



**HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL  
SİSTEMLERİNDE FONKSİYONEL EMNİYET  
YÖNETİMİ VE HATA AĞACI ANALİZİ**

**Alper Buğra KOCAÖZ**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK**

**HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMLERİNDE  
FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ VE HATA AĞACI ANALİZİ**

**Alper Buğra KOCAÖZ**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK**

**KARABÜK  
Ocak 2021**

Alper Buğra KOCAÖZ tarafından hazırlanan “HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMLERİNDE FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ VE HATA AĞACI ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK

.....

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliğinde Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 19/01/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Okan ÜNAL ( KBÜ )

.....

Üye : Doç. Dr. Nuri ŞEN ( DÜ )

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Alper Buğra KOCAÖZ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMLERİNDE FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ VE HATA AĞACI ANALİZİ UYGULAMASI**

**Alper Buğra KOCAÖZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK**

**Ocak 2021, 104 sayfa**

Ulaşım sistemleri özelinde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin raylı sistemler taşımacılığına ilgisi her geçen gün artmaya devam etmektedir. Raylı sistemler taşımacılığının tercih edilme nedeni, daha kısa sürede daha fazla mesafeyi, emniyetli ve verimli olarak yapılmasına imkân sağlamasıdır.

Raylı sistemler teknolojisinin gelişimi ile önemi artan emniyet ve verimlilik kavramları raylı sistemler mühendislik disiplinlerinin bu konulara yönelmesine sebep olmuştur. Verimlilik; tren trafik kontrol sistemlerinin ve iletişim sistemlerinin gelişimi ile; emniyet ise fonksiyonel emniyetin gelişimi ile sonuçlanmıştır. Ülkemizde tren trafik kontrol sistemleri ve fonksiyonel emniyet çalışmaları yeni yeni gelişmektedirler. Aynı zamanda gelişen sistemler emniyet ve verimlilik sabit blok ile tren tespiti

sonrasında hareketli blok ile tren tespiti ile devam etmiştir. Hareketli blok trafik ve işletme verimliliğini artırmış ve ek riskler oluşturmuştur. Bu riskler emniyetli frenleme ve emniyetli tren ayırımı gibi fonksiyonların gelişimi ile çözülmüştür.

UNISIG, EN, IEEE kuruluşları bünyesinde üretici firmaların tecrübeleri ve işletmelerden elde ettiği veriler ile oluşturulan riskler referans alınarak hazırlanmış ve gelecekte yapılacak çalışmalar için bir rapor haline getirilmiştir.

Bu çalışmada, sinyalizasyon sistemlerinin gelişimi, haberleşme temelli tren kontrol sistemi, emniyetli frenleme ve hareketli blok, fonksiyonel emniyet hakkında literatürdeki çalışmalar ışığında uluslararası standartlar temelinde sistem mimarisi oluşturulmak suretiyle tehlike tanımlamaları yapılmış ve fonksiyonel emniyet süreçleri uygulanarak risk analizinin tatbiki için kullanılan yöntemler ele alınmıştır. Bu çalışmada risk değerlendirme ve hata ağacı analiz yöntemi kullanılarak, sistem mimarisi üzerinde oluşan riskler değerlendirilmiştir.

Hata ağacı analizi ile risklerin kontrolü için, sistem tasarımı yapılarak, oluşturulan tehlike kayıtlarıyla, “Bilinen emniyetli hız ve mesafesinin aşılması.” Tehlikesinin tepe olay olarak belirlenmesi sonrasında, risk sıklığı ve şiddeti belirlenerek, risk matrisi ile sonuç risk değerlendirmesi yapılarak, risk matrisi ile beklenen kabul edilebilir değerler tespit edilmiş, hata ağacı modeli üzerinde uygulanarak ve sistem modeli üzerinden matematiksel hesaplama ile tanımlanan tehlike ve ilişkilerini doğrulamayı içermektedir.

Bu çalışma bir raylı sistemler projesinin geliştirme aşamasında uygulanması gereken risk değerlendirme yöntemlerini içermektedir. Gerçekleştirilen hata ağacı analizi ile tehlikelerin en aza indirgenebileceğini ve projeyi devreye alma öncesinde, tehlikenin nasıl indirgenebileceği sorusuna uygulama gösterecektir.

**Anahtar Sözcükler** : Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemi, Fonksiyonel Emniyet, Risk Analizi, Hata Ağacı Analizi

**Bilim Kodu** : 91435

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

# **APPLICATION OF FUNCTIONAL SAFETY MANAGEMENT AND FAULT TREE ANALYSIS IN COMMUNICATION BASED TRAIN CONTROL SYSTEMS**

**Alper Bugra KOCAOZ**

**Karabuk University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Dr. Cihan MIZRAK**

**January 2021, 104 pages**

The interest of developed and developing countries in transportation systems in rail systems transportation continues to increase day by day. The reason why rail systems transportation is preferred is that it enables more distance in a shorter time, safe and efficient.

The concepts of safety and efficiency, which have become more important with the development of rail systems technology, have caused rail systems engineering disciplines to focus on these issues.

Productivity; with the development of train traffic control systems and communication systems; safety has resulted in the development of functional safety. Train traffic

control systems and functional safety studies are newly developing in our country. At the same time evolving systems safety and efficiency; After the train detection with the fixed block, it continued with the train detection with the moving block. The moving block increased traffic and operational efficiency and created additional risks. These risks have been solved with the development of functions such as safe braking and safe train separation.

UNISIG, EN, IEEE organizations have been prepared with reference to the experiences of the manufacturers and the data obtained from the enterprises, and it has been prepared as a report for future studies.

In this study, in the light of studies in the literature information about the development of signaling systems, communication-based train control system, safe braking and moving block, functional safety, system architecture was created within the framework of international standards, hazard definitions were made and methods used to perform risk analysis by applying functional safety processes were discussed. In this study, the risks on the system architecture are evaluated by using the risk assessment and fault tree analysis method.

For the control of risks with fault tree analysis, system design is developed, with the hazard records created, after determining the hazard of "exceeding the known safe speed and distance" as the top event, determining the risk frequency and frequency, making a final risk assessment with the risk matrix, and the expected tolerance with the risk matrix. This includes verifying the hazards and their relationships that can be determined, applied on the fault tree model and defined by mathematical calculation on the system model.

This study includes the risk assessment methods that should be applied during the development phase of a rail systems project. With the fault tree analysis performed, the hazards can be minimized and the project will show an application to the question of how to reduce the hazard before commissioning.



**Key Word** : Communication Based Train Control System, Functional Safety, Risk Analysis, Fault Tree Analysis

**Science Code** : 91435

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Cihan MIZRAK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalıőma kapsamındaki teknik bilgi, analiz ve düzenleme konularında yardımlarını esirgemeyen sayın Emine ŐEN, Kemal Faruk DOęAN, Can Berk GENÇER, Oęuzhan TUNA, Gülistan Tuęçe ALVALI ve Güłçin EREL dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi ve manevi her konuda, yardımlarını esirgemedен yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 3 .....	8
DEMİRYOLU TARİHÇESİ.....	8
3.1. SİNYALİZASYON SİSTEMLERİNİN TEMELİ VE GELİŞİMİ .....	8
BÖLÜM 4 .....	11
DEMİRYOLU SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ .....	11
4.1. SABİT VE HAREKETLİ BLOK.....	13
BÖLÜM 5 .....	14
HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİ.....	14
5.1. CBTC SİSTEM ÖZELLİKLERİ VE ÇALIŞMA SİSTEMİ.....	15
5.1.1. Hat Boyu Ekipmanlar .....	18
5.1.2. Araç Üstü Ekipmanlar .....	19
5.1.3. Veri İletişim Sistemi .....	20
5.2. CBTC SİSTEM KARAKTERİSTİĞİ .....	20

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.3. CBTC SİSTEM SINIFLANDIRMASI .....	21
5.4. ÇEŞİTLİ CBTC UYGULAMALARI .....	22
5.5. CBTC KONFIGÜRASYONLARI .....	22
<b>BÖLÜM 6 .....</b>	<b>23</b>
<b>CBTC FONKSİYONLARI VE GEREKSİNİMLERİ .....</b>	<b>23</b>
6.1. OTOMATİK TREN KORUMA (ATP) .....	25
6.1.1. Tren Konumu / Tren Hız Tespiti .....	26
6.1.1.1. CBTC Tren Konumu/Tren Hız Tespiti .....	27
6.1.1.2. İkincil Tren Konum Tespiti .....	27
6.1.2. Emniyetli Tren Ayırımı .....	28
6.1.3. Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi .....	29
6.1.4. Geri Kayma Koruması .....	30
6.1.5. Hat Sonu Koruması .....	30
6.1.6. Trenlerin Birleşmesi ve Ayrılmasından Kaynaklı Oluşan Ayrılmış Koruma .....	30
6.1.7. Sıfır Hız Algılama .....	31
6.1.8. Kapı Açma Kontrolü Koruma Kilitleri .....	31
6.1.9. Kalkış Kilitleri .....	32
6.1.10. Acil Durum Frenlemesi .....	32
6.1.11. Rota Kilitleme .....	33
6.1.11.1. CBTC'nin Ayrı Bir Anlaşman İle Arayüzü .....	34
6.1.11.2. CBTC Tren Konumu Arızalarına Verilen Yanıtlar .....	34
6.1.11.3. Makas İndikasyon Kaybına Tepki .....	35
6.1.12. Trafiğin Ters Yönde Anlaşmanı .....	35
6.1.13. Çalışma Bölgesi Koruma .....	35
6.1.14. Kırık Ray Tespiti .....	36
6.1.15. Hemzemin Geçit Uyarısı .....	36
6.1.16. Sınırlı Rota Korumaları .....	36
6.2. OTOMATİK TREN OPERASYONU (ATO) .....	37
6.2.1. Otomatik Hız Denetimi .....	37
6.2.2. Platform Yanaşma Kontrolü .....	37

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2.3. Kapı Kontrolü .....	38
6.3. OTOMATİK TREN DENETİMİ (ATS).....	38
6.3.1. ATS Kullanıcı Arayüzü .....	39
6.3.2. CBTC Tren Tanımlaması ve Tren Takibi.....	40
6.3.3. Tren Rotası.....	40
6.3.4. Otomatik Tren Denetimi.....	41
6.3.4.1. Program/İşletme Denetimi .....	41
6.3.4.2. Makas Yönetimi.....	42
6.3.4.3. Enerji Optimizasyonu .....	42
6.3.5. İstasyon Durma Fonksiyonları.....	42
6.3.5.1. Bir Sonraki İstasyonda Treni Durdurma.....	42
6.3.5.2. Treni İstasyonda Tutma .....	42
6.3.5.3. İstasyonda Durmayı Atlama .....	43
6.3.5.4. Kapı Kontrol Engelleme .....	43
6.3.6. Tren Operasyonları Kısıtlama .....	43
6.3.6.1. Tren Rotası Durdurma .....	43
6.3.6.2. Geçici Hız Kısıtlaması .....	44
6.3.6.3. Makas/Yol Engelleme.....	44
6.3.6.4. Çalışma Bölgesi .....	44
6.3.7. Yolcu Bilgi Sistemi Arayüzü.....	44
6.3.8. Hata Raporlama .....	45
6.3.8.1. CBTC Hata Raporlama .....	45
6.3.8.2. Tren Arıza Raporlama.....	45
6.3.9. Karşılıklı Çalışabilirlik Arayüz Gereksinimleri.....	45
BÖLÜM 7 .....	47
EMNİYETLİ FRENLEME .....	47
7.1. FREN VE EMNİYET .....	48
7.1.1. Fren ve Frenleme .....	48
7.1.2. Emniyet ve Emniyetli Frenleme .....	48
7.2. FREN SİSTEMLERİ UYGULAMALARI VE GEREKSİNİMLERİ .....	49
7.2.1. Servis Freni.....	49

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.2.2. Acil Durum Frenlemesi .....	50
7.3. FRENLEME SİSTEM GÖREVLERİ .....	51
7.4. EMNİYETLİ FRENLEME MESAFESİ .....	51
BÖLÜM 8 .....	53
FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ .....	53
8.1. FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ .....	53
8.2. SİSTEM YAŞAM DÖNGÜSÜ VE GÖREVLERİ .....	54
8.3. EMNİYET SÜRECİ – KUM SAATİ MODELİ .....	56
8.3.1. Risk Değerlendirme .....	58
8.3.1.1. Sistem Tanımlama .....	58
8.3.1.2. Risk Analizi .....	59
8.3.1.3. Risk Derecelendirme .....	62
8.3.2. Emniyet Gereksinimleri .....	65
8.3.2.1. Fonksiyonel Emniyet Gereksinimleri .....	65
8.3.2.2. Teknik Emniyet Gereksinimleri .....	65
8.3.2.3. Bağlamsal Emniyet Gereksinimleri .....	66
8.3.3. Emniyet Bütünlük Seviyesi (SIL) .....	66
8.3.3.1. Sistematik Arızalar .....	66
8.3.3.2. Rastgele Arızalar .....	66
8.3.4. Tehlike Kontrolü .....	67
8.3.4.1. Tehlike Analizi .....	67
8.3.4.2. Ortak Neden Analizi .....	69
8.3.4.3. Emniyet İspatı .....	69
BÖLÜM 9 .....	70
HATA AĞACI ANALİZİ (FTA) .....	70
9.1. DİYAGRAM .....	71
9.1.1. Kapı (G) .....	72
9.2. MATEMATİKSEL İFADELER .....	73
9.2.1. Arıza Süresi (t) .....	73
9.2.2. Güvenirlilik (R) .....	73

	<b><u>Sayfa</u></b>
9.2.3. Arıza Olasılığı (F).....	73
9.2.4. Arıza Oranı ( $\lambda$ ).....	74
9.2.4.1. Seri Sistem Yapılandırması (OR) .....	74
9.2.4.2. Paralel Sistem Yapılandırması (AND).....	75
9.2.5. Uygulama.....	76
BÖLÜM 10 .....	77
SADELEŞTİRİLMİŞ EMNİYET ANALİZİ.....	77
10.1. SİSTEM TANIMLAMA .....	77
10.2. ANALİZ 1 .....	79
10.2.1. Tehlike Tanımları ve Sonuçları .....	79
10.2.2. Risk Değerlendirme .....	80
10.2.3. Kabul Edilemez Tehlikeler İçin Risk Değerlendirmesi.....	80
10.2.4. Tehlike İçin FTA Analizi 1.....	83
10.2.5. Kapılar Listesi.....	83
10.2.6. Olaylar Listesi.....	84
10.2.7. FTA Analizi 1 ve Sonuçları.....	84
10.3. ANALİZ 2 .....	86
10.3.1. Tehlike Tanımları ve Sonuçları .....	86
10.3.2. Risk Değerlendirme .....	87
10.3.3. Kabul Edilemez Tehlikeler İçin Risk Değerlendirmesi.....	88
10.3.4. Tehlike İçin FTA Analizi 2.....	89
10.3.5. Kapılar Listesi.....	90
10.3.6. Olaylar Listesi.....	91
10.3.7. FTA Analizi 2 ve Sonuçları.....	91
10.4. SONUÇ .....	92
BÖLÜM 11 .....	94
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	94
KAYNAKÇA.....	98
ÖZGEÇMİŞ .....	103

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Railisa UIC Statics 2019 Demiryolu Haritası [2]. .....	1
Şekil 3.1. Blok gösterimi ve TMİ sistemi. ....	10
Şekil 4.1. Güncel sinyal sistemlerinde blok kavramı. ....	12
Şekil 4.2. Hareketli blok çalışma prensibi. ....	13
Şekil 5.1. Modern bir CBTC blok sisteminin tipik mimarisi. ....	15
Şekil 5.2. CBTC sistemi kapalı devre iletişimi [31]. ....	16
Şekil 5.3. Modern bir CBTC sistem mimarisi[32]. ....	17
Şekil 5.4. Fonksiyon ilişkileri temel gösterimi. ....	17
Şekil 5.5. CBTC Sistemi iletişim mimarisi [33]. ....	18
Şekil 5.6. CBTC Sistem sınıfı 3 fonksiyonel diyagram gösterimi [28]. ....	21
Şekil 6.1. CBTC ve ERTMS Sistem düzeyi mimari. ....	23
Şekil 6.2. CBTC Sistemi temel ekipmanları. ....	24
Şekil 6.3. CBTC Sistemi temel fonksiyonları. ....	25
Şekil 6.4. ATP fonksiyonları. ....	26
Şekil 7.1. Temel fren sistemi görevleri. ....	51
Şekil 8.1. IEC 61508 çatı standart gösterimi. ....	54
Şekil 8.2. Sistem Yaşam Döngüsü. ....	55
Şekil 8.3. Kum Saati Modeli [48]. ....	57
Şekil 9.1. (a) Örnek FTA Diyagramı ve (b) RBD – Güvenirlilik Blok Diyagramı. ....	72
Şekil 9.2. Seri sistem yapılandırması [57]. ....	74
Şekil 9.3. Paralel sistem yapılandırması [57]. ....	75
Şekil 9.4. Örnek FLA lojik şema ve boolean tekniği ile arıza oranı hesaplaması. ....	76
Şekil 10.1. Modern bir CBTC sistem mimarisi. ....	77
Şekil 10.2. FTA Analizi 1 modeli. ....	83
Şekil 10.3. FTA Analizi 2 modeli. ....	90



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Türkiye CBTC sistemi uygulamaları [8]. .....	4
Çizelge 2.2. Dünya CBTC sistem uygulamaları [8]. .....	4
Çizelge 5.1. CBTC sistem sınıfları ve tanımları. ....	21
Çizelge 7.1. Acil durum frenleme kategorisi [43]. ....	50
Çizelge 8.1. Şiddet tablosu [48]. .....	62
Çizelge 8.2. Sıklık tablosu [48]. ....	63
Çizelge 8.3. Risk kabul kategorileri [48]. ....	63
Çizelge 8.4. Risk kabul kategorileri [48]. ....	64
Çizelge 8.5. THR/SIL ilişkisi. ....	65
Çizelge 8.6. Risk değerlendirme teknikleri [51] .....	68
Çizelge 9.1. Kapı sembolleri ve anlamları. ....	72
Çizelge 9.2. Olay sembolleri ve anlamları. ....	73
Çizelge 10.1. Sistem özellikleri.* .....	78
Çizelge 10.2. Sistem tehlike kaydı. ....	79
Çizelge 10.3. Sistem risk değerlendirme. ....	80
Çizelge 10.4. Tolere edilemeyen tehlikeler için risk değerlendirmesi. ....	82
Çizelge 10.5. Kapı tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması. ....	84
Çizelge 10.6. Olay tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması. ....	84
Çizelge 10.7. Sistem tehlike tanımları ve sonuçları. ....	87
Çizelge 10.8 Sistem risk değerlendirme. ....	88
Çizelge 10.9. Tolere edilemeyen tehlikeler için risk değerlendirmesi. ....	89
Çizelge 10.10. Kapı tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması. ....	91
Çizelge 10.11 Olay tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması. ....	91

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- P : olasılık  
R : güvenilirlik  
F : arıza Olasılığı  
 $\lambda_{(t)}$  : arıza Oranı

### KISALTMALAR

- CBTC : Haberleşme Temelli Kontrol Sistemi  
RAMS : Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, Bakım Yapılabilirlik ve Emniyet  
EN : Avrupa Standart  
DIN : Alman Standartlar Enstitüsü  
IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu  
IEEE : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü  
TMI : Telsizle Merkezden İdare  
ERTMS : Avrupa Raylı Sistemler Trafik Kontrol Sistemi  
ATP : Otomatik Tren Koruma Sistemi  
ATO : Otomatik Tren Operasyon Sistemi  
ATS : Otomatik Tren Denetim Sistemi  
ATC : Otomatik Tren Kontrol Sistemi  
GOA : Otomasyon Seviyesi  
LMA : Hareket Yetkisi Sınırı  
IXL : Anlaşman  
WLAN : Kablosuz Yerel Alan Ağı  
GSM-R : Mobil iletişim için küresel sistem -Raylı Sistemler  
RAP : Risk Kabul Prensibinin Seçilmesi  
CoP : Tekniğin Bilinen Kuralları

RS : Referans Sistemler  
ERE : Doğrudan Risk Tahmini  
SIL : Emniyet Bütünlük Seviyesi  
FTA : Hata Ağacı Analizi  
FMEA : Hata Modları Etki Analizi  
THR : Tolere Edilebilir Tehlike Oranı  
RBD : Güvenirlilik Blok Diyagramı  
TEH : Tehlike  
PTC : Pozitif Tren Kontrolü  
UNISIG : ERTMS / ETCS teknik özelliklerini geliştirmek için endüstriyel konsorsiyum

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

1800’li yıllarda yük ve yolcu taşımacılığı ilkel yollar ile yapılmaktaydı [1]. Ağır yük taşıma sahalarında ilkel yollardan alınan verim gelişen ticaret ve maden sektörünün taleplerini yeteri kadar karşılamaz duruma getirmiştir. 1800’lü yıllardan günümüze kadar geçen tarihsel süreçte, insanlık makineleşme sanayisinde önemli adımlar atmıştır. Her atılan adım teknolojinin gelişimini hızlandırırken maden ve yük taşıma ihtiyacını da o oranda artırmaya devam etmiştir.

Başlangıçta telsiz-insan etkileşimi ile sağlanan trafik yönetimi, zamanla ve teknolojinin gelişmesi ile günümüzde bilgisayarlar ve kablosuz veri sağlayıcıları üzerinden gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Teknolojinin gelişimi ile sistemler gün geçtikçe sistem, alt sistemler, sistem birimleri, sistem alt birimleri şeklinde detaylanarak sınıflara ayrılmıştır. Dünya nüfusunun artışı, teknoloji ve sanayiinin gelişimi dünya çapında tüm ulaşım sektörlerinde ciddi bir artış ve trafiğe sebep olmuştur. Artan bu ihtiyaç yapılan yatırımların maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı, daha verimli kullanım talebini doğurmuştur. Güvenirlik, kullanılabilirlik, bakım yapılabilirlik ve emniyet terimlerinin oluşması ile demiryollarında trafik yönetim sistemlerinin temeli atılmıştır. Artan ihtiyaçlar sonrası gelişen raylı sistemlerde taşımacılık faaliyetleri 20. Yüzyıl başlarında trafik artışı sebebi ile trafik yönetim sistemleri ihtiyacını gündeme getirmiş ve sonrasında trafik yönetim sistemlerinin gelişimi ile bu süreç devam etmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Railis UIC Statics 2019 Demiryolu Haritası [2].

Sistemlerin detaylanması ve insan taşımacılığının artması ile emniyet ihtiyacı ön plana çıkmıştır. Temel sistemlerin gelişim aşamasında deneme yanılma yöntemi olarak adlandırabileceğimiz üret, kullan ve test et ile elde edilen deneyimler ile gelişimin sağlandığı görülürken, elde edilen tecrübeler ve ihtiyaçlar, emniyet kavramını ortaya çıkarmıştır.

21. yüzyılda güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım yapılabilirlik ve emniyet küresel olarak önemli ve vazgeçilmez hale gelmiştir. Önem kazanan bu kavramlar için raylı sistemler sektörü ve diğer sektörler her biri farklı gelişimler sergileyerek özel mühendislik alanlarını, bilim dallarını ve RAMS yönetimi kavramını oluşturmuştur. Operasyonel bağlamda ihtiyaç arttıkça, raylı sistemler organizasyonları düşük maliyet, emniyetli yolcu ve yük taşımacılığı, gelişen sistemlerin bakımları ve sistemin çalışır kalabilmesi için RAMS yönetimi, faaliyetlerini gerçekleştirmektedir.[3]

Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemi olan CBTC gelişen ihtiyaçları karşılayabilmek için geliştirilmiştir. Verim artışını diğer geleneksel sinyalizasyon sistemlerine oranla gerçekleştirmesinin başlıca sebebi hareketli blok teknolojisinden faydalanmasıdır [4]. Faydalandığı teknoloji ve araçların işletmede ve hat üzerinde daha sık mesafelerde var oldukları için sistemin emniyet gereksinimleri daha net olmakta ve önem arz etmektedir.

Bu tezde, CBTC Sisteminde emniyet-kritik bir fonksiyon olan, Otomatik Tren Koruma sisteminin denetim ve kontrolünde olan emniyetli hızın ve mesafenin aşılmaması fonksiyonunu incelemeyi amaçlamaktadır. Fonksiyonun emniyetli yani kabul edilebilir risk sınırları içerisinde olduğunu doğrulamak için farklı standart sistem yaklaşımlarını referans alarak tehlike kayıtlarının oluşturulması ve oluşturulan kayıtlar temel alınarak sadeleştirilmiş bir risk analizi yapılarak, hata ağacı metodu ile sistemin emniyetinin sağlandığı gösterilmiştir.

Risk Analiz süreci beş aşamaya bölünmüştür. Bunlar arayüzler dahil sistem tanımı; tehlike tanımı, risk değerlendirme; tolere edilemeyen tehlikeler ve kalan risk için gözden geçirme ve analizi oluşturmaktadır.

Aynı zamanda, ana bileşenleriyle ilgili bazı ilgili özellikleri vurgulayan bir CBTC sistemi için hata ağacı analizi uygulaması yapılmıştır. Demiryolu tarihçesi, demiryolu sinyalizasyon sistemleri haberleşme temelli tren kontrol sistemi, haberleşme temelli tren kontrol sistemi fonksiyonları ve gereksinimleri, emniyetli frenleme, fonksiyonel emniyet yönetimi ve hata ağacı analizi konularında bilgi ve deneyim sahibi olunmuştur.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde trenler birçok tren kontrol sistemi ile donatılmıştır. Her bir sistemi üretmek ve kullanmak son derece maliyetlidir ve araçta ciddi oranlarda yer kaplamaktadırlar. Örneğin, Avrupa ülkesinden diğer bir Avrupa ülkesine geçen bir tren, sınırı geçerken tren trafik kontrol standartlarını değiştirmelidir. Tüm bunlar seyahat süresine, işletme ve bakım maliyetlerini artırmaktadır [5].

Tren trafik kontrol sistemlerinin yaygınlaşması ile işletilebilirlik ihtiyaçlarının arttığı görülmektedir [6]. Avrupa'da yirmiden fazla tren kontrol sisteminin bulunması, uluslararası demiryolu taşımacılığının gelişmesinin önünde büyük bir engel oluşturmuştur. Bu nedenle, ortak bir Avrupa sisteminin oluşturulması ancak 1980'lerin sonlarına doğru hayata geçirilebilmiştir [7]. Bu girişim aynı zamanda güvenilirlik, kullanılabilirlik, bakım yapılabilirlik ve emniyet gibi kavramların gelişimi ile sonuçlanmıştır. Tecrübe ve mühendislik disiplinlerinin gelişimi güvenilirlik ihtiyacı artmıştır. Artan ihtiyaçlar ile gelişen sistemler risk analizi yapılarak, risk analizi için ise birbirinden farklı metotlar kullanılarak bu ihtiyaçlar karşılanmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın kapsamında son yıllarda ülkemizde ve dünyada yaygınlaşan bir tren trafik kontrol sistemi olan Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemi ile CBTC ve teknolojinin gelişiminin insan hayatı ve sistemlerin düzgün çalışabilirliğini artırabilme ihtiyacından doğan emniyet kavramı üzerinde olmuştur. Literatür taraması üzerinden CBTC sistemlerini kullanarak bir emniyet uygulaması olan risk analizi çalışması yapılmak suretiyle literatüre katkı sağlanmıştır.

CBTC Sistemlerini içeren Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 de ülkemizde ve dünyada bazı uygulamalar gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Türkiye CBTC sistemi uygulamaları [8].

<b>Konum / Sistem</b>	<b>Hat</b>	<b>Tedarikçi</b>	<b>Çözüm</b>	<b>Km</b>	<b>Alan Türü</b>	<b>Otomasyon Seviyesi</b>
İstanbul Metro	M4	Thales	SelTrac	21.7	Greenfield	
	M5	Bombardier	CityFLO 650	16.9	Greenfield	UTO
	M7	Bombardier	CityFLO 650	18.5	Greenfield	
Ankara Metro	M1	Ansaldo STS	CBTC	14.6	Brownfield	STO
	M2	Ansaldo STS	CBTC	16.5	Greenfield	STO
	M3	Ansaldo STS	CBTC	15.5	Greenfield	STO
	M4	Ansaldo STS	CBTC	9.2	Greenfield	STO

Çizelge 2.2. Dünya CBTC sistem uygulamaları [8].

<b>Konum/ Sistem</b>	<b>Tedarikçi</b>	<b>Çözüm</b>	<b>Km</b>	<b>Alan Türü</b>	<b>Otomasyon Seviyesi</b>
Shanghai Metro	Alstom	Urbalis	120	Greenfield	UTO ve STO
Nanjing Metro	Siemens	Trainguard MT CBTC	137	Greenfield	
Beijing Subway	Alstom	Urbalis	159	Brownfield ve Greenfield	STO ve DTO
Copenhagen S-Train	Siemens	Trainguard MT CBTC	170	Brownfield	STO
Shanghai Metro	Thales	SelTrac	238	Greenfield ve Brownfield	STO
London Underground	Thales	SelTrac	310	Brownfield	STO

Gençer'in 2020 yılında yaptığı "Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sisteminde Emniyetli Fren Modeli" adlı çalışmasında; ekonomik refah, yakıt maliyeti, trafik sıkışıklığı ve çevre sorunları sebeplerinin verimli toplu taşıma sistemlerine ihtiyaç oluşturduğu belirtilmiştir. Toplu taşıma pazarının ihtiyaçlarını karşılamak için hatların kapasitelerinin artırılması gereksinimi ile tren trafiğinin optimize edilmesi gerekliliğini vurgulanmıştır. Optimum trafik için Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemlerinde emniyetli frenleme modellemesi oluşturmuş, frenleme için etki eden



parametreler gösterilmiş ve MATLAB uygulaması yardımı ile model doğrulamıştır. İşletme verimliliğini artırmak için emniyet kavramı kuralları çerçevesinde parametrelerin en kötü koşullar yerine ortalama koşullar için uygun değerlerin baz alınarak işletme performansında önemli bir artış sağlanabileceği önerisinde bulunmuştur [9].

