. Bu uyum, farklı altyapılara sahip demiryolu ağlarının ortak bir dilde iletişim kurmasını ve daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlar, böylece güvenlik ve verimliği yükseltilir. (EC2., n.d)

LEU'lar hem iç hem de dış ortamlarda kuruluma uygun olacak şekilde tasarlanmıştır ve çeşitli arayüzleri destekleyerek farklı sistemlerle entegrasyon imkânı sunar. Bu özellik, sistemin esnekliğini artırırken, farklı demiryolu altyapılarıyla uyum içinde çalışabilmesini sağlar. Bu sayede, modern demiryolu ağlarında yüksek verimlilik ve güvenlik sağlanır. LEU'ların teknik özellikleri, farklı üreticilere göre çeşitlilik gösterebilir, ancak genellikle dijital ve analog giriş kartları, Ethernet giriş/çıkış kartları ve balise sürücü kartları gibi temel ve önemli bileşenleri içerirler. Bu bileşenler, cihazın işlevlerini yerine getirebilmesi için gerekli olan altyapıyı sağlar. LEU'ların modüler yapısı, her bir bileşenin bağımsız olarak değiştirilmesini veya iyileştirilmesini mümkün kılar. Bu yapı, farklı demiryolu altyapılarına hızlı ve sorunsuz bir şekilde uyum sağlanmasını

kolaylaştırır. Ayrıca, LEU'lar, interlocking sistemleri ve diğer sinyalizasyon cihazlarıyla uyumlu bir şekilde çalışarak, tren kontrol ve sinyalizasyon sistemlerinin etkinliğini önemli ölçüde artırır. Bu uyum, farklı sistemlerin birbirleriyle sorunsuz bir şekilde iletişim kurmasına imkân tanır ve böylece demiryolu ağlarında güvenliği, verimliliği ve genel sistem verimliliğini eniyiler. Sonuç olarak, LEU'lar modern demiryolu sistemlerinin temel yapı taşlarından biri haline gelir, demiryolu işletmelerinin daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde etkinlik göstermelerini sağlar (Relafos vd, 2025).

4.4 Baliz (Balise)

Baliz, araç üstü (onboard) sinyalizasyon donanımına, baliz anteni adı verilen anten aracığıyla veri iletimi sağlayan, bir kasa içinde korunarak hattaki traverslerin üzerine yerleştirilen sinyalizasyon alt sistemidir (Şekil 4.4). Piyasada balizlerin genel adlandırmasında Eurobalise terimi de kullanılmaktadır. Hattın konum bilgisi ve tren kontrolü amacı ile gerekli bilgileri depolayan ve baliz anteni vasıtasıyla trene ileten baliz; pasif baliz ve aktif baliz olmak üzere iki çeşittir. Pasif baliz, içinde sabit bilgilerin bulunduğu baliz tipidir. Bu tip balizlerin içerisindeki veriler sabittir. Pasif balizlerin kablo ile herhangi bir bağlantısı yoktur (Karayanık, 2016). Pasif balizler, herhangi bir harici güç kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilen sistemlerdir. Bu balizler, tamamen tren üstü sistemi tarafından sağlanan telepower sinyali ile aktive edilir. Tren üstü sistemi, baliz antenine bu sinyali göndererek baliz içerisindeki verinin açığa çıkmasını sağlar. Bu sayede, trenin seyri sırasında gerekli sinyalizasyon bilgileri güvenilir ve kesintisiz bir şekilde iletilmiş olur (ERA. (2015a)., 2015). Pasif balizler, sistem içerisinde yalnızca değişmeyen ve sabit bilgileri saklamakla görevli olup, bu bilgilerin güncellenmesi söz konusu değildir.



Şekil 4.3 Baliz (Powered by RailSystem, nd.)

Buna karşın, aktif balizler hem sabit verileri barındırır hem de LEU aracılığıyla diğer sistemlerden aldıkları güncel bilgilerle, mevcut yol koşullarına uygun şekilde kendilerini aktif olarak günceller. Bu bilgi güncelleme süreci, LEU ile aktif baliz arasında gerçekleşen veri alışverişi sayesinde mümkün olur ve bu etkileşim "C Arayüzü" (Interface C) olarak adlandırılır. Böylece, aktif balizler sayesinde yol durumu sürekli olarak izlenir ve sistemin güvenliği ile etkinliği artırılır (ERA. (2015b), 2015). Balizler en az iki en fazla sekiz balizden oluşan baliz grupları olarak montaj edilir (European Union Agency for Railways (ERA), 2016).

Baliz grupları, içerdiği verileri mesajlar veya paketler şeklinde depolayarak sistemin işleyişine katkıda bulunur. Bu depolama yöntemi sayesinde, her bir veri birimi belirli bir anlam ve işlev kazanır. Örneğin, mesaj 3 genellikle “Movement Authority” yani hareket izni bilgisini taşırken, mesaj 132, hat kullanılabilir olmadığı bilgisini içermektedir. Benzer şekilde, paket 15 hemzemin geçit bilgilerini sunarken, paket 27 geçici hız kısaltmasıyla ilgili verileri barındırır. Her bir baliz, 341 bit ve 1023 bitlik veri bölümlerini toplayarak bu bilgileri 16’lı kodlama yöntemiyle saklar. Bu kodlama, verilerin güvenli ve tutarlı bir şekilde depolanmasını sağlayarak, sistem içerisindeki bilgi akışının kesintisiz bir şekilde sürdürülmesine imkân tanır. Böylece, balizler hem sistemin işlevselliğini artırmakta hem de hassas verilerin bütünlüğünü korumaktadır (European Union Agency for Railways (ERA), 2016).

Trenler, balizlerden bilgi alırken, maksimum 500 km/sa hızda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. 0 ile 300 km/sa arasındaki hız aralıklarında ise şebekedeki her türlü baliz tipi kullanılabilir. Bu hız dilimlerinde, sistemin ihtiyaç duyduğu veriler çok çeşitli balizler aracılığıyla aktarılabilir ve her bir baliz, trenin hızlı bir şekilde güzergâh değişimlerine veya diğer güvenlik koşullarına uyum sağlamasını mümkün kılar. Ancak, 300 km/sa ile 500 km/sa arasındaki yüksek hızlarda, yalnızca sistemin

ihtiyaç duyduğu belirli tipte balizler kullanılabilir. Bu hız aralığında, sadece standart tip balizlerin kısa telegrafları tercih edilir. Kısa telegraf sistemi, yüksek hızlarda daha fazla güvenlik sağlar, çünkü bu hızda sinyal iletimi daha kısa ve daha hızlı gerçekleştirilir. Bu düzenleme, veri aktarımında vakit kaybını en aza indirger ve trenlerin seyahat ederken beklenmedik durumlarla karşılaşmamalarını sağlar (Sarıkoç, 2021).

4.5 Baliz Anteni

Demiryolu taşımacılığı, güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek amacıyla sürekli olarak yenilenen teknolojilerle desteklenmektedir. Bu kapsamda, modern demiryolu sistemlerinde sinyalizasyon ve tren kontrolü alanında önemli rol oynayan baliz antenleri, özellikle Avrupa Tren Kontrol Sistemi (European Train Control System-ETCS) gibi ileri teknolojik altyapılarda kullanılmaktadır. Baliz antenleri, tren ile demiryolu üstyapısı arasında kesintisiz veri alışverişini sağlayarak, eylemlerin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesine önemli katkılar sunmaktadır (Binay, 2013).

Baliz antenleri, trenlerin belirli noktalardan geçerken veri alışverişinde bulunmasını mümkün kılan elektromanyetik sistemlerdir. Bu teknoloji, hattaki traverslere yerleştirilen sabit ya da değişken mesaj içeren balizler ile tren altına yerleştirilen alıcı antenlerden meydana gelmektedir (Şekil 4). Sistem, trenin hızı, yönü ve konumu gibi hayati bilgileri merkezi kontrol sistemine aktararak, makinistlere anlık veri sunmakta ve böylece seferlerin güvenli, düzenli ve verimli bir şekilde yönetilmesine imkân tanımaktadır (MEB, 2014). Bu yapı sayesinde, baliz antenleri modern demiryolu sinyalizasyon sistemlerinde temel bir bileşen haline gelmiştir. Demiryolu güvenliği açısından, baliz antenleri sinyalizasyon hatalarını en aza indirgemek ve muhtemel çarpışmaları önlemek amacıyla kullanılan en önemli bileşenlerden biridir. ETCS düzeylerine bağlı olarak, bu antenler trenlerin hızını, yönünü ve hareketlerini sürekli izleyerek, güvenli seyrin sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Sarıkoç, 2021).



Şekil 4.4 Baliz ve baliz anteni (Powered by RailSystem, nd.)

Özellikle yüksek hızlı tren hatlarında, sinyalizasyon sisteminin ayrılmaz bir parçası olarak konumlandırılan baliz antenleri, trenlerin konum ve durum bilgilerini anlık olarak merkezi kontrol sistemine ileterek, acil durumlarda hızlı müdahale imkânı sunmaktadır. Buna ek olarak, el ile işleyen sistemlere kıyasla hata payını en alt düzeye indirgemesi sayesinde, insan kaynaklı kazaların önüne geçilmesinde hayati bir rol oynamakta ve demiryolu taşımacılığının genel güvenlik standartlarını önemli ölçüde yükseltmektedir (Çekerek & Demir, 2021).

Baliz antenlerinin tasarımında, elektromanyetik uyumluluk, güç tüketimi ve sinyal gücü gibi önemli unsurlar dikkate alınmaktadır. Standart ETCS balizleri, 27.095 MHz frekansında çalışarak trenlerin sistemle doğru ve kesintisiz iletişim kurmalarını sağlamak amacıyla eniyilenmiştir (Gökdemir, 2017). Bu antenler, dış ortam koşullarına karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmış ve zorlu hava koşullarında bile yüksek verimlilik göstermektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar, baliz antenlerinin daha yüksek veri aktarım hızlarına sahip olmasını ve demiryolu altyapısına kolayca entegre edilebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, demiryolu taşımacılığının güvenliğini ve verimliliğini daha da artırmaya yönelik önemli adımlar atılmasına imkân tanımaktadır. Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, baliz antenleri de daha akıllı ve verimli bir hale gelmektedir. 5G ve IoT (Nesnelerin İnterneti) teknolojilerinin demiryolu sistemlerine entegrasyonu, trenlerin daha hassas bir şekilde konumlandırılmasını ve veri aktarım hızının artırılmasını mümkün kılacaktır. Bu entegrasyon, baliz antenlerinin veri iletim kapasitesini yükselterek, sinyalizasyon sistemlerinin daha hızlı ve doğru çalışmasını sağlayacak, böylece demiryolu taşımacılığında güvenlik ve verimlilik düzeyini daha da iyileştirecektir (Çekerek & Demir, 2021).

Bunun yanı sıra, yapay zekâ destekli sinyalizasyon sistemleri, baliz antenlerinden alınan verileri işleyerek demiryolu operasyonlarının güvenliğini artıracak ve daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır. Yapay zekâ, trenlerin hızını, yönünü ve konumunu gerçek zamanlı olarak analiz ederek olası riskleri anında belirleyip, hızlı bir şekilde çözüm üretebilecektir. İlerleyen yıllarda, otonom tren teknolojilerinin daha yaygın hale gelmesiyle, baliz antenlerinin veri işleme yetenekleri çok daha gelişmiş bir düzeye ulaşacaktır. Bu yenilik, antenlerin daha fazla veri işlemelerini ve demiryolu altyapısındaki otonom sistemlerle tamamen uyumlu çalışarak, insan müdahalesine ihtiyaç duyulmadan daha güvenli ve verimli bir ulaşım ağı oluşturulmasını sağlayacaktır.

4.6 Baliz İletim Modülü (BTM)

Baliz İletim Modülü (Balise Transmision Module-BTM), modern demiryolu sinyalizasyon sistemlerinde, tren ile hat kenarına yerleştirilen balizler arasında önemli veri iletimini sağlayan ve bu sistemlerin düzgün çalışmasını temin eden önemli bir bileşendir. Şekil 5 BTM, trenin altına yerleştirilen bir anten aracılığıyla, balizlerden gelen sinyalleri alır ve bu verileri trenin kontrol sistemine ileterek, trenin güvenli ve etkili bir şekilde seyahat etmesini sağlar. Bu süreç, trenin konumunun hassas bir şekilde belirlenmesini ve hızının anlık olarak kontrol edilmesini mümkün kılar. Özellikle yüksek hızlı trenlerde, BTM'nin verimliliği ve güvenilirliği, sistemin başarısı için büyük bir öneme sahiptir. Çünkü bu modül, trenin sinyalizasyon verilerini doğru bir şekilde alıp ileterek, hızın ve rotanın güvenli bir şekilde yönetilmesine imkân tanır. Böylece hem güvenlik hem de işletim verimliliği açısından önemli bir rol oynar (Zhao vd, 2010).



Şekil 4.5 Baliz iletim modülü (HollySys, t.y)

BTM'nin yapısal bileşenleri arasında güç kartı, yayın kartı, alıcı kartı, kod çözme kartı, iletişim kartı ve kayıt kartı yer alır. Bu modüler yapı, cihazın farklı demiryolu

altyapılarına kolayca uyum sağlamasını sağlar ve aynı zamanda bakım süreçlerini daha verimli hale getirir. Her bir bileşenin bağımsız olarak değiştirilmesi veya güncellenmesi, sistemin esnekliğini artırır. Özellikle güç kartı, tüm sistemin doğru ve kesintisiz çalışmasını sağlayarak, diğer bileşenlere enerji temin eder. Bu, BTM'nin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için önemli bir unsurdur. Ancak zamanla güç kartlarının verimliliğinde düşüşler yaşanabilir, bu nedenle ömür tahmin modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, güç kartlarının ne zaman bakım veya değiştirilmesi gerektiğini öngörerek, bakım süreçlerinin en iyi hale getirilmesi ve sistemin uzun ömürlü olmasına katkı sağlar. Böylece hem güvenlik hem de maliyet verimliliği açısından önemli faydalar sağlanır. Bu tür önleyici bakım stratejileri, demiryolu sistemlerinin güvenilirliğini ve verimliliğini artırır (Shangguan vd, 2016).

BTM'nin verimliliği, çeşitli çevresel unsurlardan etkilenebilir ve bu unsurlar, iletimde kayıplara neden olabilir. Özellikle balislerin su, kar veya diğer kalıntılarla kaplanması durumunda, sinyal iletiminde ciddi bozulmalar yaşanabilir. Bu tür olumsuz koşullar, BTM'nin verimli çalışmasını engelleyebilir. Bu gibi durumlarla başa çıkabilmek için, BTM'nin elektromanyetik bağlaşım (EMC) özelliklerinin dikkatlice irdeleyerek ve uygun modellemelerin yapılması son derece önemlidir. EMC irdelenmesi, sistemin çevresel etkilerden olumsuz etkilenmesini önleyerek, güvenilirliğini artırır. Örneğin, su altındaki balislerin iletim verimliliğini değerlendirmek amacıyla, S-parametreleri kullanılarak eşdeğer devre modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, balislerin su altındaki davranışlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılır ve iletim kayıplarını en alt düzeye indirgemeye yönelik stratejiler sunar. Bu sayede, balislerin etkili bir şekilde çalışması sağlanırken, sistemin güvenliği ve verimliliği en üst düzeye çıkarılır. Bu tür analizler, BTM'nin çevresel koşullara karşı dayanıklılığını artırır ve sinyalizasyon sistemlerinin daha güvenilir hale gelmesine katkı sağlar (Ye vd, 2024).

BTM'nin değişken özellikleri ve yüksek hızlı demiryolu hatlarına adaptasyonu, modern demiryolu sistemlerinin verimli çalışabilmesi için önemli araştırma alanlarıdır. Yüksek hızlarda, BTM'nin balislerle olan etkileşimi ve veri iletim verimliliği, geleneksel hız düzeylerinden farklı değişiklikler gösterir. Bu nedenle, BTM'nin verimliliğini en iyi hale getirilmesi için detaylı analizler yapılmıştır. Bu bağlamda, çeşitli modelleme ve simülasyon çalışmalarına odaklanılmıştır. Bu

çalışmalar, BTM'nin yüksek hızlardaki davranışlarını doğru bir şekilde tahmin etmeye ve her türlü olumsuz durumu önceden saptamaya yönelik yöntemler sunar. Özellikle, BTM'nin değişken davranışlarının modellenmesi ve simülasyonları, sistemin güvenilirliğini artırmak için yüksek öneme sahiptir. Bu modelleme teknikleri, sistemin farklı hızlarda nasıl verimlilik gösterdiğini değerlendirerek, yüksek hızlı demiryolu uygulamalarında sinyal iletimindeki hataları ve kayıpları en aza indirir. Ayrıca, bu tür çalışmalar, sistemin kararlığını ve verimliliğini artırarak, güvenli ve kesintisiz bir seyir sağlanmasına yardımcı olur. Bu sayede, yüksek hızlı demiryollarında güvenlik ve işletim verimliliği en üst düzeye çıkarılır (Zhao vd, 2010).

4.7 Tren Arayüz Ünitesi (TIU)

Modern demiryolu sistemlerinde, trenlerin güvenli ve verimli bir şekilde işletilmesi için sinyalizasyon ve kontrol sistemlerinin sorunsuz bir şekilde entegrasyonu büyük bir öneme sahiptir. Bu entegrasyonu sağlayan temel bileşenlerden biri, Tren Arayüz Birimi (Train Interface Unit -TIU) olarak bilinen sistemdir. TIU, trenin kontrol ve yönetim sistemleri ile ETCS gibi ileri sinyalizasyon altyapıları arasında kesintisiz iletişimi sağlayarak, trenlerin hız, yön ve durum bilgilerini anlık olarak iletir. Bu sayede hem tren operasyonlarının güvenliği artırılır hem de işletim verimliliği önemli ölçüde iyileştirilir. Ayrıca, TIU'nun sağladığı bu entegrasyon, demiryolu taşımacılığındaki hata oranlarını düşürerek, daha güvenli ve etkin bir ulaşım altyapısı oluşmasına katkıda bulunur (European Union Agency for Railways (ERA), 2016).

TIU, ETCS altyapısının bir parçası olarak, Tren Kontrol ve Yönetim Sistemleri (Train Control and Management System -TCMS) ile ETCS yerleşik donanımı arasında önemli bir bilgi alışverişi sağlayan önemli bir bileşendir. Bu birim, trenin hareket yönü, hızı ve fren durumu gibi önemli verileri sinyalizasyon sistemine aktararak, trenin güvenli, doğru ve zamanında işletilmesini mümkün kılar. Ayrıca, ETCS'den gelen fren komutları gibi talimatları alarak, bu komutları trenin ilgili sistemlerine iletir ve gerekli işlemlerin gerçekleşmesini sağlar. TIU'nun bu işlevi, trenlerin güvenli bir şekilde yönlendirilmesini ve sistemin verimli bir biçimde çalışmasını temin eder. Bu sayede, demiryolu uygulamalarını daha güvenli ve

verimli hale gelir, aynı zamanda sistemin olası hatalara karşı daha dayanıklı olmasını sağlar (EKE Electronics, 2018).

TIU'nun tasarımında, trenin mevcut sistemleriyle tam uyum içinde çalışabilmesi için çeşitli teknik özellikler ve arayüzler bulunmaktadır. Bu birim, özellikle Multifunction Vehicle Bus (MVB) gibi standart veri yolu protokolleri aracılığıyla TCMS ile sorunsuz iletişim kurarak, sistemler arası veri akışını güvenilir bir şekilde yönetir. Bunun yanı sıra, acil durum frenleme (Emergency Brake- EB) ve servis freni (Service Brake- SB) sistemleriyle entegre bir şekilde çalışarak, gerektiğinde güvenli ve kontrollü frenleme işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlar. TIU'nun sahip olduğu gelişmiş güvenli iletişim yetenekleri, tren uygulamalarının güvenlik düzeyini artırarak, sinyalizasyon sistemleri ile tren kontrol düzeneği arasındaki eşgüdümü güçlendirir ve demiryolu taşımacılığında daha güvenli bir çalışma ortamı oluşturulmasına katkıda bulunur (Tan vd, 2012).

