

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİNDE EMNİYETLİ
FREN MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can Berk GENÇER

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİNDE EMNİYETLİ
FREN MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Can Berk GENÇER
(526181004)**

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Raylı Sistemler Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Turan SÖYLEMEZ

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 526181004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Can Berk GENÇER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİNDE EMNİYETLİ FREN MODELİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Salman KURTULAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 13 Temmuz 2020



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmamda kıymetli bilgi birikimi ile bana daima yardımcı olan ve İTÜ raylı sistemler yüksek lisans programının açılmasında öncü rol oynayan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımı gerçekleştirdiğim süre boyunca deneyimlerini paylaşan Mustafa BELLEK, Uğur YILDIRIM ve yüksek lisans çalışmalarına imkan sağlayan ASELSAN ailesine teşekkürü borç bilirim.

Desteğini ve güvenini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de minnettarım.

Mayıs 2020

Can Berk GENÇER
(Raylı Sistemler Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
1.GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Planlanması	2
2.RAYLI SİSTEMLER	3
2.1 Raylı Sistemler Sinyalizasyonu.....	4
2.2 Sabit Blok ve Hareketli Blok Prensibi	5
3.CBTC SİSTEMİ.....	7
3.1 CBTC Sistem Standartları	8
3.2 CBTC Sistem Mimarisi	9
3.2.1 ATS alt sistemi	9
3.2.2 Hat boyu alt sistemi.....	10
3.2.2.1 Bölge denetleyicileri.....	10
3.2.2.2 Makaslar	10
3.2.2.3 Peron ayırıcı kapı sistemleri	10
3.2.2.4 Merkezi acil durum butonu	11
3.2.2.5 İstasyon acil durum butonları	11
3.2.2.6 Etiket noktaları	11
3.2.3 Araç üstü alt sistemi	12
3.2.3.1 Odometre sistemi.....	12
3.2.3.2 İnsan makine arayüzü (HMI)	13
3.2.3.3 Etiket okuyucular	13
3.2.4 Veri iletişim ağı (DCN).....	14
3.2.4.1 Hat boyu – merkez haberleşmesi.....	14
3.2.4.2 Hat boyu – araç üstü haberleşmesi	15
3.3 Genel Gereksinimler	15
3.4 CBTC Sistem Fonksiyonları	16
3.4.1 ATP fonksiyonları.....	16
3.4.1.1 Trenin konum ve hızının belirlenmesi.....	17
3.4.1.2 Emniyetli tren ayrımı.....	18
3.4.1.3 Aşırı hız koruması ve fren güvencesi.....	18
3.4.1.4 Geri kayma koruması	19
3.4.1.5 Hat sonu koruması.....	19
3.4.1.6 Trenlerin birleşmesi ve ayrılmasından kaynaklı koruma	19
3.4.1.7 Sıfır hız algılama	19

3.4.1.8 Kapı açma kontrolü koruması	19
3.4.1.9 Kalkış anклашmanı	20
3.4.1.10 Acil durum frenlemesi	20
3.4.1.11 Güzergâh (rota) anклашmanı.....	20
3.4.1.12 Trafiğin ters yönde anклашmanı	23
3.4.1.13 Çalışma bölgesi koruma	23
3.4.1.14 Ray kırığı tespiti	23
3.4.1.15 Hemzemin geçit uyarısı	24
3.4.1.16 Kısıtlı rota korumaları	24
3.4.2 ATO fonksiyonları	24
3.4.2.1 Otomatik hız düzenlemesi	25
3.4.2.2 Platform yanaşma kontrolü.....	26
3.4.2.3 Kapı kontrolü.....	26
3.4.3 ATS fonksiyonları	27
3.4.3.1 ATS kullanıcı arayüzü	28
3.4.3.2 CBTC tren tanımlaması ve tren takibi	28
3.4.3.3 Trene güzergâh oluşturma	28
3.4.3.4 Otomatik tren düzenleme.....	29
3.4.3.5 İstasyon durdurma fonksiyonları	30
3.4.3.6 Tren operasyonlarının kısıtlanması	31
3.4.3.7 Yolcu bilgilendirme sistemi arayüzleri.....	32
3.4.3.8 Arıza raporlama	32
3.5 CBTC Sistem Konfigürasyonları	33
3.6 Otomasyon Seviyeleri (GoA).....	35
3.6.1 Otomasyon seviyesi 0 (GoA 0)	35
3.6.2 Otomasyon seviyesi 1 (GoA 1)	36
3.6.3 Otomasyon seviyesi 2 (GoA 2)	36
3.6.4 Otomasyon seviyesi 3 (GoA 3)	36
3.6.5 Otomasyon seviyesi 4 (GoA 4)	36
3.6.6 Otomasyon seviyesini artırmanın fayda ve zorlukları.....	38
4.ATP EMNİYETLİ FREN MODELİ.....	41
4.1 Emniyetli Fren Modeli Belirlenmesinde Farklı Yaklaşımlar	43
4.1.1 EN 14531 standardı ortak hesaplama yöntemi.....	43
4.1.2 ERTMS sistemi acil durum frenleme eğrileri	44
4.1.3 IEC 62290-2 temel frenleme modeli.....	44
4.1.4 IEEE 1474.1 temel frenleme modeli	45
4.1.4.1 Araç üstü CBTC reaksiyon süresi	47
4.1.4.2 Tahrik devre dışı bırakma süresi	47
4.1.4.3 Süzülme süresi (EB uygulanması için ilave süre)	48
4.1.4.4 Acil durum freni oluşturma süresi.....	48
4.1.4.5 GEBR’de acil durum frenlemesi	48
4.1.4.6 Pozisyon belirsizliği	48
4.1.5 IEEE 1698 temel frenleme modeli	48
4.1.5.1 Maksimum giriş hızı (A)	49
4.1.5.2 Giriş noktası (B)	49

4.1.5.3 Reaksiyon süresi boyunca gidilen mesafe (C)	49
4.1.5.4 Ekipman reaksiyon süreleri	49
4.1.5.5 Operatör reaksiyon süresi	49
4.1.5.6 Kaçak hızlanma (D)	49
4.1.5.7 Tahrik kesme (E)	50
4.1.5.8 Ölü zaman (süzülme) (F)	50
4.1.5.9 Fren oluşumu (G)	50
4.1.5.10 Garantili frenleme hızı (H,I)	50
4.1.5.11 Gövde çıkıntısı (J)	51
4.1.5.12 IEEE 1698 standardı freni oluşum süreleri pratik örnekler	53
4.2 Emniyetli Frenleme Model Formülasyonu	52
4.2.1 Kaçak hızlanma ve tahrik kesilmesi	53
4.2.2 Süzülme ve acil durum freni oluşum süresi	54
4.2.3 Garanti edilen acil durum freni	54
4.3 Emniyetli Fren Model Parametre Tanımları	56
4.3.1 Acil durum freni hızı	56
4.3.2 Hareket yetki limiti son noktası veya çakışma noktaları	56
4.3.3 Hayati çakışma noktasında izin verilen hız	58
4.3.4 Hız belirsizliği	58
4.3.5 Mevcut konum ile çakışma noktası konum arası ortalama eğim	58
4.3.6 Minimum eğimden dolayı hızlanma	58
4.3.7 Yer çekimi sabiti	58
4.3.8 Garanti edilen acil durum frenleme değeri	58
4.3.9 Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi	59
4.3.10 Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı	59
4.3.11 Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı	59
4.3.12 Statik tren kütlesi	59
4.3.13 Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi	59
4.3.14 Döner kütle	59
4.4 Emniyetli Fren Modeli Uygulaması	60
4.4.1 Araç-A emniyetli fren modeli	65
4.4.2 Araç-B emniyetli fren modeli	69
4.4.3 GEBR değerinin emniyetli fren modeli üzerindeki etkisi	71
4.5 Emniyetli Fren Modelinin Doğrulanması	76
4.6 Emniyetli Fren Modelinin Hız Limitleri ile Uygulanması	80
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	93
EKLER	95
ÖZGEÇMİŞ	103

KISALTMALAR

ATC	: Automatic Train Control
ATO	: Automatic Train Operation
ATP	: Automatic Train Protection
ATS	: Automatic Train Supervision
CBTC	: Communication Based Train Control
CENELEC	: European Committee for Electrotechnical Standardization
DCN	: Data Communication Network
DTO	: Driverless Train Operation
EB	: Emergency Brake
ERTMS	: European Rail Traffic Management System
GEBR	: Guaranteed Emergency Brake Rate
GOA	: Grade of Automation
HMI	: Human Machine Interface
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	: International Electrotechnical Commission
MDR	: Mobile Data Radio
OCC	: Operation Control Center
PSD	: Platform Screen Door
RFID	: Radio Frequency Identification
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SIL	: Safety Integrity Level
STO	: Semi-Automatic Train Operation
UGTMS	: Urban Guided Transport Management System
UITP	: International Association of Public Transport
UTO	: Unattended Train Operation



SEMBOLLER

$v(\Delta s)$	: Acil durum freni hızı
Δs	: Çakışma noktasına kalan mesafe
V_1	: Çakışma noktasında izin verilen hız
Δv_m	: Hız belirsizliği
Δh	: Mevcut konum ve çakışma noktasında konum arası ortalama eğim
a_{gmin}	: Minimum eğimden dolayı hızlanma ivmesi
g	: Yerçekimi sabiti
a_{eb}	: Garanti edilen acil durum fren değeri
a_a	: Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi
T_a	: Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı
T_c	: Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı
T_e	: Toplam eşdeğer tepki süresi
M_p	: Statik tren kütlesi
M_i	: Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi
M_{rot}	: Döner kütle



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Temel CBTC standartları.	8
Çizelge 3.2 : Tipik CBTC parametreleri.....	33
Çizelge 3.3 : Otomasyon seviyeleri.	37
Çizelge 4.1 : IEEE 1474.1 [4] ve IEEE 1698 [5] fren model karşılaştırması.....	52
Çizelge 4.2 : Matematiksel model parametreleri.	56
Çizelge 4.3 : Farklı araç parametreleri.	64
Çizelge 4.4 : Araç – A emniyetli fren modeli parametreleri.	65
Çizelge 4.5 : Farklı GEBR değerlerinin frenleme modeli üzerindeki etkisi.....	68
Çizelge 4.6 : Farklı GEBR değerinin sefer sıklığı üzerine etkisi	68
Çizelge 4.7 : Araç – B emniyetli fren modeli parametreleri.....	69
Çizelge 4.8 : Farklı GEBR değerlerinin frenleme hızı üzerine etkisi.....	70
Çizelge 4.9 : İstanbul M11 metro hattı adezyon ve GEBR değerleri.	74
Çizelge 4.10 : Farklı GEBR değerlerinde acil durum fren hız değer değişimi.....	75
Çizelge 4.11 : Matlab parametreleri	77
Çizelge 4.12 : Sanal hat parametreleri.	78
Çizelge 4.13 : En kötü durum frenleme mesafesi karşılaştırılması.	79
Çizelge 5.1 : Emniyetli fren model parametreleri.	90



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Raylı sistemler genel bileşenleri.....	3
Şekil 2.2 : Örnek ray devresi sistemi [3].	5
Şekil 2.3 : Örnek aks sayıcı sistemi [3].	5
Şekil 2.4 : Sabit blok konsepti.	6
Şekil 2.5 : Hareketli blok konsepti.	6
Şekil 3.1 : Temel CBTC alt sistemleri [7].	9
Şekil 3.2 : İstanbul M5 peron ayırıcı kapı sistemleri.	11
Şekil 3.3 : İstanbul M4 hattı istasyon acil durdurma butonu.	11
Şekil 3.4 : İstanbul M7 hattı takometre.	12
Şekil 3.5 : İstanbul M7 hattı doppler radar.	13
Şekil 3.6 : İstanbul M11 hattı HMI.....	13
Şekil 3.7 : Temel veri iletişim ağı.....	14
Şekil 3.8 : Konum hatasının azaltılması.	17
Şekil 3.9 : Emniyetli tren ayırım konsepti.	18
Şekil 3.10 : ATO sürüş profili.	25
Şekil 3.11 : ATC alt sistemleri.	35
Şekil 4.1 : Örnek emniyetli fren model işleyişi.	41
Şekil 4.2 : Genel emniyetli fren modeli.....	43
Şekil 4.3 : Tren koruma profili ve hız denetimi [31].	45
Şekil 4.4 : IEEE 1474.1 emniyetli fren eğrisi.	45
Şekil 4.5 : IEEE 1698 frenleme modeli [32].	48
Şekil 4.6 : Normal güçten frenlemeye geçiş [32].	51
Şekil 4.7 : Emniyetli fren modeli adımları.	53
Şekil 4.8 : Tampon bölgesinde çakışma noktası.....	57
Şekil 4.9 : Bir sonraki tren çakışma noktası.	57
Şekil 4.10 : Kırmızı sinyal çakışma noktası.	57
Şekil 4.11 : ATP emniyetli fren model parametreleri.....	60
Şekil 4.12 : Tren ayak izi.	61
Şekil 4.13 : Trene hız sınırlarının uygulanışı.	61
Şekil 4.14 : Acil durum freni uygulama hızı akış şeması.	62
Şekil 4.15 : Matlab grafik arayüz.	63
Şekil 4.16 : Araç-A 132 km, 1200 m.....	65
Şekil 4.17 : Araç-A hız sınır değişimi.	66
Şekil 4.18 : Araç-A hız belirsizliği değişimi.	67
Şekil 4.19 : Araç-A GEBCO değer değişimi.....	67
Şekil 4.20 : Araç-B 90 km, 1000 m.	69
Şekil 4.21 : Araç-B GEBCO değer değişimi.....	70
Şekil 4.22 : Adezyon kuvvet diyagramı.	71
Şekil 4.23 : Kuru raylarda acil durum frenleme performansı.....	73
Şekil 4.24 : OpenTrack Araç-A tren parametrik verileri.	76

Şekil 4.25 : Sanal hat.	77
Şekil 4.26 : OpenTrack emniyetli fren modeli.	79
Şekil 4.27 : Matlab emniyetli fren modeli.	78
Şekil 4.28 : Matlab hız limitlerinin grafik arayüzünde gösterimi.	76
Şekil 4.29 : Hız limit değişim noktaları kontrolü akış şeması (Alfa).	81
Şekil 4.30 : Beta 1 algoritması akış şeması.	82
Şekil 4.31 : Araç-A 800-600 metre arası 70 km/sa hız limiti uygulanması.....	83
Şekil 4.32 : Araç-A 400-200 metre arası 90 km/sa hız limiti uygulanması.....	83
Şekil 4.33 : Beta 2 algoritması akış şeması.	84
Şekil 4.34 : Araç-A 500-400 metre arası 80 km/sa hız limiti uygulanması.....	84
Şekil 4.35 : Araç-A 500-400 metre arası 90 km/sa hız limiti uygulanması.....	85
Şekil 4.36 : Beta 3 algoritması akış şeması.	86
Şekil 4.37 : Beta birleştirilmiş algoritma akış şeması.....	87
Şekil 4.38 : Beta algoritmalarının eğri üzerinde gösterilmesi.	87
Şekil 4.39 : Araç-A 800-600 metre mesafe 80 km/sa hız limiti uygulaması.....	88
Şekil 4.40 : Araç-A 400-200 metre mesafe 70 km/sa hız limiti uygulaması.....	88

HABERLEŞME TEMELLİ TREN KONTROL SİSTEMİNDE EMNİYETLİ FREN MODELİ

ÖZET

İnsanlık tarihi kadar bir geçmişi olan ulaşım sistemlerinin günümüzde geldiği nokta ile başlangıçtaki konumunu kıyaslandığında arada çok büyük bir değişim olduğunun farkına varılabilir. Artan kentleşme, ekonomik refah, yakıt maliyeti, trafik sıkışıklığı ve çevre sorunları toplu taşıma pazarında rekabete neden olmaktadır. Bu sorunlar, verimli toplu taşıma sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Raylı sistem endüstrisi de yüksek güvenilirlik seviyesinde insanları düşük maliyetle taşımak için her geçen gün daha verimli bir yol arama zorluğu ile karşı karşıyadır. Bu zorluklara karşı raylı sistemlerin performansına en çok katkıda bulunan teknik alanlardan biri sinyalizasyon sistemleridir. Sinyalizasyon sistemleri trenlerin emniyetli, zamanında ve ekonomik bir şekilde işletilmesini sağlar. Burada ki emniyetli işletimi sağlamak için geleneksel sinyal sistemleri, fiziksel bloklar ile hatları bölerek ve her bloğa yalnız bir tren girmesine izin vererek trenlerin çarpışmasını engellemektedir. Raylı sistem araçları çelik tekerleğinin çelik raya temas ederek oluşturduğu düşük sürtünme kuvveti ile yuvarlanma direncini düşürerek hareket ederler. Düşük sürtünme kuvveti enerji tasarrufunu sağlamasına karşın, uzun fren mesafesini de beraberinde getirir. Uzun mesafelerde sabit blok sistemleri, tek bir hat bölgesinde tek araç mantığı ile işletmenin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Teknolojinin gelişmesi ve toplu taşıma pazarının ihtiyaçlarını karşılamak için hatların kapasitelerinin artırılması gereksinimi doğmuştur. Bu gereksinime istinaden fiziksel blokların yerini hareketli blok sistemleri almıştır. Hareketli blok sistemleri emniyet mesafesinin artık sabit bloklar tarafından uygulanan fiziksel bir mesafeden değil, tren hızının gerçek zamanlı hesaplamasına ve en kötü durum koşulları göze alınarak trenlerin emniyetli bir şekilde ayrılmasıdır. Emniyetli tren ayrımı işlevi emniyetli fren modeli oluşturularak, ATP hız profilinin belirlenmesi ile sağlanmaktadır. Hareketli blok sistemleri kentsel taşımacılıkta tercih edilen Haberleşme Temelli Tren Kontrolü (İngilizce kısaltması ile: CBTC) sistemlerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak trafik yönetimi ve altyapı kontrolü için tren ve hat boyu ekipmanları arasında çift yönlü haberleşme ile bir trenin kesin konumu, geleneksel sinyal sistemlerine göre daha noktasal olarak belirlenmesi temeline dayanan CBTC sisteminin mimarisi, fonksiyonları ve konfigürasyonları anlatılmıştır. Trenlerin emniyetli olarak birbirinden ayrılmasını sağlayan emniyetli fren model belirlenmesinde farklı yaklaşımlar incelenmiştir. IEEE 1698 standardının emniyetli fren model yaklaşımına göre bir formülasyon oluşturulup Matlab programı yardımıyla koda dönüştürülerek grafik arayüzü ile parametrelerin etkisi incelenmiştir. İki farklı araç parametresi girilerek emniyetli fren modeli uygulaması yapılmış en çok etkileyen parametre değerinin model üzerindeki etkisi incelenmiştir. Formülasyonun doğrulanması amacıyla benzer parametreler kullanılarak OpenTrack simülasyon programı yardımıyla en kötü koşul frenleme mesafeleri karşılaştırılmıştır. Son olarak oluşturulan algoritmaya hız limitleri girilerek model üzerindeki etki incelenmiştir.



SAFE BRAKING MODEL IN COMMUNICATION BASED TRAIN CONTROL SYSTEM

SUMMARY

It can easily be realized that there is a huge change between the transportation systems that have a history as much as human history compared to the point they have reached today and their original position. Increasing urbanization, economic prosperity, fuel costs, traffic congestion and environmental problems cause competition in the public transport market. These problems increase the need for efficient public transportation systems. The rail system industry also faces with the challenge of seeking a more efficient way to move people at a high level of reliability at a low cost. Signalling systems are one of the technical areas that contribute most to the performance of rail systems against these difficulties.

Signalling systems ensure safe, timely and economical operation of trains. The traditional signal systems prevents train from accidents by dividing the physical blocks and track. This allows only one train to enter each block to ensure safe operation. In other words, this prevents the collision of the trains. Rail system vehicles move by lowering the rolling resistance with the low friction force created by the steel wheel touching the steel rail. Although low friction force provides energy saving, it also brings long braking distance. Long-distance fixed block systems adversely affect the performance of the enterprise with a single-vehicle logic in a single line region. In order to improve technology and to meet the needs of the public transport market, there was a need to increase the capacities of the lines. Based on this requirement, physical blocks have been replaced by moving block systems. Moving block systems are no longer a physical distance applied by fixed blocks, but a safe separation of trains through taking into account the real-time calculation of train speed and worst-case conditions. Safe train separation function is provided by determining ATP speed profile by calculating safe braking model. Moving block systems are used in Communication Based Train Control (CBTC) systems which are preferred in urban transportation.

CBTC is a rail system signalling system based on bidirectional communication between train and wayside equipment for traffic management and infrastructure control. Through CBTC systems, the precise location of a train is determined more precisely than conventional signal systems. This solution is a more efficient and secure system for managing rail system traffic.

The system is implemented by various suppliers around the world in subways, light rail systems and automatic human transport at airports. CBTC standards were first defined in 1999, about twenty years after the system was developed by the first supplier. General characteristics of the functions of automatic train protection (ATP), automatic train operation (ATO) and automatic train supervision (ATS) are described by the standards. The automatic train control (ATC) system is a control system consisting of a combination of ATP, ATO and ATS systems and it is utilized to define the rail systems architecture operated automatically in the world.

There are many types of ATC systems in the world, yet all of them basically provide ATP safety. ATO provides stop commands at stations, and ATS controls train regulation times. The ATC system is a combination of three subsystems on the train: the ATP subsystem will carry out safe train movements. The ATO subsystem will control and regulate train speed and station stops. The automatic train control subsystem will provide a wayside communication link from the train. IEEE 1474 explains how a CBTC system is in the basic CBTC characteristics. When the term CBTC is used, it is often described as an automated driverless system, but there is no reference to "driverless" or "automation" anywhere in IEEE 1474. This standard accepts that different CBTC configurations are possible depending on the specific application.

The thesis is composed of 5 chapters. After mentioning the purpose and planning of the thesis within the introduction, the second chapter introduces the signalization systems by mentioning the differences between the rail systems and other modes of transportation. In rail systems, fixed and moving block principles that arise due to long braking distances are discussed. The advantages of moving block systems and the concept of train separation are also mentioned. The next section discusses why the CBTC system is needed. CBTC system standards and architecture in general are elaborated. Functions and subcomponents described by IEEE 1474 standard are also explained. The third chapter also questions how these cross-component configurations should be. By explaining the relationship between grade of automation and CBTC systems, increasing status grade of automation are examined.

The fourth chapter discusses the safe braking model which provides safe train separation among all trains operating in the CBTC region, regardless of whether the trains are equipped with CBTC or not. The safe train separation function provides safe separation of CBTC equipped trains by determining the ATP speed profile from the safe braking model, which is later pointed out in the thesis. In case of operating mixed-mode (trains that are not equipped with CBTC on the same line as those equipped with CBTC), safe train separation should be ensured by strict adherence to auxiliary secondary train detection equipment (axle counter / track circuit etc.) and/or operating procedures. In determining this model, different approaches are examined by examining the basic brake models described by EN 14531, European rail traffic management system (ERTMS), IEC 62290, IEEE 1474 and IEEE 1698.

Based on the IEEE 1698 standard, safe braking model components have been examined. This model is divided into 3 stages by introducing a different approach. According to these stages, a mathematical model has been created. This model provides emergency brake speed output according to 13 different track and ATP onboard vital computer parameters. This value represents the maximum speed that the vehicle can drive in a given track zone. In case of exceeding this speed on the system or vehicle side, emergency brake is to be applied.

The safe braking model formulation created was encoded with the help of the Matlab program and the model effect of the parameters has been directly observed thanks to the graphical user interface. In order to be an input parameter in the Matlab program,

2 different vehicle parameters have been created. According to these two parameters, safe braking model are calculated and changes of parameters are observed. The guaranteed emergency brake rate (GEBR) parameter, which affects the safe braking model the most, has been studied. The adhesion known as rail and wheel adhesion on this GEBR parameter was examined and its effect on emergency brake speed was examined. In order to verify the safe braking model created, it was provided to compare models created with similar input parameters using the OpenTrack simulation tool, which is a proven program in the rail system industry.

Different algorithms have been created by entering speed limits in the created Matlab algorithm. These algorithms are entered into the Matlab program in Beta form and observed over the graphical user interface. Considering the most restrictive speed profile, the calculation is based on the most restrictive speed. In the basic braking model, the part without the speed limits is in the alpha section. Beta is the part that operates on the braking model in case of any speed limit. The speed limit is the highest speed value of the train, which comes with the movement authority in general or temporarily applied to the desired part of the track zone. The calculated speed is the speed value calculated according to the overlap points. The calculated value is determined according to the most restrictive speed principle. The maximum speed is one of the parameters entered into the algorithm and the highest speed value that the train can go in case there is no speed limit in the related line region. The final speed is the speed value created according to the target point (endpoint of the movement authority). This model shows the model used from real systems.

The last section discusses how important the safe braking model is for train separation. For the safe braking model, it is suggested that it can be expanded further by entering more parameters.

1 GİRİŞ

Raylı sistem taşımacılığının gelişimi on sekizinci yüzyılın ilk yıllarına dayanmaktadır. Raylı sistemler, makine ve mekanik gücü kullanan hem yolcu hem de yük açısından kitle hareketlerine izin veren ilk ulaşım sistemlerindendir. Ve bugün, raylı sistemler birçok ülke için ulaşım ağlarının bel kemiğini oluşturur. Ülkelerin gelişmişlik seviyeleri ile raylı sistem ağı arasında sıkı bir bağ vardır.

Raylı sistemlere olan ihtiyacın artması nedeniyle işletmeler, yeni hatlar inşa etmeye veya mevcut hatlarının kapasitelerini maksimize etmeye odaklanmışlardır. Bu odaklanma ise raylı sistem sinyalizasyon sistemlerinin trafik kapasitesindeki artışı emniyetli bir şekilde karşılaması için gelişmesi ve modernize edilmesine sebebiyet vermiştir. Haberleşme temelli tren kontrol (CBTC) sistemleri de bu ihtiyacı gidermek için ortaya çıkmıştır. Teknolojinin gelişmesi ve son 30 yılda elde edilen deneyim, CBTC sistemlerinin geleneksel sinyal sistemlerine göre daha güvenilir ve emniyetli olduğunu göstermektedir. CBTC sistemleri ile birlikte hareketli blok yaklaşımı da kullanılmaya başlamıştır. Bu yaklaşım trenlerin anlık hız ve konumlarına göre en kötü koşullarda dahi trenleri emniyetli bir fren mesafesi kadar ayrılması prensibine göre işletilmesini sağlamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, CBTC sistemlerinde emniyet kritik olarak gerçekleştirilen araç üstü otomatik tren koruma (ATP) fonksiyonlarından birisi olan emniyetli fren model yapılması amaçlanmaktadır. Emniyetli fren modeli, emniyetli tren ayrımı kapsamında trenlerin hat üzerinde hareketli blok olarak işletilmesini sağlayan bir fonksiyondur. Bu modeldeki hesaplamayı yapmak için CBTC sistemi genel mimarisi gereksinimleri, fonksiyonları ve otomasyon seviyeleri ele alınır. ATP emniyetli fren modeli en kötü durum ve arıza senaryolarının bir kombinasyonunu sağlayarak hareket yetkisi tarafından garanti edilen mesafeye eşit veya daha az bir mesafede treni durduracak şekilde belirlenmesinde farklı standart yaklaşımları incelenerek tasarlanmıştır.

Genel bir fren modeli oluşturulabilmek amacıyla gerekli parametreler belirlenmiş fren modeli formülasyonu oluşturulmuştur. Formülasyon, Matlab programı yardımıyla modellenmiştir. Model çıktılarından acil durum freni uygulama hızı ve frenleme mesafe değerleri farklı parametrelere göre de incelenerek, fren modelini en çok etkileyen parametre üzerinden frenleme modeli çalışması gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan frenleme modelinin doğruluğunu gösterebilmek amacıyla fren modeline hız limitleri de dahil edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde emniyetli fren modeli oluşturulmuş, emniyetli tren ayrımı ve emniyetli fren mesafesi hesaplanmıştır.