Barnatt ve Jack'in 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında, Büyük Britanya demiryolunda risk analizine yönelik mevcut yaklaşımın bir incelemesini sunuldu. Demiryolu, verimlilik elde etmek için sistemlerin birbirine bağlanmasına ve işletim süreçlerinin entegrasyonuna dayanan yeni işletim paradigmalarıyla sonuçlanacak bir modernizasyondan geçtiğinden bahsedildi. Modern demiryolu ortamında karmaşıklığın arttığı ve mevcut yöntemlerin modifikasyon veya destek olmadan hala uygun olup olmadığı sorusuna yol açtığı kabul edilmediğinden bahsetti. Sistem mühendisliğinden yararlanırken aynı zamanda önemli sistem risklerini yakalayan değiştirilmiş bir yaklaşım önerisinde bulunuldu [10].

Misumi ve Sato'nun 1999 yılında yaptıkları çalışmalarında; Emniyet Bütünlük Düzeylerine tahsis edilecek hedef arıza tedbirlerinden bahsetmişlerdir. Emniyet bütünlük düzeyleri için iki farklı mod tanımlaması yapılmıştır. Genel algoritmaların, gerçek sistemlerin gerçekliğini modellemeyi mümkün kılan olası parametreleri dahil ederek türetilmesi Emniyet Bütünlük Seviyelerinin tahsisi için gerekli olduğunun vurgusu yapılmıştır. Emniyet Bütünlük Seviyelerini ve çalışma modlarını oluşturmak için talep durumu, sahte talep durumu, tespitler arasındaki ortalama süre, başarısızlık ve arıza oranları ile ilgili yeni öneriler sunulmuştur. Emniyet Bütünlük Seviyelerinin tahsisi için çalışma modlarına ilişkin yeni tanımlar ve tehlikeli olay frekanslarının tahmin edilmesi için kısa yöntemler önerilmiştir.[11]

Carvajal-Carreño vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmalarında İletişim Tabanlı Tren Kontrol sistemleri ile işletilen metro hatlarında tren-ray etkileşiminden yararlanılarak trenin hareket yetki sınırları içerisinde kalması sağlanmıştır. Hareket yetkisi sınırları içerisinde kalması için hareketli bloklardan, frenleme ve çekiş sistemlerini tanımlayarak, bulanık algoritma mantığı ile hareket yetkisi sınırları içerisinde enerjini tüketimini azaltmak için öneri sunulmuştur [12].

Doğrugüven ve Üstoğlu 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında, sistematik arızaların önlenmesi ve kontrolünün yanı sıra rastgele arızaların kontrolünü de amaçlamışlardır. Rastgele hataların kabul edilebilir oranların altında kaldığını göstermek için kantitatif tehlike analizleri yapılmasını gerekliliğini ve Tolere edilebilir tehlike oranı THR'in önemi vurgulanmıştır. Demiryolu alt sistemleri ile birlikte Nicel tehlike oranları için yanlış yorumların olduğu tespit edildiği belirtilmiş ve farklı yaklaşımların sonuçlarını göstermek için kullanım senaryoları sunulmuştur. Anlaşman projesinde kazanılan deneyimler ile ilgili fonksiyonların emniyet bütünlük seviyesi(SIL) değerini araştırarak, görev profilleri açısından kritik sistemler için sakınca görülen noktalar tespit edilmiştir. [13].

Beugin vd.' nin 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında, raylı ulaşım sistemlerinde emniyet analizinin potansiyel olarak yıkıcı türdeki kazalar için elzem olduğundan bahsedilmiştir. Sistem emniyetlerini değerlendirmek için Emniyet Bütünlük Düzeyinin standart hale getirilmesi belirtilmiştir. Raylı ulaşım sistemlerinin karmaşıklığı ile karşı karşıya kalan mevcut SIL atama yöntemleri, emniyet değerlendirmesi görevi için yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Bir model ile hem işletim durumu konseptine hem de Monte Carlo simülasyonuna dayandırılarak yeni bir öneri sunulmuştur [14].

Domíngueza ve Fernández-Cardador 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında, demiryolu sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik stratejilerden biri olan verimli sürüşler yürütmenin gerekliliğinden bahsedilmiştir. Bu verimli sürüş, ticari çalışma sürelerini veya yolcu konforunu bozmadan minimum enerji tüketimi gerektiren hız profili olduğuna değinilmiştir. Otomatik Tren İşletim sistemleri üzerinde durularak, trafik düzenleme sistemi tarafından kullanılacak her hız profilinin ATO komutlarının kombinasyonunu optimize eden doğru modellerin geliştirilmesi gerekliliği ifade edilmiştir. Gerçek bir ATO sistemi ile bir trenin simülasyonuna dayalı tüketim / zaman Pareto cephesini elde etmek için bir MOPSO algoritması önerisi sunulmuştur.[15]

Hartonga vd.' nin 2018 yılında yapmış oldukları çalışmalarında Pozitif Tren Kontrolü (PTC) sistemlerinin, çarpışma veya raydan çıkma ile sonuçlanan kazaların ortadan kaldırılabileceğinden bahsedilmiştir. PTC uygulanacak sistemlerde, sistem

performansının risk analizinin ulusal otorite tarafından onaylanması gerekliliğinden bahsedilmiştir. PTC sisteminin gerekli karşılaştırmalı risk analizi için kritik arıza modları ve bunu kolaylaştıracak risk değerlendirme süreçlerini içermesi gerektiği belirtilmiştir. [16].

Huang vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmalarında, demiryolu tehlikeli ürün taşıma sistemini başarılı bir şekilde yönetmek için, önceden açık ve etkili bir kaza analizi ve kaza kontrol yaklaşımı gerekliliğinden bahsedilmiştir. Ulaştırma personelinin mesleki becerilerinin ve tutumlarının, lityum bataryalı demiryolu taşımacılığı kazasında en zayıf bileşen olduğu vurgulanmıştır. RDNGTS kaza analizinde mevcut olan belirsizlik modelleme ve bilgi füzyon problemlerini çözebilen RDNGTS kazasını analiz etmek için bir Hata Ağacı ve Bulanık D-S Kanıtı Dayalı Akıl Yürütme birleşik yaklaşımı önerilmiştir.[17]

## BÖLÜM 3

### DEMİRYOLU TARİHÇESİ

Demiryolları 1830'lu yıllardan itibaren önce İngiltere'de ardında da tüm dünyada kullanılmaya başlanmıştır. Sanayi devrimi sonrası madenlere duyulan ihtiyacın artması, üretilen ürünlerin uluslararası satışları ve yoğunluğu artırması, insanların şehirlerden şehirlere, ülkelerden ülkelere seyahat taleplerinin artması ile doğru orantılı olarak gelişimini sürdürmüştür.

Erken demiryolları teknolojisi 16. yüzyıl ortalarında, madenlerde ki kömürlerin yeryüzüne çıkartılması için ahşap raylar üzerinde taşınan vagonlar ile başlamıştı [18]. Demiryollarının bugün bildiğimiz haline gelme süreci ve madenlerden yeryüzüne çıkma süreci, 17. yüzyılın başlarında Liverpool yakınlarında ki Prescott'da inşa edilen ahşap raylı, at ile çekiş gücü sağlanan bir tramvay olduğu düşünülmektedir [19].

Demiryolları kullanımının artması ve görünür hale gelmesi ile 18. YY sonlarında İskoçya'da Clackmannanshire kömür madenlerinden Alloa Lima'nına ahşap travers ve raylar yerine beton travers ve İsveç demirinin tercih edilmesi, bugün kullanılan demiryolu alt yapısının temellerinin atılmasına öncülük etmiştir. [20].

#### 3.1. SİNYALİZASYON SİSTEMLERİNİN TEMELİ VE GELİŞİMİ

On dokuzuncu yüzyılın ortalarında telgrafın tanıtımı, bilginin elektriksel olarak hatırı sayılır bir mesafeden taşınabileceğini göstermiştir [21]. Bilginin elektriksel olarak uzun mesafeler boyunca taşınabilmesi demiryolu sinyallerini elektriksel olarak kontrol etme yöntemlerinin araştırılmasını da bir taraftan teşvik etmiştir.

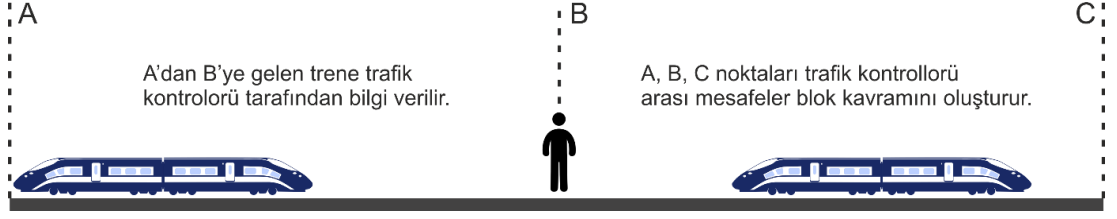
İlerleyen yıllarda, makine ve elektrik kullanımının yaygınlaşması ile paralel olarak, raylı sistemlerin üzerinde uygulanması ve mevcut hatlar üzerinde seferlerin artması ile

demiryollarında trafik problemini meydana getirmiştir. Günümüzde dahi bazı bölgelerde kullanılmakta olan bir istasyondan trenin çıkması için öndeki trenin istasyona varması ve o istasyon sınırlarını geçmesi gerekmektedir. Bu problemin temel sebebi trenin konumunun tam olarak tespit edilememesinden kaynaklanmaktaydı. Tren konumunu tespit etmek için günümüzde ray devresi olarak adlandırılan tren konum tespit sistemleri geliştirildi.

Ray Devresi, tren tekerlerinin iki rayı kısa devre etmesi sonucunda trenin varlığını ray meşguliyeti ile tespit eden sistemlerdir [22]. Ray devrelerinin ilk kullanımı William Robert Sykes tarafından 1864'te Brixton'daki London Chatham ve Dover Demiryolunun kısa bir bölümünde yapıldı [23]. İlk ray devrelerinin kullanımı ile meydana gelen problemler sonucu bugün dahi birçok gelişen sistemde ortaya çıkan güvenilirlik ihtiyacını karşılayan emniyet kavramı ortaya çıkmış oldu..

Ray devrelerin de oluşan bir dizi aksaklıklar sebebiyle hatada emniyet kavramı ortaya çıkmıştır. Bu durum sinyalizasyon sistemlerinde ilk ve vazgeçilmez kriter olarak, sistem veya alt sistemlerinde, oluşacak tehlike ve hataları kabul edilebilir düzeye getirmek olmuştur.[24]

Hatada emniyetli ray devresi, 1872'de Amerikalı bir elektrik ve makine mühendisi olan William Robinson tarafından icat edildi. Blok meşguliyet tespiti için güvenilir bir yöntem sunması, evrensel kullanımda olan otomatik sinyalizasyon sistemlerinin geliştirilmesinin temelini oluşturdu. Ray devresinin icadı ile günümüz demiryollarında ki blok kavramı oluşturulmuştur [25]. Bugün ki kullanılan sinyalizasyon sistemlerinin temeli olan sabit bloklar 19. yy sonlarından bu yana kullanılmaktadır. İlkel sistemde kullanılan blok, ray devresi icadından önce iki istasyon veya insanların haberleşmesi ile sağlanabilecek emniyetli olarak tren hareketi için izin verilen alanlardır. Ray devresi icadından sonra blok, bir trenin emniyetli şekilde seyir edebileceği iki ray devresi arasında ki frenleme ile emniyet sınırları çerçevesinde durabileceği alanı kapsamaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Blok gösterimi ve TMI sistemi.

Hatada emniyeti ray devreleri ve bu devrelerin oluşturduğu sabit blok teknolojisi ile birçok farklı sistem ve bu sistemlere bağlı alt sistemler geliştirilmiştir. 21. yüzyılda raylı sistemlerde sinyalizasyon sistemlerinde ERTMS, CBTC gibi farklı trafik sistemleri küreselleşmiş olarak kullanılmaktadır. Otomasyon sistemlerinin gelişmesiyle birlikte ATP, ATO, ATS, ATC gibi birçok farklı alt sistemin ilavesi de mümkün hale gelmiştir.

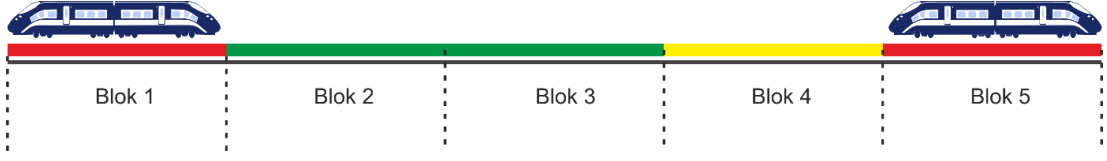
## BÖLÜM 4

### DEMİRYOLU SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ

Demiryollarının ticari olarak hayatın içine dahil olmasıyla trafik kavramından bahsedilmeye başlanmıştır. Trenler bir servis niteliği taşımaktan ileriye geçerek, uzun mesafe yolcu ve yük taşımacılığında tercih edilir hale gelmesi, trafik yönetiminin ön plana çıkmasına olanak sağlamıştır.

İlk zamanlar mevcut trenlerin ilerleme hızlarının düşük olması, trenlerin görüş alanlarından hattın meşgul olup olmadığına dair yeterli bilgi sunmaktaydı. Aynı hatta ki tren sayısının artması, çift yönlü trafiğin yoğunlaşması ile birlikte hız limitlerinin de yükselmesi, bir takım engellenemeyen kazaları meydana getirmiştir. Trafik problemine getirilen ilk çözüm belirli aralıklarla bir sonraki aralıkta tren olup olmadığını makiniste bildiren personeller konumlandırılmıştır. Bu aynı zamanda gelecekteki sinyal sistemlerinde, blok kavramının oluşumuna zemin hazırlamıştır.

Belirli aralıklarla personel bulundurmanın işgücü ve maliyet açısından problem teşkil etmesi yeni çözümler aranmasına ortam hazırlamıştır. Öncelikle blok mantığı korunarak sabit personel bulundurabilmek amacıyla iki istasyon arasına ara duraklar yapılmıştır. Yapılan ara durakların ticari ve ekonomik gelişimine katkı sağlamasıyla, bu duraklar maden vb. noktalara odaklanmıştır. Ara istasyonlar da sabit personel bulundurarak, A istasyonundan B istasyonuna seyir eden tren B istasyonuna geldiğinde yetkili personelin izni ve bilgilendirmesi ile B istasyonundan C istasyonuna doğru seyrine devam edebilmiştir. Uygulanan bu çözüm büyüyen istasyonlarda bilgilendirme ve yönlendirmeyi kolaylaştırabilmek adına yeni arayışlar doğurmuştur. Güncel sinyal sistemlerinde kullanılan blok kavramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Güncel sinyal sistemlerinde blok kavramı.

Ray üzerinde hareket eden raylı araçlar bir ya da daha fazla ana hat üzerinde kontrol edilebilen, emniyet ilke ve kurallarına uygun olarak bir akış içerisinde dirler. Ancak emniyet ilke ve kurallarını yetkisi ve kabiliyeti oranında ihlal eden bir tren ya da araç trafik alanı dışındadır. Bu noktadan hareketle, Tren trafiği kavramını “Demiryolu araçlarının demiryolu üzerindeki hareketleridir.” şeklinde tanımlamak doğru olacaktır. Güncel gelişmeler, mekanik sinyal sistemlerini oluşturmuş ve daha sonrasında elektromekanik sinyal sistemleri ve teknolojinin gelişmesiyle iç kilitleme sistemleri olarak tanımlanan anlaşılan kavramını ve trafik yönetim sistemlerinin oluşturulmasını sağlamıştır.

Trenlerin emniyetli bir şekilde işletilebilmesi için verimlilik artışı sağlayabilmek adına, sabit blok kavramı oluşturulmuştur. Oluşan blok kavramı uygulandığı hat üzerinde işletilen trenlerin maksimum hız ve tren uzunluğu temel alınarak, trenlerin hareket halinden hareketsiz duruma geçiş yaptığı mesafe baz alınarak blok mesafeleri belirlenmiştir. Hatta ki trafik artışı ile uygulanan blok mesafelerinin ve kapasite artışı için daha iyi frenleme sistemleri geliştirilmesi gerekliliği doğurmuştur.

Birleşik Krallık'ta, 1889 Demiryolları Yönetmeliği Yasası, o yıllarda gerçekleşen Armagh demiryolu kazasının doğrudan bir sonucu olarak blokların trenlere kilitli olarak ayrılması ve diğer istenen emniyet önlemlerinin uygulanması gibi bir çok konuyu etkisi altına almıştı [26].

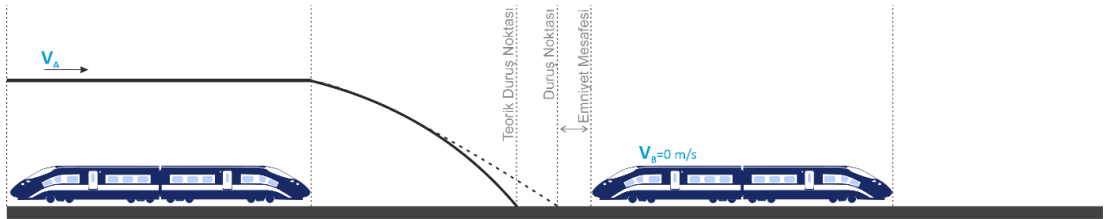
Gelişen sistemler ile demiryolları birçok araç üstü ve hat boyu sistemlere sahip olmuştur. Hat boyu sistemleri demiryolu trafiğini yönetmek ve yolları birbirinde ayırmak için kullanılan ve araç ile haberleşmeyi sağlayan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistem ile makas, sinyal, levhalar, magnetler ve ray devresi aracılığı ile araç ve istasyon haberleşmesi sağlanmaktadır.



Demiryolu sinyal sistemlerinin temeli olan blok sistemi teknolojinin gelişmesi ile sabit blok ve hareketli(sanal) bloklar ile iki farklı kavram olarak anılmaya başlanmıştır. Sabit blok, ray devrelerinin fiziksel olarak rayları sabit olarak bölmesini ifade etmektedir. Blok mesafesi işletmenin o hatta kullandığı maksimum yük, maksimum hız ve arazi yapısına göre belirlenmektedir.

#### 4.1. SABİT VE HAREKETLİ BLOK

Temel sinyalizasyon sistemi sabit blok olarak adlandıracağımız, hat üzerinde işletmenin maksimum hızlarına uygun olarak emniyetli frenleme mesafesi belirlenmesi ile blok olarak adlandırdığımız aralıkların uzunluklarını belirlemektedir. Bu durum emniyetli bir trafik yönetimini sağlarken, diğer taraftan artan istekler ve ihtiyaçlarda yetersiz kalabilmektedir. Örneğin bu sistem otomatik sürüş, işletme sefer/dakika artırılma ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. Mevcut bulunan işletme hat kapasitesini, işletme hızını artırabilmek için yüksek çözünürlükte tren konumuna ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç nispetinde trenlerin konumunun anlık olarak belirlenmesi, hız doğrulaması ve emniyetli duruş mesafesinin hesaplamasını gerektirmektedir. Yüksek çözünürlükte konum belirlenmesi sabit blokları ortadan kaldırarak, hareketli blokların var olmasını sağlamıştır. Burada hareketli bloklardan kasıt, bir trenin önde ki tren ile arasında emniyetli duruş mesafesini koruyarak, araç üstü, hat boyu ekipman koordinasyonları yardımıyla önde ki aracın konumunu bilmesi ve emniyetli duruş mesafesini koruyarak hareket etmesidir.



Şekil 4.2. Hareketli blok çalışma prensibi.

Şekil 4.1’de gösterilen sabit blok yapısı ile,Şekil 4.2’de gösterilen hareketli blok yapısı arasında ki farklılık, hareketli bloklarda duruş mesafelerinin emniyet çerçevesinde belirlenmesi ile anlık olarak bildirilmesidir.

## BÖLÜM 5

### HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİ

Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemi, araç üstü ve hat boyu ekipmanlar ile çift yönlü iletişim temelli bir sinyalizasyon sistemi olup CBTC olarak adlandırılmaktadır.

Tren sinyalizasyon sistemlerinin, talep ve trafik kapasitesindeki artışı emniyetli bir şekilde karşılayacak şekilde gelişmesi ve adapte olması gerekmektedir. Haberleşme Temelli Tren Kontrol (CBTC) sisteminin temel amacı, hat boyunca seyahat eden trenler arasındaki zaman aralığı ve yaklaşma mesafesini emniyetli bir şekilde azaltarak kapasiteyi artırmaktır. CBTC Sistemi, özellikle tren kontrolü ve trafik yönetimi için demiryolu hattı ekipmanları ile tren arasındaki iletişimlerini kullanır. Bir trenin tam konumu, geleneksel sinyalizasyon sistemlerine göre daha doğru bilindiğinden, demiryolu trafiğini daha verimli ve emniyetli bir şekilde yönetilebilmektedir.

Bir CBTC sistemi, temel sinyalizasyon sistemlerinde geleneksel olarak kullanılan sabit blok prensibi yerine hareketli blok prensibini kullanır. Bu sebeple tren algılama ekipmanlarından bağımsız olarak anlık ve yüksek çözünürlüklü tren konum algılama özelliğine sahiptir. Sahip olduğu bu özellik sistem emniyeti, verimli hat işletimi, riskleri aza indirme, hataları tolere edilebilir değerlere indirmek anlamına gelmektedir. CBTC sistemi, trafik yönetimi ve altyapı kontrolü için tren ve hat boyu arasındaki telekomünikasyondan yararlanan bir demiryolu sinyalizasyon sistemidir [27].

IEEE 1474-1 standardında tanımlandığı gibi, bir CBTC sistemi, "ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlüklü tren konumu belirleyebilen sürekli, otomatik tren kontrol sistemidir. Sürekli olarak yüksek kapasiteli, çift yönlü tren-yol kenarı veri iletişimi ve otomatik tren koruma (ATP) işlevlerinin yanı sıra isteğe bağlı otomatik

tren işletimi (ATO) ve otomatik tren denetimi (ATS) işlevlerini uygulayabilen tren ve yol kenarı işlemcilerine de sahiptir.” [28].

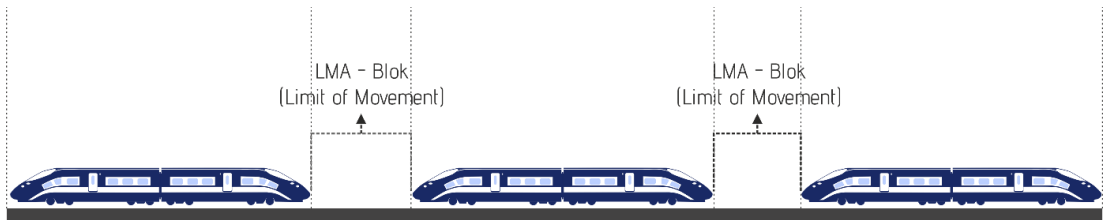
CBTC sistemi, aşağıdaki fonksiyonları gerçekleştirmek için birbiri ile etkileşim içerisinde çalışan bir dizi alt sistemlere bölünebilir. Bu fonksiyonlar [29];

- a) Sistem emniyetini iyileştirmek,
- b) Hat işletme/kapasite verimini artırmak,
- c) Tehlike/Risk durumunu önlemek şeklindedir.

## 5.1. CBTC SİSTEM ÖZELLİKLERİ VE ÇALIŞMA SİSTEMİ

Bir CBTC sisteminin sahip olacağı başlıca temel özellikleri; ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlük tren konum tespiti, hayati fonksiyonları yerine getiren araç üstü ve hat boyu işlemciler ve sürekli, yüksek kapasiteli, çift yönlü araç üstü-hat boyu veri iletişimidir.

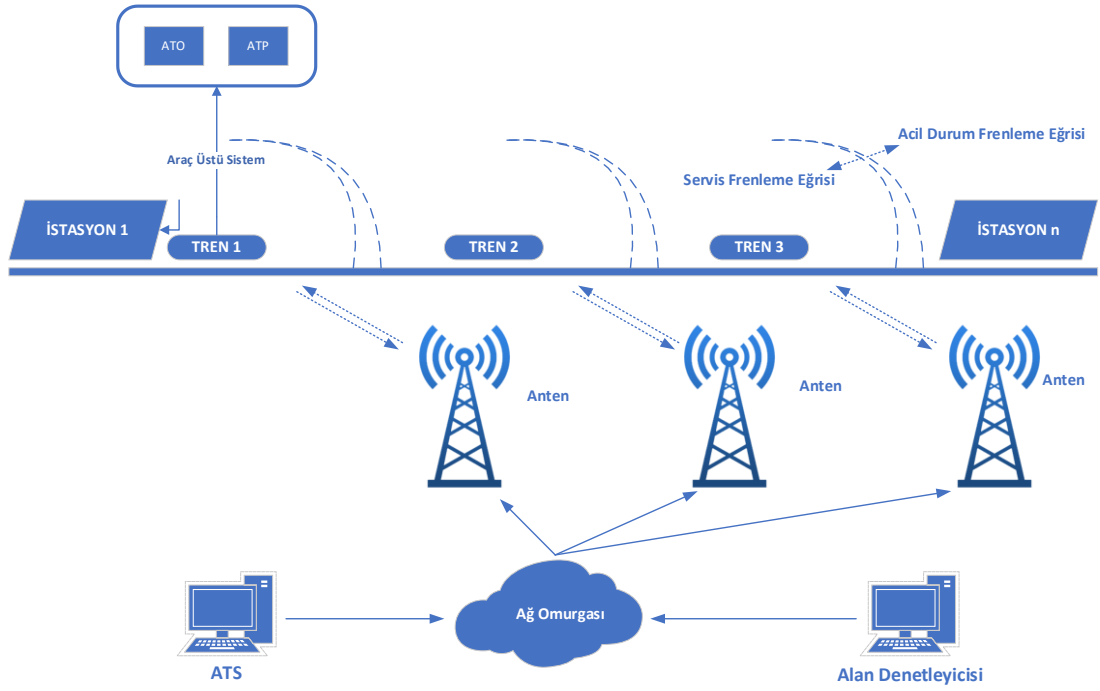
CBTC sisteminde, yüksek konum çözünürlüğü ile hareketli blok sisteminde trenler araç üstü ekipmanlar ile belirlenen sanal blok mesafeleri ile birbirini takip eder. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, frenleme eğrisinin anlık olarak hesaplanması ile bir diğer treni takip edebilir. Hareketli blok sistemi CBTC özelliklerinin temelinde yer almaktadır. Blok mesafesi emniyetli bir şekilde kısaltılması işletme de sefer/dakika ile ters orantılı olarak sefer sıklığını artıracaktır [30].



Şekil 5.1. Modern bir CBTC blok sisteminin tipik mimarisi.

CBTC sisteminde blok sisteminde sürekli olarak trenler tarafından tren konumu belirlenir ve frenleme eğrisi hesaplanır. Frenleme eğrisi BÖLÜM 7’de tanımlanmıştır. Hesaplama sonucunda oluşturulan sonuçlar tren tarafından hat boyu ekipmanına

iletilir. Sonuçların iletilmesi ile hat boyunca ki donanımların her biri otoritenin belirlemiş olduğu hareket sınırı (LMA-Limit of movement authority olarak adlandırılmaktadır.) olarak adlandırılan korumalı (blok) alanları oluşturabilir (Şekil 5.1 ). Ek olarak, CBTC sistemleri tren kontrolünün güvenirligi artırmak için tren ile kontrol merkezi arasında kapalı devre iletişim tabanlı haberleşme kullanır. Kapalı devre iletişim sistemi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

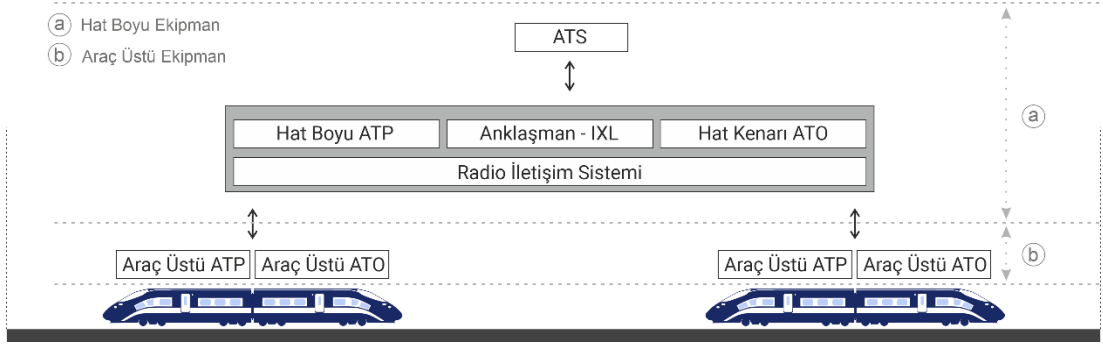


Şekil 5.2. CBTC sistemi kapalı devre iletişimi [31].

CBTC sistemleri bir diğer adıyla haberleşme temelli iletişim sistemleri olarak adlandırılabilir.