TIU, demiryolu güvenliği açısından hayati bir bileşen olup, trenin hızını, yönünü ve fren durumunu sürekli izleyerek bu önemli verileri ETCS'ye iletir. Böylece trenin sinyalizasyon sistemine uygun şekilde hareket etmesi sağlanırken, hatalı yönlendirmeler, sinyal ihlalleri ve çarpışmalar gibi olası kazaların önüne geçilir. TIU, aynı zamanda ETCS'den gelen frenleme komutlarını hızlı ve hassas bir şekilde uygulayarak, özellikle acil durumlarda trenin güvenli bir şekilde durmasını temin eder. Bu gelişmiş kontrol düzeneği, demiryolu uygulamalarının güvenilirliğini artırarak, sistemin otomatik ve hatasız bir şekilde çalışmasına katkıda bulunur (European Union Agency for Railways (ERA), n.d).

Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, TIU'ların daha akıllı, esnek ve uyarlanabilir hale gelmesi beklenmektedir. Özellikle yapay zekâ ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu sayesinde, trenlerin otonom yönetimi daha güvenli ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Bu sayede, trenlerin hareketleri gerçek zamanlı olarak en iyi hale getirilmesi planlanarak enerji verimliliği artırılacak ve işletim süreçleri daha etkin hale getirilecektir. Bunun yanı sıra, kablosuz iletişim teknolojilerindeki ilerlemeler, TIU'ların veri aktarım hızlarını ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırarak, sistemler arasındaki koordinasyonu güçlendirecektir. Tüm bu gelişmeler, demiryolu taşımacılığının daha güvenli, kesintisiz ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine

katkıda bulunarak, gelecekte akıllı ulaşım sistemlerinin temel taşlarından biri haline gelmesini sağlayacaktır (Savronik, nd).

4.8 Tren Araç Üstü Donanımları (ONBOARD)

Demiryolu taşımacılığında kullanılan sinyalizasyon sistemleri, trenlerin güvenli, düzenli ve verimli bir şekilde işletilmesini sağlamak amacıyla son derece önemli bir rol üstlenmektedir. Günümüzde modern sinyalizasyon sistemleri, hem hat kenarında bulunan sabit donanımlardan hem de trenlere entegre edilmiş tren araç üstü (onboard) sistemlerden oluşmaktadır. Araç üstü sinyalizasyon donanımları, trenlerin hızını, yönünü ve anlık konumunu hassas bir şekilde belirleyerek makinistlere sürekli olarak güncellenen gerçek zamanlı bilgiler sunar. Ayrıca, belirli durumlarda otonom kontrol düzeneğini devreye alarak, güvenlik risklerini en aza indirir ve sistemin daha etkin bir şekilde çalışmasına katkı sağlar (European Union Agency for Railways (ERA), 2021).

Araç üstü sinyalizasyon donanımları, trenin hız, yön ve hareket verilerini sürekli olarak toplayarak, bu bilgileri anlık olarak merkezi kontrol sistemlerine ileten gelişmiş algılama, haberleşme ve kontrol teknolojilerini bünyesinde barındırır. Bu sistemler, yalnızca trenin mevcut hızını ve yönünü belirlemekle kalmaz, aynı zamanda güvenli bir şekilde işletilmesini sağlamak için çevresel unsurları da irdeler. Genellikle ETCS gibi uluslararası kabul görmüş standartlar çerçevesinde tasarlanan bu sistemler, güvenlik düzeyini en üst düzeye çıkarmak adına farklı kontrol düzeneğini ve otomasyon teknolojileriyle entegre bir şekilde çalışır. Özellikle, trenlerin hız sınırlarını aşmasını önlemek, ani duruşları veya frenleme gereksinimlerini yönetmek gibi önemli işlevler sunarak işletim güvenliğini arttırır (Siemens Mobility, 2022). ETCS düzeylerine göre araç üstü sinyalizasyon sistemleri farklılık göstermekte olup, her düzey trenlerin işletme süreçlerini daha güvenli ve verimli hale getirmek amacıyla geliştirilmiştir. Aşağıda açıklanan şu düzeyler sinyalizasyon altyapısına olan bağımlılıkları, veri iletim yöntemleri ve sağladıkları kontrol düzeneği açısından belirgin farklar içerir:

ETCS Düzey 1**:** Bu düzey, geleneksel hat kenarı sinyalizasyon sistemlerine yüksek derecede bağımlıdır. Trenler, hareket ettikleri güzergahtaki balizler aracılığıyla sinyal bilgilerini alır ve bu verilere dayanarak hızlarını ve hareket yönlerini belirler. Ancak, sürekli bir veri aktarımı sağlanmadığı için sistem sağlayacıların sinyal

bilgilerini anlık olarak güncellemesi mümkün değildir. Bu durum, sistemin belirli sınırlamalar taşımasına neden olur ve daha çok düşük veya orta yoğunluklu hatlarda kullanımı tercih edilir (EC1., n.d).

ETCS Düzey 2: Bu düzeyde, sinyalizasyon süreçleri daha gelişmiş bir hale getirilmiştir. Trenler, GSM-R (Global System for Mobile Communications-Rail) teknolojisini kullanarak sürekli ve kesintisiz bir iletişim ağına bağlanır. Bu sayede, tren makinistleri ve kontrol merkezleri anlık olarak hız bilgilerini ve rota durumlarını güncelleyebilir. Dinamik hız bilgileri, trenlerin seyahat güvenliğini artırırken, hat kapasitesinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına da imkân tanır (EC1., n.d).

ETCS Düzey 3: En ileri düzey olan ETCS Düzey 3, fiziksel sinyalizasyon cihazlarına bağımlılığı büyük ölçüde azaltarak trenlerin tam konum bilgisini sürekli olarak günceller. Bu sistemde, trenlerin konumu hat boyunca sabit noktalar yerine hareketli bloklar aracılığıyla belirlenir. Böylece, hat kapasitesi en üst düzeye çıkarılarak trenler arasında daha güvenli ve verimli bir trafik akışı sağlanır. Fiziksel altyapının daha az kullanılması, bakım maliyetlerini azaltırken aynı zamanda demiryolu işletmelerine daha esnek bir yönetim imkânı sunar (ALSTOM, 2020).

Araç üstü sinyalizasyon donanımları, trenin güvenli ve etkin bir şekilde işletilmesini sağlamak amacıyla bir dizi önemli bileşenden oluşur. Bu bileşenler, trenin hızını, yönünü ve konumunu belirlemekle kalmaz, aynı zamanda makinistlerin ve merkezi kontrol sistemlerinin anlık verilere dayalı kararlar almasına da yardımcı olur. Modern sinyalizasyon sistemlerinde kullanılan bu bileşenler, entegre bir şekilde çalışarak demiryolu güvenliğini ve işletim verimliliğini arttırır.

Avrupa Hayati Bilgisayarı (Onboard Computer- European Vital Computer, EVC): Trenin hız, yön ve mevcut işletme koşullarını irdeleyerek güvenlik açısından önemli kararları alır. Bu sistem, ETCS düzeylerine uygun olarak trenin izin verilen hız sınırlarını aşmasını önleyebilir, gerektiğinde otomatik frenleme düzeneğini devreye sokabilir ve sürücüye sürekli rehberlik edebilir. EVC, trenin hareket verilerini sürekli olarak işler ve bu bilgileri kontrol merkezine iletir.

Tren Arayüz Birimi (Train Interface Unit, TIU): Sinyalizasyon donanımları ile trenin kontrol sistemleri arasındaki iletişimi sağlayan temel bir bileşendir. Motor,

frenleme ve diğer mekanik bileşenlerle doğrudan etkileşime girerek trenin işletim durumunu günceller. TIU, trenin sürüş dinamiklerini ve fren sistemlerini izleyerek, sinyalizasyon sisteminden gelen komutları fiziksel hareketlere dönüştürür.

Baliz Anteni: Hat kenarı sinyalizasyon sistemleri ile tren arasındaki veri alışverişini gerçekleştiren önemli bir donanımdır. Baliz anteni, raylara yerleştirilmiş balizlerden aldığı bilgileri EVC'ye ileterek trenin konumunu ve sinyal verilerini günceller. Bu sayede, trenin belirlenen hız limitlerine uygun şekilde hareket etmesi ve güvenli bir şekilde yol alması sağlanır.

Küresel Sistem Demiryolu Haberleşmesi (Global System for Mobile Communications-Rail, GSM-R) Modülü: Bu modül, kablosuz iletişim teknolojisini kullanarak trenin kontrol merkezi ile sürekli bağlantıda kalmasını sağlar. Bu sistem, ETCS Düzey 2 ve Düzey 3'te önemli bir rol oynayarak, merkezi kontrol sisteminin trenlere anlık komutlar göndermesine ve gerekli durumlarda müdahalede bulunmasına imkân tanır. GSM-R, sinyalizasyon bilgilerinin kesintisiz iletilmesini sağladığı gibi, acil durum haberleşmelerinin de güvenli ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılar (Bombardier, 2019).

Araç üstü sinyalizasyon sistemleri, demiryolu taşımacılığında güvenliği artırmak amacıyla tasarlanmış gelişmiş teknolojilerden oluşur. Bu sistemler, çarpışma önleme, hız kontrolü, otomatik frenleme ve sinyal ihlallerinin önlenmesi gibi önemli güvenlik işlevlerini yerine getirerek tren operasyonlarının daha güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlar. Geleneksel sinyalizasyon sistemlerinin sınırlamalarını aşarak trenlerin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesine imkân tanır. Özellikle, çarpışma önleme sistemleri, trenlerin birbirine tehlikeli derecede yaklaşmasını engellemek için gelişmiş algılama düzeneğinden faydalanır. Araç üstü sistemler, trenin konumunu ve hızını sürekli olarak izleyerek, önündeki ya da arkasındaki trenlerle güvenli mesafenin korunmasını sağlar. Eğer bir çarpışma riski algılanırsa, sistem otomatik olarak müdahle edebilir ve gerekirse acil frenleme komutunu devreye sokar. Bunun yanı sıra, hız kontrolü düzeneği, trenin belirlenen hız sınırlarına uygun hareket etmesini sağlamak için geliştirilmiştir. Sistem, demiryolu hattının eğimi, kurp yapısı, hava koşulları ve sinyalizasyon verilerini analiz ederek trenin güvenli hız sınırları içinde kalmasını garanti altına alır. Operatör tarafından yapılan hataları en aza indirmek için, aşırı hız saptandığında otomatik frenleme devreye girerek trenin güvenli sınırlar içinde durmasını sağlar. (Hitachi, 2021).

Ayrıca, sinyal ihlallerinin önlenmesi, demiryolu trafiğinin düzenli akışını sağlamak açısından büyük önem taşır. Araç üstü sistemler, hat üzerindeki sinyal bilgilerini anlık olarak işleyerek trenin sinyal ihlali yapmasını engeller. Kırmızı ışıkta geçiş veya yanlış yöne ilerleme gibi hatalar algılandığında, sistem makiniste uyarı gönderir ve gerekirse treni otomatik olarak durdurabilir. Bu özellikler sayesinde, araç üstü sinyalizasyon sistemleri özellikle yüksek hızlı tren hatlarında yaygın bir şekilde kullanılmakta ve güvenliğin en üst düzeye çıkarılmasına katkıda bulunmaktadır. Modern sinyalizasyon sistemlerinin demiryolu hatlarına entegrasyonu, kazaların önlenmesi, trenler arasındaki güvenli takip mesafesinin korunması ve yolcu güvenliğinin artırılması açısından önemli bir rol oynamaktadır.

Teknolojinin sürekli ilerlemesiyle birlikte, araç üstü sinyalizasyon donanımlarında önemli yeniliklerin ortaya çıkması beklenmektedir. Günümüzde kullanılan sistemler, trenlerin güvenliğini sağlamak ve işletim verimliliğini artırmak amacıyla gelişmiş haberleşme ve kontrol düzeneğini içermektedir. Ancak, gelecekte yapay zekâ, 5G haberleşme teknolojileri ve otonom sürüş sistemleri gibi yeniliklerin entegrasyonu, demiryolu taşımacılığını çok daha ileri bir düzeye taşıyacaktır. Özellikle yapay zekâ destekli sistemlerin sinyalizasyon teknolojilerine entegrasyonu, trenlerin daha akıllı hale gelmesini sağlayacak ve otonom tren uygulamalarını mümkün kılacaktır. Günümüzde tren makinistlerinin aldığı kararlar, sinyalizasyon sistemleri tarafından desteklenirken, yapay zekâ algoritmaları sayesinde bu kararların tamamen otonom olarak verilmesi sağlanacaktır. Algoritmalar, hava koşulları, hat yoğunluğu, sinyal verileri ve trenin mekanik durumu gibi çeşitli unsurları irdeleyerek, en güvenli ve verimli hareket planlarını oluşturabilecektir. Ayrıca, makine öğrenimi ile desteklenen bu sistemler, geçmiş tren hareketlerini irdeleyerek gelecekte daha doğru kestirimlerde bulunabilecek ve işletim süreçleri en iyi hale getirilicektir. Bununla birlikte, 5G teknolojisinin demiryolu haberleşme sistemlerine entegre edilmesi, sinyalizasyon sistemlerinde büyük bir dönüşüm yaratacaktır (Thales Group, 2023).

Günümüzde kullanılan GSM-R teknolojisi, veri iletiminde belirli sınırlamalara sahipken, 5G'nin devreye girmesiyle birlikte veri iletim hızları önemli ölçüde artacaktır. 5G'nin sunduğu düşük gecikme süresi ve yüksek bant genişliği sayesinde, tren ile kontrol merkezi arasındaki iletişim daha güvenilir ve hızlı hale gelecektir. Bu da özellikle yüksek hızlı trenlerde anlık veri paylaşımı yapılarak daha

hassas sinyalizasyon kararlarının alınmasına imkân tanıyacaktır. Ayrıca, nesnelerin interneti (IoT) ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerin de sinyalizasyon sistemlerine dahil edilmesi beklenmektedir. IoT sensörleri sayesinde trenin mekanik parçaları, raylardaki olası sorunlar ve çevresel unsurlar anlık olarak izlenebilecek, böylece önleyici bakım süreçleri geliştirilebilecektir. Büyük veri analitiği ile elde edilen bilgiler ise tren güzergahlarının ve zaman çizelgelerinin en iyi hale getirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu bileşenlerin her biri, tren operasyonlarının güvenliğini sağlamak ve hat kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için önemli bir rol oynar. Entegrasyonları sayesinde, trenler daha akıllı ve güvenilir hale gelirken, tren makinistlerinin hata yapma olasılığı da indirilmiş olur.

4.9 Fiber Optik Hat Yapısı

Fiber optik kablolar, veriyi ışık sinyalleri aracılığıyla ileten ileri düzey iletişim altyapı elemanları olarak, günümüzün yüksek hızlı ve güvenilir veri iletim ihtiyaçlarına yanıt veren önemli bir teknolojiyi temsil etmektedir. İnce cam veya özel plastik malzemelerden üretilen bu kablolar, ışığın kırılma ve yansıma ilkesine dayalı olarak veri iletimini mümkün kılmakta ve bu sayede çok yüksek bant genişliği ile düşük gecikmeli haberleşme imkânı sunmaktadır. Elektromanyetik alanlardan etkilenmeyen yapıları sayesinde, özellikle elektromanyetik girişim riski bulunan sanayi bölgelerinde, demiryolu iletişim altyapılarında veya yoğun veri trafiği gerektiren teknolojik uygulamalarda güvenli ve istikrarlı bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, uzun mesafelerde sinyal kaybının en düşük düzeyde olması, fiber optik kabloları geleneksel bakır kablolara kıyasla çok daha verimli kılmakta ve bu da onları internet omurgaları, veri merkezleri, akıllı şehir uygulamaları ve yüksek hızlı ağlar gibi modern iletişim sistemlerinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri haline getirmektedir (Rezgui, 2022).

Bir fiber optik kablo, temel olarak şu üç ana bileşenden oluşmaktadır: çekirdek (core), kılıf (cladding) ve dış kaplama (coating). Fiberin merkezinde yer alan çekirdek, ışık sinyallerinin doğrudan iletildiği bölgedir ve genellikle optik saflığı çok yüksek olan cam ya da bazı özel durumlarda plastik malzemelerden üretilmektedir. Bu yapı, optik sinyallerin en az kayıpla ve maksimum hızda ilerlemesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Çekirdeği çevreleyen kılıf, çekirdekle belirli bir kırılma indisi farkına sahiptir ve bu fark sayesinde ışık

sinyalleri çekirdek içinde tutulur; yani total iç yansıma (total internal reflection) ilkesi ile sinyallerin dağılmadan ilerlemesi sağlanır. En dışta bulunan dış kaplama tabakası ise kablonun fiziksel dayanıklılığını artırmak amacıyla tasarlanmış olup, darbe, nem, kimyasal maddeler ve çevresel aşınmalara karşı koruma sağlar. Bu üç katmanlı yapı, fiber optik kabloların hem optik verimlilik hem de çevresel koşullara karşı dayanıklılık açısından üstün özellikler göstermesini mümkün kılmaktadır (Fenta vd, 2021).

Fiber optik kablolar, ışığın çekirdek içerisinde iletim biçimine göre temelde iki ana sınıfa ayrılmaktadır: tek yönlü (single-mode) ve çok yönlü (multi-mode) fiberler. Tek yönlü fiber optik kablolar, yaklaşık 8–10 mikrometre çapında oldukça dar bir çekirdek yapısına sahiptir ve bu yapı sayesinde yalnızca bir ışık modu iletilmektedir. Bu, sinyalin daha az saçılmasına ve bozulmasına neden olduğundan, özellikle uzun mesafeli ve yüksek hız gerektiren iletişim uygulamaları için son derece uygundur. Genellikle iletişim teknolojileri altyapıları, büyük ölçekli (metropol ölçekli) veri hatları ve omurga ağlarında tercih edilmektedir. Diğer yandan, çok yönlü fiberler yaklaşık 50–62.5 mikrometre çapında daha geniş bir çekirdeğe sahiptir ve birden fazla ışık modunun eşzamanlı olarak iletilmesine imkân tanır. Bu durum, kısa mesafelerde daha yüksek veri iletim hızları sağlayabilse de ışık türlerinin birbirine karışması (modal dispersion) nedeniyle sinyal bütünlüğü uzun mesafelerde bozulabilmektedir. Bu nedenle çok yönlü fiberler daha çok bina içi ağlar, kampüs ağları ve kısa mesafeli veri merkezleri arası bağlantılar gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Curran & Shirk , 2020).