1.2 Tezin Planlanması

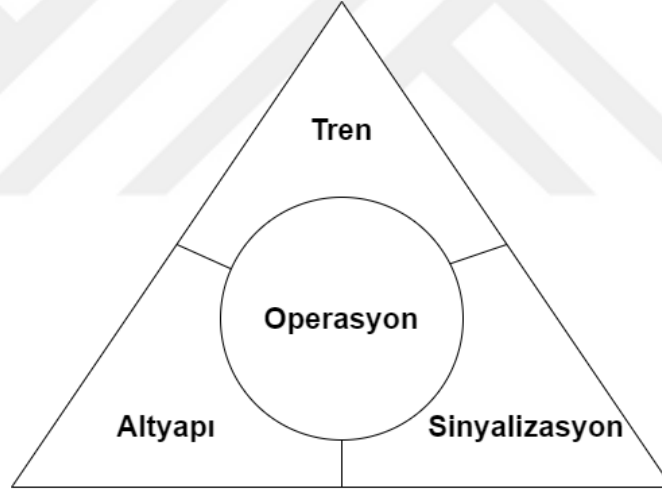
Çalışma 5 bölüm olarak planlanmıştır. Giriş bölümü ile tezin amacından bahsedildikten sonra, ikinci bölümde raylı sistemler sinyalizasyonu ve blok prensiplerine değinilmiştir. Bir sonraki bölümde CBTC sistemi temel standartları, mimarisi, genel gereksinimleri ve fonksiyonlarından bahsedilmiştir. Otomasyon seviyeleri ile CBTC sistem arası ilişkiye değinilmiştir. Dördüncü bölümde ATP emniyetli fren modeli detaylı anlatılarak standartların tariflediği farklı yaklaşımlar incelenmiştir. IEEE 1698 standardına göre matematiksel formülasyon oluşturularak Matlab programı yardımıyla modellenmiştir. Modelleme yapılırken 2 farklı araç parametresi girilmiş ve tüm parametreler grafik arayüzü ile değiştirilerek fren modeli oluşturulmuştur. Emniyetli fren modelini en çok etkileyen parametre bulunarak acil durum uygulama hızı ve frenleme mesafesi üzerine etkisi gösterilmiştir. Matlab algoritması hız limitleri girilecek şekilde genişletilerek grafik arayüzü düzenlenmiş ve hız limitlerinin uygulanması yapılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar ve öneriler oluşmaktadır.

2 RAYLI SİSTEMLER

Raylı sistemler teknik açıdan üç ana bölümden oluşmaktadır[1];

- Raylı Sistem altyapısı (raylı sistem hattı, sanat yapıları, istasyonlar, elektrifikasyon, vb.),
- Yolcu ve yük taşımak için hareket eden birimler olan raylı sistem araçları,
- Raylı sistem hattında yolcu ve yük taşımacılığını emniyetli, planlı ve ekonomik bir şekilde işletilmesini sağlayan raylı sistem sinyalizasyonu,

Bu üç bölüm, kurallar ve süreçlerle birlikte raylı sistem operasyonunu bir bütün olarak oluşturmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Raylı sistemler genel bileşenleri.

Raylı sistemlerinin diğer taşımacılık modlarından (karayolu, havayolu ve denizyolu) ayıran üç temel özellik aşağıda listelenmiştir [1]:

- Kılavuzluk; Raylı sistemler kılavuzlu sistemlerdir. Sadece önceden belirlenmiş bir ray hattı üzerinde hareket edebilirler. Makinistin hatta bulunan bir engelden kaçmak için bir yolu yoktur [2]. Bir trenin gideceği bir yoldan diğer yola geçmesini sağlayan hareketli ve sabit parçalardan oluşan makaslar yardımı ile değiştirilebilir. İzlenecek yolu önceden belirlemek mümkün olduğundan trenler zamanında istenildiği yere ulaşırlar.

- Uzun Fren Mesafesi; Raylı sistem araçları çelik tekerleğinin çelik raya temas ederek oluşturduğu düşük sürtünme kuvveti ile yuvarlanma direncini düşürerek hareket ederler. Bu nedenle araçların hareket etmesi için gerekli enerjiden tasarruf edilir. Düşük sürtünme kuvveti enerji tasarrufunu sağlamasına karşın, uzun fren mesafesini de beraberinde getirir.
- Emniyetli: Raylı sistemler en emniyetli ulaşım yollarından biridir. Yolculuk başına veya kat edilen mesafe başına ölüm veya yaralanmalar açısından karayollarından 20 kat daha emniyetlidir. Sadece havayolu taşımacılığı benzer bir emniyet seviyesine ulaşır [1].

Şehir ve nüfus artışında bu temel özellikler eklendiğinde raylı sistemlere olan ihtiyaç artmaktadır. Raylı sistemlere olan ihtiyacın artması nedeniyle işletmeler, hatlarının kapasitelerini maksimize etmeye odaklanmışlardır. Bu odaklanma ise raylı sistem sinyalizasyon sistemlerinin trafik kapasitesindeki artışın emniyetli bir şekilde karşılaması için gelişmesi ve modernize edilmesine sebebiyet vermiştir.

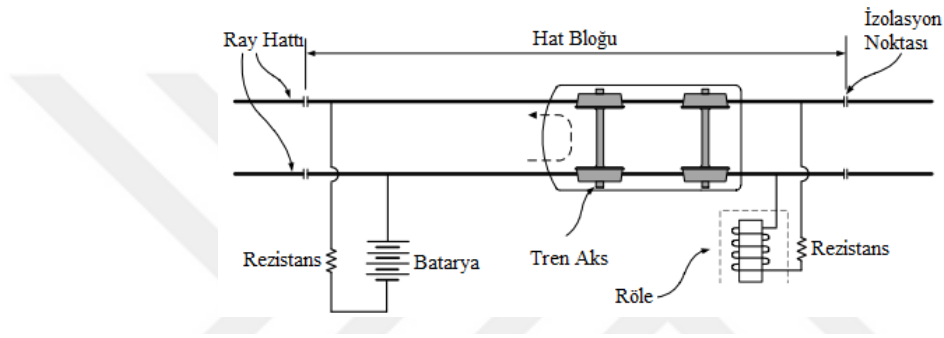
2.1 Raylı Sistemler Sinyalizasyonu

Raylı sistem taşımacılığında en önemli teknik alanlardan biri sinyalizasyon sistemleridir. Toplu taşıma pazarının ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan sinyalizasyon sistemleri, temel görüş hattı sadece makinist kontrolündeki “görerek sürüş” (line of sight) sistemlerinden tam otomatik “insansız” işletim sistemine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Sinyalizasyon sistemleri raylı sistemlerin gelişmiş performansına en çok katkıda bulunan bileşenler arasındadır. Basit anlamda trenleri emniyetli, zamanında ve ekonomik bir şekilde işletilmesini sağlar.

Raylı sistem araçlarında çelik ray teker arasındaki düşük yuvarlanma direnci nedeniyle ortaya çıkan uzun fren mesafeleri, hattın belli aralıklar ile frenleme mesafeleri hesaplanılarak bölünmesiyle ortaya çıkan sabit blok prensibi ve hat kapasitelerini artırma ihtiyacı nedeniyle trenin anlık hızına, konumuna göre hesaplanan en kötü durum fren mesafesi değerine emniyet payı eklenilerek elde edilen hareketli blok prensibinin kullanım ihtiyacını doğurmuştur.

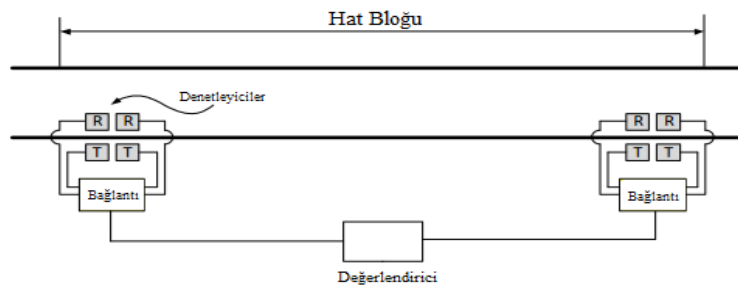
2.2 Sabit Blok ve Hareketli Blok Prensibi

Bir sinyalizasyon çözümünün temel amacı, bir raylı sistem tesisi içerisinde trenleri belirli bir noktadan bir diğer noktaya emniyetli olarak hareket edebilmesini sağlamaktır. Sinyalizasyon sistemleri bu amacı birçok fonksiyonu aynı anda yerine getirerek sağlamaktadırlar. Herhangi bir arıza oluşması durumunda bir treni durdurmak için yeterli mesafe sağlayarak trenleri güvenli bir şekilde birbirinden ayırmak, sinyalizasyon sistemi tarafından gerçekleştirilen fonksiyonlar içerisinde en önemli fonksiyonlardan birisidir. Tren ayrımı, her ne kadar emniyet açısından çok önem arz etse de, verimi düşüreceğinden dolayı çok uzun olmaması gerekmektedir.



Şekil 2.2 : Örnek ray devresi sistemi [3].

Geleneksel sinyalizasyon sistemleri trenlerin hat boyunda bulundukları konumlarının belirlenmesi için ray devrelerine veya aks sayaçlarına ihtiyaç duymaktadır. Ray Devresi, trenin konumunu, elektrik devresi yardımı ile hat bloklarındaki meşguliyet bilgilerine dayanarak belirler. Şekil 2.4’de örnek ray devresi sisteminin temel çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2.3 : Örnek aks sayıcı sistemi [3].

Aks sayıcı ise iki nokta arasındaki bir bölümün meşgul veya serbest durumlarını kontrol etmek için kullanılan bir sistemdir. Sistem genellikle bir tekerlek sensöründen (hat bloğunun her bir ucu için bir tane) ve tren akslarının hat bloğunun giren/çıkan

adetlerini saymak için bir değerlendirme biriminden Şekil 2.3’de gösterildiği gibi oluşur. Bir tren bir ray devresini veya bir aks sayıcının bulunduğu hat bloğuna girer ise tüm hat blok bölgesinin meşgul olduğunu bildirir. Blok bölgesi uzunluğu, en kötü durum koşullarına (başka bir ifade ile maksimum hız, maksimum yük, minimum fren, minimum ray tutunması) bağlıdır. Sabit blok sistemleri, tren hattını emniyetli işletim için trenlerin birbirinden ne kadar uzak tutulacağını ve istasyonlara ne sıklıkta hizmet verileceğini belirleyen bloklara böler. Bu blok uzunlukları belirlemedeki zorluk aynı anda en iyi sefer sıklığı ve emniyetli işletim için boyutlandırmaktır. Hat bloğunun uzunluğu artırılırsa, emniyet payı daha uzun sefer sıklığına rağmen artar. Bu sabit blok sistemlerinin doğasıdır. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi tek bir hat bloğunda yalnızca tek tren mantığına dayanarak trenin herhangi bir kısmı ilgili hat bloğu içerisinde olması işletmesel kısıtlamalara sebep olmaktadır.



Şekil 2.4 : Sabit blok konsepti.

Tren sefer aralıklarının düşük olduğu bölgelerde artan taşımacılık talepleri işletmeleri hatların kapasitelerini geliştirmeye zorlamaktadır. Bu durum araç sayılarını artırmaya ve trenler arası mesafeleri düşürmeye sebep olmaktadır. Trenler arası mesafeyi düşürmek ekstra blok bölümleri eklenerek optimize edilebilir. Ancak bu yaklaşımın ekonomik ve pratik sınırlamaları vardır. Sabit bloğun getirdiği dezavantajlara karşı tren pozisyonlarının sürekli izlenmesine dayanan hareketli blok sistem konsepti geliştirilmiştir. Hareketli blok prensibinin en önemli özelliği, emniyet mesafesinin artık sabit bloklar tarafından uygulanan statik bir mesafeden değil, tren hızının gerçek zamanlı hesaplamasına dayanan ayarlanabilir bir mesafe olmasıydı; tren yüksek hızda seyrediyorsa, emniyet mesafesi uzun ve tren düşük hızda seyrediyorsa emniyet mesafesi kısadır. Şekil 2.5’de gösterildiği hatti verimli şekilde kullanır.



Şekil 2.5 : Hareketli blok konsepti.

CBTC dünyasında büyüyen kavram olan hareketli blok, ray devrelerine veya aks sayıcılara olan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır [4]. Bunun yanı sıra işletmeler ise yeni teknolojileri adapte ederek daha fazla metro hattı inşa etmek veya mevcut altyapılarını modernize ederek sefer sayılarını artırmak şeklinde iki zorluk ile karşı karşıya kalmışlardır[1].



3 CBTC SİSTEMİ

Haberleşme Temelli Tren Kontrolü (CBTC), trafik yönetimi ve altyapı kontrolü için tren ve hat boyu ekipmanları arasında çift yönlü haberleşme temeline dayanan bir raylı sistem sinyalizasyon sistemidir. CBTC sistemleri aracılığıyla, bir trenin kesin konumu, geleneksel sinyal sistemlerine göre daha noktasal olarak belirlenir.

3.1 CBTC Sistem Standartları

CBTC sistemi dünya çapında çeşitli tedarikçiler tarafından metrolarda, hafif raylı sistemlerde ve havalimanlarındaki otomatik insan taşımacılığında uygulanmaktadır. ERTMS sistemi (Avrupa Birliği ve raylı sistem sinyalizasyon tedarikçileri iş birliği ile gerçekleştirilen karşılıklı işletilebilirlik ortak standartlarını oluşturma sanayii projesidir [5].) gibi geliştirme öncesinde standartlaştırılmadığından, sistem birlikte çalışabilirlikten yoksundur. CBTC standartları ilk olarak 1999 yılında, sistem ilk tedarikçi tarafından geliştirildikten yaklaşık yirmi yıl sonra tanımlanmıştır. Çizelge 3.1’de temel CBTC standartları gösterilmiştir.

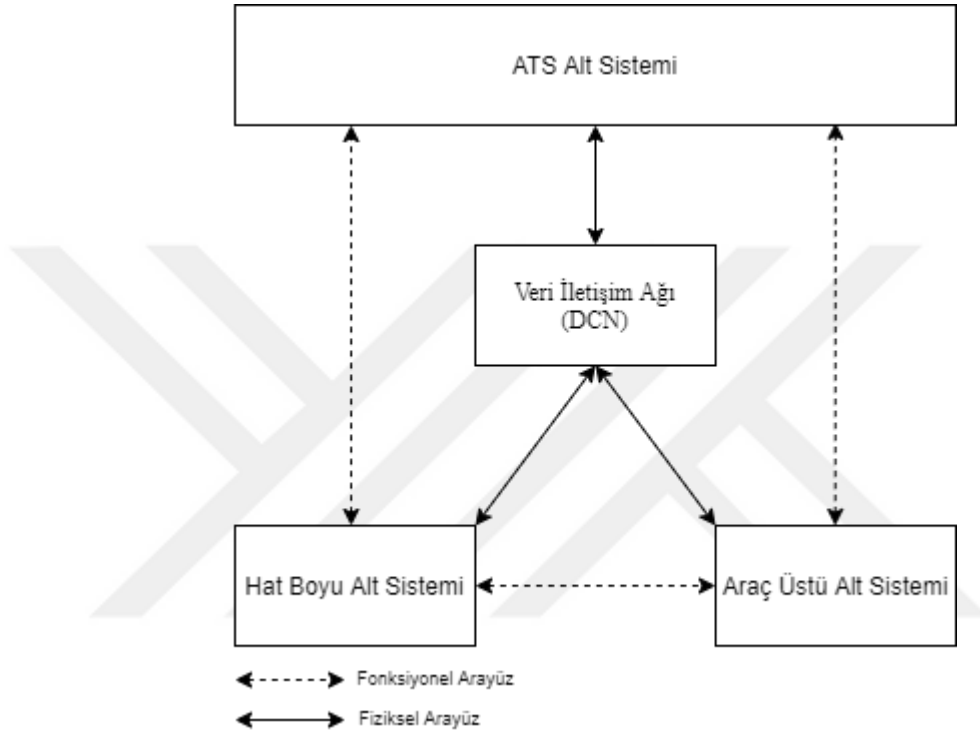
Çizelge 3.1 : Temel CBTC standartları.

Standart	Yıl	İçerik
IEEE 1474.1	2004	Haberleşme temelli tren kontrol sistemi performansı ve fonksiyonel gereksinimler
IEEE 1474.2	2003	Haberleşme temelli tren kontrol sistemindeki kullanıcı arayüz gereksinimleri
IEEE 1474.3	2008	Haberleşme temelli tren kontrol sistem tasarımı ve fonksiyonlara ayrılması için öneriler
IEEE 1474.4	2011	Haberleşme temelli tren kontrol sistemi testi için uygulamalar
IEC 62290.1	2014	Kentsel raylı ulaşım yönetimi ve kontrol-kumanda sistemleri. Sistem ilkeleri ve temel kavramlar
IEC 62290.2	2014	Kentsel raylı ulaşım yönetimi ve kontrol-kumanda sistemleri. Fonksiyonel gereksinim özellikleri
IEC 62290.3	2019	Kentsel raylı ulaşım yönetimi ve kontrol-kumanda sistemleri. Sistem gereksinim özellikleri

IEEE 1474 standartları için teknik komite yenileme çalışmalarına başladıklarını ve IEEE 1474.5 standardı ile birlikte CBTC sistemine karşılıklı işletilebilirlik özellikleri kazandıracaklarını bildirmişlerdir [6].

3.2 CBTC Sistem Mimarisi

Bir CBTC sistemi aşağıdaki ana alt sistemleri içermelidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Temel CBTC alt sistemleri [7].

- ATS alt sistemi (trafik kontrol merkezi)
- Hat boyu alt sistemi
- Araç üstü alt sistemi
- Veri iletişim ağı

3.2.1 ATS alt sistemi

ATS sistemi tren işlemlerinin önceden belirlenmiş servis tarifesine göre otomatik kumandasını sağlamaktadır. Bir servis arızası durumunda, trafik operatörleri vasıtasıyla gerekli düzeltici stratejiler için imkân ve sistem durum bilgisini operatöre gösterecek, sistem işletimini izleyecek ve sistemin çeşitli fonksiyonları için otomatik kontroller sağlamaktadır.

3.2.2 Hat boyu alt sistemi

CBTC hat boyu alt sistemi, merkezi ve/veya hat boyu konumlarına kurulan işlemci tabanlı, hat boyu denetleyici ağından oluşur. Her bir hat boyu kontrolörü, CBTC veri iletişim ekipmanı yoluyla araç üstü ekipmanı ile arayüz oluşturur.

3.2.2.1 Bölge denetleyicileri

Bölge denetleyicileri, saha ekipmanlarının kontrol edilmesinden sorumlu olan merkezi anlaşılan ile uyumlu olarak çalışan emniyetli son kontrol ekipmanlarıdır. Makaslar, peron ayırıcı kapı sistemleri, istasyon ve merkezi acil durdurma butonları gibi ekipmanların izlenmesi, kontrol edilmesi ve emniyetli durumda kalması işlevlerinden sorumludur. Bölge denetleyici sistemler genellikle anlaşılan sistemlerini içerisinde bulundurulur. IEEE 1474.3 standardı 3 farklı hat boyu mimariden bahsetmektedir. Birincisi CBTC sistemlerinde en çok tercih edilen anlaşılan temelli mimari, ikincisi anlaşılan sistemi olmadığı ancak bazı fonksiyonların araç üstü kontrolörü tarafından kontrol edildiği mimari ve hat boyu yerine eleman kontrolörleri ile tasarlanan araçların birbiri ile haberleştiği ve böylelikle karşılıklı işletilebilir sistemlerde büyük avantaj sağlayan mimari; Bu mimariler CBTC sistemindeki fonksiyonları hangi alt sistemler ile gerçekleştirdiğinize göre değişmektedir [8]. Anlaşılan sistemleri ise temel olarak raylı sistem hattında, makasları ve diğer sinyalizasyon ekipmanlarını hayati olarak kontrol eden sistemlerdir.

3.2.2.2 Makaslar

Raylı sistem araçlarını bir yoldan diğer bir yola geçişini sağlayan mekanik ekipmanlara denilir. Makasların uzaktan izlenmesi ve kontrolü ise makas motoru adı verilen elektro-mekanik ekipmanlar ile sağlanır. Makas motorları sistem mimarisine göre anlaşılan veya bölge denetleyicileri tarafından kontrol edilmektedir.

3.2.2.3 Peron ayırıcı kapı sistemleri

Hat ile istasyondaki yolcu peronunu birbirinden ayıran otomatik kayar kapılardan oluşan bir emniyet sistemidir. Otomasyon seviyesi 3 ve 4 için kesinlikle kullanılması gerekmektedir [8]. Peron ayırıcı kapı sistemlerinin (PAKS) kapı açma/kapama eşgüdümü için araç üstü ve hat boyu kontrol sistemleri ile arayüzü bulunmaktadır. Şekil 3.2’de örnek peron ayırıcı kapı sistemi gösterilmiştir.

3.2.2.4 Merkezi acil durum butonu

Trafik kontrol merkezlerinde hattaki tüm trenlerin acil durum freni uygulamalarını sağlayan bir merkezi acil durum durdurma butonu bulunmaktadır.



Şekil 3.2 : İstanbul M5 peron ayırıcı kapı sistemleri.

3.2.2.5 İstasyon acil durum butonları

İstasyonda acil bir durum gerçekleşmesi durumunda trenlerin istasyon hat bölgesine girmesini engelleyen butonlardır. Şekil 3.3’de örnek olarak acil durdurma butonu gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : İstanbul M4 hattı istasyon acil durdurma butonu.

3.2.2.6 Etiket noktaları

Etiket noktası, bir pasif cihaz veya telsiz frekans saptama (RFID) etiketidir. Bu etiketler, hat boyunca yerleştirilmişlerdir ve aracın fiziksel haritasındaki fiziksel bir

konuma karşılık gelen özel kimlikler içerir. Etiketler, tren üzerinden geçerken konumunun belirlenmesinde kullanılırlar. Her bir araç üstü ATC ekipmanı için sağlanan etiket noktası okuyucusu, her bir etiket noktası cihazı içinde gömülü olan konum bilgisini okur ve etiket konumunu kendi hesapladığı konum ile doğrular.

3.2.3 Araç üstü alt sistemi

Genel olarak CBTC araç üstü alt sistemi, bir veya daha fazla işlemci tabanlı kontrolör, hız ölçümü ve konum belirleme sensörleri, insan makine arayüzü ve etiket noktası okuyuculardan oluşur.

3.2.3.1 Odometre sistemi

Trenini konumunu belirlemek için kullanılan hız ve mesafe sensörlerin oluşturduğu sistemdir. Odometre sistemi genellikle; takometre, radar, ivme ölçerden oluşur. Bu sensörler farklı mimariler üzerine emniyet analizleri yapılarak emniyetli odometre mimarileri kurulabilir.

Takometre

Şekil 3.4’de görüleceği üzere takometre aracın bojide bulunan aks başı (turyon) denilen kısma takılarak teker dönüş sayısını hesaplar. Tren tekerlek yarıçapları da dikkate alınarak trenin kat ettiği mesafe hesaplanır. Kayma veya kızaklamadan kaynaklanan hatalar etiket noktaları ile belirli aralıklarla düzeltilir.



Şekil 3.4 : İstanbul M11 hattı takometre.

Radar

Şekil 3.5’de raylı sistem aracının alt kısmına yerleştirilen ve doppler mikrodalga ilkesini kullanarak temassız bir ölçüm ile araç hızını ölçen radar gösterilmektedir.

İvmeölçer

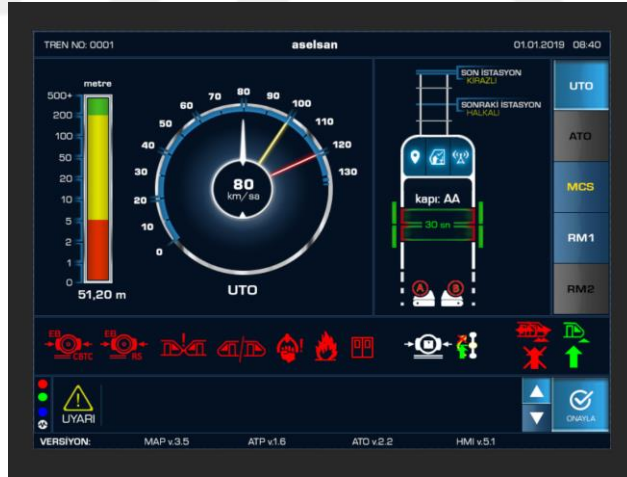
İvmeölçer yani diğer bir ifade ile akselometre, ivme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan elektromekanik bir cihazdır.



Şekil 3.5 : İstanbul M7 hattı doppler radar.

3.2.3.2 İnsan makine arayüzü (HMI)

Araç kontrol panelinde bulunan makinist ile CBTC sistemi arasındaki iletişimi (trenin kapı durumları, arıza bilgilerini, hedef noktasına uzaklığını, işletim modlarını vb. bilgileri) sağlayan cihazdır [9]. Şekil 3.6’da örnek insan makine arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : İstanbul M11 hattı HMI.

3.2.3.3 Etiket okuyucular

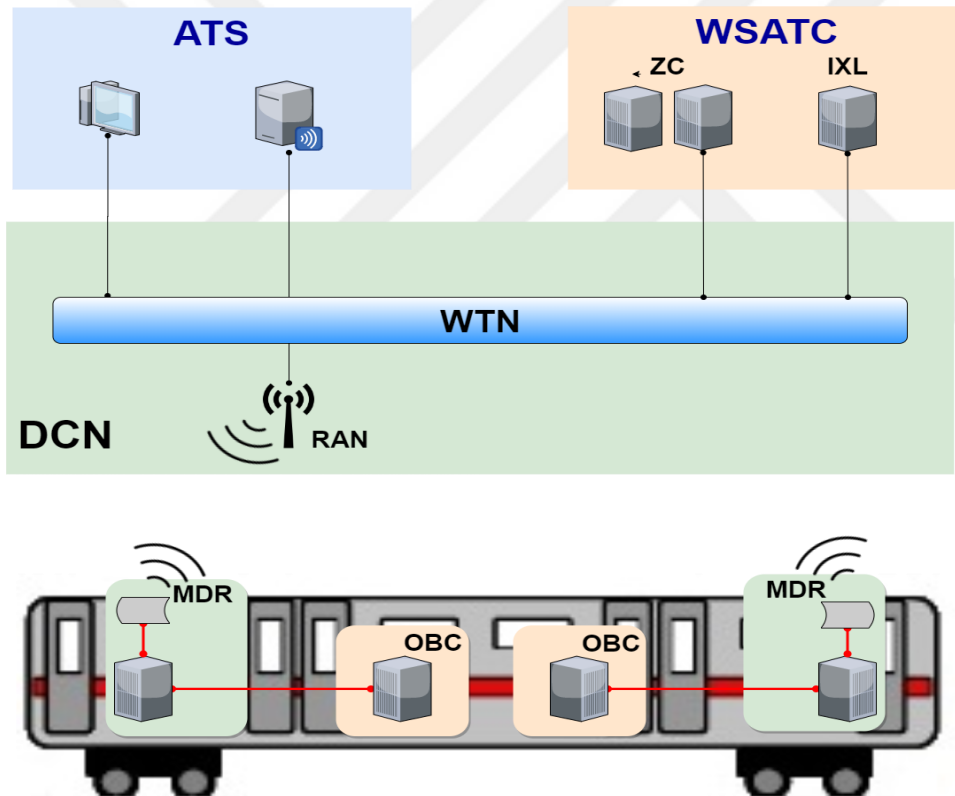
Araç üstü etiket okuyucu sistemi etiket noktalarında mesafeyi kalibre eden cihazlardır.