Bir CBTC sistemi, Şekil 5.3’de gösterildiği gibi aşağıdaki ana alt sistemleri içermelidir [31];

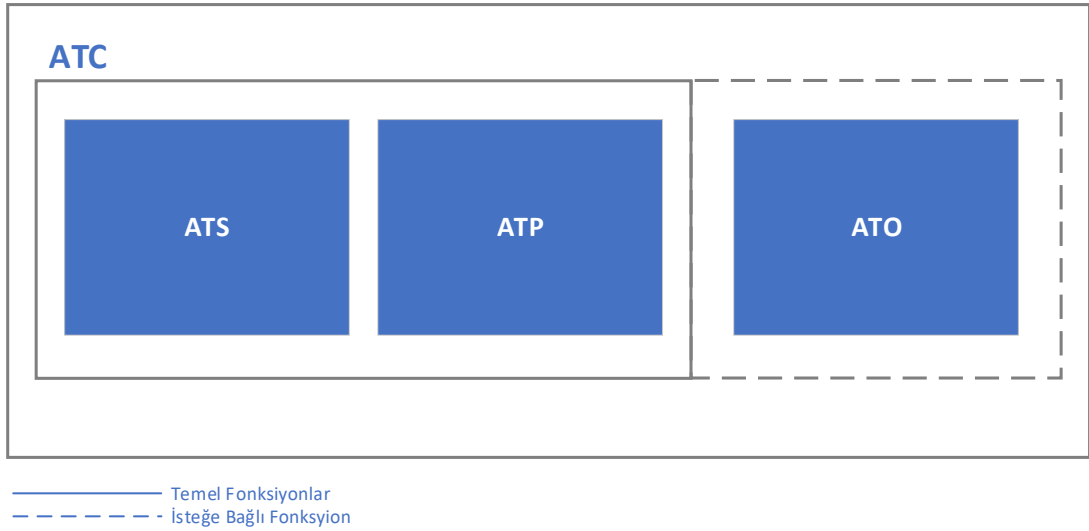
- CBTC ATS ekipmanı,
- CBTC hat boyu ekipmanı,
- CBTC araç üstü ekipman,
- CBTC veri iletişim ekipmanı.



Şekil 5.3. Modern bir CBTC sistem mimarisi[32].

CBTC sistemi, Otomatik Tren Koruma(ATP), Otomatik Tren Operasyonu(ATO), Otomatik Tren Denetimi(ATS) gibi farklı fonksiyonlar sağlayan bir den fazla alt sistemlere sahiptir. CBTC sistemi ATO fonksiyonuna sahip olduğunda, kullanılan alt sistemlerin sağladığı fonksiyonlar ile emniyetli, güvenilir ve ekonomik işletmeler oluşturularak hat verimliliği artacaktır. CBTC fonksiyonları bağlantıları Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

## CBTC

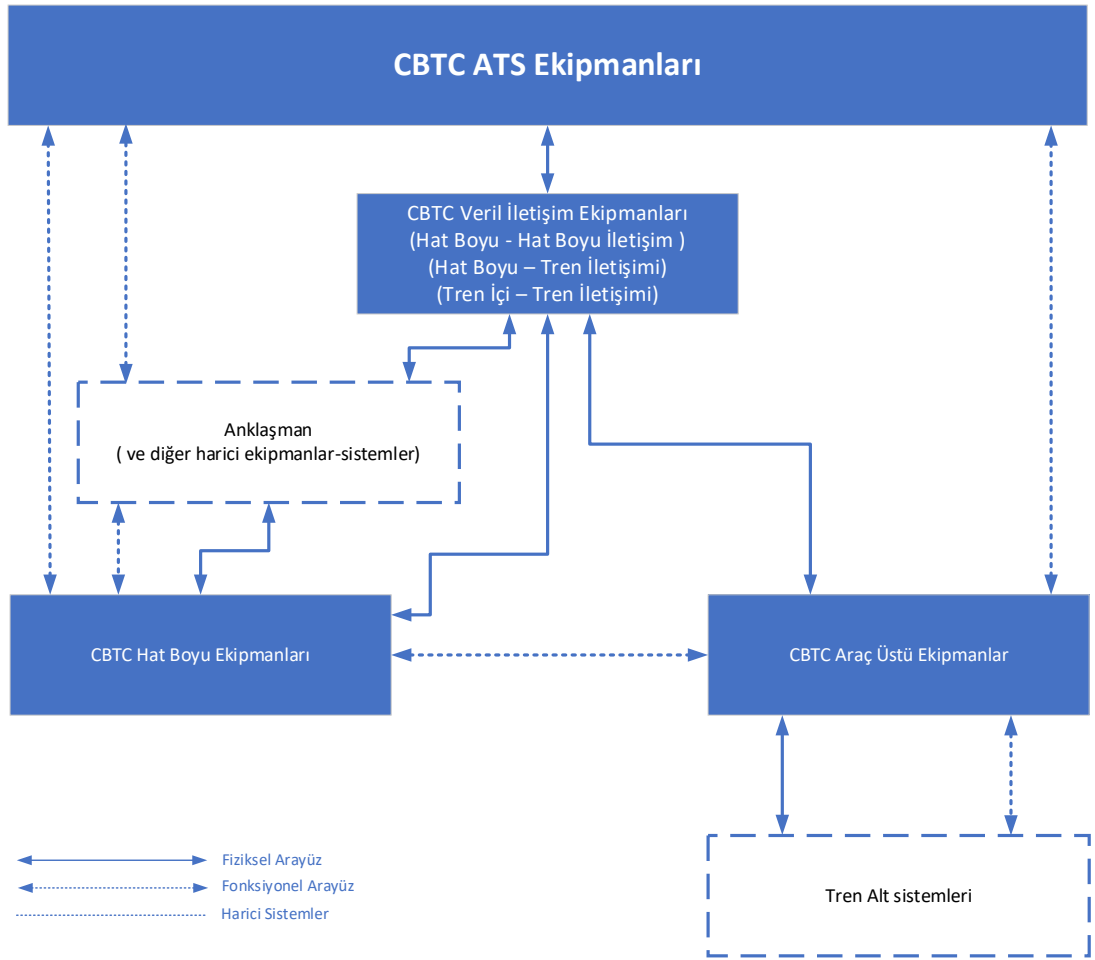


Şekil 5.4. Fonksiyon ilişkileri temel gösterimi.

CBTC sisteminin mimarisi şu şekilde tanımlanır [33];

- a) Hat Boyu Ekipmanlar
  - a. Hat Boyu Otomatik Tren Denetimi (ATS)

- b. Anlaşman (IXL)
- c. Hat Boyu Otomatik Tren Koruma (ATP)
- d. Hat Boyu Otomatik Tren Operasyonu (ATO)
- b) Araç Üstü Ekipmanlar
  - a. Araç Üstü Otomatik Tren Denetimi (ATP)
  - b. Araç Üstü Otomatik Tren Operasyonu (ATO)
- c) Veri İletişim Sistemi



Şekil 5.5. CBTC Sistemi iletişim mimarisi [33].

### 5.1.1. Hat Boyu Ekipmanlar

CBTC Sistemi Hat Boyu Ekipmanları, ATS, IXL, ATP ve ATO olarak tanımlanmaktadır. CBTC sistemi hat boyu ekipmanlar ile anlaşman ve alt sistemleri kontrol eder.[28]

ATS sistemi, genellikle CBTC sistemi içine entegredir. Otomatik Tren Denetimi olarak adlandırılan bu yapı, sistemde belirlenen kriter ve gereksinimlere uygun olarak sürücü ile sistem arasında ki arayüz görevini yürütmektedir. Harici sistemler ile de gerektiğinde arayüz görevi de görebilmektedir.

IXL sistemi, bağımsız bir sistemdir ve anlaşılan sistemi, iç kilitleme sistemi olarak adlandırılmaktadır. Anahtarlar ve sinyaller gibi hat boyundaki ekipmanların ve diğer ilgili işlevlerin kritik kontrolünü sağlamaktadır. Mekanik ekipmanları yazılım ile ilişkilendirir, ekipman ve elamanların akupule çalışmasını sağlayarak emniyetli bir işletme sağlar. Daha basit hatlar söz konusu olduğunda hat boyu ATP sistemine entegre edilebilir.

Hat boyu ATP Sistemi, bu alt sistem, bölgesindeki trenler ile olan tüm iletişimin yönetimini üstlenir. Ek olarak, söz konusu alanda çalışırken her trenin uyması gereken hareket otoritesinin LMA sınırlarını hesaplar. Bu görev bu nedenle işlem emniyeti ve güvenilirliği için kritik öneme sahiptir.

Hat boyu ATO Sistemi, her trenin varış yerini ve düzenleme hedeflerini kontrol etmekten sorumludur. İşlevselliği, sistemdeki tüm trenlerin varış yerlerinin yanı sıra istasyonlardaki bekleme süresi gibi diğer verileri de sağlar. Ek olarak, örneğin uyarı/olay iletişimi ve yönetimi veya atlama/tutma istasyonu komutlarını kullanma gibi yardımcı ve emniyetle ilgili olmayan görevleri de yapabilir.

### **5.1.2. Araç Üstü Ekipmanlar**

CBTC Sistemi Araç Üstü Ekipmanları, ATP, ATO olarak tanımlanmaktadır. CBTC Araç üstü ekipmanlar ile hat boyu ekipmanlar ve radyo tabanlı iletişim sistemi ile haberleşir [28].

Araç Üstü ATP Sistemi, emniyet profiline uygun olarak tren hızını anlık olarak takip ve kontrol eder. Gerektiğinde fren uygulamasından sorumludur. Hat boyu ATP

ekipmanları ile sürekli olarak çift yönlü iletişim sağlar. LMA'ya uygun emniyetli hız ve fren mesafesini iletmekten ve tespitinden sorumludur.

Araç Üstü ATO Sistemi, sürücü veya görevli işlevlerini kolaylaştırmak ve emniyetli olarak trafik düzenleme hedeflerini, yolcu konforunu göz önünde bulundurarak operasyonu sürdürmektedir. ATP tarafından hesaplanmış ve bildirilen verilerin kontrol altında tutulması için çekiş ve frenleme sisteminin otomatik kontrolünden sorumludur. Trenin tam otomatik mod da çalıştırabilir. Ayrıca, çalışma süresini uyarlamak veya hatta güç tüketimini azaltmak için de farklı otomatik sürüş stratejilerinin seçilmesine olanak tanımaktadır.

### **5.1.3. Veri İletişim Sistemi**

CBTC sisteminin anahtar teknolojisidir. Mobil veri iletişimi için Global Sistem (Demiryolu ve kablosuz yerel alan ağları (WLAN) gibi) gibi kablosuz ağlar, çift yönlü tren bağlantısı sağlamak için yaygın olarak kullanılır. Kentsel toplu taşıma sistemleri için, IEEE 802.11a/b/g tabanlı kablosuz ağlar, mevcut ticari kullanıma hazır ekipman ve açık standartlar ve birlikte çalışabilirlik anlayışı ile daha iyi bir seçimdir [34].

## **5.2. CBTC SİSTEM KARAKTERİSTİĞİ**

Bir CBTC sisteminin her kontrol sisteminde olduğu gibi bazı temel ve gerekli karakteristik özellikleri bulunması gerekmektedir. Bu özellikler sistemin diğer sistemlerden farkını ve çalışmasını sağlayacaktır.

Bir CBTC Sistemi'nin temel karakteristik özellikleri [34];

- a) Ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlüklü tren yer tespiti,
- b) Sürekli, yüksek kapasiteli, çift yönlü tren-hat veri iletişimi,
- c) Hayati fonksiyonları yerine getiren, araç üstü ve hat boyu ekipmanlar.



### 5.3. CBTC SİSTEM SINIFLANDIRMASI

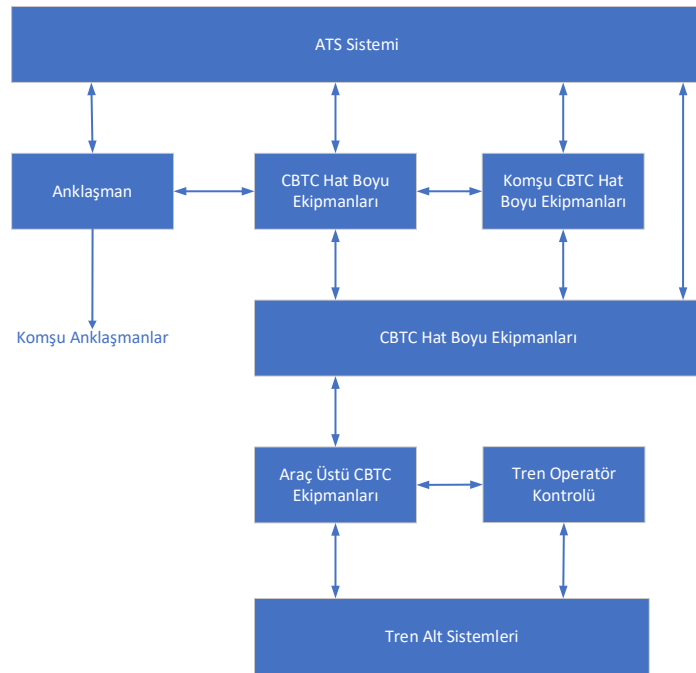
CBTC sistemi temel ihtiyaçları karşılayacak şekilde organize edilmiştir. Bir işletme bir kontrol sisteminde hattın yapısı, emniyet faaliyetleri, doğal şartlar ve otorite kuralları gereği bazı özelleştirmeler gerektirecektir. Bu ihtiyaçlar neticesinde CBTC sisteminin özelleştirilmiş farklı sınıfları mevcuttur.

Spesifik talebe/ihtiyaca göre konfigüre edilebilir. IEEE 1474-1 standardında belirtilen konfigürasyonlar Çizelge 5.1’de gösterilmiştir [35].

Çizelge 5.1. CBTC sistem sınıfları ve tanımları.

Sınıf	Tanım
1	ATO, ATS fonksiyonları olmadan, sadece ATP işlevlerini sağlar,
2	Özel uygulamanın operasyonel ihtiyaçlarını karşılamak için gereken ATP fonksiyonlarının yanı sıra belirli ATO ve/veya ATS fonksiyonlarını sağlar,
3	Belirli bir uygulamadaki tek tren kontrol sistemi olabilir veya diğer yardımcı yol kenarı sistemleri ile birlikte kullanılabilir.

CBTC Sistemi; Sınıf 3, Şekil 5.6’da fonksiyonel ilişkiler diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.6. CBTC Sistem sınıfı 3 fonksiyonel diyagram gösterimi [28].

#### **5.4. ÇEŞİTLİ CBTC UYGULAMALARI**

Tüm CBTC sistemleri temel olarak ATP işlevlerini içermektedir [28]. Bütün özelleştirmeler veya sınıflandırmalarda ATP fonksiyonlarının mevcut olması, CBTC sistem performansı ve işlevsel gerekliliklerini, hafif raylı sistem ve banliyö raylı geçiş sistemleri de dahil olmak üzere tüm transit uygulamalarına tatbikine olanak sağlamaktadır.

#### **5.5. CBTC KONFIGÜRASYONLARI**

Bir CBTC sistemi IEEE 1474 standartlarına göre, farklı tren konfigürasyonlarını destekler. Bu konfigürasyonlar belirli trenlerin ve/veya tren sınıflarının farklı performans özelliklerine sahip olduğu karma bir tren filosunun ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir.

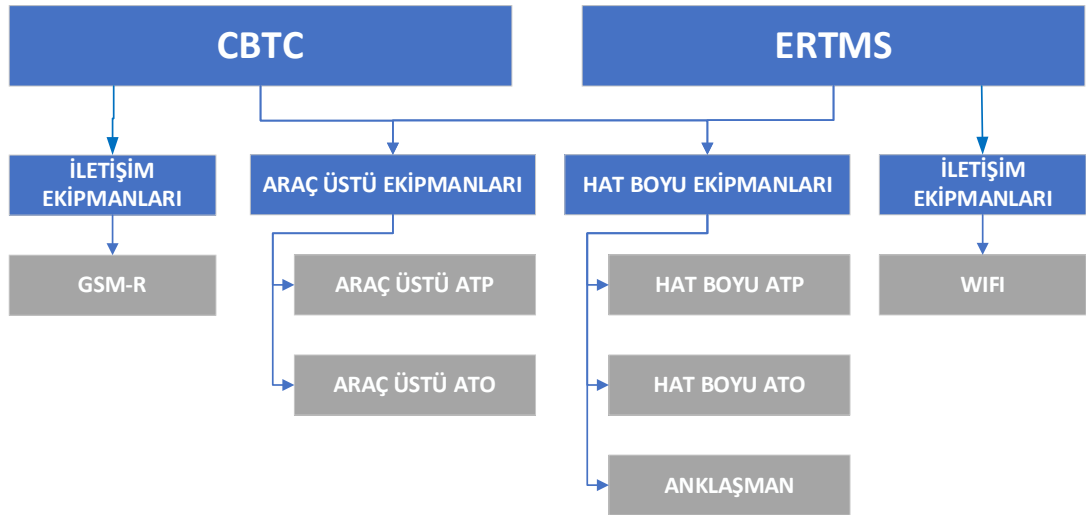
IEEE 1474'e göre destekleyebileceği başlıca konfigürasyonlar ; [28];

- a) Bir veya daha fazla işletim birimi içiren sabit uzunlukta tek yönlü trenler,
- b) Bir veya daha fazla temel işletim ünitesinden oluşan sabit uzunlukta iki yönlü trenler,
- c) Değişken uzunluklu tek yönlü trenler,
- d) Değişken uzunluklu çift yönlü trenler şeklindedir.

## BÖLÜM 6

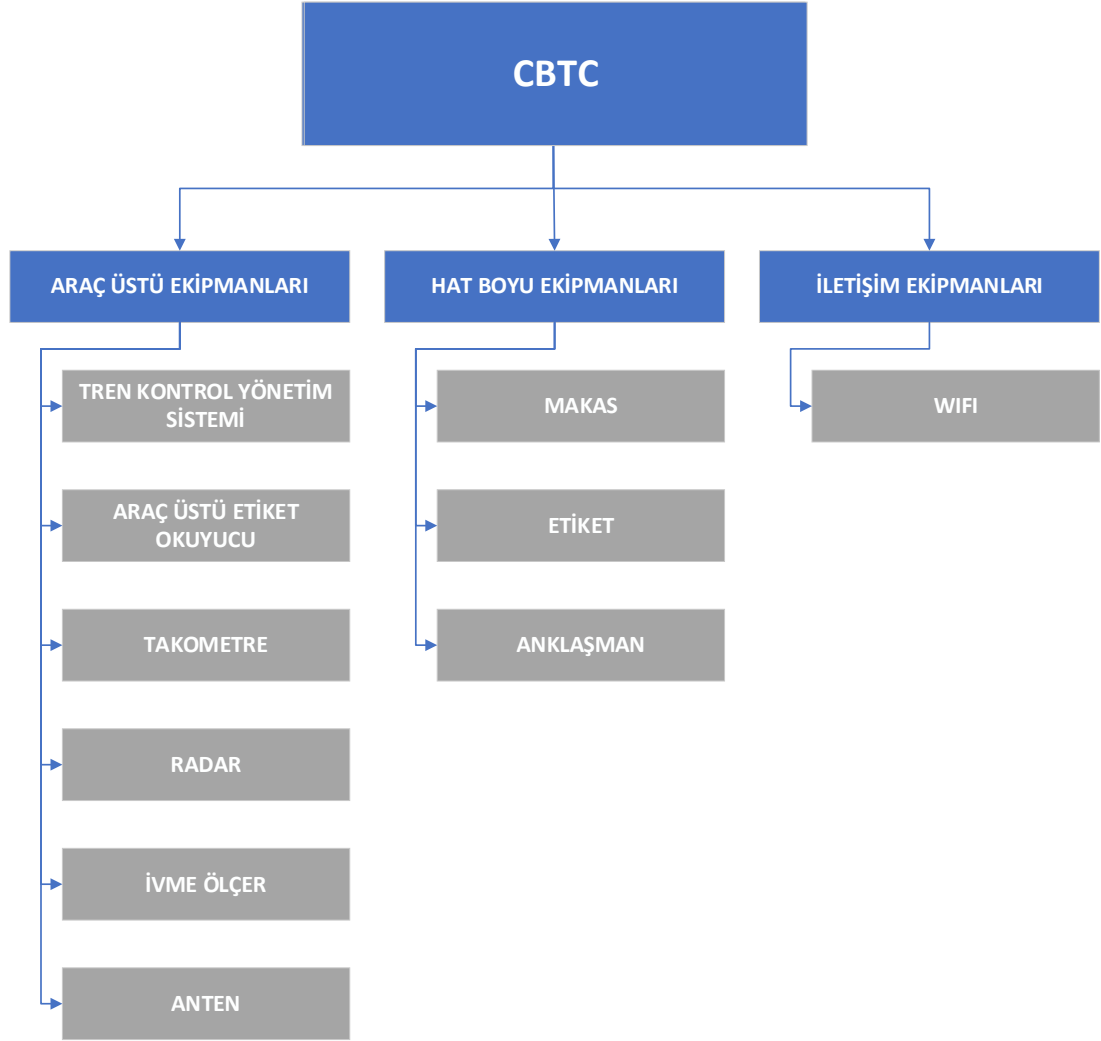
### CBTC FONKSİYONLARI VE GEREKSİNİMLERİ

CBTC sistemi, ERTMS (Avrupa Birliği ve Sinyalizasyon Sistem tedarikçileri iş birliği ile karşılıklı işletilebilirlik için oluşturulan ortak standartları oluşturma projesidir [36]. ERTMS sisteminde olduğu gibi sistemin haberleşmesi, yönetilmesi ve operasyonun gerçekleştirilmesi için hat boyu, araç üstü ve iletişim ekipmanlarına sahip olacaktır. Bu karşılaştırma Şekil 6.1’de genel bir sistem düzeyinde gösterilmiştir.



Şekil 6.1. CBTC ve ERTMS Sistem düzeyi mimari.

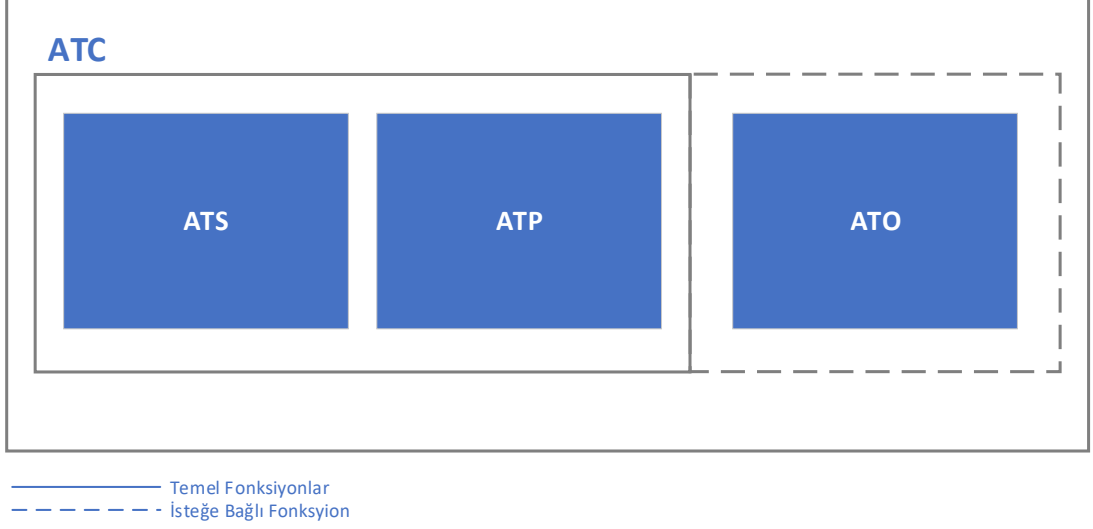
CBTC sistemlerinin temel düzeyde çalışabilirliği sağlamak için bazı araç üstü, hat boyu ve iletişim ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır [32]. Bu ekipmanlar sistem seviyesinde Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. CBTC Sistemi temel ekipmanları.

Bir CBTC sisteminin desteklemesi gereken veya destekleyeceği fonksiyonlar bulunmaktadır. CBTC sisteminin farklı fonksiyonları desteklemesi ile özelleştirilebilir bir yapısı mevcuttur. IEEE1474’de genel olarak belirtildiği ve Şekil 6.3’de CBTC Fonksiyon İlişkileri Temel Şamasında görüldüğü üzere ATC, ATP, ATO ve ATS işlevlerini sağlama yeteneğine sahip olacaktır [28]. Ancak tüm CBTC sistemlerinde ATC, ATP işlevleri, ATO ve ATS işlevlerine göre önceliğe sahip olarak değerlendirilecektir.

## CBTC



Şekil 6.3. CBTC Sistemi temel fonksiyonları.

CBTC tarafından desteklenen ATC, ATP, ATO, ATS gibi fonksiyonlar için gerekli iletişim ağı, CBTC iletişim arayüzü tarafından sağlanır. Sistem sınırları içerisinde dağ, tünel, tüp geçit gibi yüksek yapılar engel olmaksızın, kapsama sağlayacaktır. Çift yönlü veri iletişimi, düşük gecikme süresi, emniyet protokolleri şartlarını sağlamak zorundadır. Bu sebeple CBTC iletişim arayüzü ATC, ATP, ATO, ATS fonksiyonları için yeterli olacaktır.

ATC, ATP, ATO, ATS fonksiyonları bazı alt fonksiyonlar içermektedir. Fonksiyonlar, CBTC sınıflandırma ve müşteri ihtiyacına göre şekillendirilmektedir. ATO ise sürüş profilleri için farklı otomasyon sistemlerinin kullanılmasına izin vermektedir. ATC, ATP, ATS fonksiyonlarının yeterlilik ve sağladığı olanaklar ölçüsünde ATO otomasyonu farklı seviyelerde otomatik sürüş yetkileri sunmaktadır.

### 6.1. OTOMATİK TREN KORUMA (ATP)

Otomatik tren koruma fonksiyonu temel olarak çarpmalara, aşırı hıza ve diğer tehlikeli koşullara karşı güvenli koruma sağlar. Tüm ATP işlevlerinin yerine getirilmesi hayati öneme sahiptir [28]. IEEE 1474-1'e göre tasarlanmalı ve uygulanmalıdır.

ATP genelde kullanılan ekipmanlara göre aralıklı ve sürekli olmak üzere iki farklı şekilde ifade edilmektedir. Günümüzde CBTC sistemlerinde ATP sistemleri kullanılmaktadır. Bu durum kesintisiz, yüksek çözünürlüklü konum tespiti, performans yeterlilikleri ve emniyet açısından gereklidir [37]. Ele almış olduğumuz fonksiyonlar ve CBTC sistemleri sürekli iletişim metodunu içermektedir.

ATP sistemi bir dizi alt fonksiyona sahiptir. Bu fonksiyonlar IEEE 1474-1:2004'de tanımlanmıştır [28].



Şekil 6.4. ATP fonksiyonları.

### 6.1.1. Tren Konumu / Tren Hız Tespiti

Tren konumunun / tren hızının belirlenmesi, herhangi bir ATP sistemi için gerekli ve temel bir işlemdir.

### **6.1.1.1. CBTC Tren Konumu/Tren Hız Tespiti**

CBTC tren konumunun / tren hızının belirlenmesi, herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevdir.

Bir CBTC sistemi, CBTC ile donatılmış her bir trenin CBTC bölgesinde bazı bilgileri belirler;

- a) Çalıştığı konum,
- b) Hız,
- c) Sürüş yönü.

CBTC donanımlı tren, tren konumu/tren hız tespiti fonksiyonunu ilgili standartta belirtildiği şekilde sağlayacaktır [35];

- a) Standardın performans ve emniyet gereksinimlerini destekleyecektir,
- b) Yeterli hız ölçüm çözünürlüğü ve doğruluğu sağlanacaktır,
- c) Ölçüm yanlışlıklarını telafi edebilecektir,
- d) Kayma, kızıklamada ve tekerlek boyutunda ki değişimin oluşturduğu tren tekerlek opsiyonunu düzeltecektir.

### **6.1.1.2. İkincil Tren Konum Tespiti**

CBTC faaliyet bölgesinde; yetkili otorite tarafından CBTC ekipmanına sahip olmayan veya ekipmanı çalışmayan (arızalı) trenler dahil olmak üzere, bir veya daha fazla tren tarafından hattın meşgul edildiğini veya edilmediğini belirlemek ve doğrulamak amacıyla sisteme uygun ek bir hat boyu sistem ile ikincil bir tren konum belirlenmesi sağlanabilir. Örneğin Marmaray hattında ek sistem olarak aks sayaçları kullanılmaktadır [38].

### 6.1.2. Emniyetli Tren Ayırımı

Emniyetli tren ayırımı, herhangi bir CBTC sistemi yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevidir [35]. CBTC sistemi tarafından hesaplanan emniyetli fren hesaplaması ile ATP profili, güvenli frenleme modeli ile yürütülecektir ve hiçbir koşul altında (arızalar olmadan), hareket yetkisi sınırının CBTC donanımlı bir trenle aşılmasını sağlamaktadır.

Otorite tarafından talep edilmesi durumunda, CBTC emniyetli tren ayırma işlevi trenlerin otomatik olarak kapatılmasını ve belirlenmiş alanlarda trenlerin otomatik olarak birleştirilmesini ve ayrılmasını destekleyecektir.