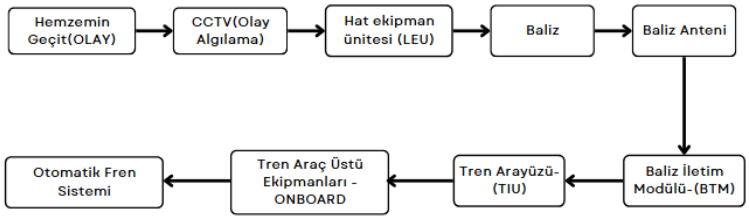
Fiber optik kablolar, geleneksel bakır bazlı iletim hatlarına kıyasla çok sayıda işletim üstünlüğü sunmaktadır. Öncelikle, optik sinyallerle veri iletimi sağladıkları için çok daha yüksek bant genişlikleri ve veri iletim hızları elde edilebilmektedir. Bu durum, özellikle yoğun veri trafiği gerektiren modern iletişim altyapılarında önemli bir üstünlük oluşturmaktadır (Kaushik, Sharma, & Singh, 2014). Ayrıca, fiber optik yapılar ışık dalgalarıyla çalıştığından, sinyal zayıflaması (attenuation) en alt düzeyde gerçekleşir ve bu da uzun mesafelerde dahi sinyal tekrarlayıcılarına (repeater) ihtiyaç duymadan güvenilir veri iletimine imkân tanır. Fiber kablolar, elektromanyetik girişimlere (EMI) ve radyo frekansı parazitlerine karşı tamamen bağışıktır; bu özellik, özellikle endüstriyel alanlar veya yüksek elektromanyetik gürültüye sahip ortamlarda kararlı iletişim sağlar. Ayrıca, hafif ve ince yapıları

sayesinde kurulumları daha az iş gücü ve altyapı gerektirir; bu da uygulama maliyetlerini düşürürken zaman tasarrufu da sağlar. Tüm bu nitelik ve üstünlükler, fiber optik teknolojisini günümüzün yüksek hızlı, güvenilir ve ölçeklenebilir iletişim sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni haline getirmiştir.

5
HEMZEMİN GEÇİT VE TRENE ENTEGRASYON

Demiryolu hatlarında güvenliğin sağlanması, özellikle hemzemin geçitlerde kazaların önlenmesi açısından yüksek öneme sahiptir. Hemzemin geçitler, karayolu ve demiryolu trafiğinin kesiştiği noktalar olması nedeniyle, muhtemel çarpışma riski barındıran hassas alanlardır. Bu nedenle, hemzemin geçitlerde olay algılama sistemleri ile tren üzerindeki frenleme ve uyarı sistemlerinin entegre çalışması büyük önem taşımaktadır. Hat boyu donanımları ile trenin karşılıklı bilgi alışverişi yapabilmesi, olası tehlikeleri önceden algılayarak müdahale süresini en aza indirmeyi mümkün kılar. Bu bölümde, hemzemin geçitlerde kullanılan teknolojilerin tren sistemleriyle entegrasyonu, bu entegrasyonun sağladığı üstünlükler ve uygulama örnekleri ele alınacaktır.

Sistemin öğeleri birbirine bağlanarak entegre bir şekilde çalışır (Şekil 5.1). İlk olarak, hemzemin geçide yaklaşan trenin konum bilgisi, demiryolu hattına yerleştirilmiş balizler aracılığıyla yüksek hassasiyetle belirlenmektedir. ETCS standartları gereği, geçitten yaklaşık 500 metre önce konumlandırılan bu balizler, trenin yaklaşmasını algılar ve LEU adlı sinyal panosundan gelen verileri işleyerek güvenli geçiş sürecini başlatır. Balizler, trene baliz anteni üzerinden anlık bilgi ileterek trenin hareket durumunu ve konumunu günceller. Bu süreçte, BTM devreye girerek baliz ile etkin bir iletişim kurar, trenin konum bilgisini alır ve elde edilen verileri trenin arayüz ünitesine iletir. Son aşamada, tüm bu bilgiler trenin araç üstü sistemine aktarılır. Böylece, sistemin temel bileşenleri arasında sağlanan sürekli veri akışı, trenin hemzemin geçide güvenli bir şekilde ulaşmasını ve kontrol altında ilerlemesini mümkün kılar.

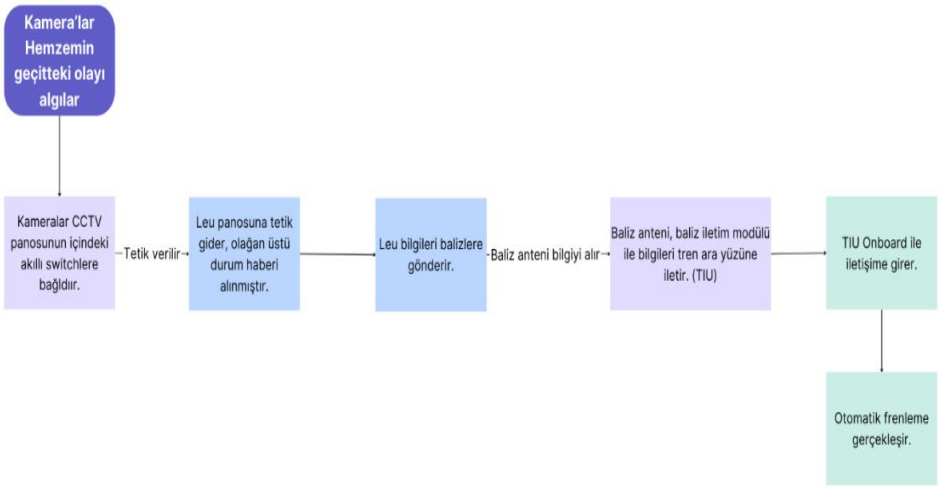


Şekil 5.1 Hemzemin geçit otomatik fren sistemi diagramı

Yukarıda bahsedilen güvenlik sistemine ek olarak, hemzemin geçitte yer alan gelişmiş kamera olay algılama sistemi, geçit üzerindeki tüm hareketleri irdeleyerek olası tehlikeli durumları saptar. Bu sistem;

1. Yayaların dikkatsizce geçitte bulunması,
2. Araçların bariyer ihlali yaparak demiryolu hattına girmesi
3. Beklenmedik engellerin (örneğin bir nesnenin hat üzerinde kalması) oluşması

gibi riskli durumları anlık olarak algılar. CCTV kameralardan gelen yüksek çözünürlüklü görüntüler, hemzemin geçitte bulunan CCTV kamera panosuna iletilerek analiz edilir. Pano üzerinde yer alan akıllı ağ anahtarı, belirlenen bir olay durumunda hızla bir tetikleme sinyali üretir ve ilgili güvenlik düzeneğini harekete geçirir (Şekil 5.2). CCTV kamera panosu ile LEU arasında kurulan güvenli bağlantı sayesinde, üretilen tetik sinyali anında LEU'ya iletilir. LEU, bu önemli güvenlik bilgisini işleyerek balize yönlendirir. Baliz, gelen veriyi trene ileterek araç üstü sistemin durum değerlendirmesi yapmasını sağlar. Trenin araç üstü sistemi, alınan bilgileri anında irdeler ve gerekli görülmesi halinde otomatik fren sistemini devreye sokar. Böylece, trenin zamanında durması sağlanarak hemzemin geçitte oluşabilecek kazaların önüne geçilir. Bu entegre güvenlik düzeneği, trenin hareketiyle eş zamanlı bir şekilde çalışarak hem yaya hem de araç trafiği açısından güvenli bir demiryolu geçişi sunar. Aynı zamanda, bu sistem, insan hatalarını en aza indirerek demiryolu güvenliğini en üst düzeye çıkarmakta ve modern ulaşım ağlarında akıllı teknoloji kullanımının önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.2 Hemzemin geçit otomatik fren sistemi süreç algoritması

Bildirici (2016) tarafından yapılmış olan çalışmada, hemzemin geçitlere yerleştirilen akıllı kameralar ve aydınlatma donanımları sayesinde, geçitteki olağan dışı durumları saptayarak tren makinistlerini ve ilgili kontrol merkezlerini zamanında bilgilendirilmesi amaçlanmıştır (Bildirici, 2016). Burada 3G üzerinden görüntü aktarımına sahip akıllı kameralar tablet bilgisayarlara alarm üretilmesi sağlanmış, böylelikle makinistin olaydan önce bilgi alması amaçlanmıştır. Ayrıca, Cho ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan çalışmada ise gerçek zamanlı uyarılar ve video görüntüleri ile makinistin engelleri fark etmemesi durumunda; tepki vermez ise, acil fren sisteminin devreye girmesi amaçlanmıştır. Sistem, tren ile zemin arasında kablosuz iletişim için 3G veya 4G mobil ağlar kullanmaktadır (Cho vd, 2013). Yapılan çalışmalara karşın, bu tezde sunulan özgün çalışmayla sistemin kendi kablosuz iletişim altyapısını kullanıp engel saptaması yaparak, trenin otomatik fren sisteminin devreye girmesi hedeflenmiştir.

6
DEMİRYOLU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE FİBER OPTİK VE MOBİL AĞLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Günümüzde demiryolu taşımacılığında güvenlik, verimlilik ve kesintisiz iletişim ihtiyacı, haberleşme sistemlerinin gelişimini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, fiber optik altyapılar ile mobil haberleşme ağları, demiryolu sistemlerinde en çok tercih edilen iki temel iletişim teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Her iki sistemin verimliliği; veri iletim hızı, gecikme süresi, bant genişliği, kapsama alanı ve güvenilirlik gibi ölçütler üzerinden değerlendirilebilir. Bu çalışmada, fiber optik ve mobil ağların demiryolu haberleşme uygulamaları özelinde matematiksel olarak karşılaştırılması amaçlanmakta; sayısal analizler ryardımıyla hangi sistemin hangi koşullarda daha üstün olduğu ortaya konulmaktadır. Böylece, demiryolu altyapı planlamasında daha doğru ve teknik temellere dayalı kararların alınması hedeflenmektedir.

6.1 Fiber Optik Kablo Parazit Dayanıklılığı

Elektromanyetik parazit (EMI), özellikle iletken temelli veri iletim sistemlerinde büyük bir sorundur; bu parazitler, sinyal bozulmasına, veri kaybına ve sistem güvenilirliğinde azalmaya neden olabilir. Mobil iletişim ağları ve bakır kablo tabanlı haberleşme sistemleri, çevresel elektromanyetik alanlara karşı duyarlıdır ve bu durum, özellikle sanayi bölgeleri, demiryolu enerji sistemleri veya elektrikli taşıma altyapılarında ciddi sorunlar yaratabilir. Fiber optik kablolar ise bu açıdan belirgin bir üstünlüğe sahiptir. Cam ya da plastik çekirdekten oluşan bu kablolar, elektriksel sinyaller yerine ışık sinyalleri kullandıkları için elektromanyetik parazitlerden etkilenmezler. Bu durum, fiber optik sistemleri yalnızca daha güvenilir değil, aynı zamanda parazit yoğunluğunun yüksek olduğu ortamlarda da kararlı hale getirir (Saleh vd, 2019).

Literatürde yapılan deneysel çalışmalar, fiber optik sistemlerin EMI'ye karşı gösterdiği direnç sayesinde, özellikle demiryolu gibi elektromekanik sistemlerle iç içe olan altyapılarda tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2009).

Ayrıca, bu sistemler topraklama ihtiyacı duymadığından, yüksek gerilim hatları yakınında da güvenli bir şekilde çalışabilmektedirler. Sonuç olarak, elektromanyetik parazite karşı dayanıklılığı sayesinde fiber optik kablolar, mobil sistemlere kıyasla çok daha güvenli, kararlı ve uzun ömürlü haberleşme çözümleri sunmaktadır. Bu özellikleri, onları demiryolu haberleşme altyapılarında vazgeçilmez kılmaktadır. Parazitten etkilenme durumunun bir ölçüsü olarak kullanılan sinyal gürültü oranının (SNR) (birimi, dB) etkisi bağıntı 6.1 ile hesaplanabilmektedir:

$$SNR = 10\ x\ log10\frac{P_Sinyal}{P_Gürültü} \tag{6.1}$$

Bu formülde;

P_sinyal: Sinyal gücü (Watt)

P_gürültü: Gürültü gücüdür (Watt)

SNR'nin yüksek olması, sistemin parazitlere karşı dayanıklı olduğunu ve veri iletim kalitesinin yüksek olduğunu gösterir (Kbashi & Hameed, 2008).

Etkiyi görmek üzere, örnek bir hesaplama aşağı sunulmuştur:

Fiber optik;

P_sinyal = 1 Mw

P_gürültü = 0.000001 mW

$SNR = 10\ x\ log10\frac{1}{0.0000001} = 10\ x\ log10(10^7) = 70db$

Mobil ağ;

P_sinyal = 1 Mw

P_gürültü = 0.001 mW

$SNR = 10\ x\ log10\frac{1}{0.0001} = 10\ x\ log10(10^3) = 30db$

Fiber Optik: Ortalama SNR = 70 dB, Mobil Ağ: Ortalama SNR = 30 dB olarak alınırsa;

Fiber optik altyapının, mobil ağlara göre;

$$10^{\frac{70-30}{10}} = 10^4$$

Yani 10.000 kat daha az parazitten etkilendiği görülür.

6.2 Fiber Optik Kablo Veri İletim Kapasitesi

Bir ağın belirli bir zamanda iletebileceği veri miktarını ifade eder. Bu, demiryolu sinyalizasyonu, video izleme ve kontrol sistemlerinde hayati önem taşır.

Aşağıda yer alan formül Shannon–Hartley teoremi, olarak bilinmektedir. Bu teorem bir iletişim kanalının kapasitesini (C) göstermektedir. Bu formül, kanal kapasitesinin bant genişliği (BW) ve sinyal-gürültü oranına (S/N) bağlı olduğunu gösterir.

$$C = BW \,.\, log_2(\,1 + \frac{S}{N}\,) \tag{6.2}$$

Burada;

C: Kanal kapasitesi (bit/s)

BW: Bant genişliği (Hz)

S: Sinyal gücü (Watt)

N: Gürültü gücü (Watt)

Bu formül de, kanal kapasitesinin (C) bilinmesi durumunda bant genişliğini (BW) hesaplamak için şu şekilde düzenlenebilir.

$$BW = \frac{C}{log_2(\,1 + \frac{S}{N}\,)} \tag{6.3}$$

Yani, bant genişliği, kanal kapasitesine, sinyal gücüne ve gürültü gücüne bağlı olarak hesaplanabilir.

Bir uygulamanın ağ üzerindeki veri iletim hızını hesaplamak için, belirli bir süre içinde gönderilen toplam veri miktarı (byte cinsinden) geçen süreye bölünerek ortalama aktarım hızı elde edilir (Scarpati, 2021).

Buna bağlı olarak;

$$BW = \frac{D}{T} \tag{6.4}$$

BW (Bant Genişliği): Bu, kanalın veri iletim kapasitesidir ve genellikle bit/s (bps) cinsinden ifade edilir.

D (Data Volume (Veri Hacmi)): Bu, iletilmesi gereken toplam veri miktarını belirtir ve genellikle bit ya da byte cinsinden ifade edilir.

T (Time (Zaman)): Bu, veri iletimi için geçen süreyi ifade eder ve genellikle saniye (s) cinsinden ölçülür.

Örnek:

Bir ağda 500 MB veri iletilsin ve bu iletimin 10 saniye sürdüğü dikkate alınsın.

D=500 MB

Bite çevrilirse,

D= 500 x 1024 x 8 bit

T=10 saniye

Bu durumda, bant genişliği

$$BW = \frac{500\ x\ 1024\ x\ 8}{10} = 409.600\ \text{bit/s}$$

olarak hesaplanır ve bu, ağın veri iletim hızını belirler.

6.3 Gecikme Süresi

Fiber optik tabanlı iletişim altyapılarında, sinyal iletim süresi ya da bir diğer ifadeyle gecikme süresi; verinin gönderici noktadan alıcıya ulaşması için geçen toplam süreyi ifade eder. Bu süreyi etkileyen temel unsurlar arasında, sinyalin fiber ortamında yayılma hızı, kablonun fiziksel yapısı ve toplam iletim mesafesi yer alır. Fiber optik kablolar içinde ışık, boşluktaki ışık hızının yaklaşık 2/3 oranında yayılmaktadır. Bu da yaklaşık olarak kilometre başına 5 mikrosaniye bir gecikme anlamına gelir. Bu düzeyde düşük gecikme süresi, fiber optik teknolojisini yüksek verimlilik gerektiren veri iletim uygulamaları açısından son derece üstün bir konuma getirmektedir. Dolayısıyla, zaman duyarlılığı önemli olan ağ sistemlerinde fiber altyapı tercihinin teknik açıdan mantıklı olduğu görülmektedir (Miller, 2012).

Bu gereksinimi karşılamak amacıyla tercih edilen fiber optik altyapılar, elektromanyetik girişimlere karşı dayanıklı yapısı ve yüksek veri taşıma kapasitesi sayesinde düşük gecikmeli iletişim sunar. Fiber içinde yayılan ışık sinyali boşluktaki ışık hızının yaklaşık %66'sı ile iletilir; bu da kilometre başına ortalama 5 mikrosaniyelik bir gecikmeye denk gelir. Böylece yüzlerce kilometrelik iletim mesafelerinde dahi gecikme süresi milisaniye düzeyinde kalabilir. Bu özellik, tren hareketlerinin zamanlaması, geçit kontrolleri ve acil durum sinyallerinin anlık olarak iletilmesi gibi güvenlik odaklı uygulamalarda fiber optik sistemleri ön plana çıkarmaktadır. Sonuç olarak, demiryolu haberleşme sistemlerinin yüksek güvenlik ve süreklilik gereksinimleri doğrultusunda, fiber optik altyapılar gecikme verimliliği açısından ideal bir çözüm sunmaktadır (ETSI, 2020).

İletim gecikmesi aşağıdaki temel formül ile hesaplanabilir:

$$Gecikme\ Süresi\ (Delay) = \frac{Mesafe\ (m)}{Yayılım\ Hızı\ (\frac{m}{s})} \tag{6.5}$$

Bu formülde, mesafe, sinyalin iki nokta arasında kat ettiği fiziksel uzunluğu ifade ederken, yayılım hızı ise sinyalin fiber optik ortamında ilerleme hızını temsil etmektedir. Fiber optik kablolarda yayılım hızı, ışık hızının yaklaşık %66'sıdır; bu da yaklaşık 2×10m/s olarak kabul edilmektedir (Saleh & Teich, 2019).

Örnek bir hesaplama yapılacak olursa;

Bir sinyalin 100 km'lik (100.000 metre) bir fiber optik hat üzerinde iletildiğini varsayılsın:

$$Gecikme = \frac{100000}{2\ x\ 10^8} = 0{,}005s = 0{,}5\ ms$$

Bu hesaplamaya göre, fiber optik üzerinden iletilen sinyalin 100 km mesafeyi kat etmesi yalnızca 0,5 milisaniye sürmektedir. Bu değer, mobil iletişim gibi elektromanyetik etkilere açık sistemlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük bir gecikme süresi anlamına gelir.

Sonuç olarak, fiber optik altyapılar, düşük gecikme ihtiyacı olan uygulamalar için önemli bir üstünlük sunmakta; bu da özellikle raylı sistemlerde, endüstriyel kontrol sistemlerinde ve yüksek hızlı veri iletiminin gerekli olduğu ağ haritalarında tercih edilmelerinin temel nedenidir.

6.4 Bağlantı Güvenliği

Demiryolu haberleşme sistemlerinde bağlantı güvenilirliği hem yolcu güvenliği hem de işletim sürekliliği açısından önemli bir unsurdur. Fiber optik sistemler, elektromanyetik parazitlere karşı yüksek direnç göstermeleri ve düşük gecikme süreleri sunmaları sayesinde bu alanda tercih edilen iletişim altyapıları arasında yer alır. Özellikle sinyalizasyon ve geçit kontrol sistemleri gibi zaman hassasiyeti yüksek uygulamalarda, iletim süresinin en alt düzeyde olması gereklidir. (Ghazali, Mohamad, Nasir , & Hamzh, 2024)

Erişilebilirlik (availability) kavramı, bir sistemin belirli bir zaman aralığında çalışır ve hizmet verebilir durumunda olma olasılığıdır. Erişilebilirlik, sistemlerin güvenilirliğini nicel olarak değerlendirmede kullanılır. Erişilebilirlik değeri olasılık tanımıyla uyumlu bir oran olduğu için 0-1 aralığında değer alır. Bu değer sayesinde hattın yıllık toplam kesinti süresini aşağıdaki şekilde hesaplamak mümkündür (IDT, n.d).

$$T_k = (1- E).\ 365.\ 24\ (sa) \tag{6.6}$$

T_k: Yıllık kesinti süresi (sa)

E: Erişilebilirlik

Örnek 1:

Bir fiber sistemin erişilebilirliği ortalama %99,999 civarında olup çok yüksektir. Bu durumda yıllık kesinti süresi,

$T_k = (1- E)$. 365.24 = (1- 0,99999). 365.24 = 0,0876 sa/yıl = 5,26 dak/yıl olarak hesaplanır.