3.2.4 Veri iletişim ağı (DCN)

CBTC sistemine ait tüm alt sistemler veri alışverişini haberleşme ağı aracılığıyla yaparlar [9]. Ağın yüksek oranda elverişli ve iletim kapasiteleri ile gecikme (veri yayılımı) süresinin CBTC gereksinimleriyle uyumlu olduğu doğrulanır.

Şekil 3.7 görselinde aşağıdaki kavramlar gösterilmektedir;

- ZC: Bölge Denetleyiciler
- IXL: Anlaşman Bilgisayarı
- WTN: Hat boyu iletim Ağı
- RAN: Radyo Erişim Ağı (Erişim Noktaları)
- MDR: Mobil Veri Tren Radyo Ağı
- OBC: Araç Üstü Hayati Bilgisayar



Şekil 3.7 : Temel veri iletişim ağı.

3.2.4.1 Hat boyu – merkez haberleşmesi

Hat boyundan merkeze veya merkezden hat boyuna veriler fiber optik iletim şebekesi üzerinden yedekli olarak sağlanır. Böylece oluşabilecek tek nokta arızaları iletişimi aksatmayacaktır.

3.2.4.2 Hat boyu – araç üstü haberleşmesi

Tren hat boyu veri hattı, CBTC bölgesinde sürekli kapsama sağlamalıdır. Haberleşme ağı, hat boyunca tren antenleri (MDR) ile erişim noktalarına bağlı antenlerden (access points) kablosuz haberleşme altyapısı kullanır. Bu haberleşme sistemi siber saldırıların en çok tehdit ettiği ağıdır. Bunu önlemek adına gerekli tüm güvenlik (yazılım ve donanım) önlemlerine sahip olmalıdır.

3.3 Genel Gereksinimler

CBTC sistemi başlıca aşağıdaki özellikleri içermektedir:

- Ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlükte tren konumu tespiti.
- Araç ile hat boyu ekipmanlar arası kesintisiz, yüksek kapasiteli, çift yönlü haberleşme.
- Hayati fonksiyonları sağlayan araç üstü ve hat boyundaki işlemciler.

Diğer bir deyişle, CBTC sistemi trenin hassas konumunu ray devrelerinden bağımsız olarak, çift yönlü kesintisiz haberleşme aracılığıyla, sistemi emniyette tutarak belirler[8].

- Ray devrelerinden bağımsız olarak yüksek çözünürlükte tren konumu tespiti;
- Bir CBTC sistemini geleneksel sinyalizasyon sistemlerinden ayıran ana özellik, ray devrelerinden bağımsız trenin konumunu belirleme yeteneğidir.
- Araç ile hat boyu ekipmanlar arası kesintisiz, yüksek kapasiteli, çift yönlü haberleşme;
- Hayati fonksiyonları sağlayan araç üstü ve hat boyundaki işlemciler;

IEEE 1474.1 Standardı 4 geniş kategoriye ayrılabilen birçok emniyet fonksiyonunu tanımlar;

- Konumlandırma fonksiyonları; CBTC sisteminin, trenleri birbirinden emniyetli bir şekilde ayırma ve takip etme yeteneğidir.
- Hız belirleme ve izleme fonksiyonları; CBTC sisteminin izleme, hızı belirleme ve kontrol etme yeteneğidir.
- Seyahat Yönü, güzergah oluşturma ve kilitleme fonksiyonları; Bir tren ilerlerken, o trene adanmış yolda hareket etmesini sağlar.

- Diğer Fonksiyonlar; çalışma bölgeleri, kapı kontrolü ve kilitler, ray kırığı tespiti ve raylı sistemler hemzemin geçit koruması vb.

3.4 CBTC Sistem Fonksiyonları

Bir CBTC sistemi, ATP, ATO ve ATS işlevlerini sağlama yeteneğini içerir. ATP işlevleri, çarpışmalara, aşırı hıza ve diğer tehlikeli koşullara karşı emniyetli koruma sağlar. ATP işlevlerinin hem ATO hem de ATS işlevlerine göre önceliği vardır. ATO işlevleri, bir tren operatörü tarafından gerçekleştirilecek temel işlemleri kontrol edecek ve bunu ATP tarafından uygulanan koruma sınırları dahilinde gerçekleştirecektir. ATS fonksiyonları, sistem durum bilgisi ve sistemin çeşitli fonksiyonları için otomatik kontrolü izleme ve geçersiz kılma aracı sağlayacaktır.

3.4.1 ATP fonksiyonları

Çarpışma, aşırı hız ve diğer tehlikeli durumlara karşı, tren konum belirleme, tren sefer aralığı kontrolü, anlaşılan fonksiyonları vb. aracılığıyla arızalara karşı emniyetli koruma sağlayan ATC alt sistemidir. Tüm ATP işlevleri hayati işlevler olarak sistem emniyet gereksinimlerine göre tasarlanmalı ve uygulanmalıdır. ATP fonksiyonları hem ATO hem de ATS fonksiyonlarına göre önceliklidir. Bir ATO veya ATS fonksiyonları bir ATP kısıtlamasını ihlal ederse, ATP işlevleri ATO/ATS komutunun yürütülmesini önler. IEEE 1474 standardında tanımlanan 16 adet ATP fonksiyonu vardır.

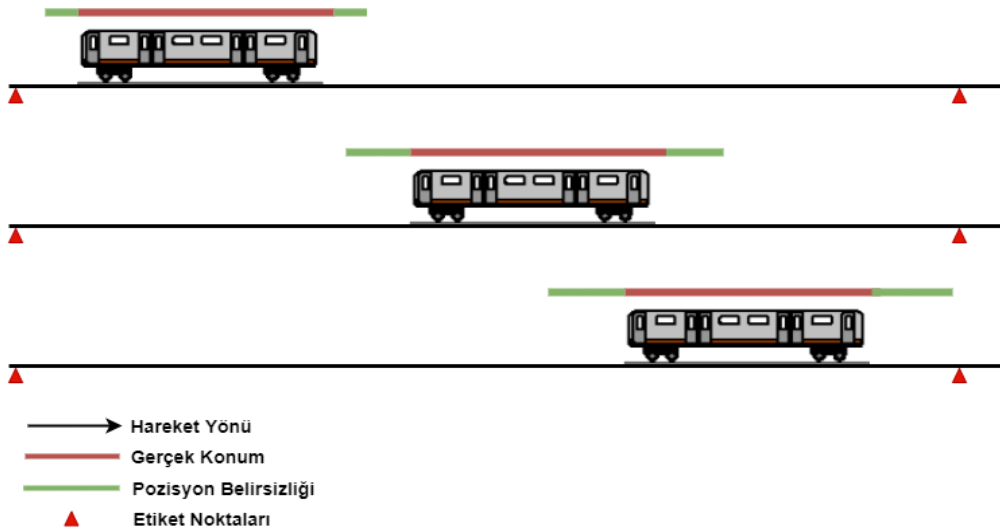
- Trenin konum ve hızının belirlenmesi
 - İkincil tren algılama
- Emniyetli tren ayrımı
 - Emniyetli fren modeli
- Aşırı hız koruması ve fren güvencesi
- Geri kayma koruması
- Hat sonu koruması
- Trenlerin birleşmesi ve ayrılmasından oluşan koruma
- Sıfır hız algılama
- Kapı açma kontrolü koruması
- Kalkış anlaşımanı
- Acil durum frenlemesi

- Rota anlaşmanı
 - CBTC ayrı bir anlaşmanla arayüzü
 - CBTC tren konumu arızalarına cevap verilmesi
 - Makas gösterimi kaybına cevap verilmesi
- Trafiğın ters yönde anlaşmanı
- Çalışma bölgesi koruma
- Ray kırığı tespiti
- Hemzemin geçit uyarısı
- Kısıtlı rota korumaları

3.4.1.1 Trenin konum ve hızının belirlenmesi

ATP sistemi, CBTC bölgesinde faaliyet gösteren her bir CBTC donanımlı trenin konumunu, hızını ve hareket yönünü belirler [10].

CBTC tren yeri belirlemesi, trenin hem önünde hem de arkasında haberleşme ağı ile birlikte trenin konumunu emniyetli ve doğru bir şekilde belirleyecektir. Tren konum/hız ölçümü tekerinin dönüşüne bağıldır. Sistem otomatik veya manuel olarak tekerlek kalibrasyon değerlerinin girilmesine imkân sağlayabilir. Şekil 3.8’ de CBTC tren yeri belirleme fonksiyonu, performans ve emniyet gereksinimlerini desteklemek için yeterli tren yeri çözünürlüğü ve doğruluğunu sağlamalıdır.



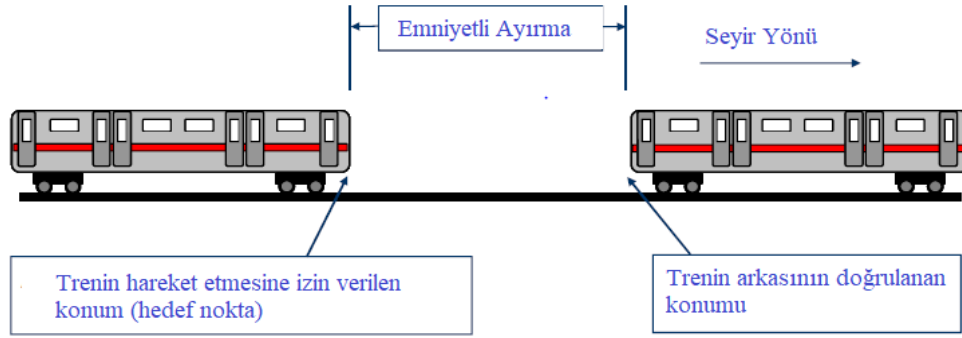
Şekil 3.8 : Konum hatasının azaltılması.

İkincil tren algılama

İkincil bir tren kontrol sistemi CBTC donanımlı olmayan trenlerin ve/veya CBTC donanımlı trenlerin hareketi durumunda kısmi ATP işlevselliği sağlayan yardımcı ekipmandır. Başka bir ifade ile birincil CBTC sinyalizasyon sistemi çalışmazsa, kullanılamıyorsa veya CBTC donanımlı olmayan trenler sisteme girerse, yedek çalışma modu, ray devreleri veya aks sayıcılar ile trenleri izleme yeteneğidir.

3.4.1.2 Emniyetli tren ayrımı

CBTC bölgesinde faaliyet gösteren tüm trenler arasında, trenlerin CBTC donanımlı olup olmadığına bakılmaksızın emniyetli tren ayrımı sağlar. Şekil 3.9 örnek işleyiş verilmiştir. Emniyetli tren ayrımı işlevi tezin ilerleyen kısımlarında bahsedilecek olan emniyetli fren modelinden ATP hız profilinin belirlenmesi ile CBTC donanımlı trenlerin emniyetli olarak ayrımını sağlar. Karışık mod (CBTC donanımlı olmayan trenlerin de CBTC donanımlı trenler ile aynı hatta işletilmesi durumu) işletme yapılması durumunda, yardımcı ikincil tren algılama ekipmanı (aks sayıcı/ray devresi vb.) ve/veya çalıştırma prosedürlerine sıkı sıkıya bağlı kalınarak emniyetli tren ayrımı sağlanmalıdır.



Şekil 3.9 : Emniyetli tren ayrım konsepti.

3.4.1.3 Aşırı hız koruması ve fren güvencesi

Emniyetli fren modelinde oluşturulacak olan ATP hız profili arızalar dahil hiçbir koşul altında trenin gerçek hızının emniyetli hız sınırını aşmamasını sağlar. Bu model sistemde hareketli blok işletim yapılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

3.4.1.4 Geri kayma koruması

Geri kayma koruması sistemin gerekli bir ATP işlevidir. Sistem, trenin gerçek gidiş yönünü izleyerek ve hesaplanan gidiş yönünü, kurulu trafik yönü ile karşılaştırır. Trenin hareket yönü aksine belirli bir geri kayma payından daha fazla hareket etmesi, sistemin acil fren uygulamasıyla sonuçlanır. Çizelge 3.2’de tipik CBTC sistemleri ve uygulamaları için geri kayma algılama kriterleri belirtilmiştir.

3.4.1.5 Hat sonu koruması

Hat sonu koruması, hat sonuna yakın veya yakınında trenlerin çalışmasına izin veren bir CBTC sistemi konfigürasyonu için gerekli bir ATP fonksiyonudur. Hat sonu koruması, trenlerin hattın sonunda hareket etmesini engellemek için ya da tamponlar (buffer stop) belirtilmişse, trenlerin çarpma etkisine sahip tasarım sınırlarını aşmasını önlemek için aşırı hız korumasına dahil edilmeli veya bunlarla birlikte çalışmalıdır.

3.4.1.6 Trenlerin birleşmesi ve ayrılmasından kaynaklı koruma

Bir tren dizisi oluşturmak için, birden fazla trenin kuplajında, CBTC sistemi parçalı trenleri tespit etme ve koruma fonksiyonlarına sahip olmalıdır[8].

Tekil trenlerin veya çoklu ünitelerin kalıcı bağlanmış olarak kabul edilip edilmediğine veya bakım veya işletme amaçları için rutin olarak bağlanmamış olmalarına bakılmaksızın, kısmen korunma zorunlu tutulmalıdır. Bir CBTC sistemi ayrıca, CBTC sistemi içerisindeki toplam uzunluğun otomatik olarak güncellenmesi dahil, trenlerin bağlanması ve ayrılması için çalışma gereksinimlerini de destekler [11].

3.4.1.7 Sıfır hız algılama

Belirli bir hızın altında veya ek olarak çekiş gücü kesme ve zaman sınırı ile sıfır hızın algılaması işlemi gerçekleştirilebilir. Çizelge 3.2’de tipik CBTC sistemleri ve uygulamaları için sıfır hız algılama kriterleri belirtilmiştir.

3.4.1.8 Kapı açma kontrolü koruması

Trenler personel tarafından işletiliyorsa, işletme seçeneğinde kapı açma kontrol koruma kilitleri gerekli bir ATP fonksiyonu olabilir. Ancak otonom trenlerin işletilmesi için kapı açma kontrol koruması zorunludur.

Bu kilitler, tren kapılarının (ve eğer varsa platform kapılarının) açılmasını sağlamadan önce aşağıdaki koşulların yerine getirilmesini sağlayacaktır:

- Tren belirli durma noktasında öngörülen toleransla durur;
- Durma noktası üzerinde belirli tren kapısının açılması onaylanır;
- Sıfır hız saptanır;
- Peron ayırıcı kapılar mevcutsa, tren hareketsizliğin onaylanması gereklidir.

Özel kapı açma izni, tren uzunluğunun platform uzunluğunu aştığı uygulamalar için mümkün olacaktır. Özel durumlar için istasyon atlama sistemi bağlanabilir.

3.4.1.9 Kalkış anklâşmanı

Kalkış anklâşmanı tüm kapılar kapanıp kilitlenmeden istasyondaki tren hareketini engelleyen bir kitleme sistemidir. Bu nedenlerle otomatik işletme yapılarına bir sisteminde genel olarak aşağıdaki koşullar sağlanmadan bir istasyondan kalkamaz:

- Trenin tüm kapıları kapalı olarak saptanır.
- Peron ayırıcı kapılar kapalı ve kilitlidir.
- Peron acil durdurma butonu etkinleştirilmemiştir.
- Trende geçerli bir hareket yetkisi bulunmaktadır.

Ekipman arızası gibi durumlarda kalkış anklâşmasının devre dışı bırakılması imkânı sağlanabilir. Bu durumda trenin kalkışı, işletme prosedürlerince yapılır [12]. Hareket yetkisi limiti hat boyu kontrolörü tarafından hesaplanan ve araç üstü ekipmanına gönderdiği bu yetki limiti içerisinde emniyetsiz bir durum (yetki limiti içerisindeki hat bölümlerinin başka bir trene ait rota içerisinde olmadığı, makasların istenilen pozisyonunda kilitli olduğu, yan koruma vb.) olmadığını garanti ettiği hat bölümüdür.

3.4.1.10 Acil durum frenlemesi

Acil bir durum anında sistem, operatör veya makinist tarafından acil durum frenlemesi yapılabilir. Aynı şekilde bu acil durum freni normal çalışmanın devam etmesine izin verecek şekilde sıfırlanması için özel kriterler işletme tarafından belirlenir.

3.4.1.11 Güzergâh (rota) anklâşmanı

ATP alt sistemi, tren çarpışmalarını ve raydan çıkmaları engellemek için konvansiyonel anklâşman uygulamalarında olduğu gibi güzergâh anklâşman işlevlerini sunacaktır.

CBTC sisteminin ayrı bir anlaşıman ile arayüzü

Yardımcı bir hat boyu sistemi veya ayrı bir anlaşıman kullanıldığında, CBTC sistemi anlaşıman için aşğıdaki gibi arayüzleri sağlar [8]:

- Yaklaşan bir CBTC treni için bir rotanın iptal edilmesi haricinde, zaman veya yaklaşım kitlemesi geçerli olabilir. Bu durumda tren girişı ile anlaşıman arasındaki mesafe, emniyetli frenleme mesafesinden büyükse veya anlaşıman sistemine girmeden önce tren durursa, rota daha fazla beklenmeden serbest bırakılmalıdır.
- Trafik kitlemesi geçersiz kılınabilir, böylece CBTC donanımlı trenler, aynı zamanda aynı hat üzerinde kendi hareket limitleri içinde zıt yönlerde hareket edebileceklerdir.
- Hat boyu sinyalleri ve yönleri, işletme tarafından belirtildiğı şekilde sağlanabilir.

CBTC tren konumu arızalarına cevap verilmesi

CBTC tren konumu belirleme fonksiyonunun başarısız olması durumunda, trenin sistem tarafından kilitlenen rotadan çıktığı kanıtlanana kadar rota anlaşımanı etkinliğini sürdürecektir[8].

CBTC tren yeri belirleme fonksiyonunun bir tren kitlemesinde bir ikincil sistem vasıtasıyla da tespit edilebildiğı bir kitlelenme durumunda, CBTC sistemi anlaşıman fonksiyonlarının geçersiz bırakılabilir. Rota ve diğer anlaşıman fonksiyonları, tren rotadan çıkasıya kadar trenin hareket yönündeki makasların hareket etmesini önleyecek şekilde yardımcı hat boyu sistemi tarafından korunur.

Makas gösterimi kaybına cevap verilmesi

Anlaşıman işlevi sırasında, rota kitlelendiğinde ve hareket izni verildiğinde, eğer makas işlevini yitirirse, rota anlaşımanı iptal olacaktır. Bu makas kaybı rotanın emniyetli fren mesafesi içerisinde ise, CBTC sistemi acil bir fren uygulaması başlatır[8].

Güzergâhlar

Sinyalizasyon sistemi altındaki tüm hareketler güzergâh koruması altındadır. İşletme güzergâhlar ile ilgili anlaşıman tablosu (rota tablosu) özel işletme koşullarını emniyeti etkisi olmadığı müddetçe belirleyebilir. Temel olarak tren güzergâh kurma işlevi şu emniyet gereklerini yerine getirecektir:

- Yaklaşım kilitleme.
- Güzergâh kilitleme.
- Makas kilitleme.
- Makas durum doğrulama.

Bu gereklilikler normal koşullarda, tekli arızalarda ve tüm istatistiksel olarak anlamlı arıza kombinasyonlarında sağlanabilir. Test ortamında doğrulanması gerekir [13].

Yaklaşım kilitleme

Tren anlaşılan giriş kesimine girmeden önce hat bölgelerinin ve makasların kilitlenmesidir. Bu hat bölgesi sadece ilgili trene ayrılmış olur.

Güzergâh kitleme

Tren yaklaşma kesimine girdikten sonra hat bölgelerinin kilitli kalmasıdır. Trenin gideceği yol boyunca bulunan makasların konumlandırılmasından kaynaklanan tren gecikmelerini en aza indirmek için, gelen bir tren tarafından kilitlenmesi ve tahsis edilmesi gerekmeden önce, makasları hareket ettiren ve konumlandıran bir güzergâh kilitleme işlevi kullanılmaktadır.

Makas kilitleme

Bir makasın etkin bölgesine giriş için "serbest" olan bir tren, belirlenen duruş noktası itibarıyla makasın etkin bölgesine yeterince yakın olan bir trendir.

Bazı şartlar sağlanmadıkça hiçbir tren, bir makasın etkin bölgesine giriş için serbest olmayacaktır:

- Başka bir trenin etkin bölge içinde olmadığı bilinmektedir.
- Makasa yaklaşım kilitlemesi uygulayan başka bir trenin olmadığı bilinmektedir.
- Makas durumunun tren ve onun seyahat yönü için emniyetli olduğu doğrulanmıştır.

Makas durum doğrulaması

Belirli bir trenin makasın etkin bölgesine girişi için makas durumunun emniyetli olup olmadığı, aşağıdakilerin tümü karşılanmadıkça doğrulanmayacaktır:

- Makasın doğru yönde (örneğin normal ya da ters) olduğu doğrulanmıştır.
- Makasın kilitli olduğu doğrulanmıştır.

- Makas hareket mekanizmasından gücün kesildiği doğrulanmıştır.
- Makas makinesi manivela işletme mekanizması hareketlendirilmemiştir.

Bir anlaşımandan geçiş için hareket onayı verildiğinde ve makas göstergelerinde arıza olduğu durumda, sistem anlaşıman bölgesi girişine verilmiş hizmet onayını geri çekmelidir.

3.4.1.12 Trafiğin ters yönde anlaşımanı

Trafiğin ters yönde anlaşımanı, terminal istasyonlarında tren yönünün tersine çevrilmesini desteklemek ve örneğin geri dönüş ve servis çalışma modlarını desteklemek için iki yönlü operasyon gerektiren CBTC sisteminde gerekli bir ATP fonksiyonudur.

Bir tren için hareket yetkisini, karşılıklı bir trafik yönünün kurulmuş olduğu bir hat bölümüne genişletmek mümkün değildir. Bir hat içindeki trafik yönünün tersine çevrilmesi aşağıdakiler olmadığı sürece mümkün değildir [8].

- Hattın o bölümündeki tüm trenler sıfır hızdadır ve gerçek trafik yönünde harekete karşı sınırlandırılmıştır.
- Hattın o bölümü dışındaki tüm trenler için hareket yetkileri o bölüme erişemez ve gerçek trafik yönünde o bölüme uzatılması sınırlandırılır.

3.4.1.13 Çalışma bölgesi koruma

CBTC sisteminde işletme isteğine bağlı bir ATP fonksiyonudur. Bir CBTC sistemi, hareket yetkilisine hizmet dışı (engellenmiş) hatlarda veya istenen konum dışında engellenen makaslar üzerinde çalışacak trenlere izin vermeyecek ve tanımlı çalışma bölgelerine yaklaşma sırasında hız sınırı uygulayacaktır. Bir CBTC sistemi, bir çalışma bölgesi üzerinden ATO işletme modunu engelleme yetenekleri de içerebilir.

3.4.1.14 Ray kırığı tespiti

CBTC sisteminde işletme isteğine bağlı bir ATP fonksiyonudur. CBTC sistemi, ray kırıklarının tespiti amacıyla yardımcı sisteme arayüz oluşturabilir. Bir CBTC sisteminin tespit edilen kusurlu bir raya yaklaşımı, işletme tarafından da belirlenebilir. İşletme kararına göre fonksiyon sinyal tedarikçisi tarafından değerlendirilir.

3.4.1.15 Hemzemin geçit uyarısı

CBTC sisteminde işletme isteğine bağlı bir ATP fonksiyonudur. CBTC bölgesi sınırları dahilinde hemzemin geçişleri mevcutsa ve işletme yetki verdiğinde hemzemin geçit sistemlerin kontrolünü mümkün kılmak ve koordinasyonunu sağlamak için geçiş uyarı sistemi ile bir arayüz oluşturabilir. Bunun için gereksinimler aşağıdaki gibidir;

- Tren hızından veya hızlanma/yavaşlamadan bağımsız olarak sabit (ve tutarlı) uyarı süreleri,
- Geişlerden önce duraklayan trenler için, tren hareketine kadar uyarı cihazlarının etkinleştirilmesi geciktirme,
- Bir tren geçişini tamamladıktan sonra peşinden ikinci bir tren geliyorrsa uyarı cihazlarının aktivasyonunun devamlılığı,
- Karayolu ve otoyollar için önceden hemzemin geçit uyarılarının bulunması.

3.4.1.16 Kısıtlı rota korumaları

CBTC sisteminde işletme isteğine bağlı bir ATP fonksiyonudur. CBTC sistemi, bir trenin veya hattın mekanik, sivil, elektriksel veya diğer önceden tanımlanmış geçici veya kalıcı koşullarıyla veya izinsiz giriş tespit cihazlarına, platform ayırıcı kapı sistemi kapılarını ve/veya hat bütünlüğünü etkileyebilecek tehlikeleri tespit edebilen diğer cihazlara arayüzler aracılığıyla, trenin hareketi için emniyetli olmayan bir rotaya girmesini nleme fonksiyonuna sahip olmalıdır.

3.4.2 ATO fonksiyonları

ATO sistemi, enerji sarfiyatını ATS sisteminin tarife gerekliliklerine göre en az seviyede tutma, belirlenmiş istasyon beklemeleri arasındaki en uygun seyahat süresini, en uygun hızlanma, boşta gitme (coasting) ve frenleme, istasyonda duruş ve istasyondan kalkış hareketleri gibi sürüş profillerini sağlar. ATO sistemi, tren hareketlerinin ATP alt sistemi tarafından izin verilen hız ve mesafe kısıtlamaları içinde kalmasını sağlayacaktır. ATO işlevleri, ATP'nin koruma sınırları dahilinde tüm tren hareket fonksiyonlarını yerine getirir.

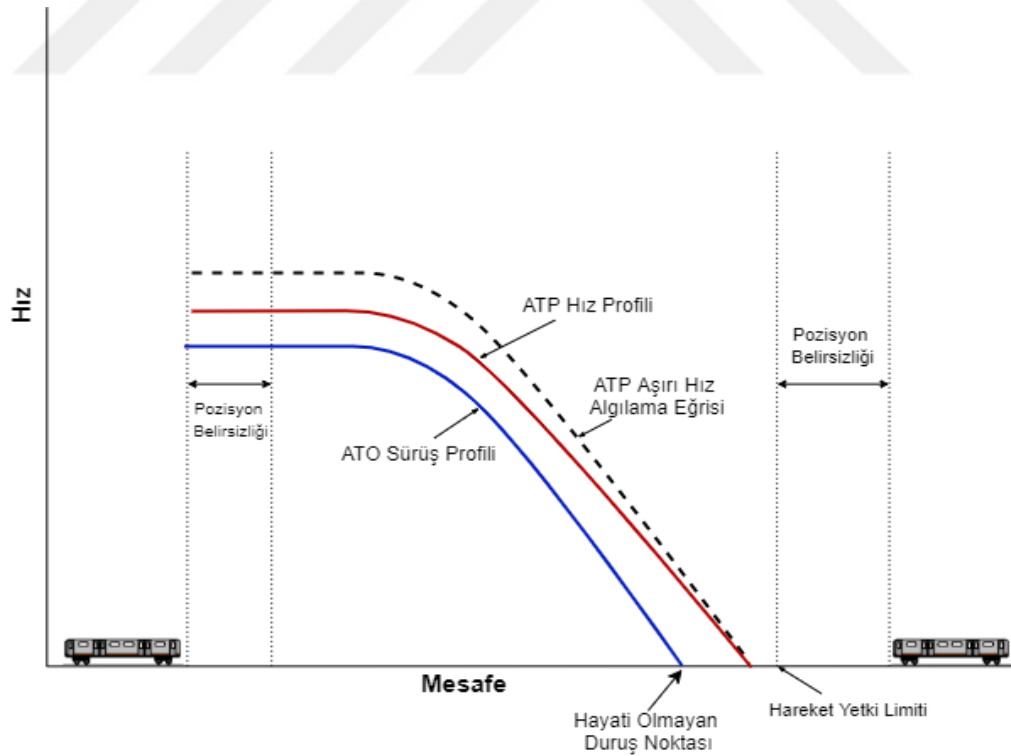
Sinyalizasyon sistemi tarafından gönderilecek komutlarla ATO sistemi, ideal trenlerin tolerans aralığı dahilinde istasyonlarda duruş yerlerinin doğruluğunun sağlanmasından ve hat topolojisi/hat profili ile bu sistem yazılımının birebir hatasız ve uyumlu olmasından sorumludur [14].