Hareket yetkisi sınırında, aşağıdaki durumlar kısıtlayıcı olacaktır [35];

- a) CBTC donanımlı bir trenin önünde ki trenin herhangi bir yer belirsizliği için emniyetli mesafe,
- b) CBTC sistemine sahip olmayan bir tren ya da çalışmayan trenle çalışan CBTC ekipmanına sahip bir tren tarafından işgal edilen bir hat bölümünün sınırı,
- c) Hat sonu,
- d) Rota belirlemesi ve kilitlemesi,
- e) Zıt trafik yönü ile bir hat bölümünün sınırının belirlenmesi,
- f) Engellenen bir hattın sınırı
- g) Eğer otorite tarafından yetki verilmişse, uyarı cihazlarının çalıştığı doğrulanmayan bir otoyol geçişine giriş,
- h) Tren hareketi için güvenli olmadığı tespit edilen bir rotaya giriş.

Eğer tren orijinal hareket otoritesi sınırına yaklaşıyor veya fren yapıyorsa, tren yeni ATP profilini ihlal ediyor olabilir. Bu şartlar altında, bir CBTC sistemi ivedi fren uygulamasını başlatır. Fren uygulaması, otorite tarafından belirtildiği gibi acil durum fren uygulaması veya denetimli bir servis freni uygulaması da olabilmektedir. [35].



### 6.1.3. Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi

Aşırı hız koruması, herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevi olacaktır [28].

ATP profili oluşturulurken, EN 1474-1 standardında 6.1.2.1'in güvenli fren modeline sahip bir CBTC sistemi, arızalar dahil hiçbir koşul altında trenin gerçek hızının emniyetli hızı aşmamasını sağlayacaktır.

Emniyetli hız, aşağıdaki durumların en kısıtlayıcı olduğu anlarda göz önüne alınarak hesaplanacaktır [28];

- a) ATP profili içerisindeki hat bölümlerinde kalıcı hız limitleri,
- b) ATP profili içerisindeki hat bölümlerinde geçici hız kısıtlamaları,
- c) Belirli bir sınıfa veya tren yapılandırmasına uygulanan herhangi bir kalıcı hız kısıtlaması,
- d) Tren kaynaklı arıza koşulları nedeniyle trende uygulanan herhangi bir hız kısıtlaması,
- e) Trenin hareket otoritesinin sınırından önce trenin emniyetli bir şekilde durmasını veya hattın o bölümüne girildiğinde uygun kalıcı veya geçici hız sınırlamalarını yerine getirmek için yeterince yavaşlamasını sağlayacak maksimum hız.

Trenin herhangi bir kısmı-bölümü hız sınırları uygulanan alan içinde olduğu durumlarda halen hız limitleri ve kısıtlamalar tren için uygulanıyor olacaktır.

Hesaplanan ATP profilinin uygulanması, CBTC tarafından belirlenen tren hızındaki CBTC tarafından belirlenen tren hızı ile ATP profili hızının karşılaştırılmasıyla sağlanacaktır. Bu konumdaki ATP profil hızı aşıldığında, CBTC sistemi acil bir fren uygulamasını başlatır.

Fren uygulaması, acil durum fren uygulaması veya otoritenin belirttiği şekilde denetimli servis freni uygulaması olabilir. İkinci durumda, bir CBTC sistemi, önceden

belirlenmiş bir zaman diliminde kabul edilebilir bir fren hızının elde edilmesini sağlamak için fren hızını takip etmelidir. Öbür taraftan güvenli fren modelinde, reaksiyon süreleri de bulunmalıdır.

#### **6.1.4. Geri Kayma Koruması**

Geri alma koruması, herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevi olacaktır [28].

Bir CBTC sistemi gerçek tren hareket yönünü izlemeli ve ölçülen hareket yönünü CBTC tarafından belirlenmiş/komut verilen trafik yönü ile karşılaştırmalıdır. Trafiğe karşı otorite tarafından belirlenmiş bir geri dönüş tolerans mesafesinden daha fazla hareket eden trenler için tren hareketleri, CBTC sisteminin bir acil durum fren uygulaması başlatmasına sebebiyet verecektir.

#### **6.1.5. Hat Sonu Koruması**

Hat sonu koruması, hat sonu terminaline yakın veya yakınında trenlerin çalışmasına izin veren herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli bir ATP işlevidir [28].

Hat sonu koruması, trenlerin hattın sonunda hareket etmesini engellemek için tampon etkisi ile trenlerin tasarım sınırlarını aşmasını önlemektir. Sistem içerisine aşırı hız koruması da dahil edilmeli veya bunlarla birlikte çalışmalıdır. Hat sonu koruma tasarımı EN 1474-1 6.1.2.1'deki emniyetli fren modeline uygun olmalıdır [28].

#### **6.1.6. Trenlerin Birleşmesi ve Ayrılmasından Kaynaklı Oluşan Ayrılmış Koruma**

Farklı trenlerin, tren oluşturmak için iki veya daha fazla taşıt yahut birimden bir araya getirilebildiği durumlarda, bir CBTC sistemi parçalı trenleri tespit etme ve koruma yeteneğine sahip olacaktır [28].

Bireysel araçların veya ünitelerin kalıcı olarak bağlanmış olarak kabul edilip edilmediğine veya bakım veya işletme amaçları için rutin olarak bağlanmamış olmalarına bakılmaksızın, kısmen korunma gerekir.

Ayrıca bir CBTC sistemi, CBTC sistemi içerisindeki toplam uzunluğun otomatik olarak güncellenmesi dahil, trenlerin bağlanması ve ayrılması için çalışma gereksinimlerini de destekleyecektir.

#### **6.1.7. Sıfır Hız Algılama**

Sıfır hız koruması, herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevi olacaktır [28].

Trenin istasyona yanaşması sonrasında ATO – Kapı Açma fonksiyonun sağlanması için ATP tarafından sıfır hız algılama fonksiyonu faaliyette olması gerekmektedir. IEEE 1475-1999 standardının bölüm 5.10'unun gereklerine uygunluk aranacaktır [39].

#### **6.1.8. Kapı Açma Kontrolü Koruma Kilitleri**

Eğer trenlerin işletmesi personel ile yapılıyorsa (vatman, makinist), yetki alanına sahip otorite seçeneğinde kapı açık kontrol koruma kilitleri gerekli bir ATP işlevi olabilir [28]. Kapı açma fonksiyonu için genel kapı açma ve seçici kapı açma işlevi sunulabilir. Bu fark istasyon platform uzunluğu ve araç uzunluğunu farklı olduğu durumlarda kullanılabilir.

Personelsiz (vatman, makinist) trenlerin işletilmesi için kapı açık kontrol koruması kilitleri zorunlu olacaktır. Bu kilitler, sağlandığı takdirde, tren kapılarının (ve eğer varsa platform kapılarının) açılmasını sağlamadan önce aşağıdaki koşulların yerine getirilmesini sağlayacaktır [28];

- Tren, belirlenmiş bir durma noktasında “düzgün bir şekilde hizalanır”; burada belirtilen durma noktası ve gerekli toleranslar, yetkili makam tarafından belirtildiği şekilde olacaktır.

- Kapı açılmasına izin verilen tren tarafında bir platform (veya yetkili makam tarafından belirlenen başka bir yer) bulunmaktadır.
- Tren hareket etmeyecek şekilde kısıtlanmıştır.

Otorite tarafından belirtilmişse, başarısızlık kurtarma amacıyla uygulanmış kapı açık kontrol koruma kilitlerinin lokal olarak atlanması için ek fonksiyon sağlanabilir.

### **6.1.9. Kalkış Kilitleri**

Trenler mürettebatla çalıştırılıyorsa, otoriteye bağlı olarak kalkış kilitleri gerekli bir ATP işlevi olabilir. İnsansız trenlerin işletilmesi için kalkış kilitleri zorunlu olacaktır [28].

IEEE Std 1475-1999'da belirtildiği gibi bu kilitler, eğer sağlanmışsa, tüm tren kapıları (ve eğer varsa platform kenarı kapıları) emniyet ve performans gereklerine uygun olarak düzgün bir şekilde kapatılıp kilitlenmediği sürece sabit bir trenin hareket etmesini önleyecektir (örneğin, tahrik sistemini devre dışı bırakarak) [39].

Otorite tarafından belirtilmişse, başarısızlık kurtarma amacıyla kalkış kilitlerinin lokal olarak atlanması için ek fonksiyon sağlanabilir.

### **6.1.10. Acil Durum Frenlemesi**

Acil durum frenlemesi, herhangi bir CBTC sistem yapılandırması için gerekli ve temel bir ATP işlevi olacaktır. Trenin acil durum fren sistemi, güvenli frenleme modeli tarafından belirlenen garantili durma mesafesi içerisinde durma noktasına getirebilecek kapasitededir.[28]

Acil durum frenlerinin normal çalışmanın devam etmesine izin verecek şekilde sıfırlanması için özel kriterler yetkili makam tarafından belirlenir. Koşullar (ATP tarafından belirlendiği şekilde) tren hareketi için doğru değilse, acil durum frenlemesi, sıfırlama sinyalleri veya hareketlerinden bağımsız olarak uygulanır, ancak bu tren için ATP fonksiyonlarının yerel manuel olarak atlanması için tesisler sağlanabilir.

Bu tür tesislerin kullanılması tren hareketlerinin güvenliğini sağlamak için işletim prosedürlerine sıkı sıkıya bağlı kalmayı şart koşar. Acil frenler sıfırlandıktan sonra doğru ATP koşulları mevcutsa, tren hareket etmesine veya hareket etmeye devam etmesine izin verilir; Bununla birlikte, eğer gerçek tren hızı tekrar ATP profil hızını aşarsa veya daha sonra bir arıza meydana gelirse, acil frenleme eskisi gibi uygulanır.

#### **6.1.11. Rota Kilitleme**

Bir CBTC sistemi, tren çarpışmalarını ve raydan çıkmayı önlemek için geleneksel kilitleme uygulamasına eşdeğer bir rota kilitleme işlevi sağlayacaktır [28].

Bu fonksiyon, rotası kilitlenen bir trenin zaman veya yaklaşma kilitlemesi içermelidir. Makas kilitleme sistemleri, makasın bulunduğu ray kesiti, bir tren tarafından işgal edildiğinde de kilitlenmelidir. Kilitleme fonksiyonları aynı zamanda hareketli köprüler ve benzeri yol açma aparatları için de geçerli olacaktır. Otoritenin belirttiği şartlar sağlandığı durumda trenin arkasında ki alan için serbestlik sağlanabilir ve kilitleme sona erdirilebilir [28];

- a) Bir hareket otoritesi, uygun rota ayarlanıp kilitleninceye kadar kenetlenmeyecek şekilde ilerletilmemelidir.
- b) Bir hareket otoritesi bir kilitleme yoluyla ilerletildikten sonra, etkilenen rota serbest bırakılmayacak ve ya tren geçip kenetlenme işleminden uzaklaştığı doğrulanmadığı ya da hareket otoritesi kenetlenme işleminden kısa bir süre sonra geri çekilmediği sürece çelişkili yollar silinmeyecektir.

Otorite tarafından yardımcı bir yol kenarı sistem belirtildiğinde, kilitleme fonksiyonları, ikincil bir tren algılama hat boyu sistemi tarafından sağlanan ayrı kilitleme ekipmanı ile kilitlenebilir. Bu durumda, bir CBTC sisteminin geliştirilmiş performans yeteneklerinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak için CBTC tren konumu/tren hızı belirleme fonksiyonu tarafından oluşturulan tren pozisyonuna dayanan konvansiyonel kilitleme fonksiyonlarına bağlanacak ve bunları değiştirebilecektir.

### **6.1.11.1. CBTC'nin Ayrı Bir Anlaşman İle Arayüzü**

Yardımcı hat boyu sistemi veya ayrı kilitleme belirtildiğinde, bir CBTC sistemi kilitlemelere aşağıdaki gibi arayüz sağlar [28];

- a) Yaklaşan bir CBTC treni için bir rotanın iptal edilmesi haricinde, zaman veya yaklaşma kilitlemesi geçerli olacaktır (yani, hareket otoritesi kilitleme işleminden kısa bir süre geri çekilmesi etkindir). Bu durumda, tren giriş ile kenetlenmeye kadar emniyetli frenleme mesafesinden büyükse (EN1474-1 6.1.2.1'in güvenli frenleme modeli ile belirlendiği gibi) veya kilitleme işlemine girmeden önce tren durursa, rota çalışmadan serbest bırakılmalıdır.
- b) Trafik kilitlemesi geçersiz kılınabilir(trafik yönü), böylece CBTC donanımlı trenler, aynı zamanda aynı hat üzerinde kendi hareket otoriteleri içinde zıt yönlerde hareket edebilir.
- c) Hat boyu sinyaller ve yönleri otorite tarafından belirtildiği şekilde sağlanabilir. Bir CBTC sistemi, sinyalin CBTC görüşü sadece CBTC donanımlı trenlerde göstermesini sağlamak için geleneksel yönleri geçersiz kılabilir.

### **6.1.11.2. CBTC Tren Konumu Arızalarına Verilen Yanıtlar**

CBTC tren yeri belirleme fonksiyonunun başarısız olması durumunda, trenin CBTC sistemi (tren daha sonra birbirine kenetleme limitlerinden arınmış olarak belirlenir.) veya işletme prosedürleri ile birbirine kenetlenmesinden veya işletim prosedürlerinden veya her iki yaklaşımın bir kombinasyonundan arındırılmış olduğu kanıtlanıncaya kadar rota kilitleme etkin kalacaktır.

CBTC tren yeri belirleme fonksiyonunun bir tren kilitleme konumunun ikincil bir sistem vasıtasıyla da tespit edilebildiği bir kilitlemede başarısız olması durumunda, rota ve diğer kilitleme işlevlerinin sağlanması koşuluyla, kilitleme işlevlerinin geçersiz kılmaları serbest bırakılabilir. Trenin kenetlenme işleminden kurtulduğu kanıtlanıncaya kadar bir geçişin trenin önünde ve altında hareket etmesini engellemek için yardımcı yol kenarı sistemi uygulanır.

### **6.1.11.3. Makas İndikasyon Kaybına Tepki**

Bir rota hareketi sırasında bir hareket otoritesi tarafından bir kez rota kilitleme komutu verildiğinde, makas indikasyon kaybı durumunda, bir CBTC sistemi hareket otoritesini rotanın başlangıcına geri çekecektir. Eğer bir tren zaten rotada güvenli bir fren mesafesi içerisinde ise, CBTC sistemi acil bir fren uygulaması başlatmalıdır [28].

### **6.1.12. Trafiğin Ters Yönde Anlaşmanı**

Trafiğin ters yönde anlaşmanı, terminal istasyonlarında tren yönünün tersine çevrilmesini desteklemek ve örneğin geri dönüş ve servis çalışma modlarını desteklemek amacıyla, iki yönlü operasyon gerektiren herhangi bir CBTC sistemi uygulaması için gerekli bir ATP işlevi olacaktır [28].

Bir tren için hareket yetkisini, karşı trafik yönünün çoktan kilitlenmiş olduğu bir hat bölümüne genişletmek mümkün olmayacaktır.

Bir hat içindeki trafik yönünün tersine çevrilmesi mümkün olmadıkça;

- a) Hattın o bölümündeki tüm trenler sıfır hızdadır ve orijinal trafik yönünde harekete karşı,
- b) Hattın o bölümü dışındaki tüm trenler için hareket makamları o bölüme erişemez ve orijinal trafik yönünün o bölüme uzatılmasıyla sınırlandırılır.

### **6.1.13. Çalışma Bölgesi Koruma**

Bir CBTC sistemi, hareket yetkilisine hizmet dışı (engellenmiş) hatlarda veya istenen konum dışında engellenen makaslar üzerinden çalışması için trenlere yetki vermeyecek ve tanımlanmış çalışma bölgelerine yaklaşırken hız sınırları uygulayacaktır [28].

Bir CBTC sistemi ayrıca ATO çalışma modunu bir çalışma bölgesi üzerinden engelleme yeteneklerini de içerebilir.

#### **6.1.14. Kırık Ray Tespiti**

Otorite tarafından belirtildiği takdirde, bir CBTC sistemi, kırık rayların tespiti amacıyla yardımcı bir sisteme yardımcı arayüz geliştirilebilir. Bir CBTC sisteminin tespit edilen bozuk bir raya tepkisi, otorite tarafından belirtildiği gibi olacaktır [28].

#### **6.1.15. Hemzemin Geçit Uyarısı**

CBTC bölge sınırları içerisinde karayolu geçişleri mevcutsa karayolunun demiryoluna ait bölge kesişimler hemzemin geçit olarak adlandırılmaktadır. Otorite yetkisinde hemzemin geçitlerin kontrolünü mümkün kılmak ve hareket makamları aracılığı ile koordine etmek için arayüz oluşturulabilir [28].

Bu arayüzün özellikleri şu şekildedir;

- a) Tren hızından veya ivmeden/yavaşlamadan bağımsız olarak sabit (ve tutarlı) uyarı süreleri,
- b) Geçişlerden önce duraklama yapan trenler için, istasyondan ayrılmaya hazır olana kadar uyarı cihazları etkinleştirilmesi ertelenmesi,
- c) Bir tren bir geçişi tamamladığında, ikinci bir tren önceden belirlenmiş bir zaman aralığında cihazları yeniden etkinleştirirse uyarı cihazlarının aktivasyonunun devam etmesi,
- d) Trafik ışıklarının veya diğer otoyol işaretlerinin öncelikli denetimi için önceden uyarı kontrolü(uyarı levhaları).

#### **6.1.16. Sınırlı Rota Korumaları**

CBTC sistemi, otorite tarafından belirtilecek bir trenin veya hattın mekanik, inşaat, elektriksel veya diğer önceden tanımlanmış geçici, kalıcı şartlar nedeniyle, izinsiz giriş tespit cihazlarına, platform ayırıcı kapılarına(varsa) ve/veya rota bütünlüğünü etkileyen tehlikeleri tespit edebilen diğer cihazlara arayüzler aracılığı ile, trenin



hareketi için emniyetli olmayan bir rotaya girmesini önleme fonksiyonuna sahip olmalıdır.

## **6.2. OTOMATİK TREN OPERASYONU (ATO)**

Bir CBTC sistemi, insansız trenlerin işletilmesi için, asgari olarak ATP tarafından otomatik olarak uygulanan emniyet kısıtlamaları dahilinde öngörülen işletme kriterlerine göre trenleri otomatik olarak çalıştırmak için otomatik tren operasyonu sağlayacaktır.[28]

CBTC, hat ile tren arasında ki veri iletişimi fonksiyonları tüm ATO işlevlerini desteklemek için yeterli olacaktır.

### **6.2.1. Otomatik Hız Denetimi**

Rota boyunca hareket edecek bir trenin çalıştırılması, durdurulması ve hız düzenlemesi, CBTC sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilir; böylece hız, ivmelenme, yavaşlama ve sarsma oranları belirtilen yolcu konforu sınırları dahilinde olur ve tren hızı ATP tarafından uygulanan aşırı hız sınırlarının altındadır.

Bir CBTC sistemi, tren operatörüne (varsa) veya ATS (Otomatik Tren Denetimi) girişlerine göre birden fazla ATO hızını, ivme ve servis freni oranını destekleyecektir [28].

### **6.2.2. Platform Yanaşma Kontrolü**

Bir CBTC sistemi aşağıdaki platform yanaşma kontrol modlarından herhangi birini uygulayabilecektir [28];

- a) Platform uzunluğunun tren uzunluğuna yaklaşık olarak eşit olması durumunda, bir CBTC sistemi bir trenin yalnızca platformda yeterli yer varsa veya önceki trenin tamamen platform alanını terk etmesi veya istasyon dışına çıkmaya

başladığında, platforma giriş izni verecek bir hareket yetisine sahipse trenin istasyona girmesine izin verecektir

- b) Platform uzunluğunun tren uzunluğundan daha uzun olduğu durumlarda, bir CBTC sistemi, otorite tarafından tanımlandığı şekilde, platform alanı içindeki çoklu durma pozisyonlarını destekleyecektir.
- c) Platform uzunluğunun birden fazla tren yanaşmasını desteklemesi durumunda, bir CBTC sistemi bir tren alternatif yanaşma alanını meşgul ederken başka bir trenin bir platforma girmesine izin verebilir.
- d) Platform uzunluğunun tren uzunluğundan daha kısa olduğu durumlarda, bir CBTC sistemi ATP - Kapı açma kontrolü koruma kilitleri ile tutarlı platform yanaşmasını da destekleyecektir.

### **6.2.3. Kapı Kontrolü**

Bir CBTC sistemi, yolcu binış ve iniş sırasında tren kapılarını (ve varsa platform kenar kapılarını) otomatik olarak kontrol edebilecektir.

Yetki sahibi olan otorite tarafından tanımlandığı gibi, otomatik kapı kontrolü aşağıdakilerle sınırlı olabilir[28];

- a) Sadece otomatik kapı açılması (yolcu kapısı açık talepleri olsun veya olmasın),
- b) Sadece otomatik kapı kapatma,
- c) Manuel açma ve kapatma.

Kapıları açık olan trende istasyonda kalma süresi ATS tarafından belirlenebilir ve otomatik olarak ATO tarafından kontrol edilebilir.

### **6.3. OTOMATİK TREN DENETİMİ (ATS)**

Bir CBTC sistemi, bir ATS sistemine arayüz olabilir veya onunla entegre olabilir.

CBTC sistemin karakteristik özelliklerine uygun olarak, uygun şartlar altında ve otorite tarafından belirtilen ölçüde CBTC ile ilgili ATS fonksiyonları uygulanacaktır [28];

- a) Ray devrelerinden bağımsız yüksek hassasiyette tren konum bilgisi,
- b) Tren ve hat arasında sürekli olarak veri iletişimi,
- c) Tren ve hat boyu veri işleme yeteneklerini geliştirmek.

Hattan trene, trenden hatta veri iletişim arayüzü de dahil olmak üzere bir CBTC veri iletişim ağı, otorite tarafından belirtilen CBTC ile ilgili ATS işlevlerini desteklemek için yeterli olacaktır.

### **6.3.1. ATS Kullanıcı Arayüzü**

Her bir ATS kullanıcı arayüzü, tüm bilgileri gösterebilmeli ve ATS fonksiyonlarında tanımlandığı gibi tüm kontrol eylemlerini, otorite tarafından belirlenen kabul edilebilir gecikmeler süreleri dahilinde uygulamalıdır.

Gerekli olan ekran verileri ve kullanıcı bilgileri girişleri, IEEE Std 1474.2 – 2003 standardına uygun olacaktır [37]. ATS kullanıcısı, otomatik CBTC ile ilgili ATS işlevlerini geçersiz kılabilir.

Bazı ATS fonksiyonları, potansiyel olarak sistem tehlikelerine neden olabilir ve bu fonksiyonların spesifik olarak uygulanması, ATS fonksiyonlarının gerektirdiği tehlike analizlerinde, emniyetli bir şekilde uygulanması gerekmemektedir; Bununla birlikte, tehlike analizleri, asgari olarak [28];

- a) ATS kullanıcısı tarafından başlatıldığında emniyetle ilgili komutların yerine getirilmemesi,
- b) CBTC sistemi, bir ATS kullanıcısı tarafından başlatılan emniyetle ilgili komutları vaktinden önce kaldırması,
- c) ATS kullanıcısı tarafından başlatılmayan emniyetle ilgili komutları yerine getiren CBTC sistemi,

d) CBTC sistemi tarafından ATS kullanıcısına yanlış bilgi gösterilmesi.

Tehlike analizi, özel transit uygulamasının ve trenlerin insanla mı yoksa insansız mı çalıştırıldığını dikkate alarak yapılmalıdır.

Emniyetle ilgili tüm kullanıcı arayüzleri / girişleri ve istemeden uygulanmasının karar yetkisine sahip otorite tarafından tanımlandığı gibi olumsuz bir operasyonel etkiye sahip olabileceği fonksiyonlar için eylemde kontrol onayı sağlanacaktır.

### **6.3.2. CBTC Tren Tanımlaması ve Tren Takibi**

CBTC bölgesinde faaliyet gösteren her bir CBTC donanımlı trene bir tren kimliği atanır. Tren tanımlamaları her bir trene özeldir. Bu tren tanımlaması, tren tipini ve trenle ilgili diğer bilgileri belirtir.

Bir ATS sistemi, CBTC bölgesinde faaliyet gösteren tüm CBTC donanımlı trenlerin konumlarını, kimliklerini, tren tarifelerini ve diğer ilgili verileri ATS kullanıcı arayüzünde otomatik olarak takip etme, kayıt tutma ve görüntüleme yeteneğine sahip olacaktır [28]. Trenlerin ön ve arka konumları CBTC tren konum raporlarına göre izlenecek ve tren konumu ATS kullanıcı arayüzünde gösterilecektir. Tren uzunluğundaki değişiklikler, oransal olarak veya metinsel tren uzunluğu verileriyle desteklenen standart bir uzunluk simgesi olarak görüntülenebilir.

### **6.3.3. Tren Rotası**

Bir ATS sistemi, CBTC bölgesinde faaliyet gösteren CBTC donanımlı trenlerin CBTC tren konum raporlarına ve tren servis verilerine, önceden tanımlanmış yönlendirme kurallarına ve ATS kullanıcı yönlendirme hizmet stratejisine uygun olarak manuel ve otomatik olarak yönlendirilmesine izin verebilir.

Özel hat konfigürasyonunun uygulanabildiği yerlerde, otomatik yönlendirme, makaslarda trenlerin uygun şekilde birleştirilmesini ve ayrılmasını, trenlerin geri dönüşünü, trenlerin depolama alanlarından/bölgelerine taşınmasını ve servis

kesintilerine ve/veya planlanan kesintileri ATS kullanıcı arayüzünde belirtilmeli ve ayrıca otoritenin belirttiği şekilde ekranlardan tren operatörüne gösterilebilir.

Bir ATS sistemi ayrıca CBTC bölgesinde faaliyet gösteren CBTC donanımlı trenlerin hareket yetkilerini kontrol etmek ve sınırlamak için bir araç içerebilir. CBTC hareket yetkisi sınırları ATS kullanıcı arayüzünde gösterilebilmeli ve yetki sınırlarının denetlenmeyen herhangi bir durumda alarm vermelidir [28].

### **6.3.4. Otomatik Tren Denetimi**

#### **6.3.4.1. Program/İşletme Denetimi**

Bir ATS sistemi, CBTC bölgesinde faaliyet gösteren CBTC donanımlı trenlerin zamanlamasını ve/veya yoldaki uyumu ile ilgili olarak otomatik olarak izleme ve düzenleme kabiliyetine sahip olabilir.

Bir ATS sistemi otomatik bir bilgi gönderme işlevi içerebilir (tren kimlikleri, CBTC tren yeri raporları, trenler arasındaki tarifeli ve gerçek geçişler ve yetkili ATS kullanıcıları tarafından uygulanan servis stratejileri temel alınarak).

CBTC donanımlı trenler, otoritenin belirttiği gibi tarifesi ve rota düzenlemesi, bekleme süresi (tren tutma yerleri dahil) yoluyla yapılacak ve ayrıca istasyonlar arasındaki çalışma sürelerinin kontrolü (örneğin, hızlanma ve servis freni hızlarını ayarlama ve ayarlamalar) yapılarak kontrol edilir.

İnsanla işletilen trenler için, istenilen istasyon kalkış zamanı ve istasyonlar arasında istenen hız profili, tren operatörüne göstergelerinde gösterilebilir ve ATO modunda çalışırken, otomatik olarak kullanılan bir CBTC sistemi tarafından ATO otomatik hız denetim fonksiyonu uygulanmalıdır [28].

Bir ATS sistemi, CBTC donanımlı trenlerin (örneğin, ıslak ray koşullarına karşılık olarak) tren servisi fren profillerini ayarlama kabiliyetini sağlayabilir. Bir CBTC

sistemi, acil durum fren uygulamasıyla sonuçlanabilecek koşulları önlemek için servis frenleme profillerinde istenen değişikliklerin uygulanmasını koordine edecektir.

#### **6.3.4.2. Makas Yönetimi**

Bir ATS sistemi, genel sistem gecikmelerini en aza indirmek için uygun tren buluşmalarını (yerel ve ekspres hatlar arasındaki transferler ve farklı hatlar arasındaki birleşme noktasında) kolaylaştırmak için CBTC tren konum raporlarına dayanan otomatik tren düzenleme fonksiyonlarını içerebilir [28].

#### **6.3.4.3. Enerji Optimizasyonu**

Bir ATS sistemi, CBTC donanımlı trenler için tren ivmelenme, tren süzülmesi ve tren frenlemesinin gerçek zamanlı kontrolü ve koordinasyonu yoluyla enerji optimizasyon algoritmalarını uygulama yeteneğine sahip olmalıdır [28]. Enerji optimizasyonuna karşı program/ilerleme düzenlemesine verilen öncelik, otorite tarafından belirtildiği şekilde olacaktır.

#### **6.3.5. İstasyon Durma Fonksiyonları**

##### **6.3.5.1. Bir Sonraki İstasyonda Treni Durdurma**

Bir ATS sistemi, trenin bir sonraki istasyonu atlaması planlanmış olsa bile, CBTC donanımlı tren/trenlerin bir sonra ki istasyonda durmak için yönlendirme araçları içerir [28]. İnsanla çalışan trenlerde, bir CBTC sistem, ATS tren durma bilgisini tren operatörüne DMI arayüz aracılığı ile gösterebilir. Aynı zamanda ATO modunda, CBTC donanımlı bir tren bir sonra ki istasyonda otomatik olarak durabilmelidir.

##### **6.3.5.2. Treni İstasyonda Tutma**

Mürettebatsız çalışan trenler için bir ATS sistemi, bir istasyonda CBTC donanımlı bir treni tutacak (ve daha sonra serbest bırakacak) imkanlar içerecektir [28].

İnsanla çalışan trenler için bu işlev isteğe bağlıdır ve otorite tarafından belirtildiği şekilde olmalıdır. Bu işlev sağlanıyorsa, bir CBTC sistemi, tren operatörüne bilgi gösterebilir ve/veya CBTC donanımlı bir tren ATO modunda istasyonda hareket etmesi önlenir.