Örnek 2:

Bir mobil sistemin erişilebilirlik değeri ise ortalama %99,0 düzeyinde kabul edilirse,

$T_k = (1- E)$. 365. 24 = (1- 0,99). 365. 24=87,6 sa/yıl = 5256 dakika/yıl = 3,65 gün/yıl olarak hesaplanır.

Kıyaslama yapıldığında doğal olarak 1000 katı fark olduğu görülmektedir.

6.5 Ortam Koşulllarına Dayanıklılık

Demiryolu haberleşme sistemlerinde kullanılan iletim teknolojilerinin ortam koşullarına karşı dayanıklılığı, sistemin bütünsel güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Mobil ağlar, özellikle tünel, dağlık bölgeler ve kırsal alanlar gibi zorlu coğrafi koşullarda sinyal kayıplarına ve bağlantı kopmalarına neden olabilmektedir (Mahmud vd, 2020).

Mobil iletişim sistemleri, özellikle baz istasyonlarının yetersiz olduğu ve fiziksel engellerin yoğun bulunduğu bölgelerde verimlilik kaybına uğramaktadır. Radyo dalgalarının binalar, tüneller veya dağlık alanlar gibi yapılar tarafından soğurulması, sinyal kalitesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna karşın, fiber optik iletim sistemleri fiziksel çevre koşullarından büyük oranda bağımsız olarak çalışabilir; elektromanyetik girişimlere karşı doğal bir direnç sergiler ve sinyali kapalı ya da zorlu ortamlarda dahi yüksek güvenilirlikle iletebilir. Özellikle yeraltı tünelleri gibi sinyalin dış ortamdan alınamadığı bölgelerde, fiber altyapı sayesinde haberleşme kesintisiz şekilde sağlanabilir. Bu da fiber optik sistemleri, demiryolu uygulamalarında uzun mesafeli ve zorlu çevresel koşullar altında tercih edilen bir çözüm haline getirmektedir.

Ortam koşulları ile Theodore S. Rappaport'un Wireless Communications: Principles and Practice adlı eserinde detaylı olarak ele alınmıştır (Goldsmith, 2019).

İletim sırasında sinyaldeki azalmanın bir ölçüsü olarak yol kaybı ifadesi (serbest uzay yol kaybı olarak da bilinir), Radyo frekansı (RF) veya kablosuz iletişim sistemlerinde, bir sinyalin boşlukta (engel, yansıma, saçılma olmadan) yayılırken ne kadar zayıflayacağını (kaybedeceğini) hesaplamak için kullanılır. Aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$PL(dB) = 20log10(f) + 20log10(d) + 32.44 \quad (6.7)$$

PL (dB): Yol kaybı (desibel)

f: Frekans (MHz)

d: Verici ile alıcı arasındaki mesafe (kilometre)

Örnek;

1800 MHz frekansında, 2 km mesafede bir mobil sinyal için yol kaybı hesaplanacaktır.

$$PL = 20log_{10}(1800) + 20log_{10}(2) + 32.44$$
$$\approx (20 \text{ x } 3.255) + (20 \text{ x } 0.3010) + 32.44$$
$$\approx 65.1 + 6.02 + 32.44$$
$$\approx 103.56 \text{ dB}$$

Bu hesaplama, sinyalin yaklaşık 103.56 dB'lik bir zayıflamaya uğradığını gösterir. Bu düzeyde bir kayıp, özellikle zayıf sinyal alanlarında iletişim kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir.

6.6 Uygulama Uygunluğu

Demiryolu haberleşme altyapısında kullanılacak teknolojilerin seçiminde, yalnızca teknik verimlilik değil, aynı zamanda uygulama uygunluğu da önemli bir değerlendirme kriteridir. Her teknolojik çözüm, belirli bir işletme senaryosuna ve çevresel koşullara göre farklı üstünlükler veya kısıtlamalar sunar. Özellikle uzun mesafeli, yüksek güvenilirlik gerektiren ve çevresel koşullardan etkilenmeyen iletim ihtiyaçlarında, fiber optik sistemler, mobil ağlara kıyasla daha uygun bir

seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, kullanılacak haberleşme altyapısının mevcut demiryolu altyapısına entegrasyonu, bakım kolaylığı, maliyet etkinliği ve hizmet sürekliliği gibi unsurlar de göz önünde bulundurularak uygulama bazlı değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir.

Bu bağlamda, fiber optik iletimli otomatik tren kontrol sisteminin mobil ağa göre daha üstün olduğu söylenebilir (Tablo 6.1) Nitekim fiber tüm ölçütleri karşılamaktadır.

Tablo 6.1 Fiber optik ve mobil ağ karşılaştırma tablosu

Ölçüt Adı	Ölçüt	Fiber Optik	Mobil Ağ
Gecikme (ms)	<5	1 (uygun)	20 (uygunsuz)
Bant Genişliği (Mbps)	≥500	500 (uygun)	100 (uygunsuz)
SNR (dB)	≥40	40 (uygun)	30 (uygunsuz)

7
OTOMATİK FRENLEME SİSTEMİNE SAHİP TRENİN DURUŞ HAREKETİNİN MODELLENMESİ

Demiryolu taşımacılığı, yüksek taşıma kapasitesi, düşük enerji tüketimi ve çevre dostu yapısıyla modern ulaştırma sistemleri arasında önemli bir yer edinmiştir. Ancak trenin güvenli bir şekilde durabilmesi, özellikle acil durumlar ve ani engeller karşısında, sistemin en hassas güvenlik ölçütlerinden biridir. Otomatik frenleme sistemleri, bu ihtiyaca yönelik olarak geliştirilen ve sürücü müdahalesine ihtiyaç duymadan devreye girerek frenleme işlemini başlatan teknolojilerdir. Bu sistemler sayesinde durma kararı otomasyon üzerinden alınmakta ve insan kaynaklı gecikmeler en aza indirilmektedir. Ancak trenin tam olarak hangi mesafede durabileceği sorusu, yalnızca fren sisteminin mekanik ve elektronik verimliliğine değil; trenin kütlesi, ilk hızı, eğim durumu, ray-yüzey sürtünme katsayısı, çevresel koşullar (yağmur, buzlanma, sıcaklık) ve hatta ray bölgesindeki hava yoğunluğu gibi çeşitli fiziksel bileşenlere de bağlıdır. Ayrıca, otomatik fren sisteminin tetiklenme anı ile tepki süresi arasındaki zaman farkı da durma mesafesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu bağlamda, otomatik frenleme sistemine sahip bir trenin durma mesafesini etkileyen insan ve çevre unsurlarının matematiksel modellerle ifade edilmesi, hem olay sonrası analizlerin daha gerçekçi yapılmasını hem de farklı senaryolar altında risk değerlendirmesinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesini mümkün kılar. Bu çalışmada, söz konusu bileşenler temel alınarak trenin durma mesafesinin matematiksel olarak modellenmesi amaçlanmakta ve bu modelleme doğrultusunda sistem davranışı sayısal olarak incelenmektedir.

7.1 Temel Durma Mesafesi Hesabı

Kinetik enerji (E_k), hareket halindeki bir cismin sahip olduğu enerjidir ve klasik mekanikte cismin kütlesi ile hızının karesinin bir işlevidir. Matematiksel olarak, kinetik enerji şu formülle ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{7.1}$$

Burada m cismin kütlesi (kg), v ise cismin hızıdır (m/s). Kinetik enerji, bir cismin durdurulması ya da yavaşlatılması sürecinde, bu enerjinin başka bir enerji formuna (örneğin ısı veya deformasyon enerjisi) dönüşmesiyle yok edilir. Özellikle yüksek kütleli ve hızlı araçlar, örneğin trenler, önemli miktarda kinetik enerjiye sahiptir. Bu nedenle, trenin tamamen durdurulabilmesi için bu enerjinin tamamının bir fren sistemi aracılığıyla emilmesi gerekir. Bu fiziksel ilke, trenin durma mesafesinin hesaplanması için temeldir. Fren sistemlerinin tasarımında önemli bir ölçüt olarak kabul edilir (Serway vd, 2013).

Bir trenin hareket hâlindeyken sahip olduğu enerji, durdurulması gereken fiziksel büyüklüğün temelini oluşturur. Bu enerji, trenin kinetik enerjisidir ve frenleme işlemi sırasında bu enerji, fren sistemleri aracılığıyla mekanik iş yapılarak sönümlenir. Frenleme esnasında uygulanan kuvvet (F), trenin bu kinetik enerjisini azaltmak üzere mekanik iş üretir. Bu iş (W), frenleme mesafesi (d) boyunca uygulanan kuvvetin (F) etkisini yansıtır (denklem 7.2). Yani, yapılan iş uygulanan kuvvet ve kat edilen yolun bir işlevidir.

$$W = F \,.\, d \tag{7.2}$$

Enerji korunumu ilkesi doğrultusunda, kinetik enerji tamamen bu işe dönüşeceğinden dolayı aşağıdaki denklik kurulabilir. Nitekim, kinetik enerjiyi, 1 birim kütleyi durgun halden alıp, belirli bir hıza ulaştırmak üzere, dış kuvvetlerce yapılması gereken net mekanik iş olarak da tanımlamak mümkündür:

$$\frac{1}{2}mv^2 = F \,.\, d \tag{7.3}$$

Buradan d fren mesafesi terimi çekilirse; kütle, hız ve fren kuvvetinin bir fonksiyonu olduğu görülür.

$$d = \frac{mv^2}{2F} \tag{7.4}$$

Fren kuvveti F, Newton'un II. hareket kanununa göre, trenin kütlesi ile yavaşlama (frenleme) ivmesi a'nın (m/sn^2) fonksiyonu olarak tanımlandığında:

$$F = m.a \tag{7.5}$$

şeklinde yazılır.

Buradaki fren kuvveti ifadesi, denklem 7.2'ye yerleştirilirse, fren mesafesinin yeni hali, hız ve frenleme ivmesinin bir fonksiyonu olarak;

$$d = \frac{mv^2}{2F} = \frac{mv^2}{2ma} = \frac{v^2}{2a} \tag{7.6}$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem, sabit fren kuvveti ve düzlükteki hat koşulları altında trenin frenlemeyle durma mesafesinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Örneğin;

Saatte 72 km (yani 20 m/s) hızla hareket eden ve toplam kütlesi 200-ton (200.000 kg) olan bir trenin, 0,5 m/s² sabit ivmeyle fren yaptığı varsayılırsa, durma mesafesi:

$d = \frac{20^2}{2\ x\ 0.5} = \frac{400}{1} = 400\ metre$ olarak hesaplanır.

Bu sonuç, trenin hızına ve frenleme kapasitesine bağlı olarak frenle durma mesafesinin önemli boyutlara ulaşabileceğini gösterir. Bu nedenle, özellikle şehir içi raylı sistemlerde frenle durma mesafesi analizleri, güvenlik kuralının temel bileşenlerinden biridir.

7.2 İnsan Faktörü Olarak Tepki Süresi

Demiryolu taşımacılığında güvenliğin sağlanması, yalnızca teknolojik sistemlerin doğruluğuna değil, aynı zamanda insan etkisine de bağlıdır. Bu bağlamda, tren sürücüsünün (makinistinin) frenleme kararını verme sürecinde geçen tepki süresi, trenin güvenli durma mesafesi üzerinde doğrudan etkili olan önemli bir değişkendir. Nitekim sürücünün hatta bir engel veya kendisi için tehlike oluşturabilecek bir durum gördüğünde, bunu algılayıp tanıması, mümkün tedbirleri tasarlaması; karar alıp uygulaması, yani tepki göstermesi için geçen sürede, tren hareketine devam etmektedir (Yardım, 2015). Ortalama bir insanın karmaşık bir uyarana verdiği tepki (tepki) süresi, kişinin yaş, tecrübe, hastalık, yorgunluk, uyku, ilaç, alkol ve uyuşturucu madde kullanımına göre değişiklik göstermekle beraber yaklaşık 1 ila 2 saniye arasındadır. Bu süre, trenin fiziksel frenleme süresine eklendiğinde, toplam güvenli durma mesafesini uzatmaktadır.

Trenin güvenli durma mesafesinin, sürücünün tepki süresi nedeniyle nasıl uzadığını ve bu mesafenin toplam durma mesafesine nasıl eklendiğini açıklayan Federal Railroad Administration tarafından yayımlanan raporda, mesafelerin ve tepki sürelerinin etkisi detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. (Federal Railroad Administration, 2005)

Yukarıda değinildiği gibi, güvenli durma mesafesi (l_e), tepki mesafesi (l_t) ve frenleme mesafesi (d)'nin toplamından meydana gelir.

$$l_e = l_t + d \tag{7.7}$$

Denklemdeki tepki mesafesi (m cinsinden), taşıtın o andaki hızı (v; m/sn) ve tepki süresinin (t_r, sn) fonksiyonu olup, şu şekilde ifade edilir:

$$l_t = v \,.\, t_t \tag{7.8}$$

7.7 denklemine 7.1 kısmındaki 7.4 denklemiyle ifade edilen fren mesafesi terimi eklendiğinde güvenli fren mesafesi şu hali alır:

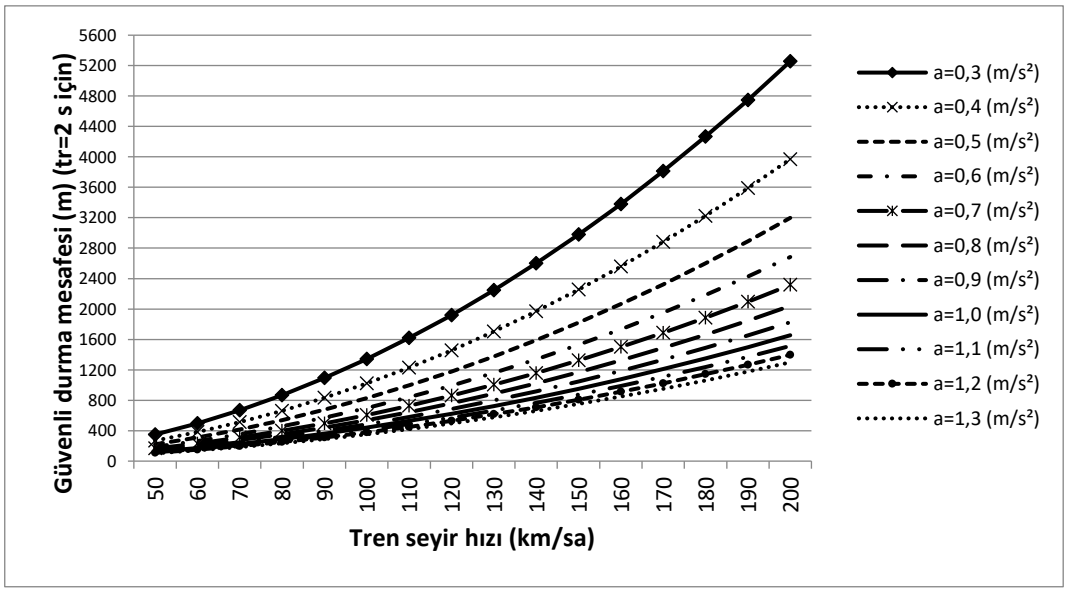
$$l_e = v \,.\, t_t + \frac{v^2}{2a} \tag{7.9}$$

Örnek olarak; Çevre koşulları dikkate alınmadan 90 km/s (25 m/sn) hızla giden bir trenin 2 sn tepki süresiyle tepki veren makinisti, 0,8 m/sn^2'lik yavaşlama ivmesiyle fren uygularsa, güvenli durma mesafesi:

$l_e = v \,.\, t_t + \frac{v^2}{2a} = 25\,.2 + \frac{25^2}{2.0{,}8} = 50 + 390{,}6 = 440{,}6\, metre$ olarak elde edilir.

Eğimsiz ve düz bir hat kesiminde 2 sn'lik tepki süresinde farklı tren seyir hızları ve frenleme ivmelerine göre güvenli durma mesafelerinin değişimi aşağıda grafik olarak verilmiştir (Şekil 7.1).

Farklı hızlar için de 2 s'lik tepki süresi içinde tepki mesafeleri ve fren mesafelerine örnekler Tablo 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1 Güvenli durma mesafesinin hıza ve ivmeye göre değişimi

Tablo 7.1 Bazı güvenli durma mesafeleri

Tren Hızı (km/s)	**Hız (m/s)**	**Tepki Süresi (s)**	**Tepki Mesafesi (m)**	**Frenleme İvmesi (m/s^2)**	**Frenle Mesafesi (m)**	**Güvenli Durma Mesafesi (m)**
60	16,67	2	33,34	0,8	173,68	207,02
90	25	2	50,00	0,8	390,63	440,63
120	33,33	2	66,66	0,9	617,16	683,82
160	44,44	2	88,88	1,0	987,46	1076,34
200	55,56	2	111,12	1,0	1543,46	1654,58

7.3 Çevresel Unsurlar

Otomatik frenleme sistemleri, trenin durma durumunu en uygun hale getirmeyi amaçlasa da çevresel unsurların etkisi göz ardı edilemez. Özellikle ray-yüzey koşulları, hava durumu ve çevresel unsurlar (Yağlar, yakıt sızıntısı, yaprak, çalı türü nebati parçacıklar, çamur, kum, taş, buz, kar, endüstriyel tozlar, metal parçacıkları gibi), frenleme etkinliğini doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer alır. Örneğin, ıslak ray durumu (wet rail" fenomeni olarak bilinen), tekerlek ve ray arasındaki yapışmayı (adhesion) azaltarak frenleme verimliliğini düşürmektedir. Bu durum, hafif yağmur veya sis gibi düşük nem düzeylerinde ortaya çıkabilir ve trenin güvenli durma mesafesini önemli ölçüde artırabilir (Rail-Traction, n.d). Ayrıca, düşük sıcaklıklar ve yüksek nem oranları, fren disklerinin aşınma özelliklerini değiştirerek frenleme etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir (Ding, Zhang, Ou, & Ma, 2023). Bunların yanısıra, ray yüzeyinde biriken yapraklar ve diğer organik maddeler, tekerlek-ray arasındaki sürtünmeyi azaltarak frenleme verimliliğini daha da düşürebilir. Bu çevresel unsurların etkilerini anlamak ve modellemek, trenlerin güvenli ve etkin bir şekilde durmasını sağlamak için yüksek öneme sahiptir (Lewis, ve diğerleri, 2023).

Bunlara ek olarak, rüzgâr unsuru da trenin durma sürecini etkileyebilir. Özellikle karşıdan esen rüzgârlar (head wind), trenin hareketine karşı ek bir direnç oluşturarak frenleme sırasında durma mesafesini kısaltabilir. Öte yandan, arkadan esen rüzgârlar (tail wind) trenin hareketini destekleyerek frenleme etkinliğini azaltabilir ve durma mesafesini uzatabilir. Bu etkiler, özellikle yüksek hızlı trenlerde ve hafif yük taşıyan vagonlarda daha belirgin hale gelir. S. Radulović ve arkadaşlarının 2022 yılında gerçekleştirdiği bir çalışmada, rüzgârın tren frenleme verimliliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve karşıdan esen rüzgârın frenleme mesafesini önemli ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir (Radulović, Milković, Raković, Simić, & Kostić, 2022).