ATO aşağıdaki 3 fonksiyondan oluşmaktadır [8]:

- Otomatik hız dzenlemesi
- Platform yanaşma kontrolü
- Kapı kontrolü

3.4.2.1 Otomatik hız dzenlemesi

Trenin istasyonlar arası hattaki yolculuğu boyunca kalkış, duruş ve hız kuralları sistem tarafından kontrol edilecektir [15]. Böylece, seyir hızı, hızlanma, yavaşlama ve ivme değişimi yolcu konfor limitlerinin dāhilinde olacaktır ve hız ATP'nin belirlediği hız limitlerinin altında kalacaktır [16]. İstasyon durdurma doğruluğu, işletme tarafından belirtildiği şekilde olmaktadır. Bir CBTC sistemi, tren operatörü (varsa) veya ATS girişlerine göre birden fazla ATO, hızlanma ve servis freni hızını destekleyebilir. şekil 3.10'da gösterildiği gibi ATO sürüş profili hızı ATP hız limitlerinin altında bulunmalıdır. Birden fazla sürüş profili olabilir. Bu sürüş profilleri içerisinde enerji verimli sürüş son zamanlarda işletmeler tarafından tercih edilmektedir. Enerji verimli sürüş stratejileri yaklaşık %15 - %20 enerji tasarrufu getirmektedir [17].



şekil 3.10 : ATO sürüş profili.

3.4.2.2 Platform yanaşma kontrolü

CBTC sistemi aşağıdaki platform yanaşma kontrol modlarından herhangi birini uygulayacaktır [8]:

- Platform uzunluğunun tren uzunluğuna yaklaşık olarak eşit olması durumunda, sadece trene yetecek kadar bir alan varsa, ya da önce ki trenin platform alanını tamamen terk etmesine ve istasyondan çıkmasına bağlı bir hareket yetkisi varsa CBTC sistemi trenin istasyon platformuna girmesine izin verecektir. (Yani, ATP kısıtlamaları dahilinde, tren hareketinin, kısmen istasyon platformu sınırları dahilindeyken durma olasılığını en aza indirmek için kontrol edilecektir.)
- Platform uzunluğunun tren uzunluğundan daha uzun olduğu durumlarda, bir CBTC sistemi, işletme tarafından tanımlandığı şekilde, platform alanı içindeki çoklu durma pozisyonlarını destekleyebilir.
- Platform uzunluğunun birden fazla treni desteklemesi durumunda, bir CBTC sistemi bir trenin bir platforma girmesine izin verirken başka bir tren zaten alternatif bir alanı işgal edebilir.
- Platform uzunluğunun tren uzunluğundan daha kısa olduğu durumlarda, bir CBTC sistemi kapı açma kontrolü koruma kilitleri ile tutarlı platforma yanaşmayı destekleyebilir.

3.4.2.3 Kapı kontrolü

CBTC sistemi, yolcu biniş ve tahliyesi sırasında tren kapılarını (ve varsa platform kapılarını) otomatik olarak kontrol edebilir.

Otomatik kapı kontrolü aşağıdakilerle sınırlı olabilir:

- Sadece otomatik kapı açılması (yolcu kapısı açık talepleri olsun veya olmasın)
- Sadece otomatik kapı kapatma
- Otomatik kapı açma veya kapanma

Otomatik kapı açma veya kapatma varsa tren ve eşleşen platform ayırıcı kapı sistemi ile birlikte açılıp kapanacak şekilde bir set olarak kontrol edilir. Diğer kapı setlerinin otomatik çalışmasını etkilemeden herhangi bir kapı setinin (hem tren hem de uygun platform kapısını) çalışmasını manuel olarak devre dışı bırakmak mümkündür.

Kapıları açıkken trenin istasyonda kalma süresi ATS tarafından belirlenebilir ve otomatik olarak ATO tarafından kontrol edilebilir.

3.4.3 ATS fonksiyonları

Trenlerin takibi, zaman çizelgelerine uygunluk için tren performanslarının ayarlanması ve düzensizlik nedeniyle oluşabilecek sıkıntıları asgariye indirmek için hizmet düzenlemesi için veri sağlama gibi fonksiyonları gerçekleştiren sistemdir. Tren operasyonunun izlenmesini ve ayrıca istasyonun uzaktan kontrolünü kolaylaştırmak için bir tren gözetim sistemidir. ATS, her tren hareketini kaydeder ve kumanda merkezindeki ekranlarda verileri gösterir.

ATS aşağıdaki 8 fonksiyondan oluşmaktadır[8]:

- ATS kullanıcı arayüzü
- CBTC tren tanımlaması ve tren takibi
- Trene güzergâh oluşturma
- Otomatik tren düzenleme
 - Sefer/tarife yönetimi
 - Tren buluşma yönetimi
 - Enerji optimizasyonu
- İstasyon durdurma fonksiyonları
 - Bir sonraki istasyonda trenin durdurulması
 - Trenin istasyonunda tutulması
 - İstasyon atlama
 - Kapı kontrolü engelleme
- Tren operasyonlarının kısıtlanması
 - Yolda bir treni durdurma
 - Geçici hız kısıtlamaları
 - Makas/hat engelleme
 - Çalışma alanları
- Yolcu bilgi sistemi arayüzleri
- Arıza raporlama
 - CBTC arıza raporlaması bildirimi
 - Tren arızası raporlaması

3.4.3.1 ATS kullanıcı arayüzü

ATS kullanıcı arayüzü, tüm bilgileri göstermeli ve tanımlanan tüm kontrol eylemlerini, işletme tarafından belirlenen kabul edilebilir gecikmeler dahilinde uygulamalıdır. ATS kullanıcısı dikkatini gerektiren her durum otomatik olarak ATS kullanıcı arayüz ekranında gösterilmelidir. Zorunlu ekran verileri ve kullanıcı bilgileri girişleri, IEEE 1474.2 standardına uygun olmalıdır. ATS kullanıcısı, tanımlanan CBTC ile ilgili bazı ATS fonksiyonlarını devre dışı bırakabilir. Bazı ATS fonksiyonları (örneğin, bir treni durdurma ve geçici hız kısıtlamalarının uygulanması ve kaldırılması, makas/hat engelleme veya çalışma bölgelerinin kaldırılması gibi) sistem tehlikelerine neden olabilir ve bu fonksiyonların özel olarak uygulanması, gerekli tehlike analizlerinde dikkate alınmalıdır. ATS fonksiyonlarının hatasız bir şekilde uygulanması gerekli değildir; ancak tehlike analizi asgari olarak aşağıdakileri göz önünde bulundurmalıdır:

- ATS kullanıcısı tarafından emniyetle ilgili komutların yerine getirilmemesi,
- CBTC sistemi, ATS kullanıcısı tarafından başlatılan emniyetle ilgili komutları vaktinden önce kaldırması,
- Bir ATS kullanıcısı tarafından başlatılmayan emniyetle ilgili komutları yürüten CBTC sistemini,
- CBTC sistemi tarafından ATS kullanıcısına yanlış bilgi gösterilmesini.

Yanlışlıkla uygulaması olumsuz bir işletmesel etkiye sahip olabilecek emniyetle ilgili kullanıcı arayüzleri/girişleri ve fonksiyonları için eylem onayı kontrollü olarak sağlanır.

3.4.3.2 CBTC tren tanımlaması ve tren takibi

ATS sistemi, CBTC bölgesinde faaliyet gösteren tüm CBTC donanımlı trenlerin konumlarını, kimliklerini, tren tarifesi ve diğer ilgili verileri ATS kullanıcı arayüzünde otomatik olarak takip etme, kayıt tutma ve görüntüleme yeteneğine sahiptir. Trenlerin ön ve arka konumları CBTC tren konum raporlarına göre izlenecek ve tren yeri ATS kullanıcı arayüzünde gösterilir.

3.4.3.3 Trene güzergâh oluşturma

ATS sistemi, CBTC bölgesi içerisinde çalışan ATC altındaki trenleri, ATC tren konum raporları ve tren hareket veri bilgileri, önceden belirlenmiş güzergâh kuralları ve diğer ATS kullanıcılarının yönlendirdiği servis stratejilerine göre, manuel ya da otomatik

olarak güzergâh oluşturacak kabiliyette olmalıdır. Otomatik güzergâh oluşturma, trenin işletmeye dahil olup/çıkması, geri dönüş, trenlerin depo alanına girmesi, parklanması işlemlerini yönetmelidir. Ayrıca uygun yerlerde servis aksaklıkları ve/veya planlanmış devre dışı kalma durumlarında yeniden güzergâh oluşturabilmelidir. ATS sistemi ayrıca CBTC bölgesinde faaliyet gösteren CBTC donanımlı trenlerin hareket yetkilerini kontrol etmek ve sınırlamak için bir sistem içerebilir. CBTC hareket yetkisi sınırları ATS kullanıcı arayüzünde gösterebilir ve yetki sınırları ile alakalı durumlarda alarm verilir.

3.4.3.4 Otomatik tren düzenleme

Sefer/tarife yönetimi

ATS sistemi daha iyi bir tarife ve enerji tasarrufu için hareket planları ve/veya gerçek zamanlı hız profili ayarlanmış seferlere göre, CBTC bölgesindeki trenin işletmesini otomatik olarak izleyebilecek ve yönetebilecek yetenekte olmalıdır. ATS sistemi otomatik tren sevkini de içermelidir (tren kimlikleri, tren konum raporları, planlı ve gerçek sefer aralıkları ve ATS kullanıcıları tarafından hazırlanan servis stratejilerine göre). ATC ile donatılmış trenlerin plan ve sefer aralığı düzenlemeleri, bekleme süresi değişiklikleri ve (örneğin) tren hızlanma, servis fren oranları ve seyir hızlarının ayarlarının yapılarak istasyonlar arasındaki hareket sürelerinin kontrol edilmesiyle yapılmalıdır. İstenilen istasyon kalkış zamanı ve istasyonlar arası istenilen hız profili gerçek zamanlı olarak araçüstü ATO'ya iletilmelidir.

ATS sistemi, CBTC donanımlı trenlerin farklı koşullara göre (örneğin ıslak ray) tren servis freni profillerini ayarlama kabiliyeti sağlayabilir. 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 dayalı otomatik tren düzenleme fonksiyonlarını içerebilir.

Tren buluşma (kavşak) yönetimi

Bir ATS sistemi, genel sistem gecikmelerini en aza indirmek için uygun tren buluşmalarını (yerel ve ekspres yollar arasındaki aktarımlar ve farklı hatlar arasındaki birleşme noktasında) kolaylaştırmak için CBTC tren konumu raporlarına dayanan otomatik tren düzenleme fonksiyonları içerebilir [8].

Enerji optimizasyonu

ATS sistemi, CBTC donanımlı trenler için tren hızlandırma, tren yavaşlatma ve tren frenlemesinin gerçek zamanlı kontrolü ve koordinasyonu yoluyla enerji optimizasyon algoritmalarını uygulama yeteneğine sahip olabilir. Enerji optimizasyonuna karşı sefer düzenlemesine verilen öncelik, işletme tarafından belirtildiği şekilde olacaktır. Sürüş profillerine boşta gitme noktaları eklenilerek belirli bölgelerde trenlerin tahrik gücünü keserek süzölmelerine ve böylelikle enerji tasarrufu yapmalarına imkân verilebilir.

3.4.3.5 İstasyon durdurma fonksiyonları

Bir sonraki istasyonda trenin durdurulması

Trenlere verilen rota bilgilerine göre trenler istasyonda belirlenen yerlerde duracaktır. ATS sistemi, tek bir CBTC donanımlı bir tren veya bir CBTC donanımlı bir tren grubunu, bir sonraki istasyonda istasyonu atlamasını planlanmış olsa bile, bu atlamayı iptal etmek için araçlar içerebilir. Sürücü ile işletilen trenler için, CBTC sistemi ATS treni durdurma bilgilerini tren operatörüne gösterebilir.

Trenin istasyonunda tutulması

Sürücüsüz çalışan trenler için, bir ATS sistemi CBTC donanımlı bir treni, istasyonunda tutabilecek (ve sonra serbest bırakacak) özellikler içerir.

Sürücü ile işletilen trenler için bu fonksiyon isteğe bağlıdır. Bu fonksiyon sağlanmışsa, bir CBTC sistemi, trenin tutma bilgilerini tren operatörüne göstergelerinde gösterebilir ve/veya CBTC donanımlı bir trenin ATO modunda istasyondan ayrılmasını önleyebilir.

İstasyon atlama

ATS sistemi, bir istasyondan veya bir istasyon grubundan trenlerin durmadan geçmesini sağlamak için özellikler içerebilir.

Sürücü ile işletilen trenler için, bir CBTC sistemi istasyon atlama bilgisini tren operatörüne ekranlarda gösterebilir. ATO modunda, tren belirlenen istasyonları otomatik olarak atlar. Bir ATS sistemi ATC ile donatılmış trenin bir veya bir grup istasyonu atlayabilmesini (durmamasını) yönlendirecek işlevlere sahip olmalıdır. CBTC istemi istasyon atlama bilgini sürücünün ve operatörün ekranında gösterir. Otomatik sürüş modundayken tren önceden belirlenen istasyonları otomatik olarak atlayabilmelidir.

Kapı kontrolü engelleme

Bir ATS sistemi, tren kapılarının CBTC kontrolünü önleyen (ve sonra izin veren) özellikler içerebilir.

Sistem istasyonda bekleme süresi boyunca kapıları otomatik olarak kontrol edecektir. Otomatik kapı kontrolü, tren kapılarının otomatik açılıp kapanması veya otomatik kapı açılması ve manuel kapı kapatılması veya tamamen manuel kapı kontrolü şeklinde olabilir. Trenin istasyonda kapıları açık şekilde bekleme süresi genellikle ATS tarafından belirlenecek ve ATO tarafından otomatik olarak kontrol edilir.

3.4.3.6 Tren operasyonlarının kısıtlanması

Tren operasyon fonksiyonlarının uygulanması ve kaldırılması, potansiyel olarak sistem tehlikelerine neden olabilir ve bu fonksiyonların özel uygulaması, tehlike analizlerinde dikkate alınmalıdır.

Yolda bir treni durdurma

ATS sistemi, CBTC donanımlı tek bir treni veya CBTC donanımlı tren grubunu derhal durdurmak için özellik içerir. Bu genelde acil durumlarda trenleri durdurma fonksiyonu ile yapılır. CBTC sistemi, belirtilen trenlerde acil bir fren uygulaması başlatır ve varsa, tren operatörünü ekranlar aracılığıyla bilgilendirir.

Geçici hız kısıtlamaları

ATS alt sistemi, hat boyunca bakım faaliyetlerini koruma amacıyla CBTC bölgesinin herhangi bir kesiminde geçici hız kısıtlaması uygulayabilir.

Makas/hat engelleme

ATS sistemi, makası, çıkış sinyalinin, rota giriş noktasını veya CBTC bölgesi içindeki bir hat bölümünü bloke etme (ve daha sonra engellemeyi kaldırma) özelliklerine sahiptir. CBTC sistemi, CBTC donanımlı trenlerin, gerekli pozisyona getirilmemiş bloke edilmiş makaslar üzerinden veya engellenmiş hat bölümlerine ve/veya hat parçası bölümlerine hareket yetkisi almasını engelleyecektir.

Çalışma alanları

ATS sistemi, çalışma ekiplerinin ve çalışma trenlerinin korunması için geçici çalışma bölgeleri kurma (ve sonra kaldırma) özellikleri içerir.

CBTC sistemi, tanımlanmış çalışma bölgelerine yaklaşırken hız sınırı uygular. Sürücü ile işletilen trenler için, kısıtlamanın bir çalışma alanına bağlı olduğunu gösteren bilgiler, tren operatörüne ve kondüktöre ekranlarla gösterilecektir. CBTC sistemi, ATO'nun bir çalışma bölgesi üzerinden çalışma modunu önleyebilir. ATS sistemi ayrıca, görülebilirliği kısıtlı alanlarda hatlarda çalışanları uyarmak için yol boyunca trenlerin yaklaşımını ve yönünü gösteren görsel ve işitsel yöntemler sağlayabilir.

3.4.3.7 Yolcu bilgilendirme sistemi arayüzleri

Bir ATS sistemi, CBTC tren hat raporlarına dayanarak, gelen trenin geliş zamanı ve gideceği son istasyon, istasyonda durmayacak ya da yolcu almayacak olan trenler, depoya giden trenler, tren tipi ve trendeki vagon sayısı, seferi etkileyen arıza bilgisi, trenlerin terminal istasyonlarda hangi perondan hareket edeceği bilgisi vb. bilgileri otomatik yolcu bilgi mesajlarını yayımlamak için hat boyu ve/veya tren kaynaklı yolcu bilgilendirme sistemleri ile arayüzü olabilir. Tren üstü yolcu bilgilendirme sistemi arayüzleri tanımlanmıştır [18].

3.4.3.8 Arıza raporlama

İşletmenin performansını etkileyebilecek veya belirli bir CBTC fonksiyonelliğinin başka bir şekilde kaybedilmesine neden olabilecek bir CBTC sistemi tarafından tespit edilen veya bunlara giriş yapan arızalar ve tolerans dışı koşullar otomatik olarak ATS kullanıcı arayüzü ekranında gösterilebilir. Herhangi bir alarm kritik ve kritik olmayan alarmlar olarak kategorize edilmeli, önceliklendirilmeli ve kaydedilmelidir. Tüm kritik alarmlar onay gerektirecektir [8].

CBTC arıza raporlaması

Sistem tarafından tespit edilmiş veya sisteme girilmiş arızalar, tolerans payı dışında kalan durumlar ve ATS kullanıcısı dikkati gerektiren her durum otomatik olarak ATS kullanıcı arayüz ekranında gösterilmelidir. Alarmlar kritik ve kritik olmayan diye ayrılmalı ve kayıt altında tutulmalıdır.

Tren arızası raporlaması

Tren durum verilerinin ATS kullanıcı arayüzü ekranlarıyla paylaşımı amacıyla araçüstü alt sistemlerle arayüz içermelidir.

Çizelge 3.2 : Tipik CBTC parametreleri.

Parametre	Tipik Aralığı
Tek hatboyu işlemcisi ile işletilebilen maksimum tren sayısı	10 - 40 Tren
Ölçülen tren konumunun kararlılığı (Araç üstü ATP tarafından ölçülen tren konumunun aralık değerleri)	$\pm 0,25 - 6,25$ m
Normal işletme sırasında ölçülen tren konumunun doğruluğu (Araç üstü ATP'nin ölçme işlemini yaptığı tren konumundaki maksimum hata seviyesidir.)	$\pm 5 - 10$ m
ATO programlanmış istasyon durdurma amaçları için ölçülen tren konumunun doğruluğu	± 0.25 m
ATO Programlanmış istasyon durdurma amaçları için ölçülen tren konumunun doğruluğu (platform ayırıcı kapı sistemleri ile)	± 0.05 m
Tren hareket yetki sınırlarının belirlenmesi	$\pm 0.25 - 6.25$ m
Araç üstü ATP tren hız ölçümünün kararlılığı	$\pm 0.5 - 2$ km/sa
Araç üstü ATP tren hızı ölçümünün doğruluğu	± 3 km/sa
Tren hızı komutlarının kararlılığı (örneğin, sivil hız sınırları)	$\pm 0.5 - 5$ km/sa
Tren - hat boyu mesaj iletişimi gecikmeleri	0.5 - 2 s
Hat boyu - tren mesaj iletişimi gecikmeleri	0.5 - 2 s
Hat boyu CBTC ekipmanları reaksiyon zamanları	0.07 - 1 s
Araç üstü CBTC ekipmanları reaksiyon zamanları	0.07 - 0.75 s
Geri kayma algılama kriteri	0.5 - 2 m

3.5 CBTC Sistem Konfigürasyonları

ATC sistemi ATP, ATO ve ATS sistemlerinin bileşiminden oluşan ve dünyada otomatik olarak işletilen raylı sistemler mimarisini tanımlamak için kullanılan bir kontrol sistemidir[8].

Dünyada birçok çeşit ATC sistemi vardır. Fakat hepsinde de temel olarak ATP emniyeti sağlar, ATO istasyonlardaki duruş komutlarını sağlar ve ATS ise hareket zamanlarını kontrol eder, düzenli bir seyir için ayarlama yapar.

ATC sistemi, trendeki üç alt sistemin birleşiminden oluşmuştur:

- Otomatik Tren Koruma (ATP) alt sistemi emniyetli tren hareketlerini yürütecektir.
- Otomatik Tren İşletimi (ATO) alt sistemi tren hızını ve istasyon duruşlarını kumanda edecek ve düzenleyecektir.

- Otomatik Tren Denetimi (ATS) alt sistemi trenden hat boyuna bir iletişim bağlantısı sağlayacaktır.

Tren hareketini otomatik olarak kontrol etmek, trenin emniyetli olarak işletilmesini sağlamak ve tren operasyonlarını yönlendirmek için CBTC sistemi; ATP içermelidir, ATO ve/veya ATS içerebilir [8].

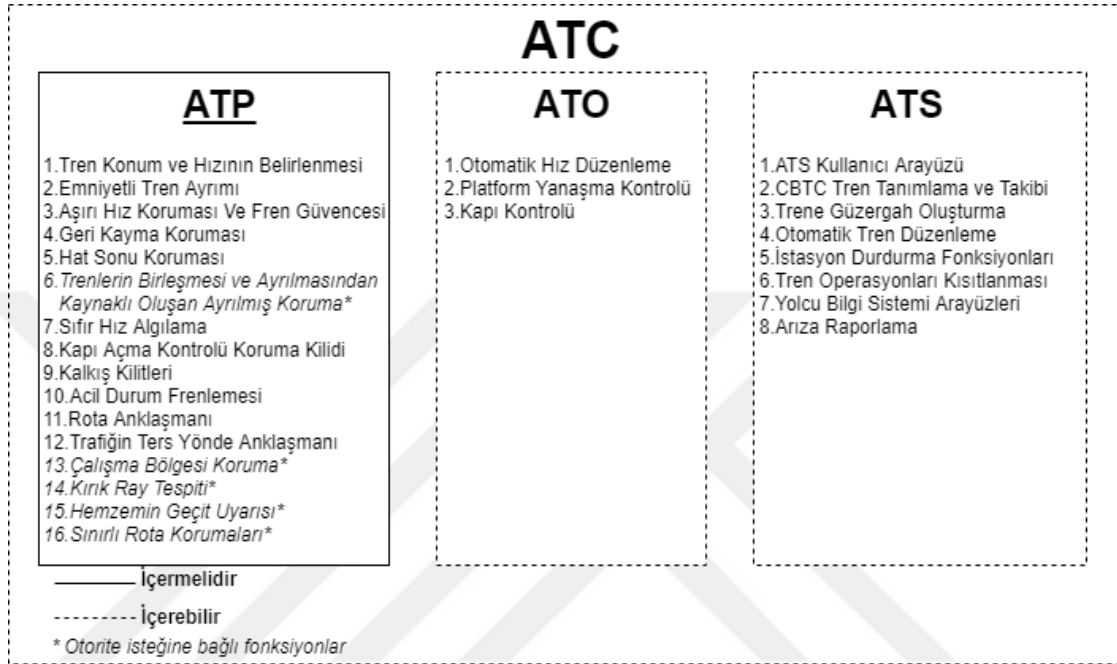
IEEE 1474 temel CBTC karakteristiklerinde, bir CBTC sisteminin nasıl olduğunu açıklamaktadır. Şekil 3.11’de ATC alt sistemleri gösterilmiştir. CBTC terimi kullanıldığında, genellikle otomatik bir sürücüsüz sistem olarak tanımlanır, ancak standartta hiçbir yerde “sürücüsüz” veya “otomasyon” için bir referans yoktur. Bu standart, özel uygulamaya bağlı olarak farklı CBTC konfigürasyonlarının mümkün olduğunu kabul eder. Bir başka ifade ile bir sisteme CBTC etiketini koyabilmek için bu konfigürasyonlardan birini sağlamamız gerekmektedir;

- Bir sisteme CBTC sistem etiketini koyabilmemiz için şekil üzerinde kesiksiz düz çizgi ile belirtilen ATP fonksiyonlarını içermelidir. (Şekil 3.11 yalnızca ATP fonksiyonu (ATO ve ATS mevcut değil) sağlayan konfigürasyon)
- Belirli bir uygulamanın özel gereksinimlerini karşılamak için gereken ATP işlevlerinin yanı sıra belirli ATO ve/veya ATS işlevlerini sağlayan konfigürasyon,
- Tüm ATP, ATO ve ATS fonksiyonlarını içeren konfigürasyon, otomatik sürücüsüz tren sistemlerinde kullanılan tüm fonksiyonları içeren konfigürasyondur. Yeni inşa edilen raylı sistemler için geliştirilen CBTC sistemlerinde tercih edilen konfigürasyondur.

Bir özelliğin ihtiyaç duyduğu konfigürasyon türü, çözüm bulmaya çalıştığı soruna bağlıdır. Eğer verim artırılmak isteniyorsa, tamamen otomatik bir sisteme ihtiyaç duyulabilir. Eğer başka bir emniyet koruma fonksiyonu eklemek isteniyorsa, yalnızca ATP çözümü yeterli olabilir. Buradaki temel nokta bir CBTC'nin “sürücüsüz” olduğu anlamına gelmemesidir. En temel şekliyle, bir CBTC sistemi yalnızca otomatik koruma (ATP) sağlar. Daha ayrıntılı sistemler ATO ve ATS fonksiyonelliğini sağlayabilir ancak “CBTC” etiketini uygulamak için bir gereklilik değildir.

3.6 Otomasyon Seviyeleri (GoA)

IEC 62290 standardı raylı sistem otomasyon seviyelerini tanımlamıştır. Otomasyon seviyesi (GoA) olarak kısaltılan bu tabir 4 seviyede ölçülmektedir. GoA1, GoA2, GoA3 ve GoA4 işletim seviyeleri insan faktörünün tren kontrolüne etkisini yansıtmaktadır [19].



Şekil 3.11 : ATC alt sistemleri.

Bu fonksiyonel sınıflandırmada yer alamayan sistemler ise genel anlamda GoA0 olarak tanımlanır [20]. Bu seviyede herhangi bir otomasyon görülmez. Tramvay sistemleri bu seviyeye örnek verilebilir.

- GoA 0: Otomatik tren koruması olmadan manuel tren işletimi
- GoA 1: Otomatik tren korumalı manuel tren işletimi
- GoA 2: Yarı otomatik tren işletimi (STO)
- GoA 3: Sürücüsüz tren işletimi (DTO)
- GoA 4: Gözetimsiz tren işletimi (UTO)

3.6.1 Otomasyon seviyesi 0 (GoA 0)

Tren korumasız manuel işletmedir. Tren hareketlerinin emniyeti ve verimliliği tamamen tren işletmecisinin kontrolü altındadır [21]. Rota kilitleme ve maksimum hızlar dahil olmak üzere hareket yetkisi, aşağıdakileri içeren çeşitli yollarla verilebilir:

- Hat boyu sinyalleri, işletim kuralları ve görüş hattı koşulları,
- Telsiz iletişimi yoluyla sözlü talimatlar.

3.6.2 Otomasyon seviyesi 1 (GoA 1)

ATP, herhangi bir kombinasyonu (emniyetli tren ayrımı ve güzergâh oluşturma) ile ilişkili korumalar sağlayabilir. Aracın hız kazanması, seyir hızı, yavaşlama ve durma fonksiyonları istasyonlarda kapıların açılması ve kapanması araç sürücüsü tarafından buton yardımı ile yapılır. Makinist treni ATP sistem araç konsolundaki hedef hız işaretini dikkate alarak sürer.