#### **6.3.5.3. İstasyonda Durmayı Atlama**

Bir ATS sistemi, bir CBTC donanımlı trenin veya CBTC donanımlı tren grubunun bir istasyondan veya bir grup istasyondan durmadan geçmesini sağlayacak tesisleri içerebilir. Mürettebatla çalışan trenlerde, bir CBTC sistemi, atlama istasyonu bilgilerini tren operatörüne arayüz ekranlarında gösterebilir. ATO modunda, tren belirlenen istasyonları otomatik olarak atlayacaktır [28].

#### **6.3.5.4. Kapı Kontrol Engelleme**

Bir ATS sistemi ATP-Kapı Kontrol fonksiyonuna göre tren kapılarının CBTC kontrolünü önleme (ve sonradan izin verme) olanakları içerebilir.

#### **6.3.6. Tren Operasyonları Kısıtlama**

Aşağıdaki işlevlerin uygulanması ve kaldırılması potansiyel olarak sistem tehlikelerine neden olabilir ve bu işlevlerin spesifik uygulaması EN 1474-1 Performans Gereksinimlerinde tanımlanan “Risk tanımlama ve risk değerlendirme süreçleri” tarafından istenen tehlike analizlerinde dikkate alınacaktır [28].

##### **6.3.6.1. Tren Rotası Durdurma**

Bir ATS sistemi, tek bir CBTC donanımlı treni veya bir grup CBTC donanımlı treni derhal durdurmak için bir araç sağlayacaktır. Bir CBTC sistemi, belirlenen trenlerde derhal bir fren uygulaması başlatacak ve varsa tren operatörüne arayüz üzerinden haberdar edecektir [28].

### **6.3.6.2. Geçici Hız Kısıtlaması**

Bir ATS sistemi, CBTC bölgesindeki herhangi bir hat bölümünde çalışan CBTC donanımlı trenler için geçici hız kısıtlamaları uygulayacak (ve kaldıracak) fonksiyonlar içerecektir.

### **6.3.6.3. Makas/Yol Engelleme**

Bir ATS sistemi, bir anahtarı, bir çıkış sinyalini, bir rota giriş noktasını veya CBTC bölgesinde bir yolun bir bölümünü bloke etme (ve daha sonra engelini kaldırma) işlevleri içerecektir. Bir CBTC sistemi, CBTC donanımlı trenlerin gerekli pozisyonda veya bloke edilmiş rotalara ve/veya yol bölümlerine hizalanmamış bloke edilmiş makaslar üzerinde hareket yetkilileri almasını yasaklayacaktır [28].

### **6.3.6.4. Çalışma Bölgesi**

ATS sistemi, iş ekiplerinin ve iş trenlerinin korunması için geçici çalışma bölgeleri kurmak (ve daha sonra kaldırmak) için tesisler içerecektir.

Bir CBTC sistemi, tanımlanmış çalışma bölgelerine yaklaşmak ve bu bölgelere sınırlandırılmış hızları uygulamak zorundadır (bkz. EN 1474-1 6.1.13) [28]. Mürettebatla çalışan trenlerde, kısıtlamanın bir çalışma bölgesine bağlı olduğunu belirten bilgiler ekranlarında tren operatörüne gösterilecek ve CBTC sistemi bir çalışma bölgesi üzerinden ATO çalışma modunu engelleyebilecektir.

Bir ATS sistemi, görüşün kısıtlı olduğu alanlarda yoldaki yol işçilerini uyararak için yol boyunca trenlerin yaklaşımını ve yönünü görsel ve işitsel olarak gösteren yöntemler de sağlayabilir.

### **6.3.7. Yolcu Bilgi Sistemi Arayüzü**

Bir ATS sistemi, CBTC tren konumu raporlarına dayanarak tren varış bilgisi gibi otomatik yolcu bilgi mesajlarını iletmek için hat boyu ve/veya araç üstü yolcu bilgi



sistemleri ile arayüz oluşturabilir. Trenle taşınan yolcu bilgi sistemi arabirimleri için IEEE Std 1477-1998 standardı referans alınabilir [28].

### **6.3.8. Hata Raporlama**

#### **6.3.8.1. CBTC Hata Raporlama**

Geçiş sisteminin zaman performansını etkileyebilecek veya belirli CBTC işlevlerinde başka bir kayıpla sonuçlanabilecek bir CBTC sistemi tarafından algılanan veya tolerans dışı koşullar ATS kullanıcı arabirimi ekranında otomatik olarak gösterilebilir. Tüm uyarılar, kritik ve kritik olmayan uyarılara göre sınıflandırılmalı, önceliklendirilmeli ve kaydedilmelidir. Tüm kritik uyarı vermeler onay gerektirir.

#### **6.3.8.2. Tren Arıza Raporlama**

Trenle üzeri CBTC ekipmanı, otorite tarafından belirtildiği gibi, tren sağlığı verilerini ATS kullanıcı arabirimi ekranlarında görüntülenmek üzere yol kenarına iletmek amacıyla trenle taşınan alt sistemler ile arabirimler içerebilir.

### **6.3.9. Karşılıklı Çalışabilirlik Arayüz Gereksinimleri**

Birlikte çalışabilirlik gereksinimlerinin otorite tarafından belirtilmesi durumunda, birlikte çalışabilirlik arabirimi standartlarını tanımlamak o otoritenin sorumluluğundadır.

Birlikte çalışabilirlik gereksinimlerine örnekler aşağıdakileri içerir [28];

- a) Bir tedarikçi tarafından sağlanan CBTC ekipmanı ile donatılmış trenler, başka bir tedarikçi tarafından sağlanan hat boyu CBTC ekipmanı ile donatılmış bir alanda çalışabilme,
- b) İki ayrı tedarikçi tarafından sağlanan hat boyu ekipmanları üst üste binme alanında (iki farklı sinyal tedarikçi ekipmanları ile oluşturulmuş sinyal sistemlerinin kesişimi) ve ortak ATS ekipmanlarıyla iletişim kurabilmesi,

- c) Bir tedarikçi tarafından verilen, başka bir tedarikçi tarafından sağlanan tren kaynaklı CBTC ekipmanlarıyla donatılmış başka bir temel işletme ünitesi ile bir tren içinde çalışabilmesi için döşenmiş, tren kaynaklı CBTC ekipmanına sahip temel bir işletme birimi.

## BÖLÜM 7

### EMNİYETLİ FRENLEME

Sinyalizasyon sistemlerinin temel amacı bir işletmede trenlerin sık seferlerine uygun bir trafik oluşturulabilmesi ve emniyetli trafiğin sağlanmasıdır. Geleneksel veya günümüz sinyal sistemlerinde bu amaç da açıkça gösteriyor ki sinyal sistemlerinin ve otomatik tren koruma sistemlerinin sistem tasarımında ana ve kritik faktör emniyettir [28]. Emniyetli frenleme, tren emniyeti ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. ATP sistemi tarafından çalışan bir tren otomatik olarak frenleneceğinde, acil durum veya hangi frenleme sistemi olursa olsun frenleme doğruluğu ve koruma mesafesi sağlanarak emniyetli bir frenleme yapılacaktır. Emniyetli koruma mesafesi çok uzunsa, işletmede tren trafik verimini azaltır ve sürücü ile çalışan tren trafiğini yavaşlatır. ATP sistemlerinin sistem tasarımı sırasında sağlayacağı ana görevlerden birisi optimum güvenli koruma mesafesi sağlamaktır.

Emniyetli frenlemenin oluşması ve geliştirilmesinin önemi, 1850'lerde ve 1860'larda kademeli olarak tüm dünyada anlaşılmaya başlandı. Başta “Armagh Demiryolu Felaketi” olmak üzere bir dizi kazanın ardından 1889'da Parlamento'nun yasayı kabul etmesinden sonra Birleşik Krallık'ta emniyetli frenleme kavramı zorunlu hale gelmiştir [40].

Emniyetli frenlemenin temeli, geleneksel sinyal dünyasındaki eşdeğer kılavuz “bir blok ayırma” kuralıdır; iki treni ayıran mesafe bir blok olmalıdır [34]. Bu uygulama, bir trenin devreye girmesi durumunda treni durdurmak için yeterli mesafe olmasını sağlar.

## **7.1. FREN VE EMNİYET**

Emniyetli frenleme kavramını açıklamadan önce temel frenleme ve emniyet kavramını tanımlamak gerecektir. Bu bölümde temel frenleme ve emniyetli frenleme kavramları, alt sistemleri ile birlikte açıklanmaktadır.

### **7.1.1. Fren ve Frenleme**

Frenleme EN 13452-1:2002 standardında, meydana gelen tren hareketine direnmek veya sabit bir trenin hareketini önlemek için bir kuvvetin üretildiği süreç olarak tanımlanmaktadır [41]. Frenleme fonksiyonunun oluşması için Frenleme işlevini gerçekleştirilecek ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Fren performansı bir aracın veya altyapının ömrü, yolcu ve yük taşıma konforu için önemlidir. Fren sisteminin performansını ve işlevini etkileyen ana faktörler; frenleme kuvveti, araçların kütlesi ve hızı, durma veya fren mesafesi, demiryolu durumu ve çevresel faktörlerdir [42].

### **7.1.2. Emniyet ve Emniyetli Frenleme**

Emniyet, tüm sistem ve alt sistemlerinin kabul edilemeyecek risklerden korunma durumudur. Frenleme Başlık 7.1.1'de belirtildiği gibi, bir kütlenin hareketsiz kalmasını sağlamak veya hareket eden bir kütlenin hareketsiz konuma geri dönmesini sağlamaktadır. Yük ve Yolcu taşımacılığı yapılan raylı sistemlerde, frenleme ekonomik, emniyetli, güvenilir işletmelerin gereği olarak oluşan trafik yönetim sistemleri için hayati önem taşımaktadır. Ekonomik, emniyetli ve güvenilir sistemlerin işletilebilmesi ve sinyalizasyon sistemlerinin gelişimi ile emniyetli frenleme kavramı oluşmuştur.

Özetle; Emniyetli Frenleme, frenleme doğruluğudur. Frenleme Doğruluğu tarafından belirlenen güvenli koruma mesafesi, frenleme hassasiyeti, treninin frenleme de ki başlangıç hızı, kontrol yolu, fren sistemleri dağılımı, ATP sistemlerinin reaksiyon süresi, tekerlek-yapışma (adezyon) gibi farklı faktörlerden etkilenir. Yukarıdaki

faktörler analiz edildiği sürece, ATP sistemlerinin tren işletim güvenliğini sağlamasını ve tren operasyon verimliliğini arttırmasını sağlamak için güvenli koruma mesafesi doğru bir şekilde belirlenebilir ve emniyetli frenleme gerçekleştirilebilir.

## **7.2. FREN SİSTEMLERİ UYGULAMALARI VE GEREKSİNİMLERİ**

DIN EN 13452-1: 2003 standardında yaygın olarak kullanılan frenleme uygulamaları temel olarak şu şekilde kategorize edilmektedir [43];

- a) Servis fren uygulaması
- b) Tam servis fren uygulaması
- c) Acil fren uygulaması
- d) Durdurma fren Uygulaması
- e) Eğim fren uygulaması
- f) İmbolizasyon fren uygulaması
  - a. Park fren uygulaması
  - b. Tutma fren uygulaması

### **7.2.1. Servis Freni**

Servis freni, işletme de ki bir araç veya dizi için işletme hız kurallarında seyretmesi adına kullanılan hizmet freni çeşididir. Trenin hızını kontrol etmek için normalde tren sürücüsünün ve/veya otomatik sürüş ekipmanının kontrolü altında kullanılan frenleme sistemidir. Servis freni uygulama alanları, hat üzerinde belirlenen hız sınırlamalarının korunması için tatbik edilir. Diğer fren çeşitlerine göre sürekli ve sık sık kullanılmaktadır. Böylece çevresel ve aşınma durumlarına karşı güçlü bir frenleme modeli olarak görülmektedir.

Servis freni için aranması gereken bazı gereksinimler; servis frenlemesi sağlanırken belirlenen performans seviyelerine tutarlı bir şekilde ulaşılmalıdır. Trenin kontrollü hareket edebilmesi için sürücünün sıklıkla kullanımına göre tasarlanmıştır. Yolcu konforunu iyileştirmek için ise frenleme parametreleri ayarlanabilir hale getirilmiştir [43].

- a) Yüksek kullanım sıklığından dolayı, servis frenlemesi kullanılan araçlarda, olumsuz çevresel etkilerin (örneğin gürültü, toz oluşumu) en aza indirilmesini sağlamalıdır.
- b) Ek olarak, Ulaşım Otoritesi için yaşam döngüsü maliyetlerini düşüren sistemler aranmalıdır.

### 7.2.2. Acil Durum Frenlemesi

Acil durum frenlemesi, belirli bir performans seviyesinde ve yüksek bütünlükle tasarlanmalıdır.

“Acil” terimi ne zaman kullanılırsa, Ulaştırma Otoritesi EN 13452-1 - 3.2.3 uyarınca gereken acil durum fren tipini tanımlayacaktır [43].

Acil durum frenlemesi, diğer frenleme uygulamalarının aksine emniyeti sağlayabilmek adına yolcu ve personel konforunun düşünmeksizin emniyetli duruş veya emniyetli mesafeyi sağlamakta yetkindir. Acil durum fren sistemi, treni, tanımlanan yavaşlama seviyelerinde tanımlanmış bir hız mesafesi ilişkisine getirebilir ve halkın ve personelin güvenliği ile orantılı olarak sarsıntı yapabilir.

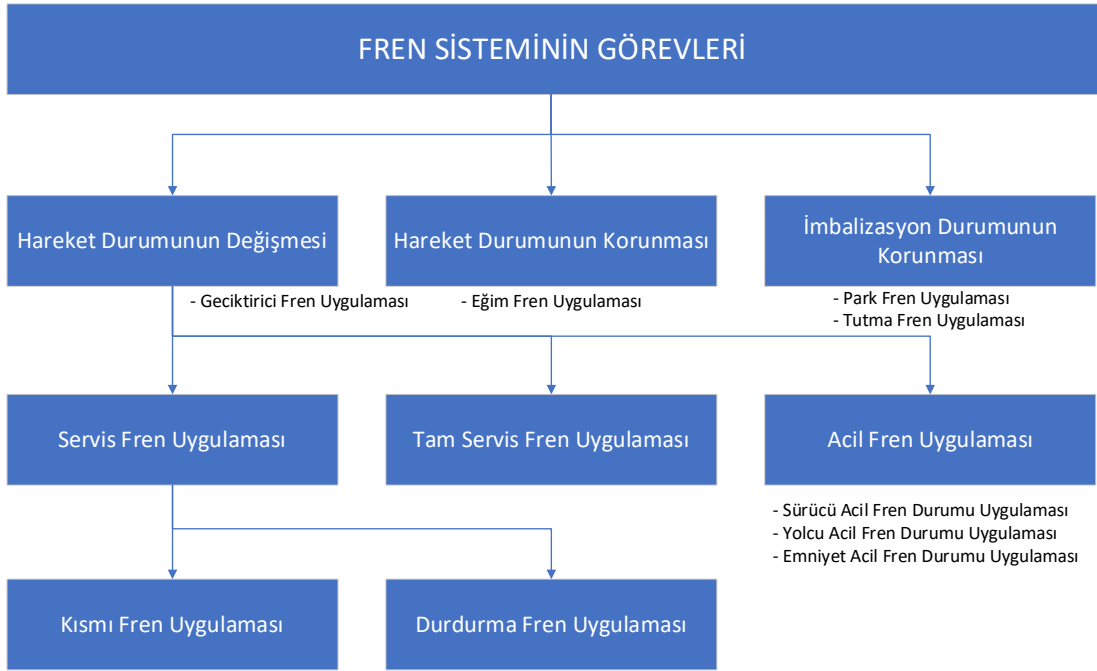
Bu uygulamanın başlatılabilmesi için acil durumunu uluslararası olarak tanımlanan 4 farklı uygulama mevcuttur. Tanımlayan 4 farklı kategoride Çizelge 7.1’de tanımlanmıştır.

Çizelge 7.1. Acil durum frenleme kategorisi [43].

Kategori	Başlatma için Temel Sebepler
Acil 1	Sürücü Farkındalığı veya ATO
Acil 2	Yolcu Alarmı
Acil 3	Sürücü, Fren kontrolü üzerinden verilmiş özel pozisyon ile veya ATP
Acil 4	Fren denetleyicisinden ayrı kontrol ile yetkili kişi

### 7.3. FRENLEME SİSTEM GÖREVLERİ

Bir demiryolu aracının ömrü boyunca çeşitli frenleme görevleri vardır. Fren sisteminin temel görevleri; hareket durumunun değişmesi, hareket durumunun korunması ve yuvarlanmaya karşı koruma şeklindedir. [42]. Temel fren sistemi görevleri, Şekil 7.1’de tanımlanmıştır [43].



Şekil 7.1. Temel fren sistemi görevleri.

### 7.4. EMNİYETLİ FRENLEME MESAFESİ

Emniyetli Frenleme Mesafesi, otomatik bir tren koruma (ATP) sisteminin tasarımında her zaman önemli bir sorun olmuştur. ATP sisteminin kontrol şekli, tren fren sistemi doğruluğu, ATP sisteminin reaksiyon süresi vb. gibi birçok faktör tarafından belirlenen tren frenleme doğruluğundan etkilenir. Matematiksel ifadesi de faktörlere bağlı olarak çok değişkenli bir fonksiyon şeklindedir.

Emniyetli frenleme tasarımı, tren operasyonunun emniyeti ve verimliliği ile yakından ilişkilidir. Emniyetli frenleme mesafesi çok kısaysa, hat üzerinde kapalı bir sinyal bloğunu geçersiz kılabilir veya arkadaki tren öndeki tren ile çakışabilir. Sonuç olarak, tren çalışma emniyeti ve güvenilirliği sağlanamaz. Emniyetli frenleme mesafesi çok

uzunsa, iki tren arasındaki mesafe uzun olması gerektiğinden hattın işletme verimliliğini azaltacaktır.

Emniyetli frenleme mesafesinde genel olarak iki farklı yaklaşım ile tanımlama yapılabilir, mutlak mesafe frenleme ve bağıl mesafe frenleme [42]. Bu iki farklı tanım frenleme de teorik ve pratik hesaplamada mevcut trenlerin hız, frenleme kapasitesi, hat faktörleri, hava şartları, eğim ve aracın frenleme eğrisi gibi bir çok faktörün frenlemeyi etkilemesinden dolayı oluşmuştur.



## BÖLÜM 8

### FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ

Demiryolu sistemleri, kendilerini oluşturan sistem ve alt sistemlerden oluşan bir sistemdir. Gelişen ve geliştirilen sistemlerde öncelik kazaları önlemektedir. Kazaları önlemek adına yapılan ve yapılmış olan tüm faaliyetler genel olarak emniyet terimi ile tanımlanmaktadır. Bir demiryolu sisteminde emniyet kavramının tam olarak tanımlanabilmesi ve uygulanabilmesi için sistemi oluşturan tüm sistem ve alt sistemlerinde emniyetli olması gerektiği öne sürülmektedir. Bu bölümde Emniyet, Fonksiyonel Emniyet ve fonksiyonel emniyet yönetimi kavramları dahilinde uluslararası kabul gören standartlar, çalışmalar tanımlanacaktır.

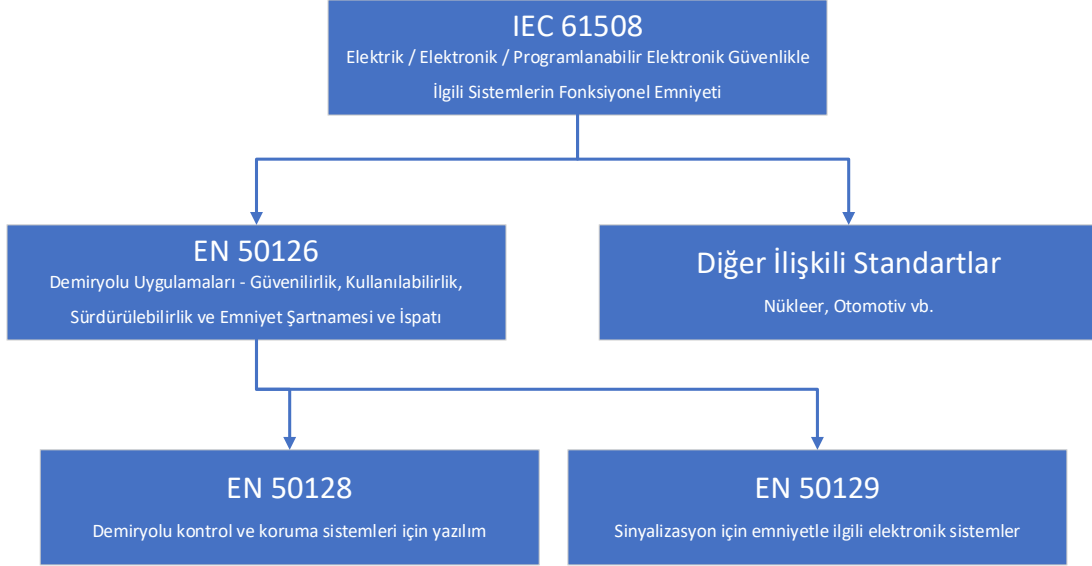
Emniyet; sistemlerin sahip olması gereken bir nitelik, özellik ve sistemin çevre ve insan sağlığına yönelik bir tehlike unsuru oluşturmamasını sağlayan sistemler bütünüdür [44]. Bu tanımda dahil olmak üzere farklı kuruluşlar tarafından farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Uluslararası kuruluşlar genel bir tanımlamayı kabul etmektedir. Uluslararası Elektromanyetik Komisyonu tarafından yapılan tanımlamayı kabul edilmiştir [45].

Fonksiyonel emniyet; bir sistemin emniyetli olabildiğinden bahsedebilmek için içerdiği tüm sistemler ve alt sistemlerin emniyetli olma durumunu ifade etmektedir. Fonksiyonel emniyet, sistem emniyetinin bir parçasıdır ve sistemin, girdilerine göre doğru işlemleri yapmasına bağlıdır [46].

#### 8.1. FONKSİYONEL EMNİYET YÖNETİMİ

Fonksiyonel emniyetin sağlanabilmesi için ilgili sistemler veya alt sistemlerin üretilmesi, geliştirilmesi gibi aşamalarında konsept aşamasından işletmeden çıkarma

fazına kadar olan yaşam döngüsü olarak adlandırılan bir süreçte tüm fazlarda takip edilmesi ve uygulanması gereken idari ve teknik faaliyet gereksinimleri vardır.



Şekil 8.1. IEC 61508 çatı standart gösterimi.

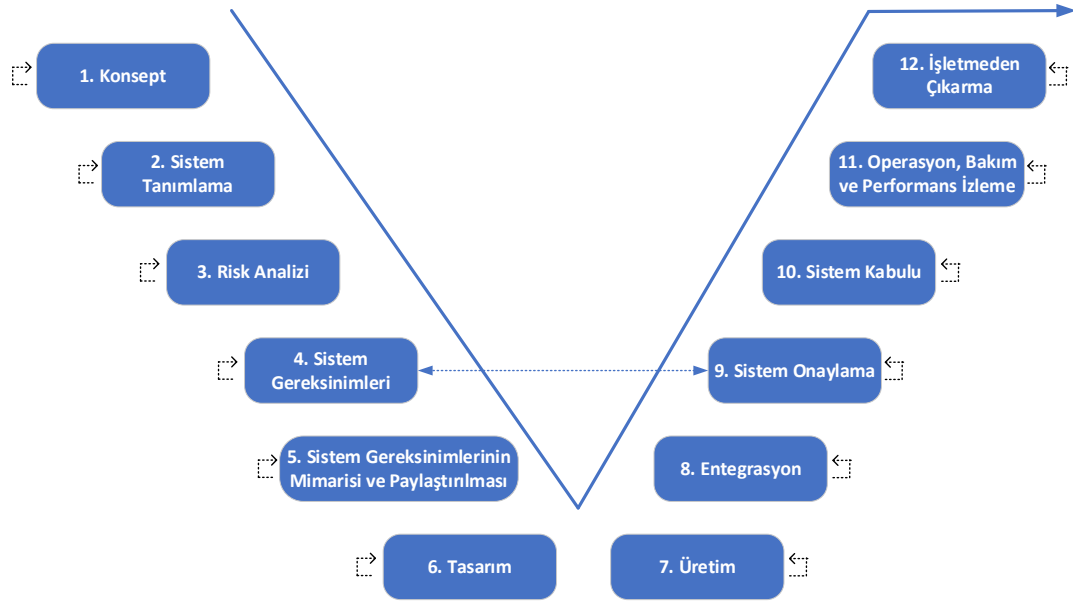
## 8.2. SİSTEM YAŞAM DÖNGÜSÜ VE GÖREVLERİ

Sistem yaşam döngüsü bir projenin SIL seviyesinde hazırlanabilmesi için, projenin içerik kısmından başlayan, sistem mimarisinin oluşturulması ve dağıtılmasına kadar devam eden tüm proje zamanı için kullanılan tanımdır. Aynı zamanda “V” model olarak da adlandırılmaktadır.

Yaşam döngüsü; bir sistem, sistemler veya alt sistemler için uygulanabilirlik kuralları dahil olmak üzere RAMS yönetimi için bir temel olarak EN 50126 standardında tanımlanmıştır.

Yaşam döngüsü, söz konusu sistem yaşam döngüsü aşamaları boyunca ilerlerken, RAMS dahil olmak üzere bir sistemin tüm yönlerini planlamak, yönetmek, kontrol etmek ve izlemek için bir yapı sağlar [47].

Yaşam döngüsü 50126-1:2017 standardında 12 fazda tanımlanmaktadır. Standart tarafından tanımlanan fazlar Şekil 8.2’de gösterilmektedir.



Şekil 8.2. Sistem Yaşam Döngüsü.

Konsept fazı, sistem kapsamın, içeriğinin ve amacının belirlendiği fazdır. Bir sonraki faz ve sistem yaşam döngüsü boyunca gerçekleştirilecek tüm fazların temelini oluşturmaktadır.

Sistem tanımlama fazı, sistem ve görev profillerinin tanımlandığı, sınırlarının belirlendiği ve organizasyon oluşturulduğu fazdır.

Risk analizi fazı, proje de olabilecek tehlikelerin analiz edildiği, kayıt oluşturulduğu, emniyet planının oluşturulduğu ve oluşabilecek risklerin analiz ve değerlendirilmesinin yapıldığı fazdır.

Sistem gereksinimleri fazı; konsept, sistem tanımlama ve risk analizi fazında oluşan gereksinimlerde dahil edilerek sistem gereksinimlerinin tanımlandığı, doğrulama planlarının oluşturulduğu fazdır.

Sistem gereksinimlerinin paylaşılması fazı, sistem mimarisinin oluşturulduğu ve donanım ile yazılım tasarımı olarak ayrıldığı akabinde gereksinimlerin alt kırılımlarını meydana getirildiği kısım olarak da ifade edilmektedir.

Tasarım fazı, sistemin alt sistemlerinin tasarıma dahil edildiği, RAM ve emniyet analizlerinin gerçekleştirildiği fazdır.

Üretim fazı, sistemin üretiminin gerçekleştirildiği, RAM ve emniyet düzenlemelerinin oluşturulduğu fazdır.

Entegrasyon fazı, oluşturulan sistem ve alt sistemlerin, sisteme ek olarak dahil edilen sistem ve alt sistemlerin/bileşenlerin entegre edildiği ve sistem testlerinin gerçekleştirildiği fazdır.

Sistem onaylama fazı, sistemin belirlenen ve istenilen sistem olarak üretildiğini doğrulamak ve sistem testlerinin başarılı sonuçlarının rapor haline getirildiği, onaylandığı ve sistemin işletmeye alınması için hazırlık fazıdır.

Sistem kabulü fazı, sistemin kabul kayıtlarının oluşturulduğu, doğrulandığı ve RAM doğrulamasının gerçekleştirildiği, emniyet raporunun oluşturulduğu fazdır.

Operasyon, Bakım ve Performans İzleme fazı, sistemin işletmede olduğu, bir sonraki projeler yeni RAM ve emniyet değerleri kaydı tutulan; proje için oluşturulan RAM ve emniyet hedeflerinin doğrulunun kontrolünün sağlandığı fazdır.