7.3.1 Islak Zemin Koşulları

Trenlerin güvenli bir şekilde durabilmesi, fren sistemlerinin etkinliği kadar ray-yol ara yüzeyinin fiziksel koşullarına da bağlıdır. Özellikle yağmurlu havalarda ray yüzeyinde oluşan su tabakası, tren tekerlekleri ile ray arasındaki sürtünmeyi önemli ölçüde azaltarak fren verimliliğini olumsuz etkiler. Bu durum, frenleme esnasında aracın durma mesafesinin uzamasına ve muhtemel güvenlik risklerinin artmasına sebep olur. Yağmur, sadece sürtünme kaybına değil, aynı zamanda fren disklerinin ve diğer frenleme bileşenlerinin ıslanmasıyla oluşan hidrolik etkiler ve aşınma oranlarındaki değişikliklerle de frenleme etkinliğini düşürür. Bu sebeple, ıslak zemin koşullarında durma mesafesinin modellenmesi, güvenlik standartlarının belirlenmesi ve otomatik fren sistemlerinin optimizasyonu açısından önemli bir öneme sahiptir. Aşağıda verilen matematiksel modeller, bu çevresel etkiyi sürtünme katsayısı üzerindeki değişimle ifade ederek trenin durma mesafesindeki artışı nicel olarak ortaya koymaktadır.

$$d = \frac{v^2}{2\mu g} \tag{7.10}$$

Burada;

v: Trenin seyir hızı (m/s)

μ: Ray tekerlek arasındaki sürtünme katsayısı

g: Yer çekimi ivmesi (9,81 m/s^2)

Bu temel durma mesafesi formülü, tren fren sistemlerinin kinetik enerji dengesi ve sürtünme kuvveti ilişkisini tanımlar. Bu klasik frenleme modeli Radulović ve diğ. (2022)'nin çalışmalarına dayanmaktadır. Yazarla özellikle, ray tekerlek arasındaki sürtünme katsayısının fren verimliliğine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir (Radulović, Milković, Raković, Simić, & Kostić, 2022).

Chen vd. (2016) ise, çalışmalarında, tekerlek-ray temasında yağmur etkisiyle sürtünme katsayısının %50'ye kadar azaldığını göstermiştirlerdir (Chen, Namura, Ishida, & Nakahara, 2016).

$$\mu_{yağmur} = a\ x\ \mu_{kuru} \tag{7.11}$$

$\mu_{yağmur}$: Yağmurlu (ıslak) ray koşullarında sürtünme katsayısı

μ_{kuru}: Kuru ray koşullarında sürtünme katsayısı

α : Sürtünme etkisini azaltma oranı

Burada α oranı genellikle 0,4 – 0,7 aralığında ortaya çıkmaktadır. Bu katsayı denklem 1.17'e uyarlandığında trenin yağmurlu ray yüzeyindeki durma mesafesi şu şekilde olur:

$$d_{yağmur} = \frac{v^2}{2x\ a\ x\ \mu_{kuru}\ x\ g} \tag{7.12}$$

Örnek verilecek olursa;

25 m/s (90 km/sa) hızla, düz ve doğru bir hat kesiminde açık havada seyreden bir tren, sürtünme katsayısı μ=0,25 olan kuru ray üzerinde frenleme yapması gerektiğinde, fren mesafesi,

$d_{kuru} = \frac{v^2}{2.\mu_{kuru}.g} = \frac{25^2}{2.0{,}25.\ 9{,}81} = 127{,}4$ m olarak hesaplanır.

Aynı hat kesiminde ıslak bir havada ıslak ray üzerinde yaklaşık yarı yarıya sürtünme kaybı olması durumunda ise, fren mesafesi

$d_{yağmur} = \frac{v^2}{2.\alpha.\mu_{kuru}.g} = \frac{25^2}{2.\ 0{,}125.\ 9{,}81} = 254{,}8$ m olarak bulunur.

Bu hesaplamalar, yağışlı hava koşullarının tren durma mesafesini neredeyse iki katına çıkardığını göstermektedir. Bu nedenle, otomatik fren sistemleri bu tür çevresel değişkenleri dikkate alarak tasarlanmalıdır.

7.3.2 Rüzgâr / Yüksek Hava Direnci

Trenlerin yüksek hızlarda seyretmesi durumunda hava direnci (aerodinamik sürükleme kuvveti), frenleme verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle rüzgâr yönü ve şiddeti, bu hava direncini artırabilir veya azaltabilir. Rüzgâr, trenin hareket yönüne karşı ise ek olarak bir yavaşlatıcı kuvvet yaratır; aynı yöndeyse frenlemenin etkisini zayıflatır.

Hava direncine bağlı kuvvet şu şekilde ifade edilir:

$$F_d = \frac{1}{2}.\rho.C_d.A.v^2 \tag{7.13}$$

Burada;

1. F_d: Hava direnci kuvveti (N)
2. ρ: Havanın yoğunluğu (yaklaşık 1,225 kg/m³)
3. C_d: Aerodinamik sürükleme katsayısı (tren şekline bağlı olarak 0,15–0,4 arası)
4. A: Trenin gabari alanı (m²)
5. V: Trenin rüzgâra göre bağıl hızı (m/s)

Bu denklem, trenin ön cephe tasarımının, hava koşullarının ve hızının frenleme üzerindeki etkisini sayısal olarak değerlendirmeye imkân verir. Özellikle rüzgârın karşıdan estiği durumlarda bağıl hız v artar ve dolayısıyla F_d, kuvveti büyür. Bu da trenin daha çabuk yavaşlamasına neden olur.

Radulović vd. (2022) çalışmalarında, rüzgârın tren üzerindeki fren verimliliğine etkisini deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada trenin yanal ve karşıdan gelen rüzgâr altında frenleme testleri yapılmış, hava direncinin durma mesafesine olan katkısı açıkça gösterilmiştir (Radulović, Milković, Raković, Simić, & Kostić, 2022).

Ayrıca bu hava direnci, genel hareket direnci toplamına (F_{toplam}) eklenerek trenin yavaşlama davranışı şu şekilde modellenir:

$$F_{toplam} = F_{fren} + F_d + F_r \quad (7.14)$$

F_{fren}: Fren kuvveti (N)

F_d: Hava direnci (N)

F_r: Ray-tekerlek sürtünmesinden gelen direnç (yuvarlanma direnimi)

Yani rüzgâr karşıdan esiyorsa F_d artar ve bu, F_{toplam}'ı büyüterek trenin daha kısa mesafede durmasına katkı sağlar. Ancak rüzgâr trenin yönüyle aynıysa bağıl hız v azalır, F_d küçülür ve bu durumda fren verimliliğini olumsuz etkilenir.

Konuya bir örnek verilecek olursak;

30 m/s (108 km/sa) hızla, düz ve doğru bir hat kesiminde açık havada seyreden bir trene, rüzgârın karşıdan 10 m/sn hızla esmesi durumunda, etkiyen hava direnci şu şekilde hesaplanır (Verilenler: Gabari alanı A=10 m^2, C_d=0,25, ρ=1,225 kg/m^3):

Bağıl hız, v = 30 + 10 = 40 m/s

$F_d = \frac{1}{2}.\rho.C_d.A.v^2 = \frac{1}{2}.1{,}225.0{,}25.10.40^2 = 2.450\ N$

Bu 2,45 kN'luk ek direnç, fren kuvvetine destek vererek trenin daha kısa sürede durmasına katkı sağlar.

7.4 Modelin Genel Formülü

Trenin durma mesafesi, hem insan unsuru hem de fiziksel ve çevresel etkenlerin birleşimiyle belirlenir. Tekrar edilecek olursa, bu süreç temelde sürücünün tepki süresi boyunca kat edilen mesafe ve trenin tamamen durmasına kadar geçen frenleme mesafesi olmak üzere iki ana bileşene ayrılır.

Tepki süresi boyunca tren sabit hızla hareket etmeye devam eder ve bu mesafe daha önce ifade edildiği gibi;

$$l_t = v\,.\,t_t \quad (7.8)$$

Frenleme aşamasında ise tren, fren kuvveti ile rüzgâr direncinin farkının kütleye oranı kadar bir ivmeyle (a) yavaşlar. Bu durumda frenleme ivmesi şu şekilde tanımlanır:

$$a = \frac{F_{fren} - F_d}{m} \tag{7.15}$$

Burada;

F_{fren}: Fren kuvveti (N)

F_d: Aerodinamik direnç kuvveti (N)

m: Trenin kütlesi (kg)

Frenleme mesafesi yine daha önce anlatıldığı üzere,

$d = \frac{v^2}{2a}$ ile ifade edilir.

Bilindiği gibi, yağmurlu havalarda ray üzeri ıslak olduğu için sürtünme katsayısı (μ) düşer; bu durumda frenleme ivmesi yaklaşık olarak

$$a = \mu . g . a \tag{7.16}$$

halini alır.

Tüm bu etkiler dikkate alındığında, güvenli durma mesafesinin son hali,

$$l_{f,e} = v . t_t + \frac{v^2}{2 . (\mu_{ıslak} . g - \frac{F_d}{m})} \tag{7.17}$$

formunu alır. Bu formül sayesinde, trenin farklı hava ve yol koşullarından nasıl etkilendiği, gerçeğe daha yakın ve ayrıntılı bir şekilde irdelenebilir.

8
SENARYO BAZLI BULGULAR VE TARTIŞMA

Balizli otomatik frenleme sistemleri, demiryolu güvenliğini artırmak amacıyla geliştirilen modern güvenlik çözümleridir. Bu sistemlerde raylara yerleştirilen balizler, trenin hızı, konumu ve hareket yetkisi gibi önemli bilgileri tren kontrol sistemine iletir. Bu tezin konusu olan olası bir tehlike durumunda örneğin; sürücünün sinyali geç fark etmesi, trenin hız sınırını aşması ya da öndeki trene fazla yaklaşması gibi senaryolarda balizler sayesinde trenin otomatik olarak frenlemeye geçirilme seneryosu düşünülmektedir. Yukarıda, verilen formüllerin bir genel formu meydana getirilmişti. Bu formül üzerinde belirli değişkenler ile trenin otomatik fren sistemi devreye girmesi ile beraber durma durumları incelenecektir.

8.1 Senaryo Parametreleri ile Durma Mesafesi Hesabı

Burada, düz ve doğru hat kesiminde açık havada seyreden bir tren için bazı değişken ve parametrelerin sabit tutulduğu aşağıdaki 4 adet durma senaryosu üzerinden hesaplamalar yapılacaktır. Bu senaryolar:

1. Senaryo: Normal Operatör (t_t=1,5 s)
2. Senaryo: Dikkati Dağılmış Operatör (t_t=4 s)
3. Senaryo: Dikkati Dağılmış Operatör (t_t=10 s)
4. Senaryo: Algılama Sistemi + Makinist ile Seyir (t_t=2)
5. Senaryo: Tam Otomatik Sistem + Mobil + Makinist (t_t=0)
6. Senaryo: Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist (t_t=0)
7. Senaryo: Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist (Islak Zemin) (t_t=0)

olup, Tablo 8.1'deki sabit değerlerle oluşturulmuştur.

Bu şartlarda hesaplanan durma mesafelerinin trenle hemzemin geçit arasında haberleşme açısından bulunması gereken 500 metrelik standart değerinin altında olduğu görülmektedir (Tablo 8.2). Kuru zemin koşullarında ray–tekerlek arasındaki

sürtünme katsayısı, güvenli frenleme hesaplarında genellikle 0,25 civarında alınmaktadır. Bu değer, acil frenleme senaryolarında kabul edilen ortalama bir katsayı olup, frenleme mesafesinin güvenlik sınırları içinde kalmasını sağlar. (The Contact Patch, t.y) Tezde de kuru zemin koşulu hesaplarında, bu ortalama katsayı değeri kabul edilecektir. Öte yandan, ıslak zemin koşullarında bu katsayının daha düşük değerlere indiği görülmektedir. Yapılan çeşitli deneysel ve benzetim temelli çalışmalarda, ıslak ray yüzeyleri için sürtünme katsayısının ortalama olarak yarıya düştüğü gözlemlenmiştir (U.S Departmant of Transportaion, 2024).

Tablo 8.1 Durma mesafesi mesafesi hesabında kullanılan sabit değerler

Parametre	**Simgesi/Formülü**	**Değeri**
Tren seyir hızı	v	20 m/s
Tren kütlesi	m	200.000 kg
Rüzgâr direnci	F_d	1960 N
Kuru hava sürtünme katsayısı	μ_{kuru}	0,25
Yağmurlu hava sürtünme katsayısı	$\mu_{ıslak}$	0,25 .0,5=0,125
Yer çekimi ivmesi	g	9,81 m/sn^2
Fren kuvveti Kuru Zemin	$F_{fren} = \mu_{kuru}.m.g$	0,25.200000.9,81=490.500 N
Fren kuvveti Islak Zemin	$F_{fren} = \mu_{ıslak}.m.g$	0,125.200000.9,81=245.520 N
Kuru Zemin Net Frenleme İvmesi	$a = \frac{F_{fren} - F_d}{m}$	(490500-1960)/200000=2,44 m/sn^2
Islak Zemin Net Frenleme İvmesi	$a = \frac{F_{fren} - F_d}{m}$	(245520-1960)/200000=1,22 m/sn^2

Tablo 8.2 Kritik durma mesafeleri

Senaryo	t_r (sn)	v (m/s)	a (m/s^2)	l_t (m)	d (m)	$l_{f,e}$ (m)	500 m'den önce durur mu?
1-Normal Makinist	1,5	20	2,44	30	97,6	122	Durur
2-Dikkati Dağılmış Makinist (t_t = 4 sn)	4	20	2,44	80	97,6	162	Durur
3-Dikkati Dağılmış Makinist (t_t = 10 sn)	10	20	2,44	80	97,6	282	Durur
4- Senaryo: Algılama Sistemi + Makinist ile Seyir	2	20	2,44	40	97,6	122	Durur
5-Tam Otamatik Sistem + Mobil + Makinist	0	20	2,44	34	97,6	82	Erişilebilirlik Durumunda Durur
6-Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist	0	20	2,44	34	97,6	82	Durur
7-Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist (Islak Zemin)	0	20	1,21	34	97,6	165,3	Durur

Demiryolu sinyalizasyon ve kontrol sistemlerinde iletişim altyapısının güvenilirliği, sistemin genel güvenliği ve verimliliği açısından önemli bir öneme sahiptir. Özellikle fiber optik kabloların elektromanyetik parazitlere dayanıklılığı, yüksek veri iletim kapasitesi ve düşük gecikme süreleri gibi üstünlükleri mevcuttur. Demiryolu ortamları, yüksek güçlü elektrikli donanımlar ve hatlardan kaynaklanan yoğun elektromanyetik parazitlerden etkilenmektedir. Fiber optik kablolar, elektromanyetik alanlardan etkilenmeyen yapıları sayesinde bu tür parazitlere karşı tam bir bağışıklık sağlar. Bu özellik, sinyal bütünlüğünün korunması ve veri iletiminde hataların en aza indirilmesi açısından önemlidir (Kesen, Sarıkaş , & Yayla). Ayrıca, modern demiryolu sistemleri, gerçek zamanlı kontrol, izleme ve güvenlik uygulamaları için yüksek bant genişliği ve düşük gecikme süreleri gereklidir. Fiber optik kablolar, geniş bant genişliği ve düşük gecikme süreleri sunarak bu gereksinimleri karşılar. Bu sayede, sinyalizasyon ve kontrol sistemleri arasında hızlı ve güvenilir veri aktarımı sağlanır (Chen, Liu, Fan, & He, 2017).

Kablolu iletişim sistemleri, özellikle fiber optik altyapıya sahip olanlar, elektromanyetik parazitlere karşı dirençli yapıları ve fiziksel bağlantı gerektirmeleri sayesinde çevresel etmenlerden çok az etkilenir. Bu yapı, iletişim hatlarının sürekliliğini ve veri iletim güvenilirliğini doğrudan artırır. Fiber optik kablolar, ışık

sinyalleri aracılığıyla veri ilettiğinden hem bant genişliği hem de iletim mesafesi açısından önemli üstünlükler sunar. Bu teknik özellikler, sinyalin zayıflamasını en alt düzeyde tutarken, yüksek hızlı ve düşük gecikmeli iletişimin de önünü açar. Ayrıca fiziksel erişim gerekliliği nedeniyle, kablolu sistemler kablosuz seçeneklere kıyasla izinsiz müdahalelere ve siber saldırılara karşı doğal bir koruma katmanı oluşturur. Güvenlik açısından bu durum önemli bir fark yaratırken, sistem erişilebilirliği açısından da kayda değer bir üstünlük söz konusudur. 6.4 bağlantı güvenliği başlığı altında yapılan hesaplamalara göre, fiber optik sistemlerin yıllık erişilebilirlik oranı %99,999 düzeyindedir; bu da yılda yalnızca yaklaşık 5,26 dakikalık hizmet kesintisine tekabül etmektedir. Buna karşılık mobil iletişim sistemleri %99,0 oranında erişilebilirlik sunmakta ve bu, yılda yaklaşık 3,65 gün hizmet dışı kalma anlamına gelmektedir. Bu fark, özellikle önemli haberleşme altyapılarında veya sürekli hizmet gerektiren uygulamalarda kablolu sistemlerin tercih edilmesini zorunlu kılmaktadır. Elde edilen bu veriler ışığında, kablolu iletişim altyapılarının hem güvenlik hem de süreklilik bakımından yüksek erişilebilirlik oranları ile öne çıktığı, dolayısıyla haberleşme sistemlerinin temel taşı olarak değerlendirilmeleri gerektiği sonucuna varılabilir. (Tablo 8.3)

Ayrıca, geleneksel demiryolu işletmeciliğinde kullanılan elle gerçekşen frenleme sistemleri, tamamen makinist tepkisine bağlı olduğu için insan hatasına açık bir yapı sergilemektedir. Makinistin tehlikeyi algılaması, karar verip tepki vermesi ve freni devreye alması belirli bir süre gerektirir. Bu süre içerisinde tren, hızına bağlı olarak önemli bir mesafe kat eder ve bu durum, özellikle yüksek hızlı tren uygulamalarında ciddi güvenlik zayıflığına neden olabilir. Bu nedenle, insan etkisiyle gerçekleşen sistemlerin yerini otomatik frenleme sistemlerinin alması, modern demiryolu güvenliği açısından önemli bir gelişmedir. Otomatik frenleme sistemleri; sensörler, sinyalizasyon verileri ve entegre kontrol algoritmaları aracılığıyla, insan müdahalesine gerek kalmaksızın frenlemeyi başlatabilir. Bu sistemler, tepki süresini milisaniyeler düzeyine indirerek trenin duruş mesafesini önemli ölçüde azaltır. Özellikle hızın yüksek olduğu durumlarda, tepki süresindeki her saniyelik farkın onlarca metreye karşılık geldiği göz önüne alındığında, otomatik sistemlerin kaza önleme kapasitesi çok daha etkili hale gelir. 7.2 başlığı altında bahsedilen formül ve hesaplamalar eşliğinde ve tablo 8.3'de 90 km/s hızla hareket eden bir trenin, farklı tepki sürelerinde frenlemeye başlaması durumunda

kat ettiği mesafeler verilmiştir. Bu değerler, el ile yürütülen sistemlerde insan tepkisine bağlı gecikmelerin nasıl ciddi güvenlik açıklarına yol açabileceğini çarpıcı şekilde göstermektedir.