3.6.3 Otomasyon seviyesi 2 (GoA 2)

Araçta ATP sinyal koruması ve ATO işletmesi vardır. İstasyonlarda kapı kapama araç sürücüsü tarafından manuel yapılır. Aracın harekete geçirilmesi için ATO başlatma butonuna basılır. Olumsuz durumda işletme ve tren arızalarına müdahale sürücü tarafından yapılır.

3.6.4 Otomasyon seviyesi 3 (GoA 3)

Sistemde tüm ATO ve ATP fonksiyonları mevcuttur. Bu sistemde araçlarda veya peronlarda tren görevlisi bulunur. Olumsuz durumda işletme ve tren arızalarına müdahale trafik operatörü tarafından kontrol merkezinden yapılır. Kontrol merkezinden müdahale edilemeyen arızalara tren görevlisi tarafından müdahale edilir.

3.6.5 Otomasyon seviyesi 4 (GoA 4)

Trenlerde hiçbir personelin bulunmadığı insansız tren işletimi vardır. Makinist kontrol kabini yoktur. Sistem güvenilirliği, son derece düşük olasılık arızaları dışında, tren operatörü müdahalesine duyulan ihtiyacı engellemek için yeterince yüksek olmalıdır.

ATC sinyalizasyon sistemine sahip bir sistemde trenler GoA2 otomasyon seviyesinde sürücülü olarak çalıştırılabilir. Yine yapılacak güncelleme işlemleriyle ATC sinyalizasyon sistemine sahip bir sistemde trenler, GoA4 otomasyon seviyesinde sürücüsüz çalıştırılabilir. Burada anlam karmaşası olmaması açısından sinyal sistemi tanımlamaları trenlerin sürüş otomasyon seviyeleriyle (GoA) birlikte değerlendirilmelidir. Sürücüsüz modu, CBTC ATC sistemi fonksiyonlarının tamamını içeren ancak sürüş otomasyonunda makiniste ihtiyaç duymayan sistem olarak algılanmalıdır.

Çizelge 3.3 : Otomasyon seviyeleri.

		Manuel	Otomatik Olmayan Tren İşletimi	Yarı Otomatik Tren İşletimi	Sürücüsüz	Gözetimsiz
Tren İşletimi için Temel Fonksiyonlar		GoA 0	GoA 1	GoA 2	GoA 3	GoA 4
Trenin emniyetli hareketini sağlama	Emniyetli güzergâh sağlama	Personel	Sistem	Sistem	Sistem	Sistem
	Emniyetli tren ayrımı	Personel	Sistem	Sistem	Sistem	Sistem
	Emniyetli Hızı Sağlama	Personel	Personel	Sistem	Sistem	Sistem
Treni sürme	İvmelenme ve frenleme kontrolü	Personel	Personel	Sistem	Sistem	Sistem
Ray hattı denetimi	Nesne ile çarpışmayı önlemek	Personel	Personel	Personel	Sistem	Sistem
	Ray hattında insana çarpmayı önlemek	Personel	Personel	Personel	Sistem	Sistem
	Yolcu kapıları denetimi	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem
Yolcu transfer denetimi	Trenler arası insan veya platform ile tren arası insan yaralanmasını önlemek	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem
	Emniyetli çalıştırma koşullarının sağlanması	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem
	Operasyona başlatma veya çıkarma	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem
Tren işletimi	Tren durumunun denetimi	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem
Acil durumun tespitini, yönetimini sağlamak	Raydan çıkmayı ve tren bütünlük kaybını tespit etmek	Personel	Personel	Personel	Personel	Sistem

3.6.6 Otomasyon seviyesini artırmanın fayda ve zorlukları

- Emniyet açısından faydaları;
 - Sürücü dikkat dağınıklığı etkilerinin otomasyon seviyesi yükseldikçe ortadan kalkması,
 - Yolcuları ve hat boyu bakım elemanlarını bakım sırasında korumak için yükselen sistem özellikleri,
- Yolcu açısından faydaları;
 - Sarsıntı ve ivmelenme limitleri ile ideal hız profiline yakın yumuşak sürüş sağlanması,
 - Yolcu transferlerinin verimliliğini artırmak için farklı operasyonel güzergâhlarda ortak bir tren istasyonuna koordineli varışlar sağlanması,
 - Trenlerin gecikme olmadan zamanında istasyonlarda bulunması,
- İşletme açısından faydaları;
 - Sistem reaksiyon süresi insan reaksiyon sürelerinden genellikle azdır bu nedenle reaksiyon süre gecikmelerinde azalma,
 - Değiştirilebilir istasyon bekleme süreleri ile tren servis sıklıkları artırılması,
 - Mevcut altyapı kullanımını en üst düzeye çıkarılması,
 - Araçların insansız olarak depo alanlarına parklanması,
 - Rejeneratif frenlemenin faydalarını en üst düzeye çıkarılması; aynı trafo bölgesinde bulunan ve aynı anda ivmelenen ve yavaşlayan trenlerin enerjilerini optimize ederek enerji tasarrufu sağlanması,
 - Gelişmiş arıza raporlama özellikleri sayesinde olaylara, tıkanıklıklara anında ve otomatik yanıtlar verilmesi,
- Maliyet açısından faydaları;
 - Otomasyon seviyesi artması nedeniyle trenlere personeller gönderilebilir. Bu duruma benzer olarak güvenlik personeli sayısı artacaktır. Buna rağmen genel olarak önemli bir toplam maliyet azalması gerçekleşecektir.

Daha yüksek otomasyon seviyelerini desteklemek için sinyal sistemlerinin genişletilmesi gerekir. Bu genişleme kapsamı ek maliyetlere sebep olacaktır.

Raylı sistem otoritesi otomasyon seviyesi yüksek bir işletme istiyorsa;

- Trenlerin ön ve arka uç kısımlarına engel algılama mekanizması takılması,

- Trenlerde yolcular ve merkezi kontrol personeli arasındaki diyalogu desteklemek için radyo imkanlarının artırılması,
- Araçlarda otomatik sürüş kontrolleri için izin verilmesi,
- Araçlarda sürücü girişleri ile ilgili kısıtlamaların kaldırılması,
- Ray hattına izinsiz girişlerin engellenmesi amacıyla otomasyon seviyesi 4'de zorunlu olan platform ayırıcı kapı sistemleri kullanılması, (Bu aynı zamanda iklimlendirme açısından oldukça faydalıdır.)
- Sistemlerin otomasyon seviyeleri artmasıyla siber tehditler artacaktır buna karşı alınacak önlemlerde maliyet artışına sebebiyet verecektir.

Maliyet/fayda değerlendirmesi yapıldığında, bazı durumlarda (ucuz iş gücü olan yerlerde, yolcu sayılarının düşük olduğu yerlerde vb.) otomasyon seviyesini artırmanın maliyeti faydalarından daha ağır olabilir [33]. Ancak metrolarda sürücüsüz sistemlere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Uluslararası Toplu Taşıma Birliği (UITP) tarafından yürütülen tam otomatik sürücüsüz metropoller üzerinde yapılan bir araştırma, otomasyon seviyesi 4 olan hatların uzunluğunun Kasım 2019'da 1146 km iken 2025 yılına kadar 2200 km'ye çıkmasının beklendiğini bildirmiştir [41].

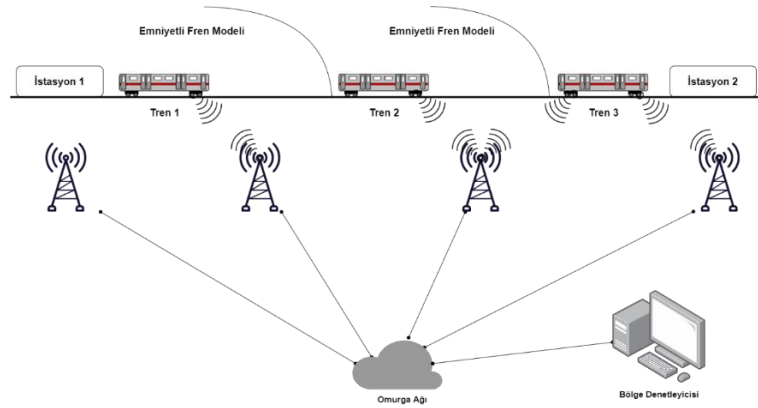


4 ATP EMNİYETLİ FREN MODELİ

Emniyetli Tren Ayrımı işlevi, araç üstü ATP sisteminin en önemli fonksiyonlarından bir tanesidir ve trenlerin hareketli blok prensibi ile çalışmasını sağlamaktadır. Emniyetli Tren Ayrımı işlevi,

- Emniyetli Fren Modelince belirlenen hızın (örneğin her bir anda güvenli tren hız profilinin tren konumuna bağlı olarak hesaplanması) sabit ATP verisinden (örneğin, sabit hat hız limitleri) ve değişken ATP verisinden (örneğin geçici hız limitleri ve hareket yetkisi limitleri) alınan değerler ile birlikte hesaplanması,
- Oluşturulan model profilinin sürekli denetlenmesi ve uygulanması adımlarından oluşmaktadır.

Emniyetli Fren Modeli en kötü durum ve arıza senaryolarının bir kombinasyonunu sağlayarak hareket yetkisi tarafından garanti edilen mesafeye eşit veya daha az bir mesafede treni durduracak şekilde tasarlanmaktadır. En kötü durum, tüm tren kontrol sistemlerinin tasarımı ve kapasitesinin temeli olan tren durma mesafesinin belirlenmesinde en emniyetli yaklaşımlardan biridir. Fren modeli trenin anlık hızına göre en az her bir çevrim süresinde en kötü koşulları dikkate alarak frenleme eğri profilleri üreterek trenin izin verilen hareket yetkisi dışına çıkmamasını kontrol eder ve hattın her bir bölümünde izin verilen hız kısıtlamaları içerisinde kalmasını sağlar.



Şekil 4.1 : Örnek emniyetli fren model işleyişi.

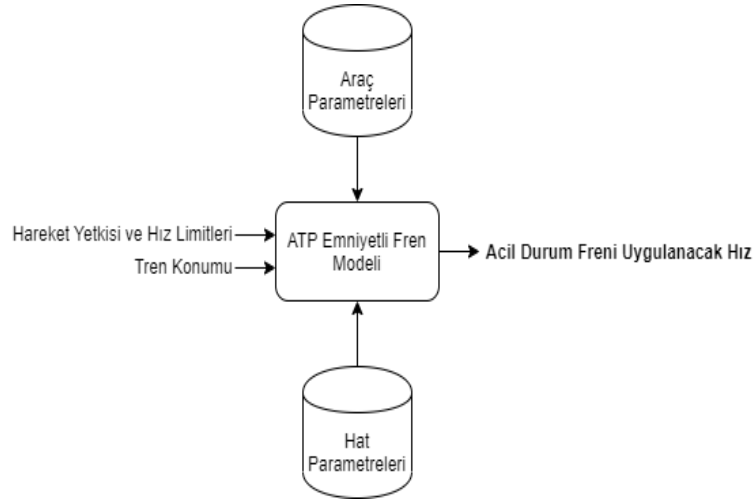
Şekil 4.1’de örnek olarak emniyetli fren modelinin işleyişi görülmektedir. Normal koşullar altında tren hareket yetkisi limitini aşmadan operasyona devam eder ancak daha önceden verilen hareket yetkisi acil durumlarda (beklenmedik meşguliyet, makas konum kaybı vb.) hareket yetkisi geriye çekilebilir. Bu durumda yeni hareket yetkisi ATP profilini ihlal ediyor olabilir. Bu koşullar altında, sistem derhal bir acil durum freni uygulaması başlatacaktır.

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere emniyetli frenleme modeli hat parametrelerine, araç parametrelerine, hareket yetki limitlerine ve performans gereksinimlerine göre hesaplanmaktadır. Emniyetli fren modelince genel olarak güvenli hız değeri aşağıdakilerden en kısıtlayıcı olanına göre belirlenir ve bu hız değerinin üzerine çıkılması durumunda acil durum freni tetiklenir;

- ATP profili dahilindeki hat bölgelerindeki daimî ve geçici hız limitleri,
- Belirli bir tren veya tren konfigürasyonuna uygulanması gereken herhangi bir daimî hız kısıtlaması,
- Bir trene, araçüstü arıza koşulları nedeniyle uygulanmış hız kısıtlamaları,
- Trenin hareket onayının sınırından önce emniyetli bir şekilde durabilmesi veya giriş yaptığı hat bölgesinin daimî ya da geçici hız kısıtlamalarına uyacak şekilde yavaşlayabilmesi için izin verilen azami hız.

İşletmelerde tren sayılarının belirlenmesinde emniyetli fren modelinin etkisi vardır [22]. Bir CBTC sistemi, CBTC bölgesi içerisinde aynı anda çalışan trenlerin farklı sınıfları ve konfigürasyonları için farklı tren hızlandırma/frenleme oranlarına uyum sağlamak ve aynı zamanda belirtilen şekilde otomatik uyku ve otomatik kuplaj ve ayrılma fonksiyonlarını yerine getirmek için birden fazla emniyetli frenleme modelini destekleyebilir.

CBTC sistem tedarikçilerinin farklı araçlar ve hat yapıları için farklı emniyetli fren modelleri genel algoritmalarına sahip oldukları ve işletilecek hattın parametrelerine göre bu algoritmayı uyarladıkları bilinmektedir. Böylelikle kısa zamanda emniyetli fren model algoritmaları geliştirilebilmekte ve kolaylıkla testleri yapılmaktadır.



Şekil 4.2 : Genel emniyetli fren modeli.

4.1 Emniyetli Fren Modeli Belirlenmesinde Farklı Yaklaşımlar

Emniyetli fren modeli her bir CBTC uygulamasında değişiklik göstermektedir. Bu nedenle genel bir model oluşturmak ve bu modele tren parametreleri, hat parametreleri ve trenin çalışacağı hat durumları gibi birçok parametreyi değiştirilebilir yapmak gerekir. Oluşturulacak olan bu genel modelin olabildiğince geniş kapsamlı olması için bu bölümde kentsel ve ana hat işletmeciliğinde kullanılan farklı uygulamalar ve jenerik modeller geliştirilmesi için genel kurallar sağlayan çeşitli standartlar incelenmiştir.

4.1.1 EN 14531 standardı ortak hesaplama yöntemi

Standart raylı sistem uygulamaları için ortak bir hesaplama yöntemini tanımlamaktadır [25]. Her türlü tren seti ve tekli araç için fren ekipmanının tasarımında ve geçerlemesinde kullanılan ortalama değer hesaplamasını ve frenleme performansını kullanan genel algoritmaları açıklamaktadır [24]. Ek olarak, algoritmalar diğer frenleme performansı hesaplama yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırmak için bir yol sağlamaktadır. Düz bir hatta temel olarak durma mesafesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [25]:

$$s = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2 - v_{son}^2}{2 \cdot a_e} \quad (3.1)$$

Formül 3.1’de görüleceği üzere; Durma/yavaşlama mesafesi (s), Toplam eşdeğer tepki süresi(t_e), Başlangıç hızı(v_0), Son hız (v_{son}), Eşdeğer yavaşlama ivmesi(a_e) olmak üzere 5 farklı değer vardır.

4.1.2 ERTMS sistemi acil durum frenleme eğrileri

ERTMS sistemlerinde uygulanan frenleme eğrilerinin tanımlandığı alt sistem 026-3 dokümanlarına baktığımızda, frenleme ile ilgili olarak çok daha standartlaşmış bir sistem gereksinim dokümanı olduğu görülmektedir [26]. ERTMS sistem gereksinimleri tüm sistem tedarikçilerine aynı metodolojiyi kullanırmak ve karşılıklı işletilebilir sistemler tasarlatmak amacıyla açık şekilde internet ortamında bulunabilir [27]. Emniyetli fren modeli ile ilgili tüm gereksinimler ve tanımlamalar 26-3 alt sistem dokümantasyonunda verilmektedir [28].

Alt sistem 26-3 sistem gereksinimleri dokümanında;

- Konum prensipleri, tren konumu ve tren yönü,
- Hareket yetkisi kavramı,
- Statik hız profili, geçici hız kısıtlamaları, hemzemin geçit gibi statik hız sınırlamalarına göre en kısıtlayıcı hız profilinin belirlenmesi,
- İzin verilen hıza göre acil fren müdahale eğrisini, servis freni müdahale ve uyarı eğrisi tanımlamayı sağlayan denetim limitleri.

Bu gereksinimlere göre, alt sistem 26-3 dokümanı hız ve mesafe izleme algoritmalarını açıklar [28]. ERTMS sistemlerinde ayrıca frenleme eğrileri yük ve yolcu tren örneği üzerinden hesaplanması ile ilgili bir araç geliştirmiştir. Bu araçta genel olarak 2 tip araç parametresini temel alınarak hat parametreleri, ulusal sınırlamalar ile frenleme eğri örnekleri vermektedir [30].

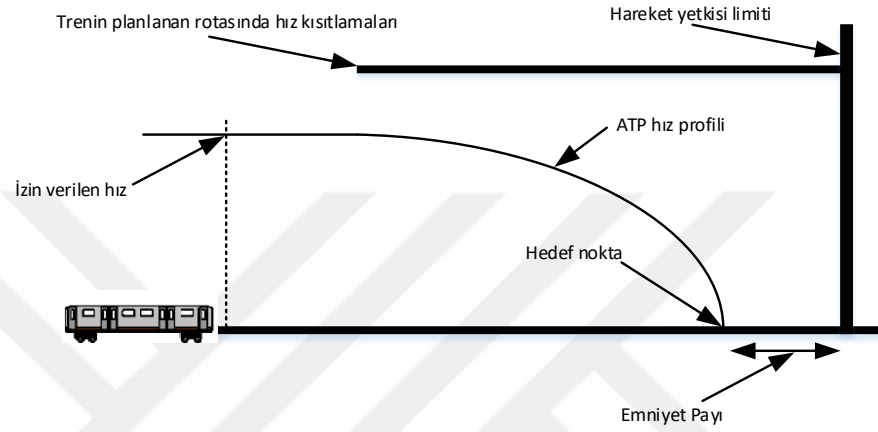
4.1.3 IEC 62290-2 temel frenleme modeli

IEC 62290 [2] standardı emniyetli frenlemenin temel ilkelerini tanımlamaktadır. Bu standarda göre tren koruma profili hareket yetkisi limitinde sona erer. Tren koruma profili geçerli emniyetli frenleme modeli ile belirlenmelidir. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi trenlerin emniyetli frenleme modeli tarafından belirlenen fren mesafesi hedef noktasını geçmemelidir [31].

Standart [3] emniyetli fren modelleri için asgari olarak aşağıdaki faktörleri göz önünde bulundurulması gerektiğinden bahsetmektedir:

- Takip edilen trenin konum belirsizliği,
- Trenin uzunluğu,
- Sistem tarafından izin verilen aşırı hız,

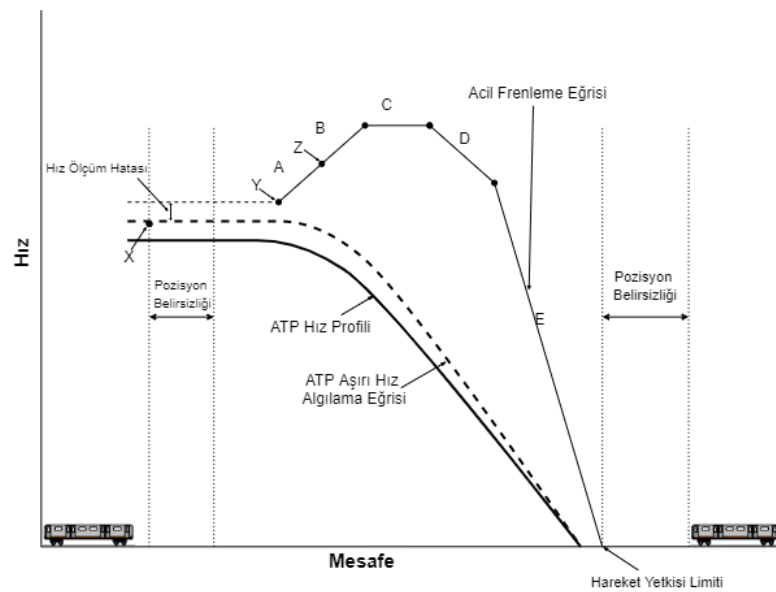
- Maksimum hız ölçüm hatası,
- Sistemdeki reaksiyon süreleri ve gecikmeleri,
- Sistem tarafından aşırı hız durumu tespit edildiğinde mümkün olan maksimum tren hızlanma oranı,
- Aşırı hız durumunun tespit edilmesinden sonra tahrik devre dışı bırakmak ve acil durum frenlerini uygulamak için en kötü durum tepki süreleri,
- Acil durum fren değeri.



Şekil 4.3 : Tren koruma profili ve hız denetimi [31].

4.1.4 IEEE 1474.1 temel frenleme modeli

Temel CBTC standartlarından olan IEEE 1474 standardı emniyetli fren modellerinin en az faktörleri göz önünde bulundurması gerektiğinden bahsetmektedir [8].



Şekil 4.4 : IEEE 1474.1 emniyetli fren eğrisi.

- Önden giden trenin konumundaki belirsizlik (geri kayma payı dâhil),
- Arkadan gelen trenin konumundaki belirsizlik,
- Tren uzunluğu,
- Tren konfigürasyonları,
- Sistem tarafından izin verilen aşırı hız limitleri,
- Azami hız ölçümündeki hata payı,
- Sistem reaksiyon süresi ve gecikmeler,
- Sistem tarafından aşırı hız durumu tespit edildiğinde mümkün olan maksimum tren hızlanma oranı,
- Aşırı hız durumunun tespit edilmesinden sonra tahrik devre dışı bırakmak ve acil durum frenlerini uygulamak için en kötü durum tepki süreleri,
- Garanti edilen acil durum fren değeri (GEBR),
- Hattın eğimi.

Şekil 4.4’de 3 farklı eğri görülmektedir. Bu eğriler;

- ATP hız profili eğrisi, ATP aşırı hız algılama eğrisinin altındaki ATP aşırı hız payı olan hız-mesafe eğrisidir. ATP profili, ATP alt sistemi tarafından kullanılan temel eğridir. ATP aşırı hız algılama eğrisi, ATP alt sistemi ölçülen hızın bunu aştığını tespit ederse, ATP alt sisteminin acil bir acil durum fren uygulamasını hemen başlatmak için kullandığı hız-mesafe eğrisidir.
- Acil fren sistemi, treni emniyetli frenleme modeli ile hesaplanan durma mesafesi içinde durdurmayı amaçlamaktadır. En kötü durum acil durum freni eğrisidir. her zaman güvenli hız eğrisinden küçük veya ona eşit olmalıdır; bu güvenli hızı, kritik bir tehlikenin (raydan çıkma veya çarpışma) oluşabileceği hız olarak tanımlanır. ATP alt sistemi bir acil fren uygulaması başlattığında, ATP alt sistemi artık kontrol döngüsünde değildir. Bu durumda tren kontrol sistemi altında acil fren yapar.
- Hız limitleri ve kısıtlamaları, genellikle trenin herhangi bir parçası hız kısıtlaması uygulanan bölgeye dahil olduğunda uygulanır. Emniyetli fren modeli emniyet faktörleri, acil durum fren eğrisinde, tren konumunun belirsizliklerinde, CBTC sistem tasarımında yer alan diğer ek ölçüm toleranslarında dikkate alınır ve ek emniyet payları eklemeye gerek yoktur [8].

Şekil 4.4’de CBTC sistemleri için tipik bir emniyetli fren modeli gösterilmektedir. Bu şekle göre frenleme eğrisi aşağıdaki adımları içermelidir.

- Araç üstü CBTC reaksiyon süresi,
- Tahrik devre dışı bırakma süresi,
- Süzülme süresi,
- Acil durum freni oluşturma süresi,
- GEBR’de acil durum frenlemesi.

4.1.4.1 Araç üstü CBTC reaksiyon süresi

CBTC sisteminin tren hızını ve tren konumunu hareket yetkisi limitine göre ölçeceği ve ölçüm hızını bu ölçüm konumundaki ATP profil hızıyla karşılaştıracağı varsayılmaktadır. Şekil 4.4’de görülen X, Y ve Z noktaları;

- X noktası, CBTC ölçülen hızın ATP ölçüm konumundaki ATP aşırı hız algılama eğrisinin hemen altında olduğu durumu temsil eder, yani ATP ölçülen hız ATP profilinin üstünde olmasına rağmen, hala ATP aşırı hız içinde algılama eğrisinin altındadır. Bu nedenle, CBTC sistemi acil durum frenlemesini başlatmayacaktır.
- Y noktasında en kötü durumda hız ölçüm ve konum ölçüm hataları (pozisyon belirsizliği) nedeniyle, trenin gerçek hızının ve gerçek lokasyonunun bulunması mümkündür. Bu noktada tren operatörü ve/veya ATO altsistem otomatik hız düzenleme fonksiyonu normalde tren hızını ATP profil hızına düşürmeye çalışacaktır.
- Z noktasında ölçülen hız artık ATP aşırı hız algılama eğrisinin üzerinde olduğu anlaşılmaktadır ve CBTC sistemi hemen acil durum freni uygulaması başlatacaktır. Bu nedenle Z noktasındaki hız, CBTC sisteminin en kötü yanıt süreleri ve ölçüm hataları nedeniyle bir trenin ATP profilinin üzerinde elde edebileceği maksimum hızı temsil eder.

Y ve Z noktaları arasında geçen ve araç üstü sistemin acil durum fren isteğini iletmesine kadar geçen reaksiyon süredir.

4.1.4.2 Tahrik devre dışı bırakma süresi

Frenleme modelinin bu bileşeni sırasında bir acil durum fren uygulamasını başlatan CBTC sistemine yanıt olarak tren tahrik sistemi devre dışı bırakılana kadar tren

hızlanmaya devam eder. Fren modeli, tahrik devre dışı bırakılana kadar bir ilk tahrik kaçak dönemi içerir. En kötü durumlar düşünülerek devre dışı bırakma süre hesaplanır ve modele dahil edilir.

4.1.4.3 Süzülme süresi (EB uygulanması için ilave süre)

Frenleme modelinin bu bileşeni sırasında, trenin, tahrik gücü devre dışı bırakılmadan önce hızlanmasının bir sonucu olarak elde edilen maksimum hızda kaydığı varsayımı yapılır. Bu kaymanın ve acil durum freni etkin olmasına kadar geçen süre ifade edilmektedir.

4.1.4.4 Acil durum freni oluşturma süresi

Frenleme modelinin bu bileşeni sırasında garanti edilen acil durum fren değerinin tam olarak uygulanması için gereken süredir.

4.1.4.5 GEBR’de acil durum frenlemesi

Frenleme modelinin bu bileşeni sırasında tren sıfır hıza gelene kadar garanti edilen acil durum fren değeri ile yavaşlamaya devam eder.

Not — D ve E bileşenleri, eşdeğer bir tek fren eğrisine entegre edilebilir.

4.1.4.6 Pozisyon belirsizliği

Emniyetli fren modeli trenin hem önünde hem de arkasında, pozisyon belirsizlikleri belirler. Bu genelde tren hız veya konum ölçüm hatalarından oluşur. Şekil 4.4’de acil durum fren eğrisi, ATP bir acil durum fren uygulaması başlattıktan sonra trenin izleyeceği en kötü durum hız-mesafe eğrisidir.

Bu acil fren eğrisi her zaman güvenli hız eğrisinden küçük veya ona eşit olmalıdır; burada güvenli hız, üzerinde kritik bir tehlikenin (raydan çıkma veya çarpışma) oluşabileceği hız olarak tanımlanır. Bu modelde, emniyet faktörleri acil durum fren eğrisinde dikkate alındığı gibi, tren konumu belirsizliklerinde ve CBTC sistem tasarımında yer alan diğer ek ölçüm toleranslarında dikkate alınır ve ek emniyet payı eklemeye gerek yoktur [8].