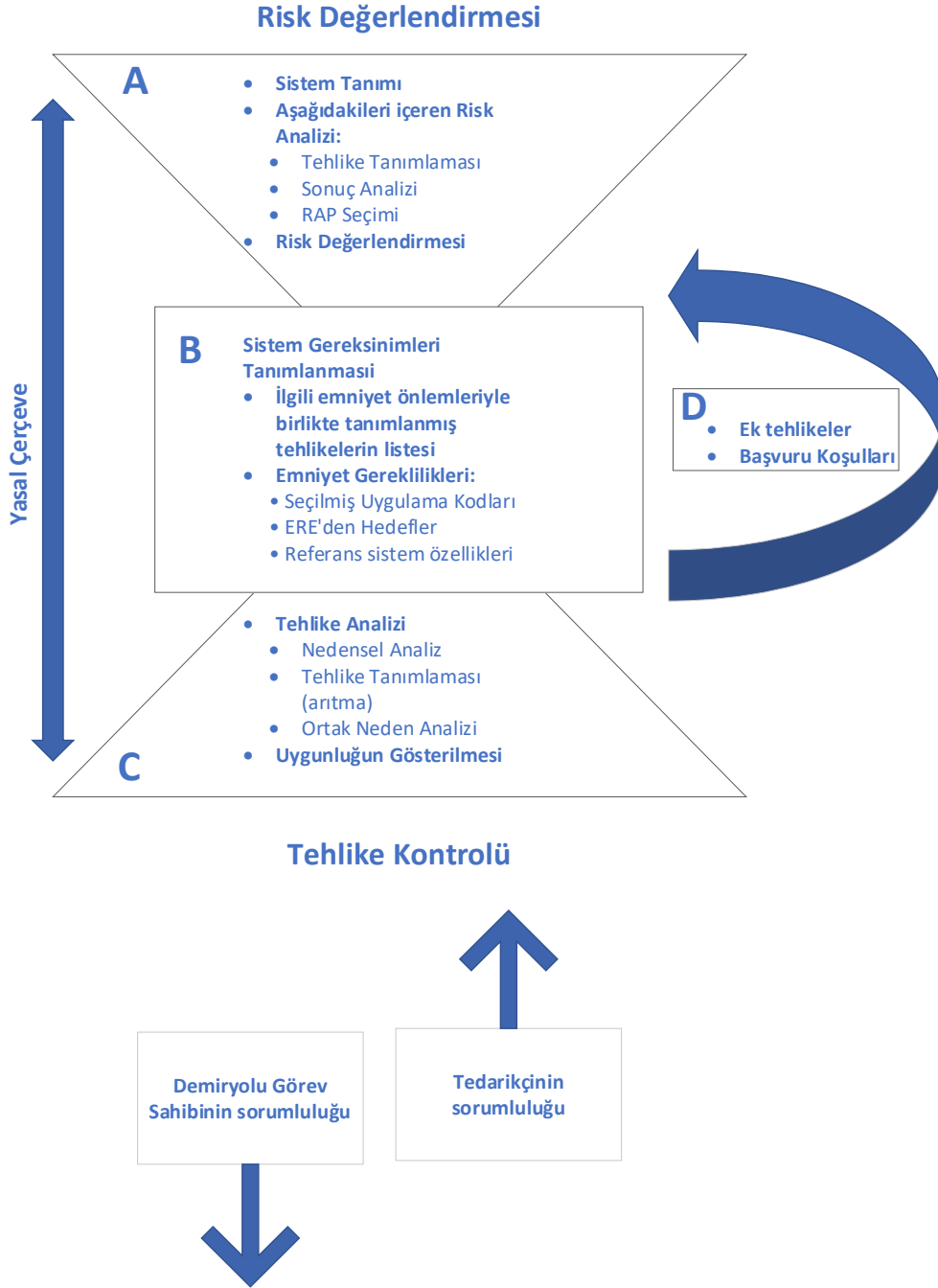
İşletmeden çıkarma fazı, sistemin emniyet ve RAM performansları değerlendirilerek sistemin işletmeden çıkartıldığı fazdır.

### **8.3. EMNİYET SÜRECİ – KUM SAATİ MODELİ**

EN 50126-2:2017’de Kum saati modeli, EN 50126-1:2017’de tanımlanmış olan V Model (Yaşam Döngüsü Modeli) için emniyet süreçlerini uygulamaya yarayan basitleştirilmiş bir yaklaşım sunar.

Kum Saati Modeli, ilgili sorumluluk alanları da dahil olmak üzere, bir teknik sistem için kabul edilebilir bir emniyet seviyesi sağlamak için kullanılmaktadır.

Bu modelin amacı, risk değerlendirmesinin (demiryolu sistemi düzeyinde) bir parçası olarak risk analizi ile tehlike kontrolünün bir parçası olarak (söz konusu sistem düzeyinde) tehlike analizi arasındaki ayrımı vurgulamaktır [48]. Kum saati modeli Şekil 8.3’de gösterilmiştir.



Şekil 8.3. Kum Saati Modeli [48].

### **8.3.1. Risk Değerlendirme**

Risk değerlendirilmesi Sistem tanımına dayanır ve risk analizi ile risk değerlendirmesini kapsar.

Bu faaliyetin ana görevi, sistem tanımından türetilen risk analizidir. Risk analizi; tehlike tanımlamasını, sonuç analizini ve Risk Kabul İlkesinin (RAP) seçimini içerir [48].

Bir risk değerlendirmesindeki ayrıntı düzeyi, riskin uygun şekilde değerlendirilmesini sağlamak için yeterli olmalıdır. Buradaki amaç, herhangi bir önemsiz tehlikeyi kataloglamak değildir.

Bir risk değerlendirmesi, demiryolu işletmesi ve uygulanan teknolojinin kendisi içindeki tehlikelerin ve bunlarla ilişkili risklerin makul bir analizini yansıtmalıdır.

#### **8.3.1.1. Sistem Tanımlama**

Sistem tanımlama risk değerlendirmenin ilk adımı olan sistem tanımlama EN 50126-1:2017 7.3 bölümüne göre oluşturulacaktır [46]. Tehlikeleri tanımlayabilmek için sistem tanımlama aşağıdaki hususları içermelidir;

- a) Sistemin hedefi ve görev profili
- b) Sistem sınırları
- c) Sistemi etkileyen operasyonel gereksinimler
- d) Risk değerlendirmesi için mevcut emniyet önlemleri ve varsayımlar

Emniyet durumları arasındaki ilişki, Yaşam Döngüsünde "sistem tanımı ve operasyonel bağlam" sırasında oluşturulan karşılık gelen bir sistem ayrıştırması ile ilişkilendirilecektir.

Niteliksel açık risk tahmini, uzman görüşü kullanılarak yapılmalıdır (örneğin, sistem tanımına dayalı mantıksal bir argüman kullanılarak) [48].

### 8.3.1.2. Risk Analizi

Risk Analizi, potansiyel tehlikeleri belirlemek, tehlikelerin derecesini ve tehlikelerin sıklığını belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir [49].

Risk analizi süreci tekrarlanan bir süreçtir. İncelenen sistemin tanımıyla başlayacaktır. Daha sonra, söz konusu sistem için tehlikeler, riskler, ilgili emniyet önlemleri ve sonuçta ortaya çıkan emniyet gereksinimleri tanımlanacaktır [48].

Risk analizi şunları içerir;

- a) Tehlike tanımlama;
- b) Sonuç analizi (sonuçların analizi, yani kayıplar).
- c) Risk Kabul Prensibinin seçilmesi (CoP, RS, ERE)

Risk analizinin başarıyla yapılabilmesi için tehlikenin tanımlanması, tehlike sınıflandırması ve seçilen risk kabul ilkelerini desteklemek için gerektiğinde bir risk modeli tanımlanmalıdır.

Sebepler, tehlikeler ve kazalar, bir ilişki içindedir, örneğin;

- a) Tek bir neden birkaç farklı tehlikeyi tetikleyebilir (veya katkıda bulunabilir);
- b) Bir tehlike birkaç farklı nedenden kaynaklanabilir;
- c) Bir tehlike, farklı operasyonel ve çevresel bağlamlarda farklı tipte kazalara neden olabilir;
- d) Bir kazanın farklı operasyonel ve çevresel bağlamlarda farklı sonuçları olabilir.

Böyle bir model, belirli bir kaza senaryosundaki tehlikeler, tetikleyen olaylar ve engeller arasındaki bağlantıları nitel ve esnek bir şekilde belirleyebilir.

Belirli durumlarda, söz konusu sistem düzeyindeki tehlikeler, doğrudan demiryolu sistemi düzeyinde tehlikelere yol açabilir ve bunlar doğrudan kazalara dönüşebilir.

Diğer durumlarda engeller etkili olabilir. Kazalara veya hatalara yol açabilecek durumlardır.

### **Tehlike Tanımlama**

Tanımlanan sisteme göre sistem seviyesine göre tehlikeler tanımlanır. Tehlikelerin sistematik olarak tanımlanması genellikle aşağıdaki faaliyetlerle gerçekleştirilir [50];

- a) Geçmiş deneyimlerden yararlanmak,
- b) Kaza raporu kayıtları incelemek,
- c) Önceki ve gelen sistemden tehlike ve hata bilgilerini toplamak,
- d) Proaktif tahmin,
- e) Ekip içi beyin fırtınası, Ulusal Otorite ve değerlendirici ile görüş alışverişinde bulunmak.

### **Sonuç Analizi**

Tanımlanan tehlikelere göre de oluşabilecek sonuçlar belirlenir. Sonuç analizi, tehlikeden kaynaklanabilecek ara koşulların ve nihai sonuçların belirlenmesini ve sistem düzeyinde her bir tehlikeden kaynaklanan kaza olasılığının tahmin edilmesini içerir.

### **Risk Kabul Prensiplerinin Seçilmesi (RAP)**

Aşağıda belirtilen üç risk kabul kriterinden biri seçilerek tehlike kontrol altına alınmalıdır.

### **Tekniğin Bilinen Kuralları (CoP)**

Tekniğin bilinen kuralları (yönetmelikler, standartlar vb.) doğru kullanıldığı zaman bir veya birden fazla tehlikenin kontrol edilmesini sağlar. CoP'nin kullanılması, risk kabul prensibi olarak kabul edilir. Kullanılan düzenlemeler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [48];



- a) Demiryolu sektöründe tanınmış ve kabul edilmiş olmalıdır.
- b) Tanımlanan sistem içinde tehlikenin kontrol edilebilmesi için uygulanabilir olmalıdır.

### **Referans Sistemler (RS)**

Referans sistemler aracılığıyla tehlikeler kontrol edilecek ise referans olarak gösterilecek olan sistem aşağıdaki gereksinimleri yerine getirmelidir;

- a) Kullanımında kabul edilebilir bir emniyet seviyesine sahip olduğu kanıtlanmış olmalıdır.
- b) Tanımlanan sistem ile benzer fonksiyonlara ve ara yüzlere sahip olmalıdır.
- c) Referans sistem uzun süre, tanımlanan sistem içerisindeki işletme koşullarına benzer koşullar altında kullanılmış olmalıdır.
- d) Referans sistem gözlenen tehlike ve kaza için emniyetli olarak ispat edilmiş olmalıdır.

### **Doğrudan Risk Tahmini (ERE)**

Risk kabul prensibi olarak ilk iki yöntem ile tehlikeler kontrol altına alınmadığı durumlarda doğrudan risk tahmini prensibi ile risk analizi gerçekleştirilir. Riskin kabul edilebilir olduğundan emin olunmalıdır.

Doğrudan risk tahmini aşağıdaki gereksinimleri yerine getirmelidir [48];

- a) Uygulanan yöntem, gözlenen sistemi ve parametreleri doğru bir şekilde yansıtmalıdır.
- b) Sonuçlar, kesin kararlar almak için net olmalıdır.
- c) Sonuçlar kesinlikle belgelendirilmelidir.
- d) Tahmin, niceliksel veya niteliksel olabilir.
- e) Niceliksel risk tahmini, ortaya çıkma olasılığı ve kaza senaryosuna göre şiddetine yönelik varsayımlar ile yapılır.

f) Niteliksel risk tahmini, uzmanların fikirlerine dayanarak yapılır.

Risk Kabul Prensibi olarak Doğrudan Risk Tahmini uygulandığında, Risk kabul kriterleri tanımlanır.

### 8.3.1.3. Risk Derecelendirme

Tehlikeden kaynaklanan sonucun sıklığı ve şiddetine göre riskin derecelendirilmesidir. Risk, Tehlikeden dolayı oluşabilecek olan bir hasarın (kazanın) sıklığı ve hasarın şiddetinin kombinasyonudur.

Aşağıdaki tablolar, belirli bir kullanımla ilgili önem kategorilerinin örneklerini vermektedir. Tabloya göre kazanın şiddeti seçilmelidir. Şiddetin birimi olarak ölü sayısı, ağır yaralı, sistem kaybı gibi düşünülebilir.

Çizelge 8.1. Şiddet tablosu [48].

Şiddet	Sonuçlar
Felaket	Çok fazla kişinin etkilenmesi ve birden fazla ölü olması ve/veya ağır çevre zararı
Kritik	Az kişinin etkilenmesi ve en az bir ölü olması ve/veya ciddi çevre zararı
Ciddi	En az bir ağır yaralı veya birden fazla hafif yaralı olması ve/veya çevreye küçük çaplı zarar
Önemsiz	Olası hafif yaralanmalar

Aynı şekilde Çizelge 8.2'ye göre kazanın sıklığı seçilmelidir. Sıklığı birim olarak yılda bir kere vb. gibi düşünülebilir.

Çizelge 8.2. Sıklık tablosu [48].

Sıklık	Açıklaması (günde 24 saat işletme)	Açıklaması(senede 5000 saat işletme,30 yıl sistem ömrü)
Sık Sık	Altı haftada bir	150'den fazla
Muhtemel	Altı haftada bir ile yılda bir arası	15 ile 150 arası
Olası	Yılda bir ile on yılda bir arası	2 ile 15 arası
Nadir	On yılda bir ile bin yılda bir arası	En fazla 1 defa
Olası değil	Bin yılda bir ile yüz bin yılda bir arası	Sistem ömrü boyunca olması beklenemez.
Çok düşük olasılık	Yüz bin yılda bir	Sitem ömrü boyunca olması mümkün değildir.

Tanımlanan risklere atanan risk kabul kategorileri sınıflandırılır. Çizelge 8.3'de risk kabul kategorileri gösterilmektedir.

Çizelge 8.3. Risk kabul kategorileri [48].

Risk Kabul Kategorileri	-
Tolere Edilemez	Risk ortadan kaldırılacaktır
İhmal Edilemez	Risk, yalnızca azaltılması mümkün değilse ve demiryolu görevlileri veya sorumlu Emniyet Düzenleme Kurumu'nun mutabakatı ile kabul edilecektir.
Tolere edilebilir	Risk, yeterli kontrol (örn. Bakım prosedürleri veya kuralları) ve sorumlu demiryolu görevlilerinin mutabakatı ile tolere edilebilir ve kabul edilebilir.
İhmal edilebilir	Demiryolu görevlilerinin mutabakatı olmadan risk kabul edilebilir

Risk matrisi (şiddet x sıklık), sıklık, şiddet ve risk kabul kategorilerine göre yapılmalıdır.

$$\text{Risk Kabul Kriteri} = \text{Şiddet} \times \text{Sıklık} \quad (8.1.)$$

Çizelge 8.4. Risk kabul kategorileri [48].

Olasılık	Sıklık	Risk Kabul Kategorileri			
$P \leq 1e-3/h$	Sık Sık	İhmal Edilemez	Tolere edilemez	Tolere edilemez	Tolere edilemez
$P \leq 1e-4/h$	Muhtemel	Tolere edilebilir	İhmal Edilemez	Tolere edilemez	Tolere edilemez
$P \leq 1e-5/h$	Olası	Tolere edilebilir	İhmal Edilemez	İhmal Edilemez	Tolere edilemez
$P \leq 1e-6/h$	Nadir	İhmal edilebilir	Tolere edilebilir	İhmal Edilemez	İhmal Edilemez
$P \leq 1e-7/h$	Olası değil	İhmal edilebilir	İhmal edilebilir	Tolere edilebilir	İhmal Edilemez
$P \leq 1e-9/h$	Çok düşük olasılık	İhmal edilebilir	İhmal edilebilir	İhmal edilebilir	Tolere edilebilir
	Sonuçların Şiddet düzeyi	<b>Önemsiz</b>	<b>Ciddi</b>	<b>Kritik</b>	<b>Felaket</b>

Çizelge 8.4'de yer alan önemsiz ve ihmal edilebilir olanlar, kabul edilebilir risk kategorisini göstermektedir. Tolere edilemeyen ve ihmal edilemeyen kategoriler için emniyet gereksinimleri veya emniyet fonksiyonu yazılarak riski kabul edilebilir kategoriye getirmek amaçlanır.

Risk Değerlendirmesi sonrasında risk kabul ilkesi ERE olan tehlikeler için SIL seviyesi belirlenir. Risk analizi, tüm öngörülebilir tehlikelerin tanımlandığına, tolere edilemeyen ve ihmal edilemeyen risklerin, risk matris yöntemi ile azaltıldığına dair güvence sağlamalıdır.

Risk matris yöntemi ile tehlikelerin şiddeti ele alınarak riskin tolere edilebilir seviyeye azaltılması ile yukarıdaki tabloda olasılık kolonundan uygun gelen THR değeri atanarak SIL seviyesi belirlenir. SIL seviyeleri, doğrudan ve dolaylı etkilerine göre değişir. Şiddeti felaket olan tehlikelerin sonuca doğrudan etki ettiğinde  $THR 10^{-9} h^{-1}$  iken, dolaylı etki sonucu  $THR 10^{-8} h^{-1}$  elde edilir.

Çizelge 8.4, ilgili tehlike için THR gerekliliğinden emniyetle ilgili fonksiyonel gereksinim için gerekli SIL'i tanımlar. SIL-THR ilişkisi Çizelge 8.5'da verilmiştir.

Çizelge 8.5. THR/SIL ilişkisi.

THR ( $h^{-1}$ )	SIL
$10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq THR < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq THR < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq THR < 10^{-5}$	1

### 8.3.2. Emniyet Gereksinimleri

Risk değerlendirme süreci sonucunda, sistem emniyet gereksinimleri elde edilir. Emniyet gereksinimleri üç gruba ayrılır [48];

- Fonksiyonel emniyet gereksinimleri,
- Teknik emniyet gereksinimleri,
- Bağlamsal emniyet gereksinimleri.

#### 8.3.2.1. Fonksiyonel Emniyet Gereksinimleri

Emniyet ile ilgili fonksiyonların beklenen fonksiyonel davranışdır.

Arıza durumunda emniyet ile ilgili fonksiyonların davranışı;

- Emniyet bütünlüğü gereksinimleri
- Tehlikeli olmayan arıza durumunda davranışı

#### 8.3.2.2. Teknik Emniyet Gereksinimleri

Sistemin uygulaması ile bağlantılıdır. Her alt sistem/ürün için teknik gereksinimler, amaçlanan fonksiyonların kapsamına bakılmaksızın, sistem / alt sistem /teknoloji 'den kaynaklanan potansiyel tehditler, çevresel koşullar, bakım yapılabilirlik gibi farklı açılardan türetilir.

Örnek olarak yanıcı malzemelerin bulunması, elektrik gerilimin bulunması, keskin köşeler, yapısal bütünlük ile ilgili tehlikeler, zararlı maddelerin bulunması, mekanik dayanıklılık, nem, ısı, ateş vb. fiziksel koşullar altında davranışı verilebilir.

### **8.3.2.3. Bağlamsal Emniyet Gereksinimleri**

İşletmesel ve bakım emniyet gereksinimlerini kapsar. Hız, işletilecek tren sayısı, ortalama işletme zamanı, sinyalizasyon talimatı, eğitim talebi, personel talebi, işletmesel personelin yeterliliği gibi konuları içermektedir.

### **8.3.3. Emniyet Bütünlük Seviyesi (SIL)**

Emniyet Bütünlüğü, emniyetle ilgili bir sistemin, belirtilen tüm koşullar altında, belirtilen çalışma ortamında ve belirtilen bir süre içinde gerekli emniyet işlevlerini yerine getirmesidir.

Emniyet Bütünlüğü, rastgele ve sistematik arızalardan etkilenebilir.

#### **8.3.3.1. Sistematik Arızalar**

Sistematik arızalar, emniyet bütünlüğünün sayısallaştırılamayan bir parçasıdır;

- a) Tasarım hataları, üretim hataları, entegrasyon hataları,
- b) İnsan hatası,
- c) Sistematik arıza bütünlüğü, kalite yönetimi, emniyet yönetimi ve teknik engellerle sağlanır.

#### **8.3.3.2. Rastgele Arızalar**

Rastgele arızalar, emniyet bütünlüğünün sayısal hale getirilebilen kısmıdır.

Rastgele arızalar, tahmin edilemeyen hatalardır. Rastgele arıza bütünlüğü, özellikle donanım bileşenlerinin güvenilirliğinin (R) sonucudur ve donanım arızalarıyla ilişkilidir.

Rastgele başarısızlık oranı küçüktür hedef THR değeri olmalıdır.

Gerekli SIL seviyesini sağlamak için hem sistematik hem de rastgele arızalarda bütünlük sağlanmalıdır.

### **8.3.4. Tehlike Kontrolü**

Tehlike kontrolü, belirlenen THR değerlerinin tutturulduğunu ve yönetildiğini göstermektir. Tehlike Kontrolü, Tehlike analizi ve emniyet gerekliliklerinin yerine getirildiğini kanıtlamak için ilgili emniyet analizlerini yapmak ve ilgili emniyet belgeleri hazırlamaktan oluşur.

#### **8.3.4.1. Tehlike Analizi**

Analiz edilen senaryoların karmaşıklığından dolayı, sonuç analizi aşağıdan yukarıya teknikler veya aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya tekniklerin bir kombinasyonu kullanılarak gerçekleştirilir.

Uzman görüşünün rolü, destekte kullanılan tekniklerin analizi ve kalibrasyonu için esastır.

Sonuç analizini gerçekleştirmek için genellikle kombinasyon halinde farklı teknikler kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan risk değerlendirme teknikleri Çizelge 8.6'da karşılaştırılmıştır. Bu tekniklerden hata ağacı analizi ve hata türleri ve etkileri analizi kısaca tanımlanmıştır.

Çizelge 8.6. Risk değerlendirme teknikleri [51]

Teknik	Kaynaklar	Belirsizlik Derecesi	Karmaşıklık	Nicelik Hesaplaması
FMEA	Orta	Orta	Orta	Orta
FMECA	Orta	Orta	Orta	Orta
FTA	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HAZOP	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta
RCM	Orta	Orta	Orta	Yüksek
PHA	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
ETA	Orta	Orta	Orta	Yüksek
RBD	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

### Hata Ağacı Analizi (FTA)

FTA'nın amacı, kalitatif ve kantitatif yöntemlerle tepe olayın arıza oranını hesaplamaktır. Olasılık hesabı ile rastgele arızalar için nicel bir değerlendirme yapılır. Olasılık hesabı, kabul edilebilir THR'ye ulaşılmasını sağlamak için yalnızca hafifletilmiş tehlikeleri kullanılır.

Diğer bir deyişle, kantitatif analiz amacıyla, arta kalan analiz sonuçlarını sağlamak için azaltılmış tehlikeler için olasılık hesabı ile nitel analizi doğrulanır. Olasılık hesabı, donanım bileşeni arıza oranları ve arıza modları için bilinen verilere ve FMEA'dan gelen rastgele donanım arızalarının ortaya çıkma sürelerine dayanır.

### Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)

FMEA, Hata ağacı analizi için girdi bilgileri vermek üzere her bir alt sistem arıza oranını tanımlamak için bileşenlerin bilinen tüm arıza modlarının ve sistem seviyesinden alt sistem seviyesine kadar arıza oranının belirlendiği tehlike tanımlamasını kullanacaktır. Bu analizin amacı, ekipman arızalarına atfedilebilir tespit edilen potansiyel tehlikelerin etkili bir şekilde ortadan kaldırıldığı veya kontrol edildiğini doğrulamaktır.



Sistem düzeyinde, arıza koşullarında sistem davranışını belgelemek için bir FMEA kullanılır. Her arıza modu için tanılama kabiliyetini ve arıza oranlarını belirlemek adına elektronik modül seviyesinde FMEA tekniğinin bir varyasyonu önerilir.

#### **8.3.4.2. Ortak Neden Analizi**

Ortak neden analizi, tüm yaşam döngüsü boyunca risklerin bağımsızlığını araştırır. Bağımsızlık gereksiniminde, alt sistemler veya sistem işlevleri arasında fiziksel ve fonksiyonel bağımsızlık olmalıdır. Bağımsızlık tam olarak gösterilemezse, ortak neden arızalarının uygun bir ayrıntı düzeyinde modellenmesi gerekir.

#### **8.3.4.3. Emniyet İspatı**

Emniyet ispatı, ürünün belirtilen emniyet gerekliliklerine uygunluğunu gösteren bir belge olarak tanımlanır.

Emniyet ispat belgesi, EN 50129:2018 standardı Bölüm 7'de belirtilen içeriğe göre hazırlanır [52].

## BÖLÜM 9

### HATA AĞACI ANALİZİ (FTA)

Hata Ağacı Analizi (FTA), potansiyel arızaların, nedenlerini ve mekanizmalarını tanımlamak için kullanılan, hata durumunu görsel olarak gösteren tümdengelimsel bir analiz aracıdır.[53]

FTA analiz sistemi olası bir kritik olay; örneğin bir arıza ile başlar ve bu olaya üst olay denilir. Bu durum bir arıza anında kök nedenden temel düzey etkinliğe yönelik riski görsel ve matematiksel olarak ifade eder. Bu üst olayının nedenini kontrol ederken, sistem arızasının bileşen arızalarından veya bileşen arızalarının kombinasyonlarından kaynaklandığını ve bu bileşen arızalarının FTA'dan temel olayları içerdiğini gösterir [54]. FTA'da analizi yapılan bir olay veya olaylar zinciri, problem çözecek kişi veya kurumların temel nedenlere veya temel düzeydeki olaylara yol açan etmenleri görmelerini sağlar.

FTA, belirtilen üst düzey tehlikeli / istenmeyen bir olayla başlar ve en iyi olaya neden olabilecek tek olayları ve olay kombinasyonlarını tanımlamak için mantık diyagramlarını kullanır. Daha sonra mantık diyagramı, en üst olaya neden olabilecek tekli ve çoklu olayları tanımlamak için analiz gerçekleştirilir [55]. Sonrasında oluşma değerlerinin olasılığı ağaçtaki en düşük olaylara atanır. FTA, üst ve ara olayların meydana gelme olasılığını belirlemek için Boolean Cebiri'ni kullanır.

Boolean Cebri, George Boole'in 1850 yıllarında Aristo tarafından oluşturulan mantık bilimine sembolik şekil verme isteği sonucunda ortaya çıkmıştır. Sayısal devrelerin analiz ve tasarım süreçlerinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır [56]. Boolean cebiri, hata ağacı uygulamalarında indirgenmeyi sağlamaktadır. Hata ağacı analizinde Boolean Cebri kullanırken VE (AND) kapısının işlemi; olayların ancak aynı anda gerçekleşmesi durumunda kapının bağlı olduğu olayın vuku bulacağını belirtir. VE

kapısında bağı olan olayların hata oranları çarpılarak hata oranı hesaplanır. VEYA (OR) kapısının işlemi ise; olayların herhangi birinin gerçekleşmesi ile bağı oldukları üst olayın gerçekleşeceğini belirtir. Bu kapı ile bağlanan olayların bir üst kapıya direk geçişi vardır. Bu durumda kapıya bağı olan alt olayların hata oranları toplanarak neden oldukları olayın hata oranı hesaplanır. Örneğin; A ve B olayları VE kapısı ile bağı ise (A.B) şeklinde, VEYA kapısı ile bağıysa (A+B) şeklinde hesaplama yapılır.

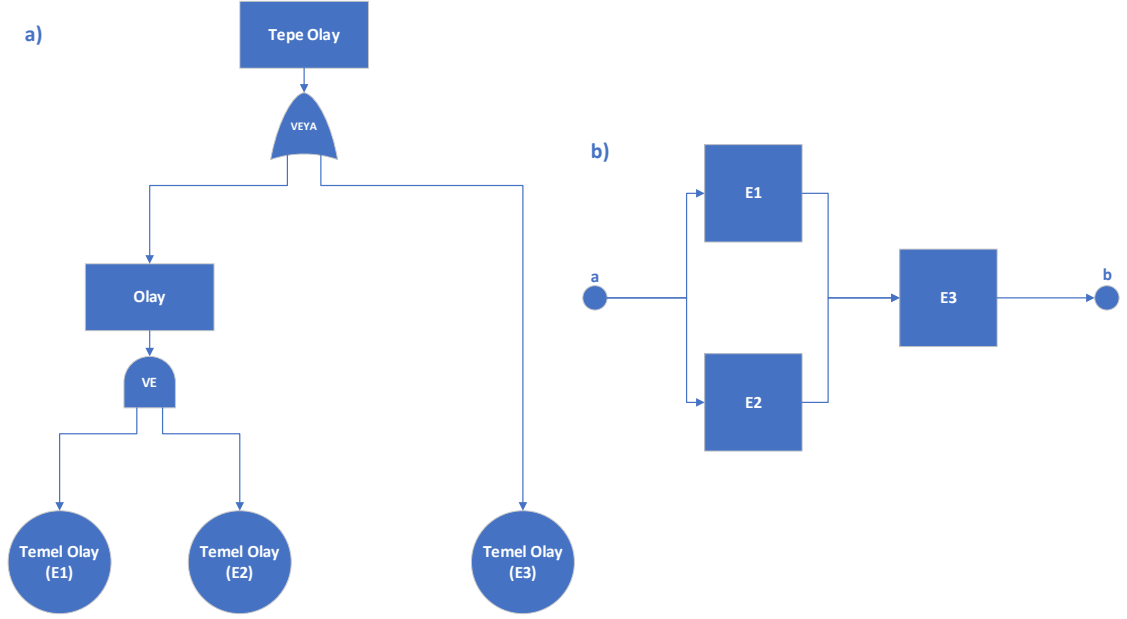
Boolean Cebri kullanılarak en alt temel olaydan tepe olaya kadar hesaplama yapılarak tepe olayın hata oranı bulunur. Ürün ve süreçler daha karmaşık hale geldikçe, görsel olan FTA yaklaşımı bağımsız bir risk tekniği veya Arıza Modu Etkileri Analizi (FMEA) olarak çok önemlidir.