Tablo 8.3 Kablolu ve kablosuz sistem karşılaştırması

Kriter	**Kablolu (Fiber Optik)**	**Kablosuz (Mobil Ağlar)**
Parazit Dayanıklılığı	Elektromanyetik parazitlere karşı yüksek dayanıklılık sağlar	Elektromanyetik parazitlerden etkilenebilir, sinyal bozulması yaşanabilir
Veri İletim Kapasitesi	Yüksek bant genişliği ile büyük veri miktarlarını iletebilir	Bant genişliği sınırlı, ağ yoğunluğu ile verimlilik düşebilir
Gecikme Süresi	Çok düşük gecikme süresi	Yüksek ağ trafiğinde gecikme yaşanabilir
Bağlantı Güvenilirliği	Fiziksel bağlantı sayesinde kesintisiz hizmet sunar	Coğrafi koşullara bağlı olarak bağlantı kopmaları yaşanabilir
Ortam Koşullarına Dayanıklılık	Çevresel unsurlardan (hava, elektromanyetik etki) daha az etkilenir	Tünel, dağlık ve kırsal alanlarda çekim sorunları yaşanabilir
Uygunluk	Gerçek zamanlı kontrol ve güvenlik uygulamaları için son derece uygundur	Kritik sistemlerde güvenlik açısından zayıf kalabilir

Tablo 8.2'de tanımlanan senaryolar temel alınarak, her bir senaryonun farklı hız koşulları altındaki durma durumunu ortaya koymak amacıyla detaylı alt analiz tabloları oluşturulmuştur. Bu analizlerde, ilgili senaryoya ait tepki süresi ve frenleme ivmesi sabit tutulmuş; hız değişkeni artırılarak her hız için tepki mesafesi, frenleme mesafesi ve toplam güvenli durma mesafesi hesaplanmıştır.

Tablo 8.4'te herhangi bir otomatik frenleme veya olay algılama sisteminin bulunmadığı, yalnızca makinistin görsel saptamasıyla frenleme yaptığı klasik işletme koşullarını temsil etmektedir. Tepki süresi t_t= 1,5 saniye olarak kabul edilmiş ve kuru zemin koşullarına göre frenleme ivmesi 2,4 alınmıştır. Bu varsayımlar altında, farklı hız değerleri için makinistin engeli fark edip frene basmasıyla trenin tam olarak durabilmesi için gereken toplam mesafeler hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, trenin önce tepki süresi boyunca kat ettiği mesafe (tepki mesafesi), ardından frenleme süreci boyunca kat ettiği mesafe (frenleme mesafesi) ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bu iki değer toplanarak "güvenli durma mesafesi" elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, seyir hızı arttıkça hem tepki hem de frenleme mesafesinin doğrusal olmayan şekilde arttığını göstermektedir. Özellikle 163,9 km/s hızda toplam durma mesafesi 500 metre eşiğini aşarak 500,17 metreye ulaşmaktadır. Bu durum, yalnızca makinistin müdahalesine dayalı sistemlerde yüksek hızlarda güvenli duruşun sağlanamayabileceğine işaret etmektedir. 170 km/s ve üzerindeki hızlarda ise durma mesafeleri ciddi şekilde artmakta ve bu durum tren işletmeciliğinde ilave güvenlik önlemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 8.4 1. Senaryo: Normal makinist ile seyir (t_t=1,5 s)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s²)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	1,5	12,50	2,4	14,22	26,72
40	11,11	1,5	16,67	2,4	25,72	42,39
50	13,89	1,5	20,84	2,4	40,19	61,03
60	16,67	1,5	25,01	2,4	57,89	82,90
70	19,44	1,5	29,16	2,4	78,73	107,89
80	22,22	1,5	33,33	2,4	102,86	136,19
90	25,00	1,5	37,50	2,4	130,21	167,71
100	27,78	1,5	41,67	2,4	160,78	202,45
110	30,56	1,5	45,84	2,4	194,57	240,41
120	33,33	1,5	50,00	2,4	231,44	281,44
130	36,11	1,5	54,17	2,4	271,65	325,82
140	38,89	1,5	58,34	2,4	315,09	373,43
150	41,67	1,5	62,51	2,4	361,75	424,26
160	44,44	1,5	66,66	2,4	411,44	478,10
163,9	45,53	1,5	68,30	2,4	431,87	500,17
170	47,22	1,5	70,83	2,4	464,53	535,36
180	50,00	1,5	75,00	2,4	520,83	595,83
190	52,78	1,5	79,17	2,4	580,36	659,53
200	55,56	1,5	83,34	2,4	643,11	726,45

Tablo 8.5 ve 8.6 ‘da yer alan senaryo durumlarında, herhangi bir otomatik frenleme ya da olay algılama sistemi bulunmamakta; durma süreci tamamen makinistin engeli fark edip fren düzeneğini harekete geçirmesine bağlıdır. Ancak burada önceki senaryodan farklı olarak, makinistin dikkatinin dağılmış olması sebebiyle tepki süresi uzamıştır. Tablo 8.5’te bu süre t_t= 4,0 s Tablo 8.6’da ise t_t= 10,0 s saniye olarak alınmıştır. Her iki tabloda da frenleme ivmesi kuru zemin koşullarına 2,4 m/s² olarak sabit tutulmuştur. 500 metrelik hayati durma mesafesi eşiği esas alınarak yapılan değerlendirmelerde, tepki süresi arttıkça bu sınırın çok daha düşük hızlarda aşıldığı görülmektedir. 1. Senaryoda en yaklaşık 145 km/sa hızla seyrettiğinde durma mesafesi 500 metreyi aşmakta (500,18 m) ve 150 km/sa hızla birlikte bu fark daha da belirginleşmektedir (528,43 m). 2. Senaryoda ise, tren yalnızca 110 km/s hızda iken dahi 500 metrelik durma mesafesini sınırda karşılamakta (500,17 m) ve bu hızdan itibaren tüm değerler güvenli sınırın dışına çıkmaktadır.

Tablo 8.5 2. Senaryo: Dikkati dağılmış makinist ile seyir (t_t=4,0 s)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s²)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	4,0	33,32	2,4	14,22	47,54
40	11,11	4,0	44,44	2,4	25,72	70,16
50	13,89	4,0	55,56	2,4	40,19	95,75
60	16,67	4,0	66,68	2,4	57,89	124,57
70	19,44	4,0	77,76	2,4	78,73	156,49
80	22,22	4,0	88,88	2,4	102,86	191,74
90	25,00	4,0	100,00	2,4	130,21	230,21
100	27,78	4,0	111,12	2,4	160,78	271,90
110	30,56	4,0	122,24	2,4	194,57	316,81
120	33,33	4,0	133,32	2,4	231,44	364,76
130	36,11	4,0	144,44	2,4	271,65	416,09
140	38,89	4,0	155,56	2,4	315,09	470,65
145,2	40,33	4,0	161,32	2,4	338,86	500,18
150	41,67	4,0	166,68	2,4	361,75	528,43
160	44,44	4,0	177,76	2,4	411,44	589,20
170	47,22	4,0	188,88	2,4	464,53	653,41
180	50,00	4,0	200,00	2,4	520,83	720,83
190	52,78	4,0	211,12	2,4	580,36	791,48
200	55,56	4,0	222,24	2,4	643,11	865,35

Tablo 8.6. 3. Senaryo: Dikkati dağılmış makinist ile seyir (t_t =10,0 s)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s²)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	10,0	83,30	2,4	14,22	97,52
40	11,11	10,0	111,10	2,4	25,72	136,82
50	13,89	10,0	138,90	2,4	40,19	179,09
60	16,67	10,0	166,70	2,4	57,89	224,59
70	19,44	10,0	194,40	2,4	78,73	273,13
80	22,22	10,0	222,20	2,4	102,86	325,06
90	25,00	10,0	250,00	2,4	130,21	380,21
100	27,78	10,0	277,80	2,4	160,78	438,58
110	30,56	10,0	305,60	2,4	194,57	500,17
120	33,33	10,0	333,30	2,4	231,44	564,74
130	36,11	10,0	361,10	2,4	271,65	632,75
140	38,89	10,0	388,90	2,4	315,09	703,99
150	41,67	10,0	416,70	2,4	361,75	778,45
160	44,44	10,0	444,40	2,4	411,44	855,84
170	47,22	10,0	472,20	2,4	464,53	936,73
180	50,00	10,0	500,00	2,4	520,83	1020,83
190	52,78	10,0	527,80	2,4	580,36	1108,16
200	55,56	10,0	555,60	2,4	643,11	1198,71

Tablo 8.7 de yer alan 4. Senaryo durumunda ise, sahada bulunan bir algılama sisteminin olası bir engeli saptayarak makinisti önceden uyarması durumunu simüle etmektedir. Otomatik frenleme devreye girmemekte; ancak uyarı sayesinde makinist daha hızlı tepki verebilmektedir. Bu doğrultuda tepki süresi t_t =2,0 s olarak kabul edilmiş ve frenleme ivmesi önceki senaryolarda olduğu gibi kuru zemin koşullarına göre 2,4 m/s² olarak belirlenmiştir. Bu sistem, özellikle dikkat dağınıklığı kaynaklı gecikmeleri telafi edebilecek bir önlem sunmakta ve makinistin tepki süresini kısaltmaktadır. Hız arttıkça tepki ve frenleme mesafeleri yine artış göstermekte, ancak bu artış makinistin uyarı sistemi olmadan tepki verdiği senaryolara kıyasla daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir. 500 metrelik hayati durma mesafesi kıstas alındığında, bu senaryoda sınır hız 160 km/s olarak belirlenmiştir. Bu hızda toplam durma mesafesi 500,32 m ile eşiğin hemen üzerinde kalmaktadır. Bu durum, 160 km/s ve altındaki hızlarda sistemin yeterli güvenlik sağladığını; ancak daha yüksek hızlarda ek tedbirlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Tablo 8.7 4. Senaryo: Algılama sistemi + Makinist ile seyir (t_t =2,0 s)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s²)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	2,0	16,66	2,4	14,22	30,88
40	11,11	2,0	22,22	2,4	25,72	47,94
50	13,89	2,0	27,78	2,4	40,19	67,97
60	16,67	2,0	33,34	2,4	57,89	91,23
70	19,44	2,0	38,88	2,4	78,73	117,61
80	22,22	2,0	44,44	2,4	102,86	147,30
90	25,00	2,0	50,00	2,4	130,21	180,21
100	27,78	2,0	55,56	2,4	160,78	216,34
110	30,56	2,0	61,12	2,4	194,57	255,69
120	33,33	2,0	66,66	2,4	231,44	298,10
130	36,11	2,0	72,22	2,4	271,65	343,87
140	38,89	2,0	77,78	2,4	315,09	392,87
150	41,67	2,0	83,34	2,4	361,75	445,09
160	44,44	2,0	88,88	2,4	411,44	500,32
170	47,22	2,0	94,44	2,4	464,53	558,97
180	50,00	2,0	100,00	2,4	520,83	620,83
190	52,78	2,0	105,56	2,4	580,36	685,92
200	55,56	2,0	111,12	2,4	643,11	754,23

Tam otomatik fren sistemine sahip trenlerde, frenleme işlemi herhangi bir insan müdahalesi gerektirmeden, algılama sisteminden gelen veriler doğrultusunda anında devreye girmektedir. Bu durumda tepki süresi t_r=0 s olarak kabul edilmekte ve durma mesafesi yalnızca frenleme ivmesine bağlı olarak belirlenmektedir. Tablo 8.8'de yer alan mobility altyapısı ile çalışan tam otomatik sistemde tren, 176,5 km/sa hıza kadar 500 metrelik durma mesafesi sınırı içerisinde kalmaktadır. Ancak bu sistemin doğası gereği, çevresel koşullardan etkilenme ve bağlantı sürekliliği problemleri yaşama ihtimali bulunmaktadır. Daha önce 6.4 numaralı başlık altında yapılan bağlantı güvenliği analizine göre, mobility sistemlerinde yılda ortalama 3,65 gün bağlantı kesintisi yaşanabileceği öngörülmektedir. Bu tür bir kesinti, trenin fren sistemine zamanında komut iletilememesi riskini doğurarak, engele çarpma olasılığını artırabilir. Özellikle acil ve hayati frenleme anlarında bu bağlantı kesintilerinin yaşanması durumunda, sistemin "sıfır tepki süresi" üstünlüğü, işlevini yitirecektir.

Buna karşın, Tablo 8.9'da yer alan fiber optik tabanlı sistem, aynı teknik koşullarda çalışmakta olup 176,5 km/s hıza kadar 500 metre sınırı içinde kalabilmektedir. Ancak fiber optik sistemin üstünlüğü yalnızca bu değil; çevresel koşullardan etkilenmeyen yapısı ve yüksek bağlantı kararlılığı sayesinde yıllık bağlantı kesintisi süresi yalnızca yaklaşık 5,26 dakikadır. Bu süre, pratikte ihmal edilebilecek düzeyde olup hayati frenleme anlarına denk gelme olasılığı oldukça düşüktür. Bu nedenle fiber optik sistem, Tablo 9.3'te tanımlanan en elverişli otomatik frenleme koşullarını tam olarak karşılayabilmektedir.

Her iki altyapı da tam otomatik frenleme sisteminin teknik gerekliliklerini karşılamaktadır; ancak bağlantı sürekliliği ve çevresel güvenilirlik açısından fiber optik altyapı, mobility sistemlere kıyasla çok daha yüksek işletim güvenliği sunmaktadır.

Tablo 8.8 5. Senaryo: Tam otomatik sistem + Mobil + Makinist (t_t =0 s)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s^2)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	0,0	0,00	2,4	14,22	14,22
40	11,11	0,0	0,00	2,4	25,72	25,72
50	13,89	0,0	0,00	2,4	40,19	40,19
60	16,67	0,0	0,00	2,4	57,89	57,89
70	19,44	0,0	0,00	2,4	78,73	78,73
80	22,22	0,0	0,00	2,4	102,86	102,86
90	25,00	0,0	0,00	2,4	130,21	130,21
100	27,78	0,0	0,00	2,4	160,78	160,78
110	30,56	0,0	0,00	2,4	194,57	194,57
120	33,33	0,0	0,00	2,4	231,44	231,44
130	36,11	0,0	0,00	2,4	271,65	271,65
140	38,89	0,0	0,00	2,4	315,09	315,09
150	41,67	0,0	0,00	2,4	361,75	361,75
160	44,44	0,0	0,00	2,4	411,44	411,44
170	47,22	0,0	0,00	2,4	464,53	464,53
176,5	49,03	0,0	0,00	2,4	500,82	500,82
180	50,00	0,0	0,00	2,4	520,83	520,83
190	52,78	0,0	0,00	2,4	580,36	580,36
200	55,56	0,0	0,00	2,4	643,11	643,11

Tablo 8.9 6. Senaryo: Tam Otomatik Sistem + Fiber + Makinist (t_t =0 sn)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s^2)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	0,0	0,00	2,4	14,22	14,22
40	11,11	0,0	0,00	2,4	25,72	25,72
50	13,89	0,0	0,00	2,4	40,19	40,19
60	16,67	0,0	0,00	2,4	57,89	57,89
70	19,44	0,0	0,00	2,4	78,73	78,73
80	22,22	0,0	0,00	2,4	102,86	102,86
90	25,00	0,0	0,00	2,4	130,21	130,21
100	27,78	0,0	0,00	2,4	160,78	160,78
110	30,56	0,0	0,00	2,4	194,57	194,57
120	33,33	0,0	0,00	2,4	231,44	231,44
130	36,11	0,0	0,00	2,4	271,65	271,65
140	38,89	0,0	0,00	2,4	315,09	315,09
150	41,67	0,0	0,00	2,4	361,75	361,75
160	44,44	0,0	0,00	2,4	411,44	411,44
170	47,22	0,0	0,00	2,4	464,53	464,53
176,5	49,03	0,0	0,00	2,4	500,82	500,82
180	50,00	0,0	0,00	2,4	520,83	520,83
190	52,78	0,0	0,00	2,4	580,36	580,36
200	55,56	0,0	0,00	2,4	643,11	643,11

Islak zemin koşulları, trenlerin fren verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir çevresel unsurdur.7. Senaryoda, tam otomatik fren sistemi t_t =0 sn olarak işleyerek tepki süresini ortadan kaldırmakta; ancak frenleme ivmesi ıslak zemin nedeniyle 1,2 m/s² gibi düşük bir değere inmektedir. Bu durum, fren mesafesinin kuru zemine göre yaklaşık iki katına çıkmasına yol açmakta ve toplam durma mesafesini hızla artırmaktadır. Trenin 125 km/sa hıza ulaştığı noktada, güvenli durma mesafesi hayati 500 metre sınırını aşmakta ve 500,84 metre olarak hesaplanmaktadır. Daha yüksek hızlarda bu mesafe hızla artmakta, 150 km/sa'te 723,5 metreye, 200 km/sa'te ise 1286,21 metreye yükselmektedir. Bu olumsuz etkilerin yanı sıra, altyapı koşulları da güvenlik üzerinde belirleyicidir. Fiber optik altyapı bu noktada üstünlük sağlamaktadır; zira çevresel koşullardan etkilenmeyen ve bağlantı sürekliliği yüksek bir sistem sunmaktadır. Böylece, frenleme işleminin tam otomatik ve hızlı olarak gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Öte yandan, mobil tabanlı altyapıda, yukarıda Tablo 8.8 ve "6.4. Bağlantı Güvenliği" başlığı altında belirtildiği gibi, yılda ortalama 3,65 günlük bağlantı kopması riski bulunmaktadır. Bu durum, ıslak zeminde zaten uzamış olan frenleme mesafesine ek olarak, ani erişim problemleri yaşanması halinde trenin durma verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve kaza riskini artırabilir.

Tablo 8.10 7. Senaryo: Tam otomatik sistem + Fiber + Makinist (Islak zemin) (t_t =0 sn)

Seyir Hızı (km/s)	Seyir Hızı (m/s)	Tepki Süresi (s)	Tepki Mesafesi (m)	Frenleme İvmesi (m/s^2)	Frenle Mesafesi (m)	Güvenli durma mesafesi (m)
30	8,33	0,0	0,00	1,2	28,67	28,67
40	11,11	0,0	0,00	1,2	51,01	51,01
50	13,89	0,0	0,00	1,2	80,39	80,39
60	16,67	0,0	0,00	1,2	114,83	114,83
70	19,44	0,0	0,00	1,2	156,16	156,16
80	22,22	0,0	0,00	1,2	204,02	204,02
90	25,00	0,0	0,00	1,2	258,26	258,26
100	27,78	0,0	0,00	1,2	321,55	321,55
110	30,56	0,0	0,00	1,2	389,13	389,13
120	33,33	0,0	0,00	1,2	462,87	462,87
124,8	34,67	0,0	0,00	1,2	500,84	500,84
130	36,11	0,0	0,00	1,2	543,31	543,31
140	38,89	0,0	0,00	1,2	630,18	630,18
150	41,67	0,0	0,00	1,2	723,5	723,50
160	44,44	0,0	0,00	1,2	822,88	822,88
170	47,22	0,0	0,00	1,2	929,05	929,05
180	50,00	0,0	0,00	1,2	1041,67	1041,67
190	52,78	0,0	0,00	1,2	1160,72	1160,72
200	55,56	0,0	0,00	1,2	1286,21	1286,21

Sonuç olarak, ıslak zemin koşullarında bile fiber optik altyapı ile tam otomatik fren sistemlerinin entegrasyonu, güvenli seyir için yüksek öneme sahiptir. Mobil altyapı ise bağlantı problemleri nedeniyle ek risk taşımakta olup, özellikle zorlu çevresel koşullarda sistem güvenliğinin sağlanmasında fiber optik altyapıya kıyasla daha elverişsizdir.

8.2 Araştırma Sorularının Cevapları

Giriş bölümünde de değinildiği gibi bu çalışma, kamera tabanlı olay algılama sistemlerinin, otomatik frenleme düzeneğiyle entegre edilmesi durumunda, elle frenlemeden kaynaklanan gecikmeleri ortadan kaldırdığı için, daha hızlı ve güvenilir fren tepki süresi sağlanabileceği hipotezine dayanmaktadır. Diğer taraftan da çalışma fiber optik altyapı kullanımıyla, parazit, zayıflama ve kesinti gibi sinyal iletimindeki problemlerle karşılaşma olasılıklarını neredeyse ortadan kaldırarak,

geçitlerdeki sinyalizasyon sisteminin erişilebilirliğinin arttırılabileceği ve veri aktarım hızınının yükseltilebileceği varsayımı üzerine inşa edilmiştir.