4.1.5 IEEE 1698 temel frenleme modeli

Raylı sistem araçlarının fren mesafelerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemler IEEE 1698 [5] standardında verilmiştir. Yöntemler, otomatik tren koruma ve tahrik ve

fren sistemi işletimi, çevre koşulları, operatör arayüzleri, toleranslar ve arıza kodlarını kapsamaktadır [32]. Bu modelde geçen her bir harf farklı durumları göstermektedir. Aşağıda bu harflerin durumları gösterilmektedir.

4.1.5.1 Maksimum giriş hızı (A)

Maksimum giriş hızı, trenin modele girebileceği n maksimum hızdır. (Genellikle bölgede izin verilen hızdan 3-5 km/s daha yüksektir.)

4.1.5.2 Giriş noktası (B)

Giriş noktası, bir trenin daha kısıtlayıcı bir bölgeye girdiği veya yaklaşmakta olan bir kısıtlayıcı durum nedeniyle frenlemeyi başlatması gereken noktadır.

4.1.5.3 Reaksiyon süresi boyunca gidilen mesafe (C)

Sinyalizasyon ekipmanının tasarımına ve uygulamasına bağlı olarak, bu bileşen eşzamanlı veya ardışık olaylar olan iki bölümden oluşabilir. Bunlar ekipman reaksiyon süreleri boyunca kat edilen mesafe ve operatör reaksiyon süresi boyunca kat edilen mesafedir [32].

4.1.5.4 Ekipman reaksiyon süreleri

Bu reaksiyon süresinde kat edilen mesafe, hat boyu ve/veya araç üstü ATC ekipmanlarının frenleme ihtiyacını algılaması, işlemesi ve göstermesi için en kötü durum süresini içerir.

4.1.5.5 Operatör reaksiyon süresi

Operatörün frenleme ihtiyacını anlaması (görsel ve/veya sesli bildirime dayanarak) için gereken süresidir. Operatör reaksiyon süresi, operatörün, aşırı hız koşulunu onaylayarak ve/veya frenlerin manuel olarak uygulanmasıyla aşırı hız durumunu bastırması için bir ek zaman içermelidir.

4.1.5.6 Kaçak hızlanma (D)

Kaçak hızlanma bileşeni reaksiyon süresinde kat edilen mesafesinin sonunda başlar ve bir acil durum freni uygulaması ile çekiş gücünün ortadan kaldırılması başlatılana kadar devam eder.

Modelin bu bileşeni, araç performans özelliklerine bağlı olarak, reaksiyon süresinin sonunda hız için maksimum hızlanma oranını varsayar. Bu, tam yüklü bir araç için mevcut çekiş gücü kullanılacak şekilde, boş bir aracın ağırlığı varsayımını içerebilir. Tren, bileşen reaksiyon süreleri sırasında herhangi bir zamanda hızlanırsa, ATP sistemi aşırı hız durumunu tespit eder ve kaçak hızlanma başlatır. Bu her zaman aşırı hız koşulunun (hızlanma veya daha düşük hız gereksiniminin tanınması) tam olarak C bileşeninin sonunda gerçekleştiğini varsaymaktan daha kısa bir durma mesafesi ile sonuçlanacaktır.

Kaçak hızlanma tipik olarak otomatik tren işletimi ve/veya mikroişlemci tabanlı tahrik kontrol mantığı içeren fren modellerine dahildir. Hayati olmayan mikroişlemci teknolojisini kullanan tahrik kontrollerinin varlığı, kendi başına, sıfır zaman süresinden daha büyük bir kaçak hızlandırma bileşeninin bir frenleme modeline dahil edilmesini gerektirmez [32].

4.1.5.7 Tahrik kesme (E)

Pozitif çekiş gücünün azalmaya başladığı noktadan başlayarak ve nominal olarak sıfır çekiş gücünün elde edilmesiyle biten en kötü zaman boyunca kat edilen mesafedir [32].

4.1.5.8 Ölü zaman (süzülme) (F)

Nominal olarak sıfır çekiş gücü ile başlayan ve garanti edilen frenleme oranının %10'luk tipik bir değerinin elde edilmesiyle biten en kötü zaman boyunca kat edilen mesafedir.

4.1.5.9 Fren oluşumu (G)

Bazı durumlarda ölü zaman ile birleştirilen fren oluşumu elde edilen garantili frenleme oranının tipik olarak %10'u ile biter.

4.1.5.10 Garantili frenleme hızı (H,I)

Garanti edilen frenleme hızı, aşağıda daha ayrıntılı açıklandığı gibi işletme tarafından tanımlanan en kötü koşulda aracın garanti ettiği yavaşlama oranıdır.

Minimum frenleme hızı (H)

Minimum performans frenleme hızı özellikleri kuru, düz hattaki en kötü durum

frenidir. Bu oran test aşamasında belirlenebilir ve doğrulanabilir [32]. Bir başka ifade ile normal adezyon şartlarında çıkaracağımız frenleme hızıda denilebilir.

Güvenlik faktörleri ile frenleme hızı (I)

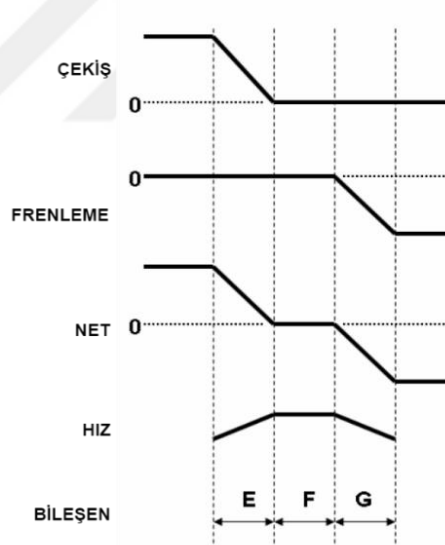
Minimum frenleme hızını değiştirerek frenleme mesafesini genişleten güvenlik faktörleridir. İşletmenin özel olarak alınmasını istediği güvenlik önlemleridir[32].

4.1.5.11 Gövde çıkıntısı (J)

Trenin gövde çıkıntısı veya ön kuplör yüzünü tanımlar. Konum belirsizliğinden gelen mesafede bu kısımda değerlendirilir.

4.1.5.12 IEEE 1698 standardı freni oluşum süreleri pratik örnekler

IEEE 1474 [4] standardında kavramsal olarak işaretlenen E, F ve G kısımlarını detaylandırmıştır. Şekil 4.5’da bir örneği verilen, tahrik kesilmesi (E bileşeni), süzülme (F bileşeni) ve/veya acil durum freni oluşumu (G bileşeni) için pratik varyasyon örneğinin genelleştirilmesini göstermektedir.



Şekil 4.5 : Normal güçten frenlemeye geçiş [32].

Tüm bileşenler (E, F ve G) zaman fonksiyonlarına tabidir. Olaylar arasında kısa bir süre gerekir (tam durma süresi ile karşılaştırılır), bu nedenle bileşenler sırasında hız değişiklikleri azdır. Sonuç olarak, yatay eksenler zaman veya mesafe hariç yorumlanabilir.

Çizelge 4.1 : IEEE 1474.1 [4] ve IEEE 1698 [5] fren model karşılaştırması.

Hız/Pozisyon Maddesi	IEEE Std 1698	IEEE Std 1474.1
Maksimum giriş hızı	A	X Noktası
Trenin frenleme modeline giriş noktası	B	Y Noktası
Reaksiyon süresi boyunca gidilen mesafe	C	A
Kaçak hızlanma	D	B
Tahrik kesme süresi	E	B
Süzülme (ölü zaman) süresi	F	B ve C bölgesine dahil
Acil durum freni oluşum süresi	G	C ve D
Minimum garanti edilen acil durum freni	H	E
Frenleme oranı faktörleri	I	E bölgesine dahil
Araç gövde çıkıntısı	J	Pozisyon Belirsizliği

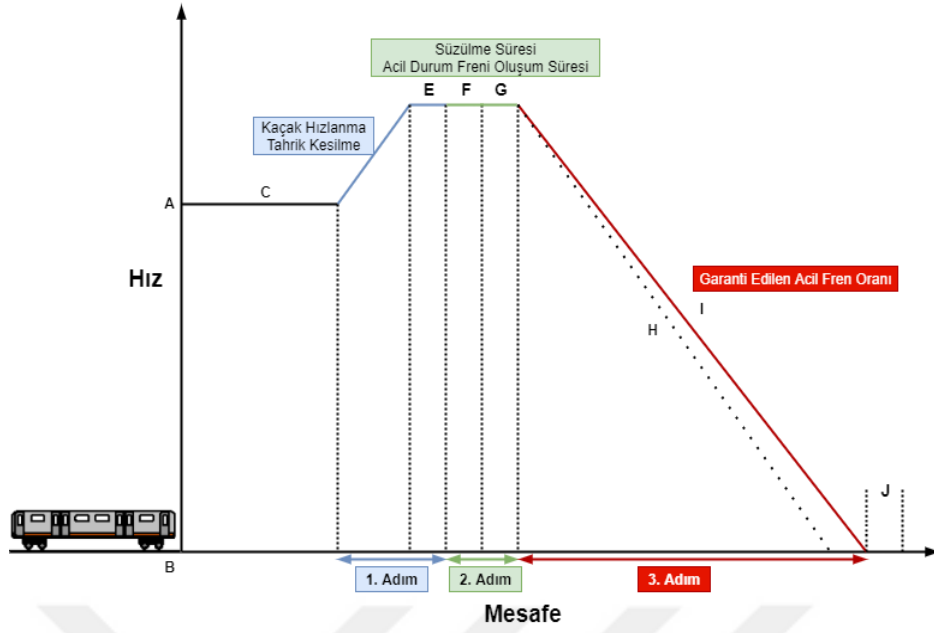
İlgili standartlardan görüldüğü gibi CBTC sistemleri için emniyetli frenleme modeli ve ERTMS sistemleri için acil durum freni yavaşlama eğrileri ana prensipleri standartlara göre benzer olmakla birlikte raylı sistem aracının farklı özellikleri ve değişim gösteren hat parametreleri sebebiyle önemli farklılıklar vardır [33]. Bu durumda trenlerin işleyeceği hatta, araç parametrelerine bakılarak emniyetli fren model oluşturulmalıdır.

4.2 Emniyetli Frenleme Model Formülasyonu

Emniyetli fren modeli, frenlemenin kapsamlı olarak anlatıldığı IEEE 1698 [5] standardına bağlı olarak modellenecektir. Standardın tariflediği fren modeli üç adımda gruplandırılmıştır.

- Kaçak hızlanma ve tahrik kesilmesi
- Süzülme ve acil durum freni oluşum süresi
- Garanti edilen acil durum freni

Şekil 4.6’da emniyetli fren model adımları gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Emniyetli fren modeli adımları.

4.2.1 Kaçak hızlanma ve tahrik kesilmesi

Kaçak hızlanma bileşeni, reaksiyon mesafesinin sonunda başlayan ve tahrik kuvvetinin kesilmesi ile sona eren ve maksimum ivmelenme gücünün uygulandığı varsayımı ile en kötü koşulda kaçak hızlanma mesafesinin hesaplandığı kısımdır. Bileşen C sırasında kaçak hızlanma başladığı durumlarda, ATP sistemi aşırı hız durumunu tespit eder ve normal aşırı hız durumu uygulamasından her zaman daha kısa durma mesafesine neden olan kaçak hızlanma bileşeni başlatır.

Modelin bu bileşeni, araç performans özelliklerine bağlı olarak, reaksiyon süresinin sonunda hız için maksimum hızlanma oranını varsayar.

Tahrik kuvvetinin kesilmesi bileşeni, çekiş gücünün azalmaya başladığı ve nominal olarak sıfır çekiş gücünün başması ile biten noktadan başlayarak en kötü zamanın kat ettiği mesafesini gösterir. Bileşen sona erene kadar, tipik olarak trenin ortalama hızlanma oranına sahip olacağı varsayılır.

İlk adım olarak kaçak hızlanma ve tahrik kuvvetinin kesilme bileşenlerinin formülasyona girdi süreleri birleştirilmiştir. Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süresi (T_a).

4.2.2 Süzülme ve acil durum freni oluşum süresi

Süzülme bileşeni sıfır tahrik kuvvetinin gelmesi ile başlar ve garanti edilen acil durum ivmesi %10 değerinin üstüne çıktığında sona erer. Tahrik kesilmesi ve fren uygulaması arasında hiçbir süre bulunmayan belirli koşullar altında, süzülme bileşeni ihmal edilebilir. Acil Durum freni oluşumu %10 GEBR ile başlayan ve %100 GEBR uygulanana kadar geçen süre bileşenidir. İkinci adım olarak süzülme ve acil durum freni oluşum süre bileşenlerinin formülasyona girdi süreleri birleştirilmiştir. Süzülme ve acil durum freni oluşum süresi (T_c).

4.2.3 Garanti edilen acil durum freni

Garanti Edilen Acil Durum Fren Değeri, herhangi bir başlangıç hızından hareketsiz hale geçene kadar araç tarafından elde edilen eşdeğer yavaşlama ivmesi değeri olarak tanımlanır. Tren tarafından ulaşılan garanti edilen acil durum fren hızı eğimsiz doğru hat ve maksimum yolcu yükü ve minimum adezyon seviyesi (işletileceği hatta göre değişecektir) dikkate alır. Çalışmada kullanılan frenleme ile ilgili genel kelimler EN 1477 [6] standardı temel alınarak belirlenmiştir [34].

Bu bileşenleri formülize etmeye çalışmaya ve emniyetli fren modeli;

$$\Delta s = \frac{v(\Delta s)^2}{2a_{eb}} \quad (3.2)$$

$$v(\Delta s)^2 = 2a_{eb} \Delta s \quad (3.3)$$

$$v(\Delta s)^2 = 2a_{eb} \Delta s \quad (3.4)$$

$$v(\Delta s) = \sqrt{2a_{eb} \Delta s} \quad (3.5)$$

Formül 3.5’de görüleceği üzere değerlerin açıklamaları; hareket yetki limiti son noktası veya hız limiti değişim noktası (Δs), acil durum freni uygulama hızı ($v(\Delta s)$), Garanti edilen acil durum fren değeri (a_{eb})(- yavaşlama).

Formüle ana girdi mesafe olacaktır ve aracın verilen mesafede hızının en fazla ne kadar olması gerektiği bulunmaya çalışılmaktadır. Bu hız değeri acil durum frenleme hız limiti olacaktır. Araç bu hızın üzerine çıktığında acil durum freni uygulayacaktır.

$$M_i = M_p + M_{rot} \quad (3.6)$$

Formül 3.6’da görüleceği üzere dinamik kütle, statik kütlenin ve eşdeğer döner kütlenin toplamıdır;

Formülle ağırlık ile eğim (Δh) arasındaki ilişki girilmesi amacıyla yer çekim sabiti ile çarpılarak girilmiştir. Çakışma noktasında izin verilen hız (V_1) kök içine yazılarak formülasyon bu hızın karesinden çıkarılmıştır Böylelikle çakışma noktasına hangi hız ile gireceğimiz modele girdi parametresi yapılmıştır.

$$v(\Delta s) = \sqrt{v_1^2 - 2a_{eb}\Delta s + 2\frac{M_p}{M_i}g\Delta h} \quad (3.7)$$

Formül 3.7’de görüleceği üzere değerler; hareket yetki limiti son noktası veya hız limiti değişim noktası (Δs), acil durum freni uygulama hızı ($v(\Delta s)$), Garanti edilen acil durum fren değeri (a_{eb})(- yavaşlama), Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi (M_i), Tren statik kütlesi (M_p), Yer çekimi sabiti (g), Mevcut konum ile kısıtlama noktasındaki konum arasındaki eğim farkı (Δh).

Elde ettiğimiz formülasyon Matlab programı yardımıyla hesaplamalar yapılarak girdi parametreleri artırılmıştır. Ta ve Tc süreleri a_{eb} ve a_a değerleri ile işlemler yapılarak K0 ve K1 formülasyonları oluşturulmuştur. Hız belirsizliği (Δv_m) değeri (-) olarak girilerek trenin hızındaki belirsizlikte girdi parametrelerden biri olmuştur.

$$v(\Delta s) = -\Delta v_m + K_0 + \sqrt{v_1^2 - 2a_{eb}\Delta s + 2\frac{M_p}{M_i}g\Delta h + K_1(a_{eb} + a_{g\ min})} \quad (3.8)$$

$$K_0 = a_{eb}(T_a + T_c) - a_a T_a \quad (3.9)$$

$$K_1 = a_{eb}(T_a + T_c)^2 - a_a T_a^2 \quad (3.10)$$

Formül 3.8’de görüleceği üzere matematiksel model parametreleri Çizelge 4.2’de matematiksel modelin girdi parametreleri birimleri ve sembolleri ile beraber gösterilmiştir. Formülasyona göre 13 tane girdi parametresi ve bir tane çıktı parametre görülmektedir. Bu parametreler araç parametreleri, hat parametreleri ve hareket yetki limitinden gelen parametreler olmaktadır. Genel bir algoritma oluşturularak araç A ve araç B örnek parametreleri denenerek algoritma denenmiştir. Genel algoritma oluşturularak parametrik olarak değiştirilmiştir.

Çizelge 4.2 : Matematiksel model parametreleri.

Numara	Parametre	Birim	Sembol
1.	Acil durum freni uygulanacak hız	m/s	$v (\Delta s)$
2.	Hareket yetki limiti son noktası veya hız limiti değişim noktası	m	Δs
3.	Hayati çakışma noktasında izin verilen hız	m/s	V_1
4.	Hız belirsizliği	m/s	Δv_m
5.	Mevcut konum ile çakışma noktasındaki konum arasındaki ortalama eğim	‰	Δh
6.	Mevcut konumda trenin arka ucu ile çakışma noktası arasındaki minimum eğimden dolayı hızlanma	m/s^2	a_{gmin}
7.	Yer çekimi sabiti	m/s^2	g
8.	Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s^2	a_{eb}
9.	Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi	m/s^2	a_a
10.	Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı	s	T_a
11.	Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı	s	T_c
12.	Statik tren kütlesi	ton	M_p
13.	Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi	ton	M_i
14.	Döner kütle	ton	M_{rot}

4.3 Emniyetli Fren Model Parametre Tanımları

4.3.1 Acil durum freni hızı

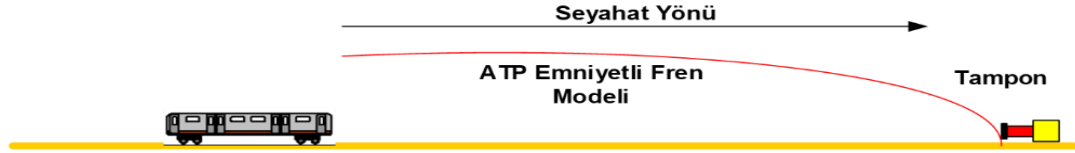
Emniyetli fren modelinin çıktısı olarak parametrelere göre hesaplanan acil durum freni uygulanacak hız limitidir. Modelin parametrelere göre bu hızdan daha yukarı çıkması durumunda araç üstü bilgisayar tarafından acil durum freni tetiklenecektir.

4.3.2 Hareket yetki limiti son noktası veya çakışma noktaları

Bir başka ifade ile çakışma noktaları hız limitlerinin değiştiği noktalardır. Formülasyondan bu noktalara kalan mesafeler girdi parametrelerinden biri olacaktır. Genel olarak hayati ve hayati olmayan çakışma noktaları olarak sınıflandırılabilir. Hayati çakışma noktaları ATP emniyetli frenleme modeli tarafından kullanılırken, hayati olmayan çakışma noktaları ATO sürüş seviyeleri tarafından ATP hız limitleri altında takip edilir. Çakışma noktalarında hız limitleri sıfıra eşit veya sıfırdan yüksek değerler olabilir. Çakışma noktasında hız limiti sıfıra eşitse burası durmamız gereken bir noktadır. Genelde bu noktalar hareket yetkisi bitiş noktalarında verilen sıfır hız

limitleri olarak değerlendirilmektedir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 hayati çakışma noktalarına örnek verilebilir. Tren emniyetli fren modeli bu noktalardan önce veya en kötü durumda bu noktaların üzerinde trenleri durduracaktır. Çakışma noktasında hız limitleri sıfırdan farklı olduğu nokta hız limiti değişim noktasıdır.

Bir hattın sonu;



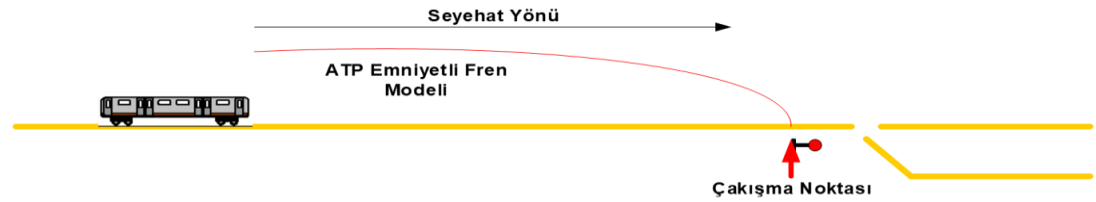
Şekil 4.7 : Tampon bölgesinde çakışma noktası.

Bir sonraki tren (pozisyon belirsizliği);



Şekil 4.8 : Bir sonraki tren çakışma noktası.

Kırmızı sinyal noktası;



Şekil 4.9 : Kırmızı sinyal çakışma noktası.

Tren emniyetli fren modeli her bir hız limit değişim noktalarını hesaplayarak trenin güvenli hız limitlerini aşmamasını sağlayacaktır. Formülasyonda girdi parametrelerden biri olan hareket yetki son noktası veya hız limiti değişim noktaları, ne kadar mesafe sonra hız limiti değişimi olduğu bilgisini formülasyona girdi yapmaktadır [35]. Bu girilen mesafelerin trenin orta noktasına göre normalleştirildiği varsayılarak yapılmaktadır.

4.3.3 Hayati akışma noktasında izin verilen hız

Hayati akışma noktalarında dūřmemiz gereken hız limitleridir. Sıfır veya sıfırdan farklı hızlar olabilir. Formūlasyonda bu noktalara izin verilen hız limitleri girdi parametrelerinden biri olacaktır. Bir sonraki hız değişim noktasında girilen bu hıza uygun şekilde model emniyetli fren uygulama hızını gūncellemektedir.

4.3.4 Hız belirsizliği

Emniyetli fren modelindeki trenin hız belirsizliklerine karşı konulmuş emniyet payıdır. Formūlasyonda bu belirsizlik girdi parametrelerinden biri olacaktır. rnek olarak acil durum fren hızı 80 km/sa olan bir yerde, odometrenin hızı yanlış lebileęine karşılık 2 km/sa belirsizlik payı girilerek acil durum freni hızını 78 km/sa indirilmesini sağlar.

4.3.5 Mevcut konum ile çakışma noktası konum arası ortalama eğim

Emniyetli fren modelinde ortalama eęim hesabı yapılarak en yūksek eęim farkı formūlasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır. Eęim pozitif ve negatif olabildięi gibi trenin kūtlesi ile matematiksel modelde belirlirmiřtir.

4.3.6 Minimum eğimden dolayı hızlanma

Emniyetli tren modelinde tren arka ucu ile çakışma noktası arasında minimum eğimden dolayı maksimum hızlanma oluşacaktır. Bu hızlanma ivmesi formūlasyona girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.7 Yer ekimi sabiti

Formūlasyonda yerçekimi sabiti girdi parametrelerinden biri olacaktır.

4.3.8 Garanti edilen acil durum frenleme değeri

Garanti edilen acil durum freni (GEBR) genelde dūz açık hatlarda evre kořullarında ve bir trende özel uygulamada var olabileęi tahmin edilebilecek en ktū durumdaki gūvenilir fren donanımının, arıza modları altındaki bir trenin elde ettięi minimum acil durum fren hızı olacaktır. GEBR, genel olarak iřletme tarafından belirlenmekte ve azami yolcu yūkū (varsa kar ve buz yūkū), asgari ngrūlen adezyon seviyeleri, azami tasarım ve arka rūzgār dikkate almaktadır. Formūlasyonda bu frenleme ivme deęeri girdi parametrelerinden biri olacaktır.

4.3.9 Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi

Trenin nominal koşullarda (%100 tahrik kuvveti mevcut) eğimsiz düz hatta tahrik sisteminin maksimum hızlanma ivmesi formülasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.10 Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı

IEEE 1698 [5] standart bileşenleri kısmında anlatılan trenin kaçak hızlanma ve tahrik kesme sürelerinin toplamı formülasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.11 Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı

IEEE 1698 [5] standart bileşenleri kısmında anlatılan trenin süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı formülasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.12 Statik tren kütlesi

Trende bulunan tüm statik kütle değerlerinin toplamı formülasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.13 Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi

Tren eylemsizlik kütlesi veya dinamik kütlesi, statik kütlenin ve döner kütle sabiti ile toplamıdır. Formülasyonda girdi parametrelerden biri olacaktır.

4.3.14 Döner kütle

Trenin döner kütlesi, dişli oranı ve tekerlek çapı ile dönüştürülen trenin dönme ataletine eşdeğerdir. Eşdeğer dönmeyen tren kütlesi, statik tren kütlesinin ve dönme ataletinin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Buradaki ilişki araç hızından bağımsızdır, bu nedenle dikkate alınan her hızda geçerlidir ve araç gücünden bağımsızdır. Genel olarak, bir metro treninin döner kütlesi, boş trenin %5 ila %8'i olarak kabul edilir [36]. Formülasyonda bu döner kütle değeri girdi parametrelerinden biri olacaktır.

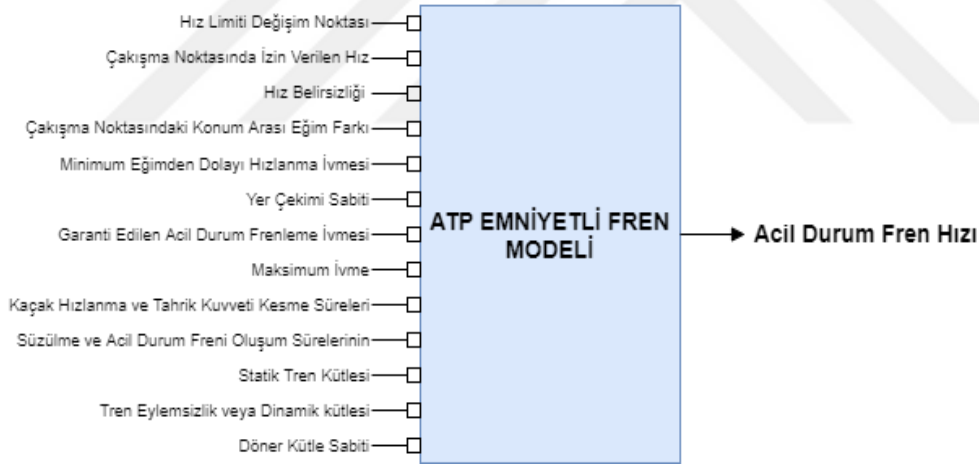
Yukarıda açıklamaları bulunan 13 girdi parametresinden trenin anlık mesafesine bağlı olarak acil durum freni uygulaması için gerekli hız değeri çıktısını oluşturmaktadır.

4.4 Emniyetli Fren Modeli Uygulaması

Emniyetli Fren modeli adımları ile IEEE 1698 [5] standardının tariflediği modele farklı bir yaklaşım getirilmiş ve formülasyon oluşturulmuştur. Bu formülasyon Matlab programı yardımı ile yazılan kod aracılığıyla matematiksel denklem modellenmiş ve emniyetli fren modeli farklı parametrelere göre değiştirilebilir şekilde bir grafik arayüzü oluşturulmuştur. Şekil 4.10'de emniyetli fren model parametreleri gösterilmektedir.