FTA'nın bazı kullanım durumları şu şekilde örneklendirilebilir;

- a) Yeni bir ürün geliştirilmesi sürecinde
- b) Mevcut sistemde emniyeti etkileyebilecek bir güncelleme
- c) Mevcut sistemde hata veya arıza durumlarında

## 9.1. DİYAGRAM

Hata Ağacı Analizi (FTA), birbirinden ayrı arızaları sistem arızasıyla ilişkilendiren güvenilirlik mühendisliğinin en önemli tekniklerinden biridir. Bu yöntem Şekil 9.1'de gösterildiği gibi bir ağaç şeklinde yukarıdan aşağıya bir mantık diyagramına dayanmaktadır [54].





Şekil 9.1. (a) Örnek FTA Diyagramı ve (b) RBD – Güvenirlilik Blok Diyagramı.

Üst ve temel olayları bağlamak için FTA’da her zaman matematik bilimindeki iki mantık kapısı olan VE, VEYA kapıları kullanılır. VEYA kapısı, giriş olaylarından herhangi biri meydana gelirse kapının çıkış olayının meydana geleceği anlamına gelir. VE kapısı, kapının çıkış olayının yalnızca tüm giriş olayları meydana geldiğinde gerçekleşebileceği anlamını taşır.





### 9.1.1. Kapı (G)

VE ile VEYA kapıları lojik kapı olarak adlandırılmaktadır (Çizelge 9.1). VE kapısında ara olay, tüm alt olaylar(Çizelge 9.2) meydana gelirse gerçekleşir. VEYA kapısında ara olay, alt olaylardan biri meydana gelirse gerçekleşir

Çizelge 9.1. Kapı sembolleri ve anlamları.

Sembol	Tanım
	Ve Kapısı / And Gate İki veya daha fazla olayın aynı anda gerçekleştiğini gösterir.
	Veya Kapısı / Or Gate İki veya daha fazla olaydan sadece birinin gerçekleştiğini gösterir.

Çizelge 9.2. Olay sembolleri ve anlamları.

Sembol	Tanım
	Temel Olay / Basic Event Sistem bileşeninde hata veya arızayı gösterir.
	Harici Olay / External Event Normal şartlar gerçekleşmesi veya ortaya çıkması beklenen olay.
	Ara Olay / Intermediate Event Birbirini etkileyen farklı olayın etkileşimi ile oluşan olayı gösterir.
	Gelişmemiş Etkinlik / Undeveloped Event Gerekli şartlar oluşmadığından gerçekleşmemiş olayı gösterir.

## 9.2. MATEMATİKSEL İFADELER

### 9.2.1. Arıza Süresi (t)

Arıza süresi sistemin fonksiyonunu yerine getiremediği süredir. Arıza süresi, “*t*” sembolü ile gösterilir.

### 9.2.2. Güvenirlilik (R)

Güvenirlilik, Bir birimin *t* zamanında, belirlenen koşullar altında ondan istenen fonksiyonu yerine getirebilme olasılığıdır. Güvenirlilik, *R(t)* sembolü ile gösterilir.

### 9.2.3. Arıza Olasılığı (F)

Arıza olasılığı bir birimin *t* zamanında, belirlenen koşullar altında ondan istenen fonksiyonu yerine getirememeye olasılığıdır. Arıza olasılığı, *F* sembolü ile gösterilir.

$$R_{(t)} + F_{(t)} = 1 \quad (9.1.) [57]$$

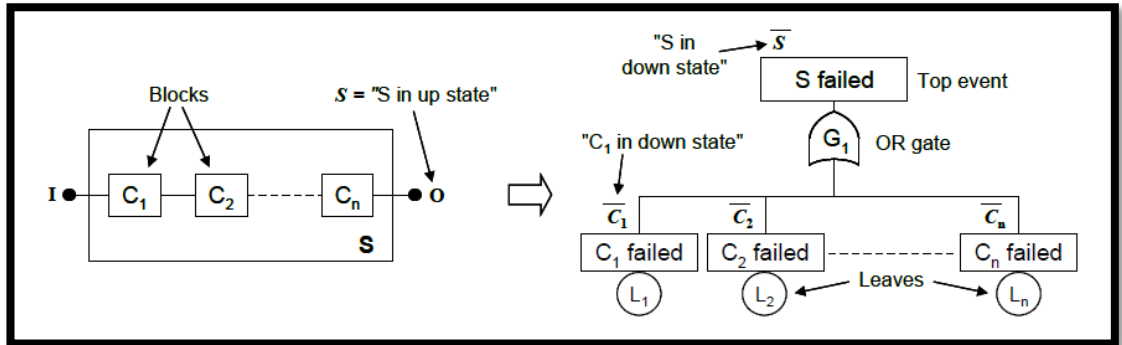
### 9.2.4. Arıza Oranı ( $\lambda$ )

Belli bir zamandaki arıza oranı, örneğin bir gün içerisinde arızalanan nesnelere sayısının sistemin başlangıcında mevcut olan tüm nesnelere bölünmesi sonucu elde edilir.

$$\lambda_{(t)} = - \frac{\frac{dR_{(t)}}{d_t}}{R_{(t)}} \quad (9.2.) [57]$$

#### 9.2.4.1. Seri Sistem Yapılandırması (OR)

Bir sistemde arıza veya arızalar oluştuğunda, oluşan arızalara bağlı olarak oluşan diğer arızalar seri ve bağlı olarak gerçekleştiği durumda seri sistem yapılandırması kullanılmaktadır. Bu durum Booleen tekniğinde ve FTA'da veya kapısı olarak sembolize edilmektedir. Seri arıza durumlarında Şekil 9.2. Seri sistem yapılandırması ve Eşitlik 9.3 geçerlidir [57].

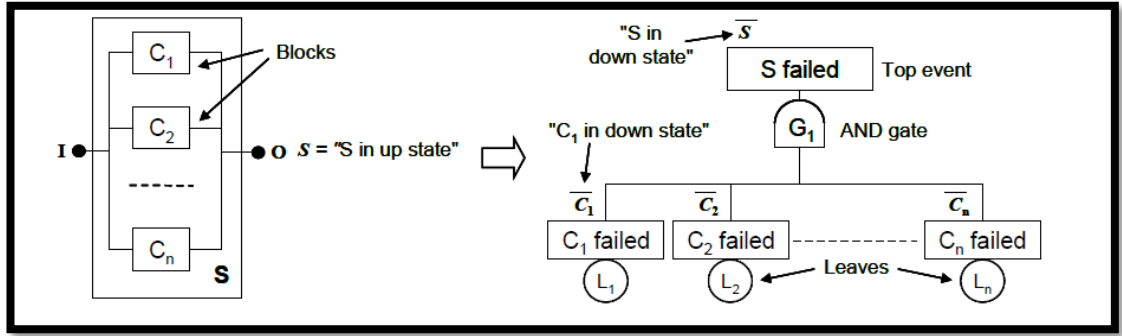


Şekil 9.2. Seri sistem yapılandırması [57].

$$C_{Toplam \lambda} = C_1 + C_2 + C_3 \dots C_n \quad (9.3)$$

### 9.2.4.2. Paralel Sistem Yapılandırması (AND)

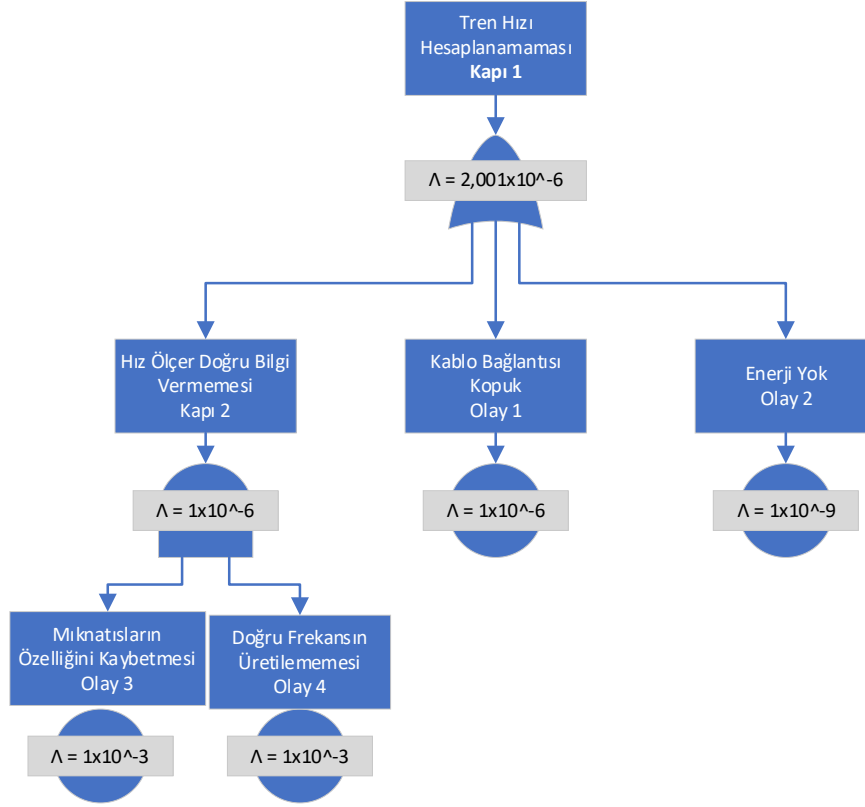
Bir sistemde arızalar oluştuğunda bunlara bağlı olarak oluşan diğer arızalar, paralel ve birbirinden bağımsız şekilde farklı zamanlarda gerçekleştiği durumlarda ise seri sistem yapılandırması kullanılmaktadır. Bu durum Booleen tekniğinde ve FTA'da ve kapısı olarak sembolize edilmektedir. Seri arıza durumlarında Şekil 9.3. Paralel sistem yapılandırması ve Eşitlik 9.4. geçerlidir [57].



Şekil 9.3. Paralel sistem yapılandırması [57].

$$C_{Toplam \lambda} = C_1 \times C_2 \times C_3 \dots C_n \quad (9.4)$$

## 9.2.5. Uygulama



Şekil 9.4. Örnek FTA lojik şema ve boolean tekniği ile arıza oranı hesaplaması.

$$\lambda_{\text{Kapı 2}} = \lambda_{\text{Olay 3}} \times \lambda_{\text{Olay 4}} = 1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-3}$$

$$\lambda_{\text{Kapı 2}} = 1 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_{\text{Kapı 1}} = \lambda_{\text{Kapı 2}} + \lambda_{\text{Olay 3}} + \lambda_{\text{Olay 2}} = 1 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-9}$$

$$\lambda_{\text{Kapı 1}} = 2.001 \times 10^{-6}$$



## BÖLÜM 10

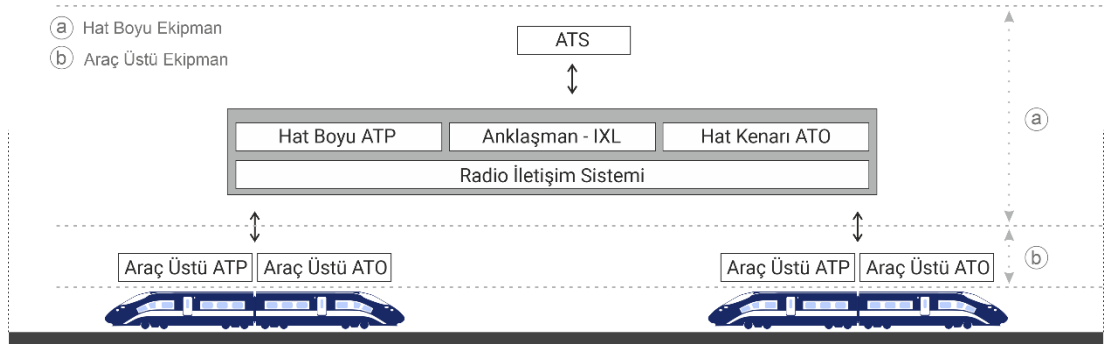
### SADELEŞTİRİLMİŞ EMNİYET ANALİZİ

#### 10.1. SİSTEM TANIMLAMA

Sistem kapalı bir hat içinde istasyonlar ve bakım merkezinden oluşan, yolcu işletmeciliği yapılan bir hattı içerir. Sistem emniyetli, verimli ve yüksek performansta hat işletimine olanak sağlar.

Sistem, aşağıdaki ana alt sistemleri içermekte ve birlikte çalışmaktadır;

- ATS ekipmanları
- Hat boyu ekipmanları
- Araç üstü ekipmanları
- Veri iletişim ekipmanları



Şekil 10.1. Modern bir CBTC sistem mimarisi.

Sistem özellikleri;

- IEEE 1474-1 – CBTC Sınıf 3
- GOA2 otomasyon seviyesinde (Yarı Otomatik Tren İşletimi) işletme

Sistem konfigürasyonu;

- a) Bir veya daha fazla işletim birimi içiren sabit uzunlukta tek yönlü trenler,
- b) Bir veya daha fazla temel işletim ünitesinden oluşan sabit uzunlukta iki yönlü trenler,
- c) Değişken uzunluklu tek yönlü trenler,
- d) Değişken uzunluklu çift yönlü trenler.

Bu projede varsayılan sistem özellikleri Çizelge 10.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 10.1. Sistem özellikleri.\*

Sistem	CBTC
Sınıf	3
Makinist	Var
Otomasyon Seviyesi	GOA2 – Yarı Otomatik Tren İşletimi
ATC	Var
ATP	Var
ATO	Var
ATS	Var
Hat Boyu Sistem	Radyo Anten Hat boyu ATP Hat boyu ATS Makas Konum Etiketleri
Araç Üstü Sistem	Odometri Sistemi Radar İvme Ölçer İnsan Makine Arayüzü Etiket Okuyucu
Tren Tespiti	Hareketli Blok
Veri İletişimi	Radyo İletişim Sistemi

\*Tabloda belirtilen CBTC sistemi gerçeğe uygun örnek bir hata ağacı analizi yapılabilmesi için temel seviyede bilgi verilmiştir. Gerçek çalışabilir bir sistem olması için ek olarak birden fazla sistem ve alt sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

## 10.2. ANALİZ 1

### 10.2.1. Tehlike Tanımları ve Sonuçları

Sistem için oluşturulan tehlike tanımları ve sonuçları Çizelge 10.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 10.2. Sistem tehlike kaydı.

Tehlike No.	İncelenen Sistem	Tehlike Tanımı	Tehlike	Tehlike Sonucu
<b>CBTC.TEH.01</b>	CBTC	Hız kontrolü	CBTC tarafından bilinen emniyetli hız ve mesafe sınırının aşılması	Çarpışma
<b>CBTC.TEH.02</b>	CBTC	Hız kontrolü	CBTC 'in Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaması	Çarpışma
<b>CBTC.TEH.03</b>	CBTC	Hız kontrolü	Fren Uygulama hatası	CBTC 'in Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaz
<b>CBTC.TEH.04</b>	CBTC	Hız kontrolü	Yanlış hız/mesafe denetimi ve koruması	CBTC 'in Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaz
<b>CBTC.TEH.05</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması	Fonksiyon Kaybı
<b>CBTC.TEH.06</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücüye Yanlış Bilgi Verilmesi	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması
<b>CBTC.TEH.07</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücü Hatası	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması
<b>CBTC.TEH.08</b>	CBTC	Sıcaklık	Yüksek ve düşük sıcaklık nedeniyle sistemin arızalanması	Fonksiyon Kaybı
<b>CBTC.TEH.09</b>	CBTC	Elektromanyetik Parazit ve Uyumluluk	Elektromanyetik parazit nedeniyle sistemin arızalanması	Fonksiyon Kaybı

### 10.2.2. Risk Değerlendirme

Oluşturulan tehlike tanımları için risk değerlendirmesi, var olan tehlikeler için Çizelge 8.1. Şiddet tablosu [48] ve Çizelge 8.2. Sıklık tablosu referans alınarak Başlangıç Sıklık Sütunu ve Başlangıç Şiddet Sütunu tanımlaması yapılacaktır. Çizelge 8.3. Risk kabul kategorileri referans alınarak risk matrisi kullanılır ve Çizelge 8.4. Risk kabul kategorileri [48] üzerinden risk değeri hesaplanır. Hesaplanan risklerin (Çizelge 10.3) THR değerlerine ulaşılacaktır. Bazı risk ve kayıtlarda deneyimlerden elde edilen değerler kullanılabilir.

Çizelge 10.3. Sistem risk değerlendirme.

Tehlike No.	Başlangıç Sıklığı	Başlangıç Şiddeti	Başlangıç Riski
CBTC.TEH.01	Olası	Felaket	Kabul edilemez
CBTC.TEH.02	Olası	Felaket	Kabul edilemez
CBTC.TEH.03	Nadir	Felaket	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.04	Nadir	Felaket	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.05	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.06	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.07	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.08	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez
CBTC.TEH.09	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez

### 10.2.3. Kabul Edilemez Tehlikeler İçin Risk Değerlendirmesi

Başlangıç Riskleri belirlenen, tolere edilemeyen tehlike tanımları için gerekirse Emniyet Gereksinimi atayarak veya ek fonksiyonlar ile seri fonksiyon veya paralel fonksiyon şeklinde farklı kabul edilebilir değerlere ulaşılabilir. CBTC.TEH.08 ve CBTC.TEH.09 tehlike tanımları için Avrupa Normları üzerinden gereksinimler tanımlanarak sıklık ve şiddeti kabul edilebilir seviyeye indirilmiştir. Emniyet

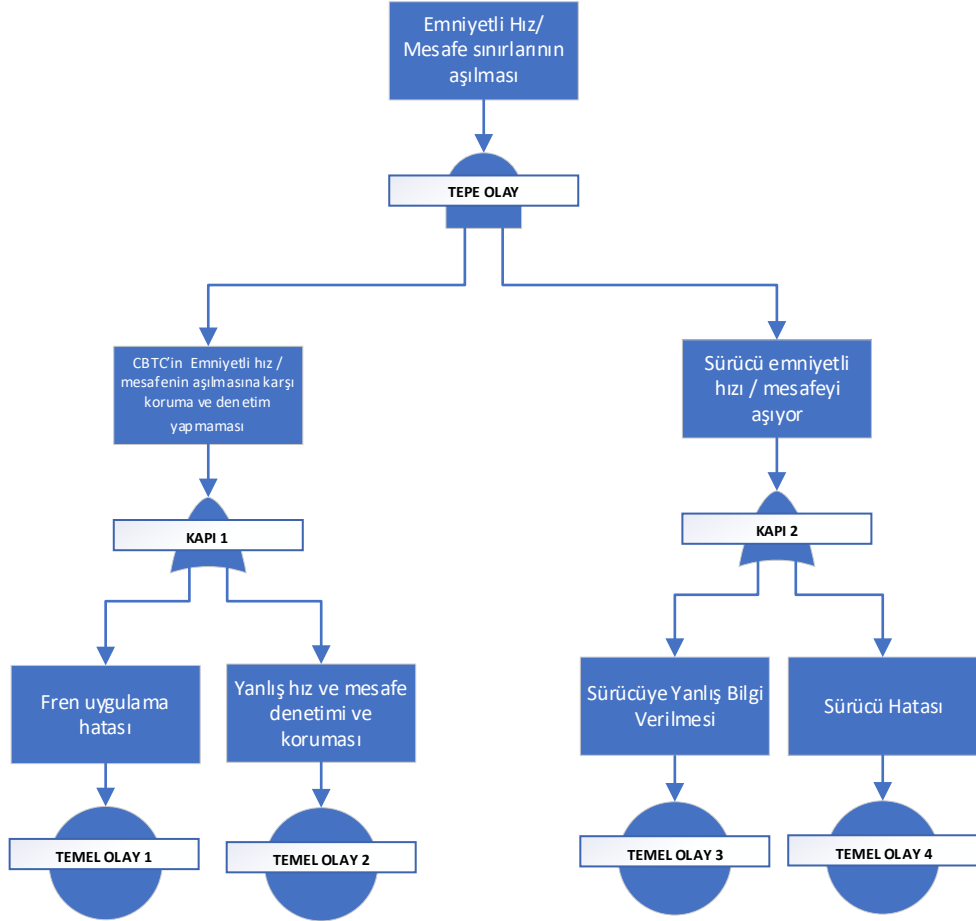
gereksinimi tanımlanmayan tehlike kayıtları için şiddet değiştirilemez olacağı için sıklık durumunun indirgenmesi gerekmektedir. Sıklık durumunu indirmek için temel olayı belirleyecek, tehlikelerin birbirleri ile ilişkilerini tanımlayarak Çizelge 10.3'de tanımlanan THR değerleri ile Hata Ağacı Analizi yapılması gerekmektedir.

Çizelge 10.4. Tolere edilemeyen tehlikeler için risk değerlendirmesi.

Tehlike No.	Emniyet Gereksinimi/ ÖNLEM/MITIGATION	Kalan Sıklık	Kalan Şiddet	Bitiş Riski	THR Beklenen Değeri
<b>CBTC.TEH.01</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir	1e-9/h
<b>CBTC.TEH.02</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir	1e-9/h
<b>CBTC.TEH.03</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	1e-9/h
<b>CBTC.TEH.04</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir	1e-9/h
<b>CBTC.TEH.05</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	1e-7/h
<b>CBTC.TEH.06</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	1e-7/h
<b>CBTC.TEH.07</b>	Otomatik Tren Koruma - Aşırı Hız Koruması ve Fren Güvencesi fonksiyonu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	1e-7/h
<b>CBTC.TEH.08</b>	CBTC Sistemi EN 50155 standardına uyumlu olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	-
<b>CBTC.TEH.09</b>	Sistem, EN 50121-4'e uygun olacaktır.	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir	-

#### 10.2.4. Tehlike İçin FTA Analizi 1

FTA Analizi için akış diagramı Şekil 10.2’de gösterilmiştir.



Şekil 10.2. FTA Analizi 1 modeli.

#### 10.2.5. Kapılar Listesi

FTA Analizine ilişkin kapı listesi, tanımlar, açıklamalar ve tehlike tanımlamaları karşılaştırması Çizelge 10.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 10.5. Kapı tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması.

KAPI	TANIM	Tehlike Tanımı
TEPE OLAY	Ve kapısı	CBTC.TEH.01
KAPI 1	Veya kapısı	CBTC.TEH.02
KAPI 2	Veya kapısı	CBTC.TEH.05

### 10.2.6. Olaylar Listesi

FTA Analizine ilişkin olay listesi, tanımlar, açıklamalar ve tehlike tanımlamaları karşılaştırması Çizelge 10.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 10.6. Olay tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması.

OLAY	TANIM	Tehlike Tanımı	THR
TEMEL OLAY 1	Fren uygulama hatası	CBTC.TEH.03	1e-05/h[58]
TEMEL OLAY 2	Yanlış hız ve mesafe denetimi ve koruması	CBTC.TEH.04	1e-01/h[58]
TEMEL OLAY 3	Sürücüye yanlış bilgi verilmesi	CBTC.TEH.06	1,3e-05/h[58]
TEMEL OLAY 4	Sürücü hatası	CBTC.TEH.07	1e-03/h[58]

### 10.2.7. FTA Analizi 1 ve Sonuçları

Tepe olay, Eşitlik 8.1'de Risk Kabul Kriteri Şiddet x Sıklık formülü ile Çizelge 10.3'de Başlangıç Riskini ifade etmektedir.

#### CBTC.HAZ.01(Tepe Olay) Tehlike Risk Kabul Kriteri Hesaplaması

Risk Kabul Kriteri = Şiddet x Sıklık

Şiddet : Felaket

Sıklık : Olası

Risk Kabul Kriteri = (FELAKET) x (OLASI)

Çizelge 8.4'de belirtilen Risk Matrisi üzerinden çarpım işlemi yapılmaktadır.



Risk Kabul Kriteri = Tolere Edilemez olarak tespit edilmektedir ve THR değeri  $1x10^{-5}$  olarak çıkmaktadır. Çizelge 8.4’de riskimizin kabul edilebilir olması için sıklık “ÇOK DÜŞÜK OLASILIK” olması gerekmektedir. Çok Düşük Olasılık olabilmesi için Olasılık değerimiz:

Risk Kabul Kriteri : Şiddet X Sıklık

Risk Kabul Kriteri : ÇOK DÜŞÜK OLASILIK X FELAKET

Risk Kabul Kriteri : Tolere Edilebilir ve olasılık değeri ise  $1x10^{-9}$  olarak görünmektedir. Temel Olay olarak belirlediğimiz CBTC.TEH.01 tehlikesi için FTA analizi ile Sıklık değerini nasıl düşürebileceğimizi tespit etmek için Hata Ağacı Analizi yaparak temel probleme ulaşacağız.

CBTC.TEH.01 için kabul edilebilir değeri  $THR_{CBTC.TEH.01} = THR_{Temel Olay} = 1x10^{-9}$ ,dur.

### **THR Kapı 1 Hesaplaması**

$THR_{KAPI 1} = Veya Kapısı$

$THR_{KAPI 1} = THR_{Temel Olay 1} + THR_{Temel Olay 2}$

$THR_{Temel Olay 1} = 1x10^{-5}$

$THR_{Temel Olay 2} = 1x10^{-1}$

$THR_{KAPI 1} = 1x10^{-5} + 1x10^{-1}$

$THR_{KAPI 1} = 1,00001x10^{-1}$

### **THR Kapı 2 Hesaplaması**

$THR_{KAPI 2} = Veya Kapısı$

$THR_{KAPI 2} = THR_{Temel Olay 3} + THR_{Temel Olay 4}$

$THR_{KAPI 2} = THR_{Temel Olay 3} + THR_{Temel Olay 4}$

$THR_{Temel Olay 3} = 1,3x10^{-5}$

$THR_{Temel Olay 4} = 1x10^{-3}$

$THR_{KAPI 2} = 0,013x10^{-3} + 1x10^{-3}$

$$THR_{KAPI 2} = 1,013x10^{-3}$$

### **THR Temel Olay Hesaplaması**

$$THR_{Tepe Olay} = Ve Kapısı$$

$$THR_{Tepe Olay} = THR_{Kapı 1} + THR_{Kapı 2}$$

$$THR_{Kapı 1} = 1,00001x10^{-1}$$

$$THR_{Kapı 2} = 1,013x10^{-3}$$

$$THR_{Tepe Olay} = 1,00001x10^{-1} + 1,013x10^{-3}$$

$$THR_{Tepe Olay} = 1,013x10^{-4}$$

$THR_{Tepe Olay}$ 'ın emniyetli olabilmesi için Çizelge 8.5'da belirtilen THR – SIL ilişkisi SIL 4 seviyesinde olmalıdır.

SIL4 seviyesinde bir THR değeri ise  $10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$  arasında olması gerekmektedir.  $THR_{Tepe Olay}$  değeri ise bu aralığa girmemektedir.

FTA Analiz sonucunda tepe olay değeri karşılamadığı için tasarım değişikliğine gidilerek yeni tasarıma göre FTA Analiz yapılacaktır.

## **10.3. ANALİZ 2**

### **10.3.1. Tehlike Tanımları ve Sonuçları**

Sistem için oluşturulan tehlike tanımları ve sonuçları Çizelge 10.7'de gösterilmiştir. Temel Olay 2'nin THR değeri, Tehlike Kayıtlarına yeni tanımlanan CBTC.TEH.10 ve CBTC.TEH.11 ile bağımsız olarak ilişkilendirilebilir.

Çizelge 10.7. Sistem tehlike tanımları ve sonuçları.

Tehlike No.	İncelenen Sistem	Tehlike Tanımı	Tehlike	Tehlike Sonucu
<b>CBTC.TEH.01</b>	CBTC	Hız kontrolü	CBTC tarafından bilinen Hız sınırı aşılması	Çarpışma
<b>CBTC.TEH.02</b>	CBTC	Hız kontrolü	CBTC'nin Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaması	Çarpışma
<b>CBTC.TEH.03</b>	CBTC	Hız kontrolü	Fren uygulama hatası	CBTC 'in Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaz
<b>CBTC.TEH.04</b>	CBTC	Hız kontrolü	Yanlış hız/mesafe denetimi ve koruması	CBTC 'in Emniyetli hız ve mesafenin aşılmasına karşı koruma ve denetim yapmaz
<b>CBTC.TEH.05</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması	Fonksiyon Kaybı
<b>CBTC.TEH.06</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücüyü Yanlış Bilgi Verilmesi	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması
<b>CBTC.TEH.07</b>	CBTC	Hız kontrolü	Sürücü Hatası	Sürücünün emniyetli hız ve mesafeyi aşması
<b>CBTC.TEH.08</b>	CBTC	Sıcaklık	Yüksek ve düşük sıcaklık nedeniyle sistemin arızalanması	Fonksiyon Kaybı
<b>CBTC.TEH.09</b>	CBTC	Elektromanyetik Parazit ve Uyumluluk	Elektromanyetik parazit nedeniyle sistemin arızalanması	Fonksiyon Kaybı
<b>CBTC.TEH.10</b>	CBTC	Hız kontrolü	Tren hareketi izleme hatası	Yanlış hız/mesafe denetimi ve koruması
<b>CBTC.TEH.11</b>	CBTC	Hız kontrolü	Yanlış hız izleme (emniyetli olmayan hıza karşı denetim)	Yanlış hız/mesafe denetimi ve koruması

### 10.3.2. Risk Değerlendirme

Yeni eklenen tehlike tanımları için risk değerlendirmesi, var olan tehlikeler için Çizelge 8.1. Şiddet tablosu [48] ve Çizelge 8.2. Sıklık tablosu referans alınarak Başlangıç Sıklık Sütunu ve Başlangıç Şiddet Sütunu tanımlaması yapılacaktır. Çizelge 8.3. Risk kabul kategorileri referans alınarak risk matrisi kullanılır ve Çizelge 8.4. Risk kabul kategorileri [48] üzerinden Risk değerleri belirlenerek THR değerleri hesaplanır.

Bazı risk ve kayıtlarda deneyimlerden elde edilen değerler kullanılabilir. Güncel risk değerlendirme sonuçları Çizelge 10.8 üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 10.8 Sistem risk değerlendirme.