Bu çerçevede de aşağıdaki araştırma sorularına cevap aranmıştır:

1) Kamera tabanlı olay algılama sisteminden elde edilen bilgiler, otomatik frenleme sistemi ile entegre edildiğinde insan müdahalesine gerek kalmadan güvenli ve zamanında durdurma sağlanabilir mi?

2) Otomatik frenleme sisteminin, elle frenlemeye göre güvenlik ve tepki süresi açısından verimliliği nedir?

3) Fiber optik tabanlı bir veri iletim altyapısı, sinyalizasyon sistemlerinde erişilebilirlik ve veri hızı açısından ne tür üstünlük sağlar?

8.2.1 1.Araştırma sorusunun cevabı olarak "önerilen entegre sistem ile güvenli ve zamanında durdurma sağlanabilmesi" hususu:

Kamera tabanlı olay algılama sisteminin otomatik frenleme sistemi ile entegre edilmesi durumunda tren insan müdahalesine gerek kalmadan güvenli ve zamanında durabilir. Nitekim, bu çalışmanın 4. bölümünde, "4.2. Olay Algılama Kameraları" başlığında detaylandırıldığı üzere, olay algılama kameralarının sürücü destek sistemlerindeki kullanım alanları, teknik üstünlüğü ve uygulama imkânları kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bu çerçevede, olay algılama kameraları ile otomatik frenleme sisteminin entegre bir biçimde çalışması, güvenli ve zamanında durma hedefine ulaşma açısından son derece etkili bir çözüm sunmaktadır.

Olay algılama kameraları, yol koşullarındaki ani değişiklikleri, muhtemel engelleri veya çevresel tehditleri milisaniyeler içinde algılayabilmekte; bu sayede insan tepki süresine kıyasla çok daha hızlı ve güvenilir bir müdahale imkânı sağlamaktadır. Çalışmada yer verilen düşük güç tüketimi, yüksek dinamik aralık (HDR), düşük gecikme süresi ve eşzamansız veri iletimi gibi teknik özellikler, bu sistemlerin hızlı karar alma ve gerçek zamanlı uygulamalarda etkin şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

3. Senaryo ile, yer alan dikkati dağılmış bir makinistin fren tepki süresi verilmiştir. Bu senaryoda, olay algılamanın yapılamadığı varsayılmış ve makinistin engeli fark ederek tepki vermesi için gereken süre t_t = 4,0 saniye olarak kabul edilmiştir. Bu koşullar altında, tren hızının 163 km/sa'nın üzerine çıkması durumunda engelle

çarpışma gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, Tablo 8.6'de ise tepki süresi t_t =10,0 s olarak alınmıştır. Bu durumda ise 110 km/sa'in üstüne çıktığında çarpışmanın gerçekleşeği öngörülmüştür. Buna karşılık otomatik frenleme sisteminin devrede olduğu tam otomasyon senaryosu ele alınmıştır. Bu düzende insan müdahalesi tamamen ortadan kalktığından tepki süresi t_t = 0 olarak kabul edilmiştir. Bu sayede, sistem engeli algılar algılamaz frenlemeyi başlatmakta ve trenin hızı 176,5 km/sa'in üzerine çıkmadığı sürece çarpışmanın önüne geçilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu üç senaryo karşılaştırıldığında, otomatik frenleme sistemi sayesinde çarpışmasız duruş sağlanabilen hız sınırının anlamlı biçimde yükseldiği görülmektedir. Tepki süresinin 10 saniye olduğu durumda maksimum güvenli hız 110 km/s iken, otomatik sistemde bu sınır 176 km/s'ye çıkmaktadır. Bu da yaklaşık %60 oranında bir verimlilik artışına işaret etmektedir. Benzer şekilde, 4 saniyelik tepki süresi ile kıyaslandığında ise otomatik sistem, %7,98'lik bir iyileşme sağlamaktadır. Bu bulgular, insan kaynaklı gecikmelerin ortadan kaldırılmasıyla otomatik sistemin güvenlik açısından önemli bir üstünlük sunduğunu ortaya koymaktadır.

8.2.2 2. Araştırma sorusunun cevabı olarak "otomatik frenleme sisteminin, elle frenlemeye göre güvenlik ve tepki süresi açısından verimliliğinin ne olduğu" hususu:

Demiryolu taşımacılığında güvenliğin temel bileşenlerinden biri, trenin engellere karşı zamanında ve etkili şekilde durabilmesidir. Bu süreçte, tren sürücüsünün tepki süresi önemli bir rol oynar; zira tepki süresi boyunca tren, frenleme başlamadan hareket etmeye devam eder ve bu durum toplam güvenli durma mesafesini artırır. "7.2. İnsan Faktörü Olarak Tepki Süresi" başlığında da belirtildiği gibi, güvenli durma mesafesi tepki mesafesi ve frenleme mesafesinin toplamıdır (denklem 7.9). Tepki mesafesi, tren hızının tepki süresi ile çarpımıyla bulunur ve insan unsurundaki değişkenlikler nedeniyle bu süre 1,5 saniyeden 10 saniyeye kadar uzayabilir. Manuel frenleme senaryolarına dair hesaplamaların verildiği Tablo 8.4 ve Tablo 8.5, tepki süresindeki artışın güvenli durma mesafesinde nasıl çarpıcı bir artışa neden olduğunu açıkça göstermektedir. Tepki süresi 10 saniye olan makinist için 110 km/s hızda güvenli durma mesafesi 316,81 metre civarındayken, otomatik fren sisteminde (Tablo 8.8 ve Tablo 8.9) bu mesafe, tepki süresi sıfıra indiğinden

önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum, aynı hızda güvenli durma verimini yaklaşık %60 oranında iyileştiğini göstermektedir.

Ayrıca otomatik frenleme sistemleri, insan kaynaklı tepki gecikmelerini ortadan kaldırarak tepki süresini sıfıra indirir. Bu, yüksek hızlarda dahi trenlerin hayati mesafeler içinde güvenli şekilde durabilmesini sağlar. Otomatik fren sistemleriyle maksimum güvenli hız 176 km/s'ye kadar çıkarken, elle frenlemede bu sınır 110 km/s civarındadır. Bu, tren işletmeciliğinde hem güvenlik hem de verimlilik açısından önemli bir üstünlüktür.

8.2.3 3. Araştırma sorusunun cevabı olarak "fiber optik tabanlı bir veri iletim altyapısının, sinyalizasyon sistemlerinde erişilebilirlik ve veri hızı açısından ne tür üstünlük sağladığı" hususu:

Fiber optik tabanlı veri iletim altyapısı, sinyalizasyon sistemlerinde yüksek erişilebilirlik ve veri iletim hızı bakımından geleneksel iletim teknolojilerine kıyasla önemli üstünlükler sunmaktadır. "4.9. Fiber Optik Hat Yapısı" başlığı altında da detaylı olarak açıklandığı üzere, fiber optik kablolar, veriyi elektromanyetik sinyaller yerine ışık dalgaları aracılığıyla ilettiğinden, elektromanyetik girişimlere tamamen bağışıklık gösterir. Bu özellik, demiryolu gibi elektromanyetik parazit yoğunluğunun yüksek olduğu ortamlarda veri iletiminin sürekliliğini ve güvenilirliğini artırır. Ayrıca, direnç, haberleşmenin kararlılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu durum 6.1 denklemi,

$$SNR = 10\ x\ log10\frac{P_Sinyal}{P_Gürültü} \tag{6.1}$$

Formülüyle ifade edilmiş ve örnek hesaplamada fiber altyapının ortalama 70 dB, mobil sistemin ise 30 dB sinyal-gürültü oranına sahip olduğu görülmüştür. Hesapla, fiber optik sistemlerin mobil ağlara göre 10.000 kat daha az parazitten etkilendiği gösterilmiştir ki, bu elektromanyetik yoğunluğun yüksek olduğu demiryolu altyapılarında önemli bir üstünlüktür. "6.2. Fiber Optik Kablo Veri İletim Kapasitesi" başlığı altında bulunan veri iletim kapasitesi açısından da fiber sistemler büyük üstünlük sağlamaktadır. (6.2) numaralı Shannon-Hartley denklemi

$$C = BW\ .\ log_2(\ 1 + \frac{S}{N}\ ) \tag{6.2}$$

ile açıklanan kanal kapasitesi; fiber optik altyapısında yüksek bant genişliği ve düşük sinyal kaybı ile mobil ağlara kıyasla daha yüksek veri hızına imkân tanımaktadır.

Bu durum, örnek hesaplamayla 500 MB'lık bir verinin 10 saniyede iletildiği senaryoda, fiber sistemin 409.600 bit/s iletim kapasitesi sunduğunu göstermektedir (denklem 6.4).

Mobil sistemlerde bu değerin çok altında kalması, fiberin özellikle sinyalizasyon gibi yüksek hız gerektiren uygulamalarda daha uygun bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır.

Gecikme süresi bakımından, fiber optik altyapılar, mobil sistemlere göre çok daha düşük gecikme süresi sunar. "6.3. Gecikme Süresi" başlığındaki denklem 6.5

$$Gecikme\ Süresi\ (Delay) = \frac{Mesafe\ (m)}{Yayılım\ Hızı\ (\frac{m}{s})} \tag{6.5}$$

ile yapılan hesaplamada, 100 km uzunluğundaki bir fiber hat için gecikme süresi 0,5 milisaniye olarak bulunmuştur. Aynı mesafede mobil ağlarda bu sürenin onlarca milisaniyeye kadar çıkabildiği bilindiğinden, fiber sistemlerin zaman hassasiyeti yüksek olan tren hareket zamanlaması, geçit kontrolü ve acil durum sinyalizasyonu gibi alanlarda çok daha güvenilir çözümler sunduğu sonucuna varılmaktadır.

Erişilebilirlik bakımından da fiber optik altyapılar mobil ağlara göre açık üstünlük sağlamaktadır. (6.6) numaralı denklem

$$T_k = (1- E).\ 365.\ 24\ (sa) \tag{6.6}$$

kullanılarak yapılan hesaplamalarda, fiber optik altyapının yıllık kesinti süresi yalnızca 5,26 dakika, mobil sistemin ise yaklaşık 3,65 gün olduğu hesaplanmıştır. Bu fark, demiryolu gibi kesintisiz güvenlik ve kontrol gerektiren sistemlerde fiber optiğin tercih edilmesini bir bakıma artık zorunlu kılmaktadır.

Çevresel dayanıklılık açısından, fiber optik sistemlerin elektromanyetik parazitlerden etkilenmemesi ve çevresel koşullara karşı dirençli olması, mobil sistemlerin tünel, dağlık alan gibi kapsama sorunu yaşadığı bölgelerde ciddi bir üstünlük sağlamaktadır. Yol kaybı hesaplamasına dayanan (6.7) denklemine göre,

mobil sinyal 2 km mesafede yaklaşık 103,56 dB'lik bir zayıflama yaşarken, fiber sistemde bu tür mesafe kaynaklı kayıplar neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir.

Sonuç olarak; fiber optik altyapının sinyalizasyon sistemlerinde daha yüksek veri hızı, daha düşük gecikme süresi, daha güvenilir bağlantı ve çevresel koşullara karşı daha yüksek direnç sunduğunu sayısal olarak ortaya koymaktadır. Özellikle Tablo 8.3'de karşılaştırmalı olarak sunulan durum da bu üstünlüğü özetlemekte; fiber optik sistemin, gecikme, bant genişliği ve sinyal güvenliği açısından tüm teknik ölçütleri başarıyla sağladığını göstermektedir.

Mevcut koşullar altında, fiber optik altyapı; 3G ve 4G teknolojisine kıyasla çok daha yüksek veri iletim kapasitesi, düşük gecikme süresi, elektromanyetik parazitlere karşı dayanıklılık ve uzun mesafelerde kararlı bağlantı gibi üstünlükler sunmaktadır. Sabit altyapıya dayanması, kırsal alanlar da dahil olmak üzere geniş bir coğrafyada erişilebilirliği artırmaktadır. Elbette 5G teknolojisi, veri iletiminde önemli sıçramalar vadetmekte; daha düşük gecikme süresi, daha az parazitlenme ve daha yüksek kapasite gibi gelişmelerle bu farkı zamanla azaltabilir. Ancak 5G'nin bu potansiyele ulaşabilmesi için yine güçlü ve yaygın bir fiber optik omurga altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır

En başta belirtildiği üzere, Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS), hemzemin geçitlerdeki olay algılamalarını trenin geçide yaklaşık 500 metre kala gerçekleştirecek şekilde baliz yerleşimini esas almaktadır. Bu tezde geliştirilen temel yapı, bu mevcut standartla uyumlu biçimde oluşturulmuştur. Ancak seçenek bir senaryo olarak, fiber optik (F/O) altyapının sunduğu hızlı ve güvenilir veri iletim imkânından faydalanılarak, baliz sayısının artırılması ve bu balizlerin 750 m, 1000 m ve 1250 m gibi daha uzak mesafelere yerleştirilmesi önerilebilir. Bu senaryoda, hemzemin geçitte bariyer kapandıktan sonra meydana gelebilecek bir tehlike (örneğin araç sıkışması), olay algılama sistemince tespit edilir edilmez, bilgi en uzaktaki balize iletilir. Böylece tren henüz çok uzaktayken uyarılır ve otomatik frenleme sistemi devreye girerek güvenli duruş için gerekli mesafe sağlanmış olur. Bu yaklaşım, mevcut sistemle kıyaslandığında olaylara daha erken tepki verilmesini sağlayarak trenin durma kabiliyetini artırır. Dolayısıyla, bu tür bir genişletilmiş algılama senaryosu hemzemin geçitlerde kaza riskini daha da azaltma potansiyeline sahiptir.

9
SONUÇ

Bu çalışma, demiryolu sistemlerinde hem iletişim altyapısının güvenilirliğini artırmaya hem de tren uygulamalarının güvenliğini güçlendirmeye yönelik bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Özellikle kablolu iletişim altyapısının sunduğu yüksek erişilebilirlik, elektromanyetik bağışıklık ve veri güvenliği üstünlüğü, sinyalizasyon ve kontrol sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından büyük bir önem taşımaktadır. Fiber optik tabanlı kablolu sistemler, mobil iletişim çözümlerine kıyasla yıllık erişilebilirlik açısından gözle görülür bir üstünlük sağlayarak, önemli anlarda haberleşme kopukluklarının önüne geçmektedir. Nitekim fiber optik sistemlerin mobil ağlara kıyasla 10.000 kat daha az parazitten etkilendiğini ortaya koyan hesaplamalar ve yıllık kesinti süresinin yalnızca 5 dakika mertebesiyle sınırlı kaldığını gösteren erişilebilirlik analizleri, bu üstünlüğü nicel olarak da desteklemektedir. Bu durum, sistemin yalnızca teknik veriminin değil, aynı zamanda işletim sürekliliğini ve yolcu güvenliğini de doğrudan etkilemektedir.

Buna ek olarak, elle frenleme sistemlerinin otomatik çözümlerle desteklenmesi, insan hatasından kaynaklı gecikmeleri en aza indirerek, yüksek hızlı tren senaryolarında olası kazaların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda otomatik fren sistemlerinin, sensör verilerine dayalı hızlı tepki düzeneği sayesinde, tehlike anında milisaniyeler içinde frenleme başlatabilmesi güvenlik düzeyini önemli ölçüde artırmaktadır. 90 km/sa hızla seyreden bir trenin yalnızca 2 saniyelik tepki süresinde, 50 metre yol kat ettiği düşünüldüğünde, elle yapılan frenleme işlemi gecikmesinin ne denli riskli olabileceği daha açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada yer alan hesaplamalar ve analizler, fren sistemlerinin otomasyonuna yönelik yapılan teknolojik yatırımların, yalnızca güvenliği değil, aynı zamanda sistem bütünlüğünü de olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bunlara göre, tepki süresi neredeyse sıfırlanan otomatik sistemlerde maksimum güvenli hız sınırı 176 km/sa çıkarken, el ile yürütülen sistemlerde bu sınır 110 km/sa ile sınırlı

kalmaktadır. Bu fark, yaklaşık %60 düzeyinde bir verimlilik iyileşmesini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, kablolu iletişim altyapısının sağladığı teknik üstünlükler ile otomatik frenleme teknolojilerinin yüksek tepkiselliği bir arada değerlendirildiğinde, demiryolu taşımacılığında güvenlik ve süreklilik açısından yüksek verimli bir sistem mimarisine ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

Gelecekte farklı tren türleri, çevresel koşullar ve altyapı varyasyonları altında yapılacak saha testleriyle, sistemin uyarlanabilirliği ve ölçeklenebilirliği daha net şekilde ortaya konabilir. Gelecekte gerçekleştirilecek saha testleri, farklı tren konfigürasyonlarına ve çevresel koşullara uyarlanabilirlik konularında sistemin verimini daha kapsamlı biçimde ortaya koyacaktır. Bu doğrultuda geliştirilecek uygulamalar, modern demiryolu işletmeciliğinde sürdürülebilir ve entegre bir güvenlik yaklaşımının temel yapı taşlarını oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

a2techonogy. (n.d). *Raylı Ulaşım Video Analiz Sistemi*. 05 05, 2025 tarihinde a2-VCA Raylı Ulaşım Video Analiz Sistemi: https://a2technology.co/urunler/a2-vca/a2-vca-rayli-ulasim-video-analiz-sistemi/?utm_source adresinden alındı

Akbayır, Ö. (2016). Dünya'da ve Türkiye'de DemirYolu Kazaları Nedeniyle Meydana Gelen Ölüm Oranlarının Karşılaştırılması. *ISERSE* (s. 45-52). Demiryolları Mühendisliği Derneği.

Alamsyah, A. (2025). Smart train control and monitoring system with predictive maintenance and secure communications features. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* , (s. 31).

ALSTOM. (2020). *European Train Control System (ETCS)*. ASLTOM: https://www.globalrailwayreview.com/news/12064/bombardier-grows-its-global-ertms-portfolio/ adresinden alındı

Amin, S., Cárdenas, A. A., & Sastry , S. S. (2009). Safe and Secure Networked Control Systems under Denial-of-Service Attacks. *Hybrid Systems: Computation and Control (HSCC 2009), Lecture Notes in Computer Science* (s. 31-45). San Francisco, CA, USA: Springer.

andani, M. T., Mohammed, A., Jain, A., & Ahmadian, M. (2018). Application of LIDAR technology for rail surface monitoring and quality indexing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, (s. 1398-1406). doi:10.1177/0954409717727200

Azfar, T., Li, J., Yu, H., & Long Cheu, R. (2022). Deep Learning based Computer Vision Methods for Complex Traffic Environments Perception: A Review. IEEE. doi:10.48550/arXiv.2211.05120

Bildirici, C. (2016). Hemzemin Geçit Erken Uyarı Sistemi (HEGEUS). *Demiryolu Mühendisliği*, *3*, s. 70-74. İstanbul.

Binay, İ. (2013). Avrupa tren kontrol sisteminin (ETCS) Türkiye'deki demiryoluna uygulamasının incelenmesi. İstanbul: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bombardier. (2019). *Onboard ETCS Technology*. Bombardier: https://www.globalrailwayreview.com/news/12064/bombardier-grows-its-global-ertms-portfolio/ adresinden alındı

Brandli, C., Berner, R., Yang, M., Liu, S.-C., & Delbruck, T. (2014). A 240 × 180 130 dB 3 µs Latency Global Shutter Spatiotemporal Vision Sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* (s. 2333–2341). IEEE.

Cardenas, A. A., Amin, S., & Sastry, S. (2008). Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (s. 495–500). Beijing, China: IEEE.