Emniyetli fren modeli parametreleri belirlenirken modele etkisinin az olduğu düşünülen parametreler girdi yapılmamıştır. Modelde bazı varsayımlar yapılmıştır;

- Trenin geçtiği hat bloğundaki kurlar hesaplamaya dahil edilmediği,
- Trenin geçtiği hat bloklarında sabit bir GEBR değeri olduğu,
- Gerekli olan garanti edilen acil durum freni için adezyon değerinin yeterli olduğu,
- Trenin geçtiği hat bloklarında sabit bir adezyon direnci olduğu,



Şekil 4.10 : ATP emniyetli fren model parametreleri.

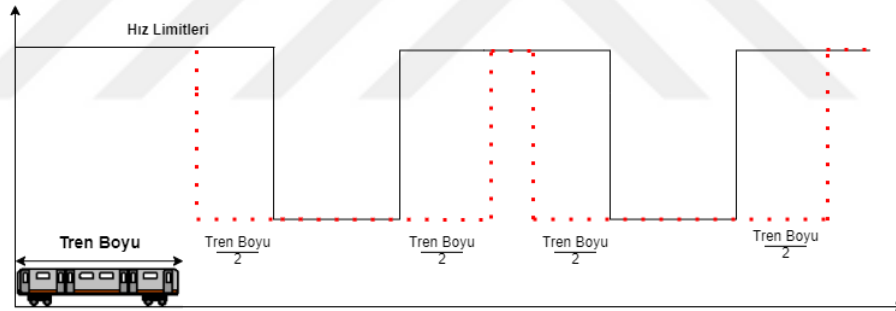
- Acil durum freni uygulama hızı hesaplaması esnasında başka bir nedenden dolayı acil durum freni uygulanmadığı,
- Acil durum freni uygulandığında sıfır hız algılanana kadar uygulamaya devam ettiği,
- Trenin çakışma noktasına kadar olan eğimler ortalama eğim olarak hesaba katıldığı,

- Bir hatta, normal çalışma koşullarında, hat eğimi, istasyon giriş/çıkış noktalarında, dönüşlerde hız sınırları olabilir. Tüm bu hız sınır noktaları birleştirilmeli ve aynı yerde birden fazla hız sınırı var ise en kısıtlayıcı hız limiti alınmalıdır.
- Trenin arka uç noktası, tren ayak izinde belirtilen uzunluk ve pozisyon belirsizliklerinin gidiş yönüne göre arka uç noktasıdır (Şekil 4.11).



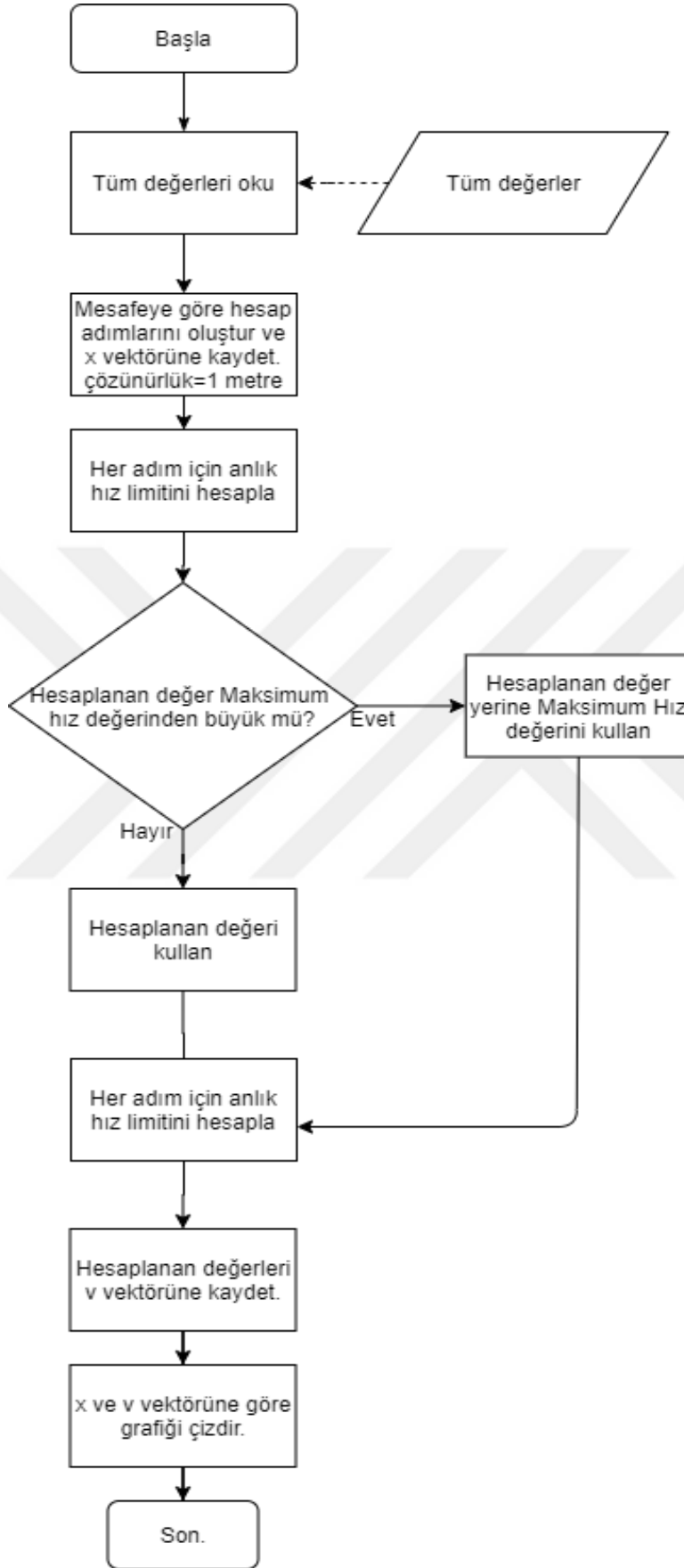
Şekil 4.11 : Tren ayak izi.

- Şekil 4.12’de gösterildiği gibi hız limit bölgelerinin trenin orta noktasına göre normalleştirildiği,

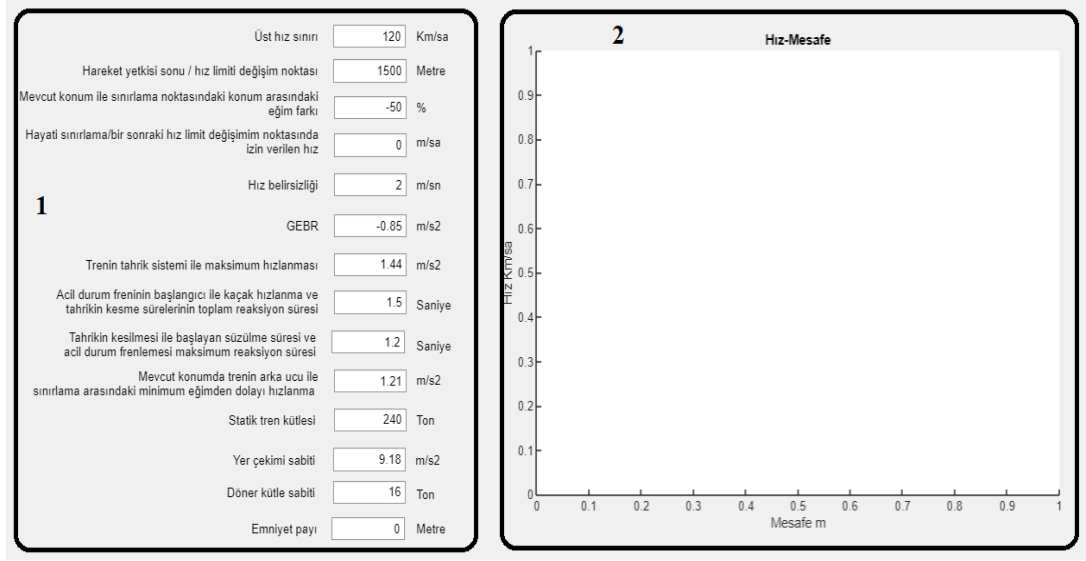


Şekil 4.12 : Trene hız sınırlarının uygulanışı.

Varsayımları dikkate alınarak emniyetli fren modeli oluşturulmuştur. Şekil 4.13’de acil durum fren hızı belirleme işlemi için oluşturulan algoritma akış şeması temel olarak gösterilmiştir. Akış şemasında görüldüğü üzere trenin 1 m aralıklar ile frenleme modeli grafik arayüzü yardımı ile parametrik olarak modellenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.13 : Acil durum freni uygulama hızı akış şeması.



Şekil 4.14 : Matlab grafik arayüz.

Şekil 4.14’de gösterilen grafik arayüzünde bir numaralı kısımda;

- Formülasyonda girdi parametreleri olan;
 - Hareket yetki limiti son noktası veya hız limiti değişim noktası,
 - Hayati çakışma noktasında izin verilen hız,
 - Mevcut konum ile çakışma noktasındaki konum arasındaki ortalama eğim,
 - Mevcut konumda trenin arka ucu ile çakışma noktası arasındaki minimum eğimden dolayı hızlanma,
 - Yer çekimi sabiti, garanti edilen acil durum frenleme değeri,
 - Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi,
 - Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı,
 - Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı,
 - Statik tren kütlesi,
 - Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi,
 - Döner kütle.

Ayrıca formülasyonda olmayan fakat frenleme modelinde olması gerektiği düşünülen üst hız sınırı ve emniyet payıda modele girdi parametresi olarak eklenmiştir.

- Üst hız sınırı, trenin işleyeceği hatta izin verilen maksimum inşai hız limitini gösterir. Bu kısım formülasyon girdi parametrelerde bulunmayan ancak

grafikte üst hız sınırı belirlenmesi ve hesaplamaya dahil edilmesi amacıyla parametrik olarak girilmiştir.

- Emniyet payı, bir sonraki çakışma noktasının belirsizliğidir. Bir başka ifade ile trenin gideceği mesafeye ek olarak bir emniyet payı konularak bu mesafeden bu pay kadar önde durması sağlanmaktadır.

Şekildeki grafik arayüzünde ikinci kısımda;

- Parametrik olarak girilen girdilerin değişimini x, v vektörleri ile mesafe, hız grafik görselidir.

Hesaplama yapılırken karşılaştırma yapılması amacıyla 2 farklı araç parametresi belirlenmiştir. Burada yazılan araç parametreleri sektörde kullanılan gerçek araç parametreleri referans alınarak oluşturulmuştur. Bu gerçek parametrelere göre oluşturulan araç parametreleri ile olabildiğince gerçek fren modeli hesaplaması yapılması amaçlanmaktadır. Çizelge 4.3’de görüleceği üzere araç parametreleri belirlenirken olabildiğince farklı değerler kullanılmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.3 : Farklı araç parametreleri.

Araç - A	Birim	Değer	Araç - B	Birim	Değer
Maksimum hız	km/sa	120	Maksimum hız	km/sa	80
Maksimum ivme	m/s ²	1.1	Maksimum ivme	m/s ²	1.21
Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s ²	0.85	Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s ²	0.75
Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süreleri	s	1.5	Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süreleri	s	2
Süzülme ve acil durum freni oluşum süreleri	s	1.2	Süzülme ve acil durum freni oluşum süreleri	s	1.5
Statik tren Kütlesi	ton	212	Statik tren Kütlesi	ton	240
Dinamik tren kütlesi	ton	224	Dinamik tren kütlesi	ton	256
Döner kütle	ton	12	Döner kütle	ton	16

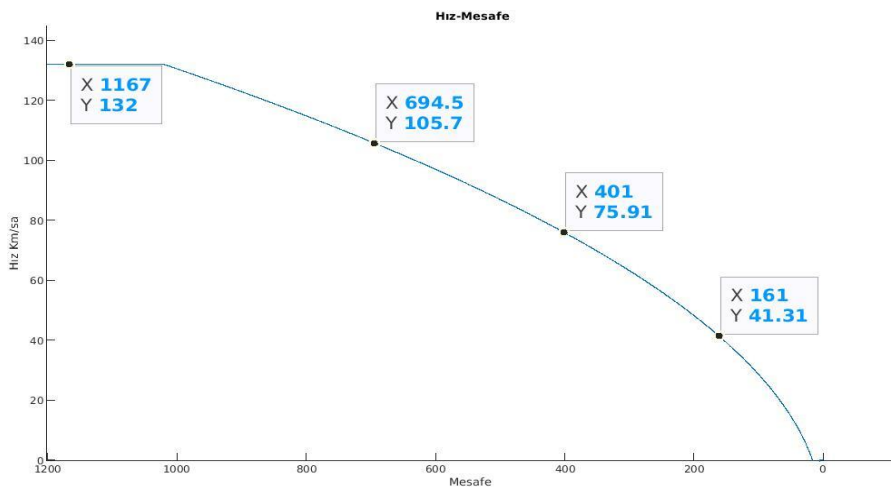
4.4.1 Araç-A emniyetli fren modeli

Örnek bir Araç-A parametreleri ile beraber Matlab programında formülasyona girildi yapılarak bir kod oluşturulmuş ve grafik arayüzü yardımı ile parametrelerin etkisi frenleme modeli üzerinde incelenmiştir.

Çizelge 4.4 : Araç – A emniyetli fren modeli parametreleri.

Parametre	Birim	Değer
Üst hız sınırı	km/sa	132
Hareket yetkisi/hız limiti değişim noktası/çakışma noktasına kalan mesafe	m	1200
Mevcut konum ile çakışma noktası konum arası eğim farkı	‰	-1
Çakışma noktasında izin verilen/düşmesi gereken hız	m/s	0
Mevcut konumda tren ile çakışma noktası arası minimum eğimden dolayı hızlanma	m/s ²	1.21
Hız belirsizliği	m/s	1
Maksimum hız	km/sa	120
Maksimum ivme	m/s ²	1.1
Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s ²	0.85
Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süreleri	s	1.5
Süzülme ve acil durum freni oluşum süreleri	s	1.2
Statik tren kütlesi	ton	212
Dinamik tren kütlesi	ton	224
Döner kütle	ton	12
Emniyet payı	m	15

Şekil 4.15’da parametrelerin Matlab algoritmasına girildiğinde; çakışma noktasına 1200 metre mesafe kaldığında trenin acil durum fren hızının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.15 : Araç-A 132 km, 1200 m.

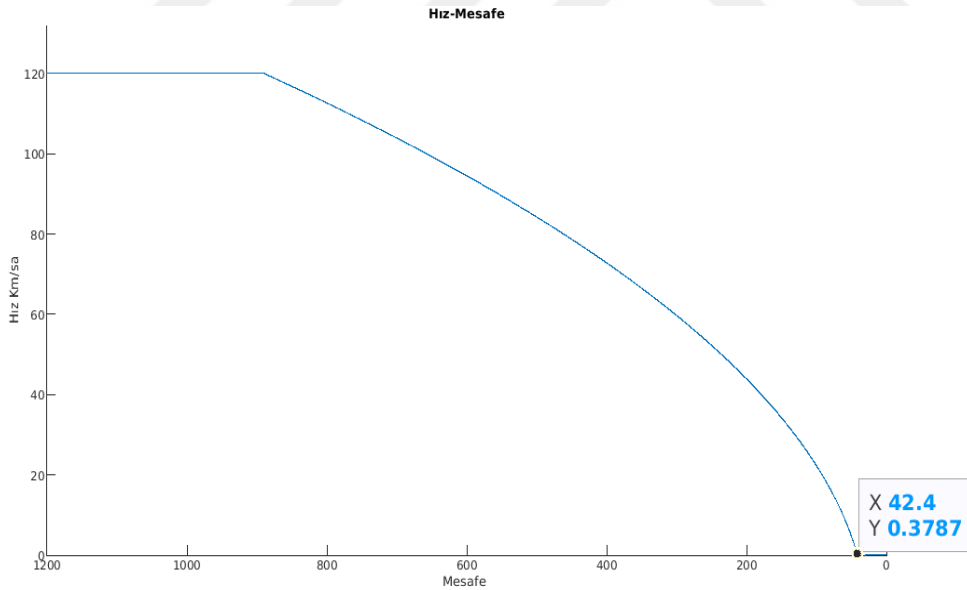
132 km/sa hızla giden trenin acil durum freni uygulamasına başladığı nokta olarak 1048 metredir. Bu metreden sonra çakışma noktasına kalan mesafeye kadar tren acil durum uygulanması için gereken hız limit grafiği gösterilmiştir. Grafikte işaretlenen noktalara bakıldığında;

- 694 metre mesafe kaldığında 105,7 km/sa
- 401 metre mesafe kaldığında 75,91 km/sa
- 161 metre mesafe kaldığında 41,31 km/sa

Acil durum fren hızı grafikte görülmektedir. Bu hızların üzerine çıktığında acil durum freni tetiklenecektir. Grafik başka bir ifade ile girilen parametrelere göre trenin 1038 metrede acil durum fren hızını olan 132 km'den kademeli olarak düşürdüğü görülmektedir.

Matlab grafik arayüzünde;

- Emniyet Payı 15 metre yerine 40 metreye çıkarıldığında,
- Üst hız limiti 132 km yerine 120 km girildiğinde,

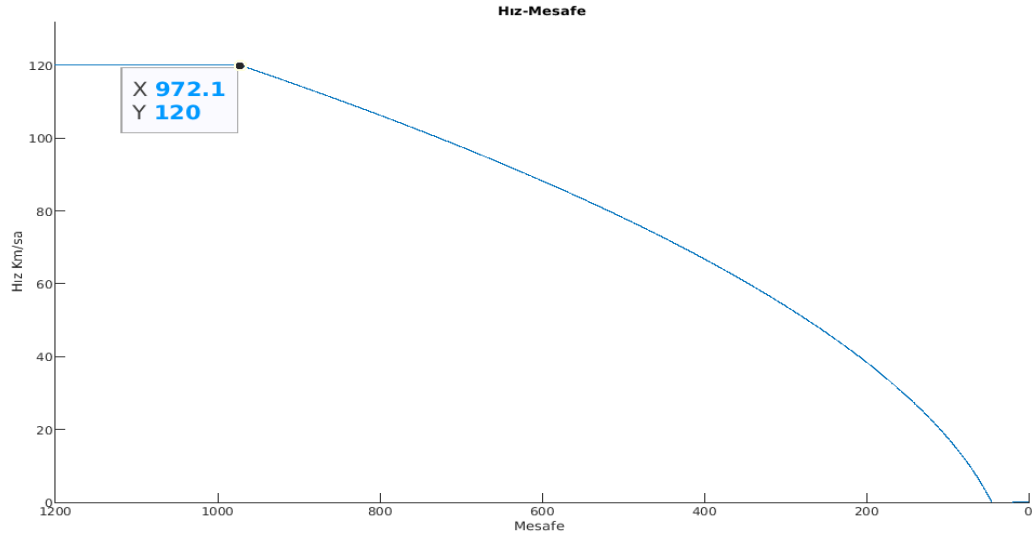


Şekil 4.16 : Araç-A hız sınır değişimi.

Şekil 4.16 incelendiğinde trenin 40 metre öncesinde duracağı ve üst hız limitinin 120 km olarak girildiğinde 870 metrede trenin yavaşlamaya geçtiği görülmektedir.

Matlab grafik arayüzünde;

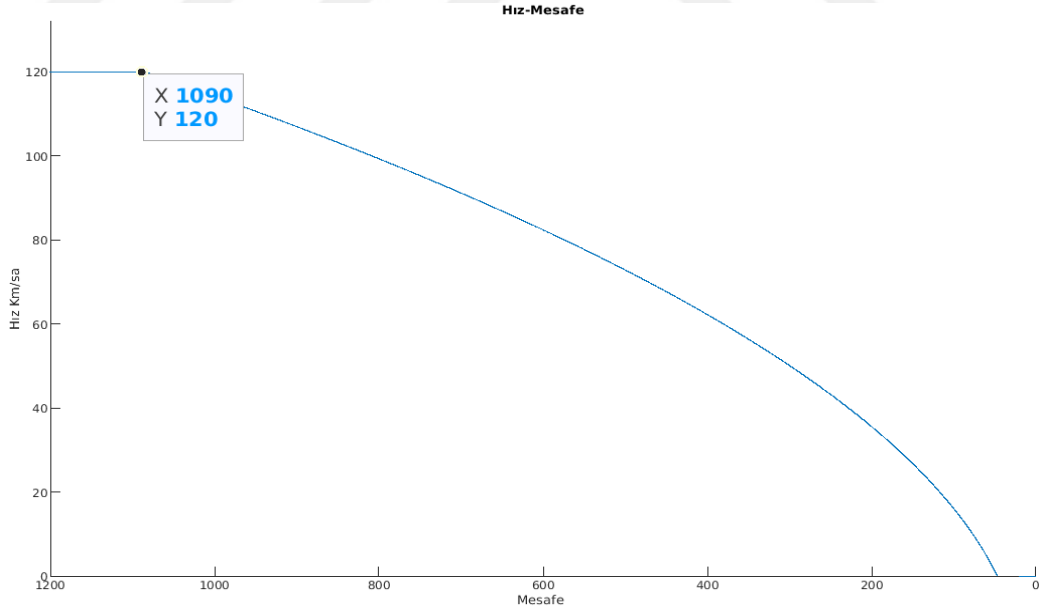
- Hız belirsizliği 1 m/s yerine 4 m/s girildiğinde,



Şekil 4.17 : Araç-A hız belirsizliği değişimi.

Şekil 4.17’de 870 metre olan acil durum freni hızı düşme sınırının daha önceden başladığı görülmektedir. Burada ki neden trenin hızının yaklaşık 14.4 km/sa hız yanlış ölçüldüğünü parametrik olarak girilmesi ve trenin bu hata için acil durum freni uygulanacak hızı 972.1 metrede başlattığı görülmektedir.

Grafik arayüzünde;



Şekil 4.18 : Araç-A GEBR değer değişimi.

Şekil 4.17’de 40 metre emniyet payı, 120 km üst hız sınırı, 4 m/s hız belirsizliği parametrelerine 0,80 m/s² GEBR değeri de eklenerek 972 metrede 120 km olan acil durum freni uygulama hızı oranı 0,05 düşürüldüğünde yaklaşık 120 metre önceden

1090 metre kala aracın fren uygulama hızını düşürdüğü görülmektedir (Şekil 4.18). GEBR değerleri 0,01 değer düşürülerek 1200 metre mesafe kala trenin 120 km hızı ile acil durum freni uygulama hızı düşme noktası aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Farklı GEBR değerlerinin frenleme modeli üzerindeki etkisi.

GEBR Değeri (m/s^2)	120 km olan acil durum fren hızının düşmeye başladığı mesafe (m)
0,80	1090
0,79	1099
0,78	1107
0,77	1119
0,76	1132
0,75	1148
0,74	1162
0,73	1175
0,72	1189
0,70	1202

Çizelge 4.5 incelendiğinde bu parametreler kullanılarak GEBR değeri değişiminin emniyetli fren modeli üzerine etkisi görülmektedir. Her bir 0,01 düşüşte acil durum freni uygulanacak mesafeyi yaklaşık 13 metre öne çektiği görülmektedir. GEBR değerinin önemi ve acil durum fren hızı üzerindeki etkisi çizelgede görülmektedir.

Trenler arası mesafe belirlenmesinde sadece frenleme mesafesini dikkate aldığımızı varsayarak GEBR değer değişimini sefer sıklığı üzerine etkisini gösterme açısından 120 km/sa hızla giden tren saniyede yaklaşık olarak 33,3 metre ilerleyecektir. Bu durumda 0,80 GEBR değeri olan bir hat bölgesinde trenler arası mesafeye x dememiz durumunda çizelgede gösterildiği üzere farklı GEBR değerlerinde sefer sürelerinin değişimi verilmiştir. Bu varsayımlar altında GEBR değerinin düşmesi durumunda trenler arası mesafenin artacağı ve sefer sıklığının düşeceği varsayılabilir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 : Farklı GEBR değerinin sefer sıklığı üzerine etkisi

GEBR Değeri (m/s^2)	120 km ilerleyen trende belirli hat bölgesinde sefer süresi değişimi (s)
0,80	x
0,75	x+2
0,70	x+4

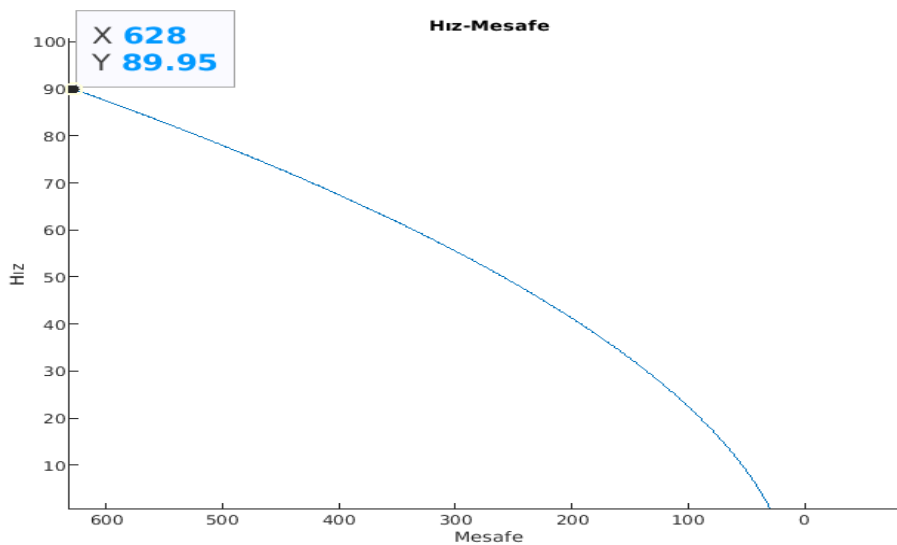
4.4.2 Araç-B emniyetli fren modeli

Örnek bir Araç-B parametreleri ile beraber Matlab programında formülasyon girdi yapılarak bir kod oluşturulmuştur. Formülasyona ikinci bir araç parametresi girilerek hesaplamanın doğrulanması amaçlanmıştır.

Çizelge 4.7 : Araç – B emniyetli fren modeli parametreleri.

Parametre	Birim	Değer
Üst hız sınırı	km/sa	90
Hareket yetkisi/hız limiti değişim noktası/çakışma noktasına kalan mesafe	m	1000
Mevcut konum ile çakışma noktası konum arası eğim farkı	‰	-1
Çakışma noktasında izin verilen/düşmesi gereken hız	m/s	0
Mevcut konumda tren ile çakışma noktası arası minimum eğimden dolayı hızlanma	m/s ²	1.44
Hız belirsizliği	m/s	1
Maksimum hız	km/sa	80
Maksimum ivme	m/s ²	1.21
Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s ²	0.75
Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süreleri	s	2
Süzülme ve acil durum freni oluşum süreleri	s	1.5
Statik tren kütlesi	ton	240
Dinamik tren kütlesi	ton	256
Döner kütle	ton	16
Emniyet payı	m	30

Çizelge 4.7'daki parametreleri Matlab grafik arayüzünde bulunan girdi değerlerine yazdığımızda grafik çıktımız verilmiştir.

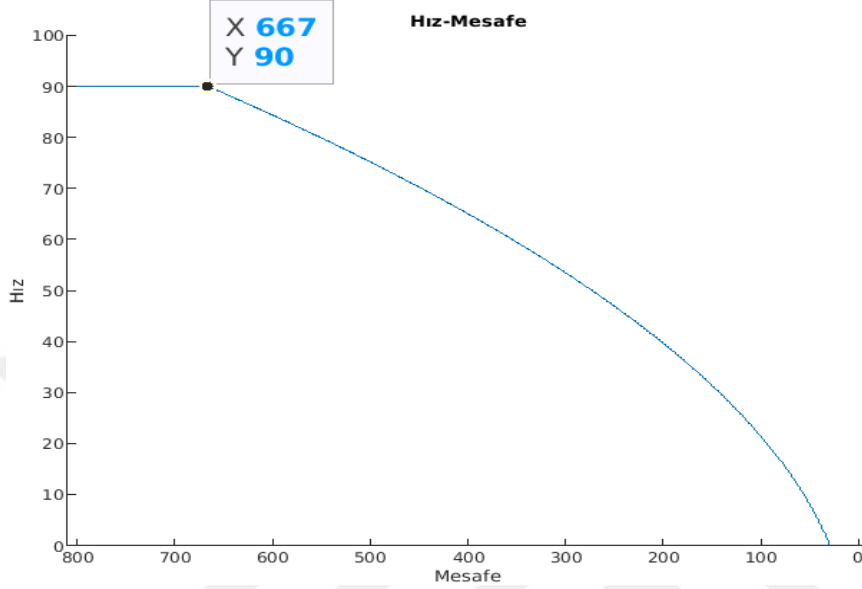


Şekil 4.19 : Araç-B 90 km, 1000 m.