Tehlike No.	Başlangıç Sıklığı	Başlangıç Şiddeti	Başlangıç Riski	THR Değeri
<b>CBTC.TEH.01</b>	Olası	Felaket	Kabul edilemez	1e-09/h
<b>CBTC.TEH.02</b>	Olası	Felaket	Kabul edilemez	1e-09/h
<b>CBTC.TEH.03</b>	Nadir	Felaket	İhmal Edilemez	1e-09/h
<b>CBTC.TEH.04</b>	Nadir	Felaket	İhmal Edilemez	1e-09/h
<b>CBTC.TEH.05</b>	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez	1e-07/h
<b>CBTC.TEH.06</b>	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez	1e-07/h
<b>CBTC.TEH.07</b>	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez	1e-07/h
<b>CBTC.TEH.08</b>	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez	-
<b>CBTC.TEH.09</b>	Nadir	Kritik	İhmal Edilemez	-
<b>CBTC.TEH.10</b>	Olası	Felaket	Kabul edilemez	1e-09/h
<b>CBTC.TEH.11</b>	Olası	Felaket	Kabul edilemez	1e-09/h

### 10.3.3. Kabul Edilemez Tehlikeler İçin Risk Değerlendirmesi

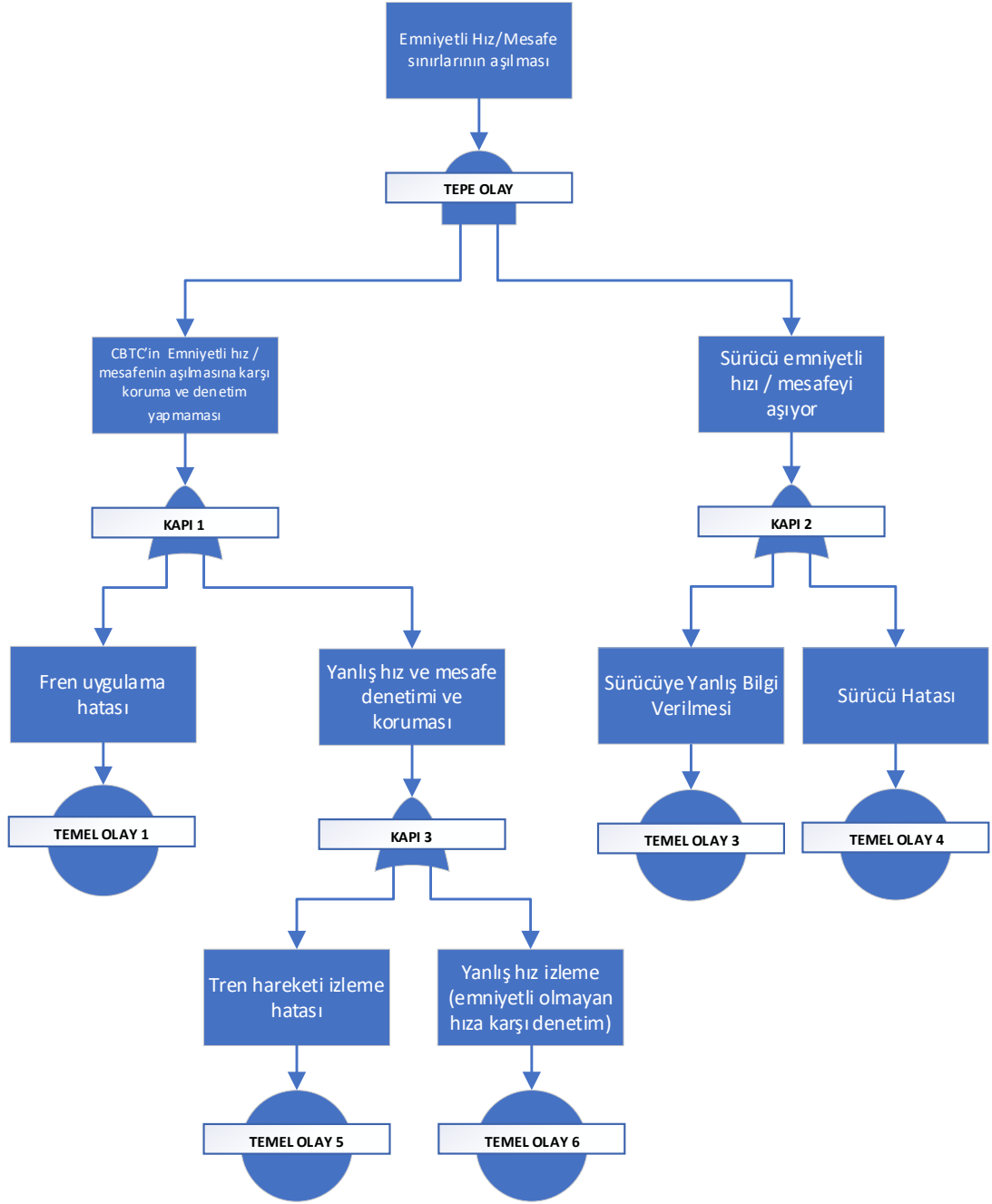
Başlangıç Riskleri belirlenen, tolere edilemeyen tehlike tanımları için gerekirse Emniyet Gereksinimi atayarak veya ek fonksiyonlar ile seri fonksiyon veya paralel fonksiyon atamalarıyla farklı kabul edilebilir değerlere ulaşılabilir. Emniyet gereksinimi tanımlanmayan tehlike kayıtları için şiddet değiştirilemez olacağı için sıklık durumunun indirgenmesi gerekmektedir. Sıklık durumunu indirmek için temel olayı belirleyecek, tehlikelerin birbirleri ile ilişkilerini tanımlayarak Çizelge 10.8’de tanımlanan THR değerleri ile Hata Ağacı Analizi yapılması gerekmektedir.

Çizelge 10.9. Tolere edilemeyen tehlikeler için risk değerlendirmesi.

Tehlike No.	Kalan Sıklık	Kalan Şiddet	Bitiş Riski
<b>CBTC.TEH.01</b>	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.02</b>	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.03</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.04</b>	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.05</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.06</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.07</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.08</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.09</b>	Çok düşük olasılık	Kritik	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.10</b>	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir
<b>CBTC.TEH.11</b>	Çok düşük olasılık	Felaket	Kabul edilebilir

#### 10.3.4. Tehlike İçin FTA Analizi 2

FTA Analizi için akış diagramı Şekil 10.3'de gösterilmiştir.



Şekil 10.3. FTA Analizi 2 modeli.

### 10.3.5. Kapılar Listesi

FTA Analizine ilişkin kapı listesi, tanımlar, açıklamalar ve tehlike tanımlamaları karşılaştırması Çizelge 10.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 10.10. Kapı tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması.

KAPI	TANIM	Tehlike Tanımı
TEPE OLAY	Ve kapısı	CBTC.TEH.01
KAPI 1	Veya kapısı	CBTC.TEH.02
KAPI 2	Veya kapısı	CBTC.TEH.05
KAPI 3	Veya kapısı	CBTC.TEH.04

### 10.3.6. Olaylar Listesi

FTA Analizine ilişkin olay listesi, tanımlar, açıklamalar ve tehlike tanımlamaları karşılaştırması Çizelge 10.11’de gösterilmektedir.

Çizelge 10.11 Olay tanımları ve tehlike tanım karşılaştırması.

OLAY	TANIM	Tehlike Tanımı	THR
TEMEL OLAY 1	Fren uygulama hatası	CBTC.TEH.03	1e-05/h[58]
TEMEL OLAY 2	Silindi.	-	-
TEMEL OLAY 3	Sürücüyeye yanlış bilgi verilmesi	CBTC.TEH.06	1,3e-05/h[58]
TEMEL OLAY 4	Sürücü hatası	CBTC.TEH.07	1e-03/h[58]
TEMEL OLAY 5	Tren hareketi izleme hatası	CBTC.TEH.10	1,1e-05[58]
TEMEL OLAY 6	Yanlış hız izleme (emniyetli olmayan hıza karşı denetim)	CBTC.TEH.11	1,945e-06[58]

### 10.3.7. FTA Analizi 2 ve Sonuçları

Tepe olay, Eşitlik 8.1’de Risk Kabul Kriteri Şiddet x Sıklık formülü ile Çizelge 10.3’de Başlangıç Riskini ifade etmektedir ve yeni eklenen Çizelge 10.11’de belirtilen değerler üzerinden hesaplamalar yapılmıştır.

#### THR Kapı 3 Hesaplaması

$$THR_{KAPI\ 3} = \text{Veya Kapısı}$$

$$THR_{KAPI\ 3} = THR_{Temel\ Olay\ 5} + THR_{Temel\ Olay\ 6}$$

$$THR_{Temel Olay 5} = 1,1x10^{-5}$$

$$THR_{Temel Olay 6} = 1,945x10^{-6}$$

$$THR_{KAPI 3} = 1,1x10^{-5} + 1,945x10^{-6}$$

$$THR_{KAPI 3} = 12,945x10^{-6}$$

### **THR Kapı 1 Hesaplaması**

$$THR_{KAPI 1} = Veya Kapısı$$

$$THR_{KAPI 1} = THR_{Temel Olay 1} + THR_{Kapı 3}$$

$$THR_{Temel Olay 1} = 1,5x10^{-5}$$

$$THR_{Kapı 3} = 12,945x10^{-6}$$

$$THR_{KAPI 1} = 1,5x10^{-5} + 12,945x10^{-6}$$

$$THR_{KAPI 1} = 2,055x10^{-6}$$

### **THR Kapı 2 Hesaplaması**

$$THR_{KAPI 2} = 1,013x10^{-3} \text{ (Başlık 10.2.7'de } THR_{KAPI 2} \text{ değeri hesaplanmıştır.)}$$

### **THR Temel Olay Hesaplaması**

$$THR_{Tepe Olay} = Ve Kapısı$$

$$THR_{Tepe Olay} = THR_{Kapı 1} \times THR_{Kapı 2}$$

$$THR_{Kapı 1} = 2,874x10^{-6}$$

$$THR_{Kapı 2} = 1,013x10^{-3}$$

$$THR_{Tepe Olay} = 2,874x10^{-6} \times 1,013x10^{-3}$$

$$THR_{Tepe Olay} = 2,911362x10^{-9}$$

## **10.4. SONUÇ**

$THR_{Tepe Olay}$ 'ın emniyetli olabilmesi için başlangıç şiddetinin felaket ve başlangıç sıklık durumunun olası sebebiyle Çizelge 8.5'de belirtilen THR – SIL ilişkisi SIL 4 seviyesinde olmalıdır.



SIL 4 seviyesinde bir tehlike kaydının THR değeri ise  $10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$  arasında olması gerekmektedir.  $THR_{Tepe Olay}$  değeri ise Analiz 1 sonrasında eklenen CBTC.TEH.10 ve CBTC.TEH.11 tehlike kaydı sonrasında oluşan THR değerlerinin değişmesiyle SIL4 aralığını sağlamıştır.  $THR_{Tepe Olay} = 2,911362 \times 10^{-9}$ 'dur. Bu durumda  $10^{-9} \leq THR_{Tepe Olay} < 10^{-8}$  uygunluğu sağlamaktadır.

FTA Analiz sonucunda tepe olay değeri karşıladığı için tasarım değişikliği doğrulanmıştır.

## BÖLÜM 11

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Raylı sistemler sektöründe mevcut ve geleceğe yönelik taşımacılık projelerinin faaliyete geçirebilmesi noktasında uluslararası bağımsız kuruluşlardan sertifikasyon süreçlerinin tamamlanması gerekmektedir. İşletmecilikte ve yolcu taşımacılığı için insan ve çevrenin zarar görmemesi adına emniyetli bir sistemin oluşturulması, mevcut ve geliştirilecek olan projelerin uygulanmasına imkân tanıyacaktır.

Sistemlerin emniyetli olması ve alt sistemler ile bütünleşik emniyetlerinin sağlanması farklı disiplinlerin etkileşimi ile mümkün olmaktadır. Sistem emniyetinin sağlanabilmesi için uluslararası kuruluşlar bünyesinde farklı proje ve uygulamalar ile elde edilen teorik ve deneysel çalışmalar ışığında, her alanda standart yaklaşımlar geliştirilmiştir. Oluşturulan standartların raylı sistemler sektörü içinde özelleşmesiyle gün geçtikçe sayısı da artmaktadır. Raylı sistemlerde işletim kapasitesinin artması yönetim ve emniyet sistemlerinin gereksinimi de o oranda artırmıştır.

Bu çalışmada öncelikli olarak raylı sistemlerin gelişim tarihçesi, sinyalizasyon sistemlerinin oluşumu ve trafik yönetim sistemleri ile ilgili mevcut çalışmalar aktarılmıştır. Çağımızın gelişen ve gelişmekte olan sistemlerinden Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemi olan CBTC sisteminin sınıflandırılmasını, otomasyon seviyesini, fonksiyonlarını ve ilişikte olduğu sistemlerin detaylı analizi çalışma kapsamında incelenmiştir.

Sonrasında emniyetli bir sistemin elde edilebilmesi için risk analizi ve risk değerlendirme metotları üzerinde durulmuştur. Emniyet yönetimi için uluslararası standartlar referans alınarak kabul görmüş teknikler üzerinde durulmuş ve uluslararası emniyet yönetim modelleri, teknikleri ve süreçleri ile IEEE 1474 standart serisi

çerçevesinde tasarlanan bir sistemde örnek tehlike tanımları yapılmış, EN 50126-1 ve EN 50126-2 standartları kapsamında emniyet yönetimi ve değerlendirme faaliyetlerine yer verilmiştir. UNISIG tarafından açık kaynak olarak sunulan veriler ve tanımlamaları dikkate alınarak EN 61025 standardı kapsamında Hata Ağacı Analizi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu araştırmada, ilk olarak tanımlama bilgileri sağlanmıştır. CBTC Sistemi ve CBTC Sistemini oluşturan fonksiyonların emniyet ve fonksiyonel emniyet kavramları açıklanmıştır. Oluşturulan CBTC sistemi kapsamında on bir adet tehlike tanımı yapılarak standartlar uyarınca risk değerlendirme sürecine girilmiştir. Tanımlanan tehlikeler başlangıç risk ve başlangıç sıklıkları deneyim ve mevcut veriler dikkate alınarak atamaları yapılmıştır. Tehlike değerlerinin atamaları gerçekleştirilirken hataların kritik veya ölümcül olarak sonuçlanmasına göre sınıflandırmalar yapılmıştır. EN 50126-2 standardı uyarınca risk matrisi dahilinde tehlike sonuçları ve THR değerleri kabul edilebilir sınırlar ile belirlenmiştir. Belirlenen THR değerleri ile kritik veya ölümcül sonuçlar kabul edilebilir seviyelere indirilmesi amaçlanmıştır. Belirlenen sınırlar çerçevesinde tepe olay ve temel olaylar olarak tanımlanan riskler belirlenmiştir. Belirlenen riskler ve risklerin ilişkileri sonucunda Hata Ağacı Analiz çizimi Subset-118 kaynak alınarak oluşturulmuş ve olayların bağıntıları tecrübe ve elde edilen veriler ile belirlenmiştir. Oluşturulan Hata Ağacı sistem de ki tehlike ve tehlikelerin gerçekleşme ve sonuç ilişkilerinin FTA üzerinde belirtildiği gibi temel ve anlaşılır düzeyde akışı gösterilmiştir. Tanımlanan tehlike tanımları birer metin veya özel bir tanım numarası haricinde ilişki ve bağıntıları net bir şekilde görüldüğü gösterilmiştir. Hata Ağacı oluşturulduktan sonra olaylar tepe olaydan temel olaylara birbirini takip eden veya koşullu olarak gerçekleştiği de gösterilmiştir. Atanan ve belirlenen değerler ile Hata Ağacı Analizinde kullanılan, boolean cebri uyarınca temel olaydan tepe olaya doğru sağlanan eşitlikler ile gerekli hesaplamalar yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ilk analiz sonrasında analiz öncesinde ulaşması hedeflenen emniyet bütünlüğü çerçevesinde belirlenmiş olan tolere edilebilir değerlere ulaşılmadığı görülmüştür. Oluşturulan FTA üzerinde “*Temel Olay 2*” ve “*Kapı 1*” in beklenen ve kabul edilebilir THR değerine ulaşılmasını engellediği tespit edilmiştir. Kabul edilebilir değerden büyük olan “*Temel Olay 2*”, Subset-118 uyarısında şiddet seviyesi kritik olarak değil felaket olarak

güncellenmiş ve sisteme dahil edilen ek fonksiyon, odometri sisteminin hayati olması durumunda zaruri şekilde belirtilmiştir. Yeni değer ataması gerçekleştirilmesi için temel olay detaylandırılarak hatanın oluşmasına sebep olan olaylar ve ilişkileri belirlenmiştir. Belirlenen olaylar tehlike tanımları yapılmış ve “*Tepe Olay*” ilişkisi tespit edilmiştir. Hata Ağacı Analizi için ikinci model oluşturulmuş ve olayların ilişkileri ve bağlantıları gösterilmiştir. Tehlike tanımlarına dahil edilen temel olaylar Subset-118 ve diğer subsetler ile sağlanan veriler ile sonucu felaket olay olarak değerlendirilmiş ve gerekli değer atamaları yapılmıştır. İkinci Hata Ağacı Analizi boolean cebri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonrasında oluşturulan tehlike tanımları çerçevesinde doğru bir sistem tasarımı yapıldığı ve emniyet bütünlüğünün sağlandığı görülmektedir.

Bu çalışmada önerilen uygulanması gereken fonksiyonel emniyet yönetimi ile IEEE 1474 standartlarına uygun olarak tanımlanmış ve sisteme ait risk modellemesi yapılmıştır. Oluşan riskler sonucunda “Emniyetli hız ve mesafe sınırlarının aşılması” tehlikesi üzerinde durulması gerektiği görülmüştür. CBTC sistemi için işlevsel, işletmesel ve yapısal açıklamalar sunulmuş, olası hatalar fonksiyonlarla ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. Tehlike sonuçlarının belirlenmesi UNISIG tarafından tanımlanan belgelendirmeler üzerinden sahada ve tecrübe ile edinilmiş veriler ile risk analizi yapılarak desteklenmiştir. Tasarlanan ve belirlenen riskler kapsamında, risk için parametreler tespit edilerek, risklerin başlangıç ve bitiş değerlerinin belirlenebilmesi için risk değerlendirme matrisi kullanılmıştır. “Emniyetli hız ve mesafe sınırlarının aşılması” tehlikesi için hata ağacı modellenmiş ve analizi matematiksel olarak yapılmıştır. Hesaplanan sonuçlara göre sistem incelenmesi detaylandırılarak, olası tehlikeler tekrardan tanımlanmış ve fonksiyonel emniyet kapsamındaki süreçlere tabii tutulmuştur.

Bu çalışmada sağlanan modeller ve öneriler ile süreçler ve teknikler fonksiyonel emniyet yönetimi ve sistem mühendisliği modellemeleri aşamasında, sonradan çıkabilecek değişikliği veya sonuçları hayati ve maddi manada ağır sayılabilecek sonuçlardan kurtarılması için sistematik bir yaklaşım sergilenmiştir.

Ayrıca gerçekleştirilen çalışma ile derlenen kitaplar, makaleler, tezler ve standartlar, CBTC Sistemleri ve Fonksiyonel Emniyet yönetiminin farkındalığının yerli literatüre kazandırılmasını da amaçlanmıştır. Trafik yönetim sistemlerinin ulusal kriterlere göre değerlendirilip, fonksiyonel emniyet yönetiminin mevcut ve geliştirilmekte olan milli projelere ayrıca katkı sağlaması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Internet: Railway Technology, "Tracks In Time: 200 Years Of Locomotive Technology", <https://www.railway-technology.com/features/featuretracks-in-time-200-years-of-locomotive-technology-4517022/> (2020).
2. Internet: Railisa UIC Statics, "RAILISA STAT UIC - Railway World Map 2019", <https://uic-stats.uic.org/gis/> (2020).
3. Gündoğdu, F. and Dal, E., "Demiryolu Projelerinde RAMS Yönetimi ve LCC Kavramı", *TRANSİST 2011*, IV. ULAŞIM SEMPOZYUMU VE SERGİSİ, 150–154 (2011).
4. Wang, S., Zhu, L., Xu, K., Zhang, L., and Wang, X., "Reliability Evaluation for LTE Based CBTC Train Ground Communication Systems", *Journal Of Advanced Transportation*, 2019: 1–11 (2019).
5. Internet: UIC, "ETCS", <https://uic.org/rail-system/ertms/etcs> (2020).
6. The Eurostat, "Railway Passenger Transport Statistics - Quarterly And Annual Data", *The Eurostat*, (2020).
7. Internet: ERTMS.NET, "ERTMS History", [https://www.ertms.net/?page\\_id=49](https://www.ertms.net/?page_id=49) (2020).
8. Internet: Wikipedia, "Communications-Based Train Control", [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Communications-based\\_train\\_control&oldid=992350305](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Communications-based_train_control&oldid=992350305) (2020).
9. Gençer, C. B., "Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sisteminde Emniyetli Fren Modeli", *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (2020).
10. Barnatt, N. and Jack, A., "Safety Analysis In A Modern Railway Setting", *Safety Science*, 110: 177–182 (2018).
11. Misumi, Y. and Sato, Y., "Estimation of average hazardous-event-frequency for allocation of safety-integrity levels", *Reliability Engineering & System Safety*, 66 (2): 135–144 (1999).
12. Wang, T., Wang, W., Zio, E., Tang, T., and Zhou, D., "Analysis of Configuration Data Errors in Communication-Based Train Control Systems", *Simulation Modelling Practice And Theory*, 96: 101941 (2019).

13. Dogrugüven, E. H. and Ustoglu, I., "SIL Attachment Paradigm from the Perspective of Quantitative Hazard Rates", *IFAC-PapersOnLine*, 51 (9): 112–117 (2018).
14. Beugin, J., Renaux, D., and Cauffriez, L., "A SIL Quantification Approach Based On An Operating Situation Model For Safety Evaluation In Complex Guided Transportation Systems", *Reliability Engineering & System Safety*, 92 (12): 1686–1700 (2007).
15. Domínguez, M., Fernández-Cardador, A., Cucala, A. P., Gonsalves, T., and Fernández, A., "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines", *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, 29: 43–53 (2014).
16. Hartong, M., Goel, R., and Wijesekera, D., "Positive Train Control (PTC) failure modes", *Journal Of King Saud University - Science*, 23 (3): 311–321 (2011).
17. Huang, W., Liu, Y., Zhang, Y., Zhang, R., Xu, M., De Dieu, G. J., Antwi, E., and Shuai, B., "Fault Tree and Fuzzy D-S Evidential Reasoning combined approach: An application in railway dangerous goods transportation system accident analysis", *Information Sciences*, 520: 117–129 (2020).
18. Lewis, M. J. T., "Early Wooden Railways", *A.M. Kelley*, 498 (1970).
19. Jones, M., "Lancashire Railways: The History of Steam", *Countryside Books*, 96 (2012).
20. Landes, D. S., "The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present", *Cambridge University Press*, 592 (2003).
21. Coe, L., "The Telegraph: A History of Morse's Invention and Its Predecessors in the United States", *McFarland*, 202 (2003).
22. Güngör, Y., "Ray Devreleri", *T.C. Milli Eğitim Bakanlığı*, 43 (2013).
23. Marshall, J., "A Biographical Dictionary of Railway Engineers", *David & Charles*, 264 (1978).
24. Gündoğdu, F. and Söyler, H., "Demiryolu Sinyalizasyon Sistemlerinde Tasarım Kriterleri ve "Fail-Safe" Kavramı", *Raylı Sistemler Bülteni*, 9 (25–29): 5 (2008).
25. American Railway Association, "The Invention of the Track Circuit: The History of Dr. William Robinson's Invention of the Track Circuit, the Fundamental Unit Which Made Possible Our Present Automatic Block Signaling and Interlocking Systems", *Signal Section, American Railway Association*, American Railway Association Signal, 132 (1922).

26. Stationery Office, T., "Regulation of Railways Act 1889: 52 and 53 Vict. Ch. 57", *Stationery Office*, Stationery Office, (1989).
27. IEEE, "IEEE 1474.1-1999 - IEEE Standard for Communication Based Train Control Performance Requirements and Functional Requirements", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, 36 (1999).
28. IEEE, "IEEE Std 1474.1-2004 IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, 55 (2004).
29. Zhu, L., Yu, F. R., Ning, B., and Tang, T., "A novel communication-based train control (CBTC) system with cooperative wireless relaying", *2013 IEEE International Conference On Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 6422–6426 (2013).
30. Pearson, L. V., "Moving block railway signalling", *Loughborough University of Technology*, (1993).
31. Zhu, L., Yu, F. R., Ning, B., and Tang, T., "Handoff management in communication-based train control networks using stream control transmission protocol and IEEE 802.11p WLANs", *EURASIP Journal On Wireless Communications And Networking*, 2012 (1): 211 (2012).
32. Internet: Rail System, "Communications-Based Train Control (CBTC) |", <http://www.railsystem.net/communications-based-train-control-cbtc/> (2020).
33. IEEE, "IEEE Std 1474.3-2008 IEEE Recommended Practice for Communications-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, 129 (2008).
34. Guiot, B., "Compendium on ERTMS: European Rail Traffic Management System", *Eurailpress*, 260 (2009).
35. IEEE, "IEEE Std 1474.1-2004 IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, 55 (2004).
36. Winter, P., "Compendium on ERTMS: European Rail Traffic Management System", *Eurail Press*, (2009).
37. IEEE, "IEEE Std 1474.2-2003 IEEE Standard for User Interface Requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) Systems", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, 26 (2003).
38. YÜKSEL, H. E., "Raylı Toplu Taşıma Sinyalizasyon Sistemleri Ve Marmaray Projesi'nin Sinyalizasyonu", *Niğde Üniversitesi*, (2007).



39. IEEE, "IEEE 1475-1999 - IEEE Standard for the Functioning of and Interfaces Among Propulsion, Friction Brake, and Train-borne Master Control on Rail Rapid Transit Vehicles", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, (1999).
40. Internet: Wikipedia, "Armagh Rail Disaster", [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Armagh\\_rail\\_disaster&oldid=988566269](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Armagh_rail_disaster&oldid=988566269) (2020).
41. BSI, "EN 13452-1:2002 Railway Applications - Braking - Mass Transit Brake Systems - Part 1: Performance Requirements", *EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION*, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, (2002).
42. Günay, M., Korkmaz, M. E., and Özmen, R., "An investigation on braking systems used in railway vehicles", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 23 (2): 421–431 (2020).
43. BSI, "BS EN 13452-1:2003 - Railway applications. Braking. Mass transit brake systems. Performance requirements", *IEEE*, IEEE Vehicular Technology Society, (2003).
44. IEC, "IEC 60050-903:2013 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 903: Risk assessment", *International Electrotechnical Commission*, International Electrotechnical Commission, 22 (2013).
45. IEC, "IEC 60050-351:2013 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 351: Control Technology", *International Electrotechnical Commission*, International Electrotechnical Commission, 457 (2013).
46. BSI, "BS EN 50126-1-2017 Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Generic RAMS Process", 2017. Ed., *The British Standards Institution*, BSI Standards Limited, 106 (2017).
47. IEC, "IEC 60050-192:2015 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability", *International Electrotechnical Commission*, International Electrotechnical Commission, 239 (2015).
48. BSI, "BS EN 50126-2-2017 Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 2: Systems Approach to Safety", *The British Standards Institution*, BSI Standards Limited, 80 (2017).
49. Leitner, B., "A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis", *Procedia Engineering*, 187: 150–159 (2017).
50. Rausand, M. and Haugen, S., "Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications", *John Wiley & Sons*, 784 (2020).

51. Yakın, İ., "Demiryolu Sinyalizasyonunda Güvenirlik Emre Amadelik Sürdürülebilirlik ve RAMS Yönetimi ve FMEA-FTA Analizi Uygulaması", *İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ*, (2014).
52. BSI, "EN 50129:2018 Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems – Safety Related Electronic Systems for Signalling", *The British Standards Institution*, BSI Standards Limited, 158 (2019).
53. Internet: Quality-One International, "FTA | Fault Tree Analysis", <https://quality-one.com/fta/> (2020).
54. "Handbook of RAMS in Railway Systems", *Taylor & Francis, CRC Press*, Boca Raton, (2018).
55. FAA System Safety Handbook, "FAA System Safety Handbook, Chapter 8: Safety Analysis/Hazard Analysis Tasks", System Safety Handbook, *Federal Aviation Administration*, Federal Aviation Administration, 36 (2000).
56. Internet: Bilginer, S., "Boolean Cebri | Sayısal Devreler", <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/boole-cebri-sayisal-devreler/15399#ad-image-0> (2020).
57. BSI, "BS EN 61025 Fault Tree Analysis", *BSI*, BSI Group Headquarters, 122 (2018).
58. Vlcek, M., "Functional Safety Analysis of ETCS DMI", *UNISIG*, 313 (2016).

## ÖZGEÇMİŞ

Alper Buğra KOCAÖZ 1992 yılında İstanbul'un Üsküdar ilçesinde doğdu. İlköğretim eğitimini Gümüşhane'de, Lise eğitimini Erzincan'da tamamladı. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği bölümüne başladı. 2016 mezun olduktan hemen sonra Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans çalışmasına başladı. Yüksek lisans tez konusu "Haberleşme Temelli Tren Kontrol Sistemlerinde Fonksiyonel Emniyet Yönetimi Ve Hata Ağacı Analizi Uygulaması" dır. Şuanda Eskişehir ilinde Savronik A.Ş.'de sistem mühendisi olarak çalışmaktadır.

---

---