Chen, D., Liu, Q., Fan, X., & He, Z. (2017). Distributed Fiber-Optic Acoustic Sensor With Enhanced Response Bandwidth and High Signal-to-Noise Ratio. *Journal of Lightwave Technology* (s. 2037 - 2043). IEEE.

Chen, H., Namura, A., Ishida, M., & Nakahara, T. (2016). Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness. *WEAR* (s. 303-309). ScienceDirect.

Cho, B.-K., Ryu, S.-H., Chyeol Hwang, H., Koh, S.-C., & Lee, D.-H. (2013). Intelligent Control System for Railway Level Crossing Safety. *Intelligent Systems and Applications*, (s. 123-135). Kore.

Curran, M., & Shirk , B. (2020). Basics of Fiber Optics. Fiber Systems, Inc. 05 11, 2025 tarihinde https://www.fibersystems.com/pdf/whitepapers/Basics-of-Fiber-Optics.pdf adresinden alındı

Çavdar, A., Uçar, M., & Kılıçaslan, İ. (2008). Trafik Kazalarına Sebep Olan Yüksek Hız Kusurlarının Denetimi ve Aktif Güvenlik Sistemleri İle Kontrolü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* (s. 187-198). Ankara: Gazi Üniversitesi.

Çekerek, E., & Demir, M. (2021). İstanbul Metrolarında Yolcu Konforunun Arttırılması: Sinyalizasyon Sistemi ile Otomatik Anons Kontrol Uygulaması. *Demiryolu Mühendisliği*, (s. 110-121).

Dandıl, E., & Demir, E. (2020). Gerçek Zamanlı Araç Hız Ölçümü ve Takip Sistemi Tasarımı. *Journal of the Institute of Science and Technology*, (s. 13-27).

Dilek, E., & Dener, M. (2023). Computer Vision Applications in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *23*, s. 6. Sensors. doi: https://doi.org/10.3390/s23062938

Ding, S., Zhang, M., Ou, Y., & Ma, L. (2023). Study on the Influence of Friction and Wear Properties of High-Speed Rail Brake Materials under Humidity Environment and Temperature Conditions. *Applied Sciences* (s. 1615). Basel, İsviçre: MDPI .

Du, C., Dutta, S., Kurup, P., Yu, T., & Wang, X. (2020). A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, (s. 303).

Dupuis, Y., Subirats, P., & Vasseur, P. (2016). A Survey of Vision-Based Traffic Monitoring of Road Intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (s. 1-18). IEE.

EC1. (n.d). *European Commision ETCS Levels and Modes*. Mobility and Transportaion: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en adresinden alındı

EC2. (n.d). *European Commision Subsystems and Constituents of the ERTMS*. European Commision : https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/subsystems-and-constituents-ertms_en?utm_source adresinden alındı

EKE Electronics. (2018). *EKE*. What is an ETCS-TIU?: https://www.eke-electronics.com/what-is-an-etcs-tiu/ adresinden alındı

ERA. (2015a). (2015, 12 17). *European Union Agency for Railways (ERA), Subset-036: FFFIS for Eurobalise (Version 3.1.0)*. 2025 tarihinde

https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index009_-_subset-036_v310.pdf adresinden alındı

ERA. (2015b). (2015, 12 17). *European Union Agency for Railways (ERA) Subset-036: FFFIS for Eurobalise (Version 3.1.0)*. https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index009_-_subset-036_v310.pdf adresinden alındı

ERA. (2015c). (2015, 12 17). *European Union Agency for Railways (ERA), Subset-036: FFFIS for Eurobalise (Version 3.1.0)*. (E. U. Railways, Prodüktör) 2025 tarihinde https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index009_-_subset-036_v310.pdf adresinden alındı

ETSI. (2020). *LTE; 5G; Mobile communication system for railways (3GPP TS 22.289 version 16.1.0 Release 16).* ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122289/16.01.00_60/ts_122289v160100p.pdf adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (2016, 05 13). *Subset-026-Chapter 3-System Requirements Specification*. European Union Agency for Railways: https://www.era.europa.eu/era-folder/archived-set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1 adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (2016, 05 13). *SUBSET-026-Chapter 8-System Requirements Specification*. European Union Agency for Railways: https://www.era.europa.eu/era-folder/archived-set-specifications-3-etcs-b3-r2-gsm-r-b1 adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (2016). *subset-034_v320*. Europen Union Agency for Railway: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index007_-_subset-034_v320.pdf adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (2021). *The European Rail Traffic Management System*. European Union Agency for Railways: https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (2024). *Report on Railway Safety and Interoperability in the EU.* ERA. 05 11, 2025 tarihinde

https://www.era.europa.eu/system/files/2024-06/Report%20on%20Railway%20Safety%20and%20Interoperability%20in%20the%20EU%202024.pdf adresinden alındı

European Union Agency for Railways (ERA). (n.d). *Subsystems and Constituents of the ERTMS*. Europen Union Agency for Railways. adresinden alındı

Falanga, A., Kleber, K., & Scaramuzza, D. (2020). Dynamic Obstacle Avoidance for Quadrotors with Event Cameras. *Science Robotics* (s. 1-8). American Association for the Advancement of Science (AAAS).

Federal Railroad Administration. (2005). *High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment.* Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation.

Fenta, M. C., Potter , D., & Szanyi , J. (2021). Fibre Optic Methods of Prospecting: A Comprehensive and Modern Branch of Geophysics. *Surveys in Geophysics* (s. 551-584). Almanya: Springer.

Gallego, G., Delbrück, T., Orchard, G., Bartolozzi, C., Taba, B., & Censi, A. (2022). Event-Based Vision: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (s. 154-180). IEEE.

Ghazali, M. F., Mohamad, H., Nasir , M., & Hamzh, A. (2024). State-of-The-Art application and challenges of optical fibre distributed acoustic sensing in civil engineering. *Optical Fiber Technology.* ScinceDirect.

Goldsmith, A. (2019). *Wireless Communications.* Draft of Second Edition.

Gökdemir, V. (2017, 07 06). *Demiryolu Balizlerin Durumu Takip Sistemi Tasarimi ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi.* 9lib: https://9lib.net/document/rz3e9ndq-demiryolu-balizlerinin-durum-takip-sistemi-tasarimi-ve-gerceklestirilmesi.html adresinden alındı

He, D., Zou, Z., & Chen, Y. (2021). Rail Transit Obstacle Detection Based on Improved CNN. IEEE (Dü.), *IEEE Transactions on Instrumentation and Measuremen* içinde, (s. 99). doi:10.1109/TIM.2021.3116315

Hitachi. (2021). *Digital Signalling and Onboard ETCS Solutions*. HITACHI: https://www.hitachirail.com/blog/2024/how-digital-signalling-technology-is-helping-to-better-connect-the-world/ adresinden alındı

HollySys. (t.y). *Balise Transmission Module (BTM) and Antenna*. (HollySys) 2025 tarihinde https://www.hollysys.com/products/transportation-intelligence/train-control-signalling-products/btm adresinden alındı

Hurtado-Hurtado, G., Luis , M.-V., Otremba, F., & Jáuregui-Correa , J. (2023). Railcar Dynamic Response during Braking Maneuvers Based on Frequency Analysis. *Applied Sciences*, s. 13(7).

IDT. (n.d). *ITU-T profiles for IEEE 1588.* Integrated Device Technology .

İnan, M., & Demir, M. (2017). Demiryolu Ulaşimi ve Türkiye'de Hizli Tren Yatirimlarinin Etkileri: Eskişehir-Konya Örneği. *Fırat Üniversitesi Sosyal bilimler dergisi* (s. 99-120). Elazığ: Fırat Üniversitesi.

Karayanık, S. (2016). Marmaray Sinyalizasyon Sistemleri. *Demiryolu Mühendisler Derneği Konferansı* (s. 71-77). Demiryolu Mühendisler Derneği.

Kaushik, G., Sharma, M., & Singh, B. (2014). Optical Fiber Communication: (Advantages and Disadvantages). *2024 IJIRT* (s. 1327-1330). IJIRT. 05 11, 2024 tarihinde https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT100684_PAPER.pdf adresinden alındı

Kbashi, H., & Hameed, M. (2008). Calculations of Signal to Noise Ratio (SNR) for Free Space Optical Communication Systems. *Baghdad Science Journal*, (s. 95-100). doi:10.21123/bsj.2008.5.1.95-100

Kesen, U., Sarıkaş , A., & Yayla , A. (tarih yok). Fiber Optik Haberleşmenin Akıllı Ulaşım Sistemlerindeki Yeri. *1. BANU AUS BANU-ITCS' 18* (s. 183-195). Bandırma 17 Eylül Üniversitesi.

Kıyıldı, R. K. (2022). İstatistiklerle ülkemizdeki açık hat demiryolu ulaşımındaki gelişmeler. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(4)*. Niğde, Türkiye: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi. doi:https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2533633

Lanner. (n.d). *Real-Time Obstacle Detection Over Railway Track with In-Train Edge AI Appliance*. 05 10, 2025 tarihinde lannerinc: https://www.lannerinc.com/applications/edge-ai/real-time-obstacle-detection-over-railway-track-with-in-train-edge-ai-appliance adresinden alındı

Lewis, R., Trummer , G., Six , K., Stow, J., Alturbeh, H., Bryce, B., . . . Buckley Johnstone , L. (2023). Leaves on the line: Characterising leaf based low adhesion on railway rails. *Wear. 520.* Elsevier.

Lichtsteiner, P., Posch, C., & Delbruck, T. (2008). A 128× 128 120 dB 15 µs Latency Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* (s. 566-576). IEEE.

Lichtsteiner, P., Posch, C., & Delbruck, T. (2008). A 128×128 120 dB 15 µs Latency Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor. *EEE Journal of Solid-State Circuits* (s. 566–576). IEEE.

Mahmud, K., Sahoo, A., Fernandez, E., Sanjeevikuma, P., & Holm-Nielsen, J. (2020). Computational Tools for Modeling and Analysis of Power Generation and Transmission Systems of the Smart Grid. *IEEE Systems Journal* (s. 3641 - 3652). IEE.

MEB. (2012). *Hemzemin Geçit Koruma Sistemleri Modülü.* Ankara: MEB.

MEB. (2013). *Raylı Sistemler Teknolojisi - Hemzemin Geçit Koruma* . Ankara: MEB.

MEB. (2014). *Tren Koruma ve Kontrol Sistemleri.* Ankara: MEB.

Miller, K. (2012, 01 09). *Calculating Optical Fiber Latency*. M2Optics: https://www.m2optics.com/blog/bid/70587/calculating-optical-fiber-latency adresinden alındı

Munyer, T., Brinkman, D., Zhong, X., Huang, C., & Konstantzos, I. (2022). Foreign Object Debris Detection for Airport Pavement Images based on Self-supervised Localization and Vision Transformer. Computer Vision and Pattern Recognition . doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.16901

Müdürlüğü, T. (2023). *2023 İstatistikleri.* TC Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü.

MyCarImport. (n.d). *Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) nedir?* 05 10, 2025 tarihinde mycarimport: https://tr.mycarimport.co.uk/kb/what-is-the-automatic-identification-system-ais/?utm_source adresinden alındı

Navtech. (n.d). *FOD Detection*. Copyright Navtech Radar 2025: https://navtechradar.com/problems-we-solve/security-solutions/fod-detection/?utm_source adresinden alındı

Orchard, G., Vasudev, A., Jayawant, A., Etienne-Cummings, R., & Thakor, N. (2015). Converting Static Image Datasets to Spiking Neuromorphic Datasets Using Saccades. *Frontiers in Neuroscience* (s. 1-9). Frontiers Media SA.

Pehlivan, M. (2014). Sakarya Kentiçi Ulaşım Sisteminde Sinyalize Kavşaklar İçin Trafik Uyarmali Bir Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi. İSTANBUL: Bahçeşehir Üniversitesi.

Posch, C., Matolin, D., & Wohlgenannt, R. (2011). A QVGA 143 dB dynamic range frame-free PWM image sensor with lossless pixel-level video compression and time-domain CDS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* (s. 259-275). IEEE.

Powered by RailSystem. (tarih yok). *Balise*. (railsystem.net) 2025 tarihinde https://railsystem.net/balise/ adresinden alındı

Powered by RailSystem. (t.y). *Balise*. (railsystem.net) 2025 tarihinde railsystem: https://railsystem.net/balise/ adresinden alındı

Radulović, S., Milković, D., Raković, M., Simić, G., & Kostić, A. (2022). Influence of the Head Wind on Determining Braking Performance of Zacns Tank Wagon. *Acta Polytechnica Hungarica. 19*, s. 6. Budapeşte, Macaristan: Budapest Tech Polytechnical Institution.

Rahman, F. U., Ahmed, M., Hasan, M., & Jahan, N. (2022). Real-Time Obstacle Detection Over Railway Track using Deep Neural Networks. *Procedia Computer Science*, *215*, s. 289-298.

Rail-Traction. (n.d). *Low Adhesion Explained*. rail-traction: https://www.rail-traction.com/what-is-low-adhesion/ adresinden alındı

Ramaswami, R., Sivarajan, K., & Sasaki, G. (2009). *OpticaL Networks.* USA: Morgan Kaufmann .

Relafos, D., Tuo, W., Lee, P., & Duan, H. (2025). *Design Rules, Structure, and Architecture of the LEU (Lineside Electronic Unit) in the European Train Control System (ETCS).* ResearchGate.

Rezgui, H. (2022). An Overview of Optical Fibers. *Global Journal of Science Frontier Research: A (Physics and Space Science)* (s. 14-20). Newyork: Global Journals.

Sağbaş, E. A., Peker, M., & Balli, S. (2017). A novel approach for transportation mode detection: Combining t-SNE manifold learning and support vector machines. *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP).* Malatya, Turkey: IEEE.

Saleh, B. E., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of Photonics.* USA: Wiley (John Wiley & Sons).

Saleh, B. E., & Teich, M. C. (2019). *Fundemantels Of Photonics.* USA: WILEY.

Sarıkoç, F. (2021). ETCS Seviye-1 Sisteminde Noktasal Hız Tespitine Dayanan Hemzemin Geçit Tasarımının. *Demiryolu Mühendisliği*, (s. 263-273).

Savronik. (nd). *Train Control and Management System*. Savronik: https:/www.savronik.com.tr/en/solutions/rail-transportation-systems/train-control-and-management-system/ adresinden alındı

Scarpati, J. (2021, 06 24). *How to calculate network bandwidth requirements*. TechTarget: https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/How-to-calculate-network-bandwidth-requirements adresinden alındı

Serway, Raymond , A., Jewett, & John , W. (2013). *Physics for Scientists and Engineers.* Boston: Brooks/Cole Cengage Learning.

Shan, J., Miccinesi, L., Beni, A., Pagnini, L., Cioncolini, A., & Pieraccini, M. (2025). A Review of Foreign Object Debris Detection on Airport Runways: Sensors and Algorithms. *17(2)*, s. 225. Remote Sensing. doi:https://doi.org/10.3390/rs17020225

Shangguan, W., Zang, Y., Wang, H., & Pecht, M. (2016). Board-level Lifetime Prediction for Power Board of Balise Transmission Module in High-speed Railways.

Shannon. (1948). A mathematical theory of communication. (s. 623–656). University of Illinois Press.

Siemens Mobility. (2022). *Next-Generation Train Control Systems*. Siemens Mobility: https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/digital-solutions-software/infrastructure/signaling-x/train2cloud.html adresinden alındı

Sun, Z., Yu , M., Wang, H., & Li, X. (2015). Effects of Traffic Cameras on Incident Management: Validation of Statistically Significant Effects Using Field Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (s. 17-24). Washington: Transportation Research Board of the National Academies.

Tan, P., Shi, Y., Zhang, X., Zhang, X., & Chen, Z. (2012). Design and Evaluation of Universal On-board Train Interface Unit. *2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering* (s. 1401-1404). Xi'an, China: IEEE.

Taştimur, C., Karakose, M., & Akın, E. (2017). Image Processing Based Level Crossing Detection and Foreign Objects Recognition Approach in Railways. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, *1.* doi:10.18100/ijamec.2017Special Issue30465

TCDD. (2023a). (2023). *2019-2023 İstatistik Yıllığı.* Ankara: TC Devlet Demir Yolları İşletmesi Genel Müdürlüğü.

Te Connectivity. (n.d). *Industrial Ethernet Switches with M12 Connectivity*. TE Connetctiviy: https://www.te.com/en/products/switches/industrial-ethernet-switches.html?utm_source=&tab=pgp-story adresinden alındı

Thales Group. (2023). *The Future of Railway Signalling*. Thales Group: https://www.thalesgroup.com/en/what-we-do-transportation/railsignalling adresinden alındı

The Contact Patch. (t.y). *Transport technology from the ground up*. 06 20, 2025 tarihinde The Contact Patch: https://www.thecontactpatch.com/rail/r0816-railway-braking adresinden alındı

Tunio, N., & Soomro, S. (2018). Real Time Tracking and Monitoring System for Train. *Gyancity Journal of Electronics and Computer Science*, (s. 39-44).

U.S Departmant of Transportaion. (2024). *Advanced Modeling of Wheel-Rail Friction Phenomena.* Washinton DC 20590: U.S Departmant of Transportaion.

UAB. (2021). *Demiryolu Hemzemin Geçitlerinde Alinacak Tedbirler Ve Uygulama Esaslarina Dair Yönetmelik*. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Ankara: https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/7.5.40076.pdf adresinden alındı

UAB. (2022). Hemzemin Geçit Yönetmeliği. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. Ankara. 05 11, 2025 tarihinde https://uhdgm.uab.gov.tr/uploads/pages/yonetmelikler/demiryolu-hemzemin-gecitlerinde-alinacak-tedbirler-ve-uygulama-esaslari-hakkinda-yonetmelik.pdf adresinden alındı

UIC. (2022). *Best practice for level crossing risk assessment.* UIC Safety Platform, Paris: UIC.

Wang, P., Li, W., Wang, X., & Chu, X. (2018). The Method of Train Positioning Based on Digital Track Map Matching. *MATEC Web of Conferences* , (s. 246).

Yardım, M. S. (2015). Karayolu Mühendisliğine Giriş (Basılmamış Ders Notları). İstanbul, Türkiye.

Ye, K., Jiao, J., Xu , Q., Chen , F., & Zhu, L. (2024). Modeling and Research on Railway Balise Transmission System for Underwater Debris. *MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)* (s. 1-20). Applied Sciences .

Yoon, S., & Cho, J. (2022). Deep Multimodal Detection in Reduced Visibility Using Thermal Depth Estimation for Autonomous Driving. *SENSORS MDPI. 22*, s. 14. MDPI. doi:https://doi.org/10.3390/s22145084

Zhao, H., Sun, S., & Li, W. (2010). Dynamic characteristics modelling and adaptability research of the balise transmission module in high speed

railways . *Computers in Railways XII* (s. 475-482). Chına: WIT Transactions on The Built Environment.

Zhao, J., Li, Y., Zhu, B., Deng, W., & Sun, B. (2020). Method and Applications of Lidar Modeling for Virtual Testing of Intelligent Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (s. 2990-3000). IEEE. doi:10.1109/TITS.2020.2978438

Zhu, A. Z., Yuan, L., Chaney, K., & Daniilidis, K. (2018). EV-FlowNet: Self-Supervised Optical Flow Estimation for Event-based Cameras. *Robotics: Science and Systems (RSS)* (s. 1-9). Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Robotics: Science and Systems Foundation.

Zhu, A., Yuan, Z., Chaney, K., & Daniilidis, K. (2018). Event-based Motion Segmentation with Spatio-Temporal Motion Surfaces. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)* (s. 1-9). Lake Tahoe, NV, USA: IEEE.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Conf-ITS'25 1. Akıllı Ulaşım Sistemleri Konferansı, Ankara, Türkiye, 16-17 Nisan 2025, ss.1-13, (Tam Metin Bildiri)