Şekil 4.19’de görüldüğü üzere girdi parametreleri girildiğinde 90 km/sa hızla giden bir tren 628 metre kala acil durum freni uygulama hızını düşürmeye başlamaktadır.

Grafik arayüzünde;

- 0,75 m/s² olan garanti edilen acil durum fren oranı 0,70 m/s² olarak girildiğinde;



Şekil 4.20 : Araç-B GEBR değer değişimi.

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere 628 metre olan acil durum freni uygulama hız düşüş noktası GEBR değerine bağlı olarak yaklaşık 40 metre geriye doğru çekilmiştir.

Çizelge 4.8 : Farklı GEBR değerlerinin frenleme hızı üzerine etkisi.

GEBR Değeri (m/s ²)	90 km olan acil durum fren hızının düşmeye başladığı mesafe (m)
0,70	667
0,69	676
0,68	687
0,67	696
0,66	705
0,65	714
0,64	729
0,63	745
0,62	761
0,61	777

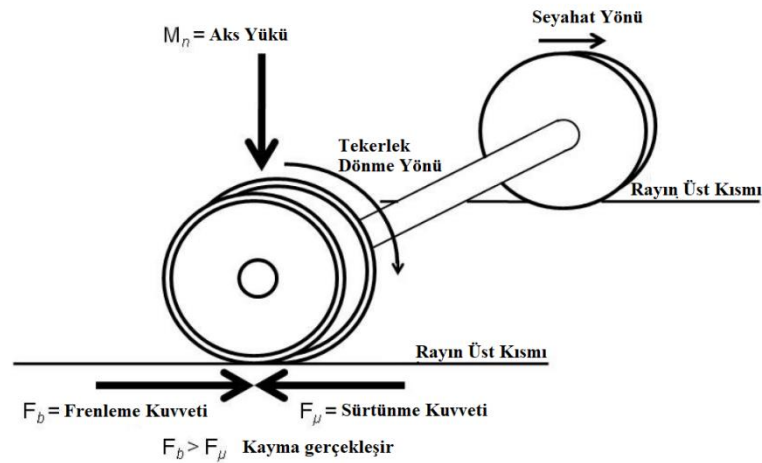
Çizelge 4.8’den anlaşılabacağı üzere farklı GEBR değerlerinin mesafe üzerindeki etkisi azımsanamayacak büyüklüktedir. Araç-A ve Araç-B parametrelerine göre acil durum fren hızı değişimi grafikler üzerinden gösterilmiştir. Buna ek olarak farklı GEBR

değerlerinin acil durum fren hızını ne zaman düşürmeye başladığı mesafeler gösterilmiştir.

4.4.3 GEBR değerinin emniyetli fren modeli üzerindeki etkisi

Emniyetli fren model formülasyonu farklı araç parametrelerine göre incelendiğinde en fazla etki eden parametrenin garanti edilen acil durum fren değeri olduğu görülmektedir. Garanti edilen acil durum freni (GEBR) genelde düz açık hatlarda çevre koşullarında ve bir trende özel uygulamada var olabileceği tahmin edilebilecek en kötü durumdaki güvenilir fren donanımının, arıza modları altındaki bir trenin elde ettiği minimum acil durum fren hızı değerini göstermektedir, GEBR, genel olarak azami yolcu yükü (varsa kar ve buz yükü), asgari öngörülen adezyon seviyeleri, azami tasarım ve arka rüzgâr dikkate alır. Bu nedenle hattaki en kötü adezyon seviyelerinin belirlenmesi önemlidir.

Araç üreticilerinin aracın işleyeceği hattaki adezyon (ray/tekerlek arası sürtünme) oranını dikkate alarak verdikleri bu katsayı tekerleğe uygulanan kütlenin ve geçerli sürtünme katsayısının bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Frenleme kuvveti, tekerlek ile ray arasındaki sürtünme kuvvetlerinin karşıt olduğu frenleme sistemi vasıtasıyla tekerleğe uygulanır. Şekil 4.21’de görüldüğü üzere frenleme kuvveti, sürtünme kuvvetinden büyük olduğunda kayma gerçekleşecektir.



Şekil 4.21 : Adezyon kuvvet diyagramı.

Adezyon katsayılarının hesaplanmasında literatürde araç tiplerine (lokomotif, hızlı trenler, hafif raylı araçlar vb.) ve kullanılacağı hatta göre ray ve tekerlek arası sürtünme davranışını hıza bağlı olarak ifade eden farklı deneysel formüller vardır [37].

Japon elektrikli tren setleri;

Kuru rayda

$$\mu_J = \frac{27.2}{85 + V} \quad (3.11)$$

Islak rayda

$$\mu_J = \frac{13.6}{85 + V} \quad (3.12)$$

Alman Elektrikli tren setleri;

Kuru rayda

$$\mu_J = 0.116 \frac{9}{42 + V} \quad (3.13)$$

Islak rayda

$$\mu_J = 0.7 * (0.116 \frac{9}{42 + V}) \quad (3.14)$$

Bu formüller dışında Curtius-Kniffler formülünde [40];

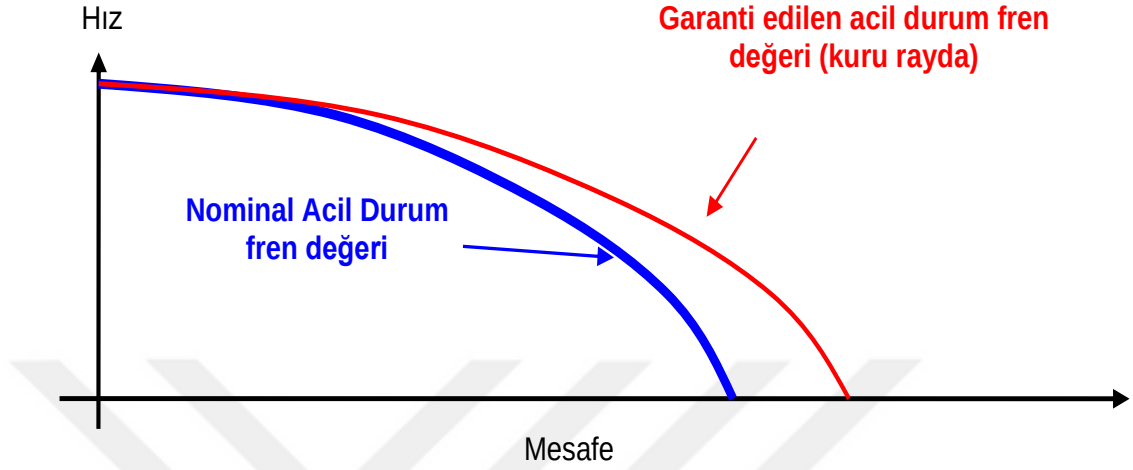
$$\mu = \frac{2,1}{v + 12,2} + 0,161 \quad (3.15)$$

Adezyon Katsayısı (μ), Hız, km/s(V) değerlerinden hesaplanılarak adezyon katsayısı elde edilmektedir.

Tren için gerekli olan adezyon katsayısı, trenin yaptığı adezyon katsayısının üzerine çıkarsa, kayan bir tekerlek setinin veya tekerlek kızak koruma cihazı tarafından yapılan düzenlemenin bir sonucu olarak teorik bir hesaplama ile karşılaştırıldığında durma mesafesinin artmasına neden olabilir [38].

Araçlarda tekerlek ve ray arasında maksimum adezyon elde etmek amacıyla genel hassas ve elektronik olarak kontrol edilen bir kayma ve kızaklama önleme sistemi bulundurulur [42]. Bu sistem frenleme esnasında tekerleklerin kızaklayarak apleti (tekerlekte oluşan düzleşme durumu) olmasını ve hareket esnasında patinajı önleyen sistemlerdir. Cer kontrol sistemi ve frenleme sistemi ile entegre olarak çalışırlar. İstanbul yeni havalimanı araç alım şartnamesinde de kayma kızaklama önleyici bir gereksinim bulunmaktadır [39]. En kötü adezyon değerleri alınarak aracın bu değerde bile hızlanma ivmesini test ortamında doğrulaması gerekir.

Şekil 4.22’de gösterildiği gibi frenleme performansının kuru raylar üzerindeki dağılımını temsil etmek nispeten kolay olsa da ıslak raylarda fren yaparken ortaya çıkan fiziksel hesaplamaların bugün modellenmesi son derece zordur.



Şekil 4.22 : Kuru raylarda acil durum frenleme performansı

ERTMS sistemlerinde adezyon katsayılarının sürücü veya operatör tarafında değiştirilebildiği görülmektedir [43]. Ulusal değerler vasıtasıyla, araç içi ekipmanda kuru raylar ve ıslak raylar için referans koşullarına göre mevcut olan adezyon katsayısı gösterilmektedir. Adezyon katsayısı ilgili hat bloğu için seçildiğinde araç üstü sistemi o bölgede araç frenleme modelini uygun şekilde güncellemektedir. Kaygan ray sürücü tarafından seçildiğinde, tüm konumlar düşük adezyon koşullarını dikkate almaktadır.

GEBR değerinin belirlenmesi sadece adezyon katsayısına bağlı bir değer değildir. Bu değeri en çok adezyon etkiler fakat aşağıdaki diğer parametrelere de bağlıdır;

- Bazı frenleme elemanlarının (balatalar, silindirler vb.) performansının dağılımı,
- Fren sistemi bileşenlerinin güvenilirliği. Burada genellikle yapılan bir hata, trenin garanti edilen acil durum fren güvenilirliği ile araç üstü emniyet hedeflerini karıştırmaktır. Örneğin bir emniyetli fonksiyon tolere edilebilir tehlike oranı 10^{-9} /saat olduğunu varsayalım. Bu değer acil bir durum ile karşılaşıldığında frenlerin tetiklenme işleminin kabul edilebilir arıza oranını temsil etmektedir. Diğer bir ifade ile acil durum frenleme sisteminin

güvenilirliğinin bir raylı sistem genel emniyeti üzerinde bir etkisi olacaktır, ancak bu sadece araç üstü bilgisayarın tehlike oranından farklı bir katkıdır.

- Fren sisteminin yapısı (bağımsız bileşenlerin sayısı),
- Kayma kızaklama sisteminin verimliliği.

Çizelge 4.9'da İstanbul M11 metro hattında işletmenin belirlediği adezyon ve tek bir boji sistem kaybında GEBR değerleri verilmiştir.

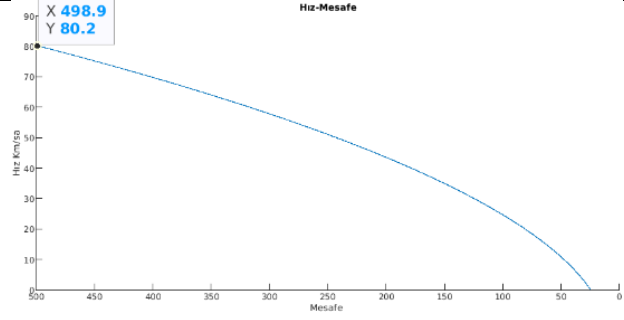
Çizelge 4.9 : İstanbul M11 metro hattı adezyon ve GEBR değerleri.

Adezyon Katsayısı	Tek bir boji sistem kaybında GEBR
Kuru Rayda (0.14)	1.08
0.13	0.85
0.12	0.79
0.11	0.72
0.10	0.66
0.09	0.56
0.08	0.50

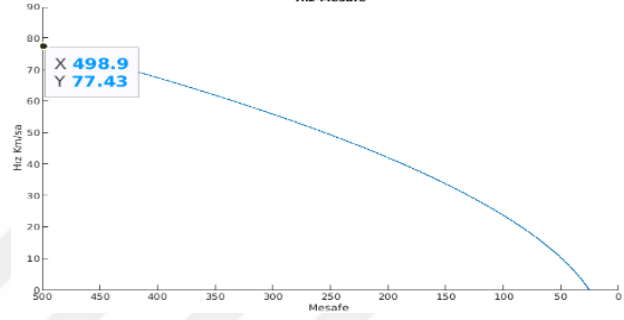
Araç B parametreleri alınarak farklı GEBR değerlerinin hız üzerine etkisinin anlaşılması için 500 metre mesafe girilmiştir. Çizelge 4.10'da farklı GEBR değerlerinin çakışma noktasına 500 metre mesafe kalan bir tren üzerindeki acil durum fren hızı değişimi gösterilmiştir. 0,75 GEBR değerinden başlanılarak 0,55 değerine kadar 5 farklı GEBR değerinin etkisini gösteren çizelgede yaklaşık olarak her 0,05 ivme oranı azaltılmasında trenin acil durum freni uygulama hızının 2,5-3 km/sa düştüğü, acil durum fren hızının düşmeye başladığı mesafenin ise yaklaşık 60 metre arttığı gözlemlenmiştir. Kent içi ulaşımında düşük sefer aralığı hedefleri düşünüldüğünden GEBR değerinin göz ardı edilemeyecek etkileri olduğu görülmektedir. Farklı hat bölgelerinde farklı adezyon seviyeleri olmaktadır. Tünelde veya açık hatta en kötü adezyon değeri aynı olarak alınabilir fakat bu frenleme mesafelerinin artmasına ve böylelikle işletme performansında azalmaya sebep olacaktır. Bu nedenle aynı hatta farklı GEBR değerleri girilerek işletmenin daha yüksek performansta çalışması sağlanmaktadır. Matlab programı yardımıyla oluşturulan formülasyon ve örnek araç parametreleri temel alınarak oluşturulan fren modelinin doğrulanması önemlidir. Bu amaçla bir sonraki başlıkta modelin doğrulanması işlevi opentrack programı ile karşılaştırılarak gerçekleştirilecektir.

Çizelge 4.10 : Farklı GEBR değerlerinde acil durum fren hız değer değişimi.

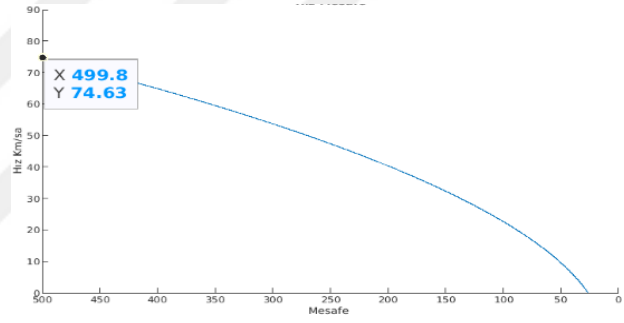
GEBR: 0,75 m/s²
Mesafe: 500 m
Hız: 80,2 km/sa



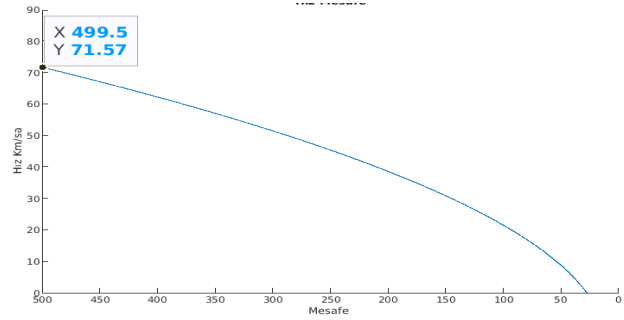
GEBR: 0,70 m/s²
Mesafe: 500 m
Hız: 77,43 km/sa



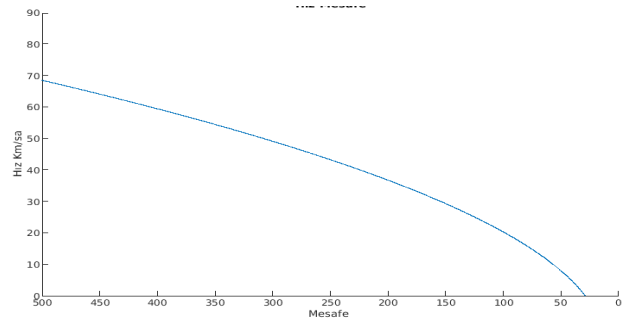
GEBR: 0,65 m/s²
Mesafe: 500 m
Hız: 74,63 km/sa



GEBR: 0,60 m/s²
Mesafe: 500 m
Hız: 71,57 km/sa



GEBR: 0,55 m/s²
Mesafe: 500 m
Hız: 68,66 km/sa



4.5 Emniyetli Fren Modelinin Doğrulanması

Emniyetli fren temel modeli, bu tez boyunca farklı araç ve parametrelere göre değiştirilerek acil durum fren hızı hesaplaması yapılmıştır. Emniyetli fren modelinin en kötü durumda çakışma noktasının sonunda veya bu mesafeden önce durmasını garanti etmesi gerekmektedir. Bu durum modelin doğrulanması ihtiyacını doğurmuştur.

Doğrulama olarak raylı sistem sektöründe kendini ispatlamış bir program olan OpenTrack simülasyon aracı kullanılacak ve benzer girdi parametreleri ile oluşturulan modellerin karşılaştırılması sağlanacaktır [40].

Şekil 4.23’de gösterildiği gibi OpenTrack programında benzer parametrelerle işlem yapılması amacıyla öncelikle kullanılacak olan Araç-A parametreleri girilmiştir.

The image shows two screenshots from the OpenTrack software interface. The left screenshot is the 'Engines' window, and the right screenshot is the 'Trains - Edit' window.

Engines Window:

- Engine: GYH4 (2 / 21)
- Engine Name: GYH4
- Engine Description:
- Load [t]: 240.000
- Resistance Factor: 3.30
- Adh. Load [t]: 240.000
- Rot. mass Factor: 1.08
- Length [m]: 81
- Speed max. [km/h]: 120
- Tractive Effort max. [kN]: 270
- Length [m]: 81
- Speed max. [km/h]: 120
- Tractive Effort max. [kN]: 270
- System: Universal Electric, Thermic, Thermoelectric, AC 15 kV 16 2/3 Hz
- Diagram Color: [Black]
- Adhesion [%]: bad: 80, normal: 125, good: 150
- Loss Function: [Linear]
- Selected Point: v [km/h]: [], Z [kN]: [], P [MW]: [], linear
- Visual Rectangle: Speed max. [km/h]: 130, Tractive Effort max. [kN]: 290, Min. [kN]: 0
- Buttons: Set Data, Save Depot, New Depot, Open Depot, Del. Engine, New Engine

Trains - Edit Window:

- Train Name: CanBerk
- Description: CanBerk
- Type: Commuter / Regio Train
- Category: GYH
- Engines:
- Pos. Name Load [t] Len. [m]
- 1 GYH4 240.000 81
- Σ Load [t]: 240.000 Σ Len. [m]: 81
- Trailers:
- Pos. Name Load [t] Len. [m]
- Σ Load [t]: 0.000 Σ Len. [m]: 0
- Resistance Equation: Davis Formula [F=A+B*v+C*v^2]
- A: 3.199 B: 0.04304 C: 0.000504 Unit: kN
- Starting Res. [N/t]: [] below Speed [km/h]: []
- Gradient: Distributed Mass per Train
- Curve: Roeckl Formula Standard Gauge (Trains) [%]: 100.0
- Acceleration (Train related Settings): Max. Acceleration [m/s^2]: 1.10 Max. Drawbar Force [kN]: []
- Acc. Delay [s]: 1 Min. Time to hold Speed [s]: []
- Acc. Delay at Stop [s]: 2
- Deceleration: Deceleration Function: Default
- From [km/h] To [km/h] Dec. [m/s^2]
- 0 v max. -0.70
- Braked Weight Percentage (BWP) [%]: 100
- a = - (C1+C2*BWP) C1: [] C2: [] Result [m/s^2]: []
- Use Dynamic Braking: [] above [km/h]: []
- Correct Deceleration on Gradients [m/s^2/‰]: 0.007
- Min. Dec. [m/s^2]: -0.10 Max. [m/s^2]: -1.50
- ETCS: [] Dec. Delay [s]: 1.0 above [km/h]: 0.0
- Buttons: Cancel, OK

Şekil 4.23 : OpenTrack Araç-A tren parametrik verileri.

Oluşturulan Araç-A parametrik verileri aşağıda sıralanan OpenTrack tren parametreleri kısmına yazılmıştır;

- Kütlesi,

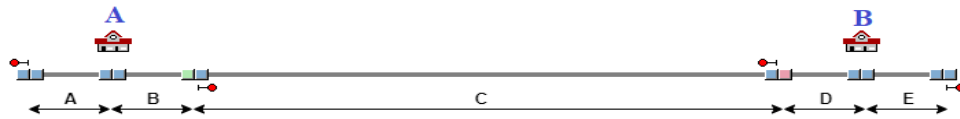
- Döner kütle faktörü,
- Uzunluğu,
- Maksimum hızı,
- Maksimum çekiş gücü,
- Adezyon katsayıları,
- Hızlanma ivmesi,
- GEBR değeri.

Frenleme gecikme süresi, trenin en kötü koşullarda emniyetli fren modeli hesaplanarak oluşturulan Matlab uygulama çıktısıyla karşılaştırılacaktır. OpenTrack programına girilen parametreler formülasyonu doğrulamak amacıyla Matlab programında grafik arayüzü ile girdi yapılmıştır (Çizelge 4.11)

Çizelge 4.11 : Matlab parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Üst hız sınırı	km/sa	120
Hareket yetkisi/hız limiti değişim noktası/çakışma noktasına kalan mesafe	m	3200
Mevcut konum ile çakışma noktası konum arası eğim farkı	‰	-5
Çakışma noktasında izin verilen/düşmesi gereken hız	m/s	0
Mevcut konumda tren ile çakışma noktası arası minimum eğimden dolayı hızlanma	m/s ²	1.44
Hız belirsizliği	m/s	1
Maksimum ivme	m/s ²	1.21
Garanti edilen acil durum fren değeri	m/s ²	0.85
Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme süreleri	s	2
Süzülme ve acil durum freni oluşum süreleri	s	1.5
Statik tren kütlesi	ton	240
Dinamik tren kütlesi	ton	256
Döner kütle	ton	16
Emniyet payı	m	20

Şekil 4.24’de görüleceği üzere Araç-A parametre değerleri girdi olarak yazıldıktan sonra emniyetli fren modelinin işleyeceği hatta ait parametreleri girdi yapmak amacıyla sanal bir hat oluşturulmuştur.



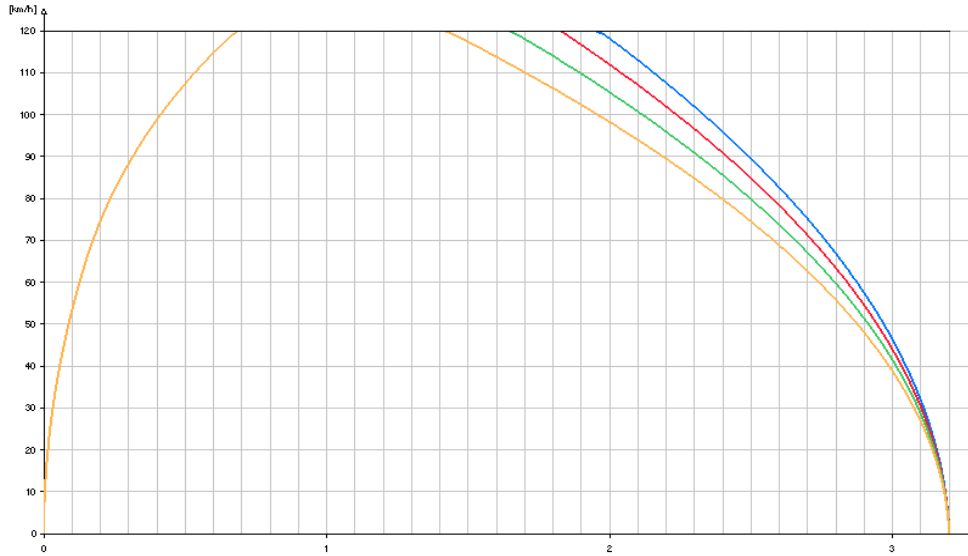
Şekil 4.24 : Sanal hat.

A ve B istasyonlarının bulunduğu sanal hatta sinyalden sinyale prensibi ile güzergâh kurulmaktadır. A'dan B istasyonuna gidecek bir trende emniyetli fren eğrisi hesaplanacaktır. Çizelge 4.12'de hattın uzunluğu ve eğim değerleri gösterilmektedir. Bu hat bölümünde herhangi bir kurb olmadığı varsayılmıştır.

Çizelge 4.12 : Sanal hat parametreleri.

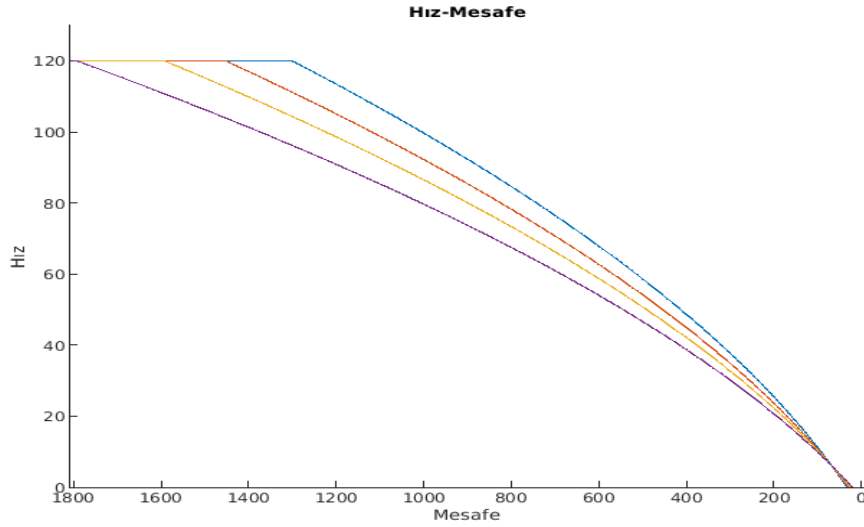
Hat Bölgesi	Uzunluk (m)	Eğim (%)
A	100	-5
B	100	-5
C	3000	-5
D	100	-5
E	100	-5

Parametreleri girilmiştir. OpenTrack programı ve Matlab çıktıların karşılaştırılması bu ortak parametrelere göre yapılmıştır. Şekil 4.26 OpenTrack programı kapsamında 3200 metro boyunca aracın hızlanması ve 120 km/sa hız ile giden trenin en kötü durumda frenleme mesafesi gösterilmiştir.



Şekil 4.25 : Matlab emniyetli fren modeli.

Şekil 4.25'da hızlanma ve frenleme mesafeleri görülmektedir. Bu kapsamda hızlanma göz ardı edilmiştir. Matlab programı kapsamında 1800 metre boyunca aracın en kötü durumda 120 km/sa hızla farklı GEBR değerlerine göre frenleme mesafeleri incelenmiştir.



Şekil 4.26 : OpenTrack emniyetli fren modeli.

OpenTrack programı ve Matlab çıktılarının karşılaştırılması bu ortak parametrelere göre yapılmıştır.

Çizelge 4.13 : En kötü durum frenleme mesafesi karşılaştırılması.

Renk (Opentrack-Matlab)	GEBR	OpenTrack	Matlab
Mavi	0,85 m/s ²	1220	1290
Kırmızı	0,80 m/s ²	1350	1425
Yeşil-Sarı	0,75 m/s ²	1520	1580
Sarı-Mor	0,70 m/s ²	1750	1802

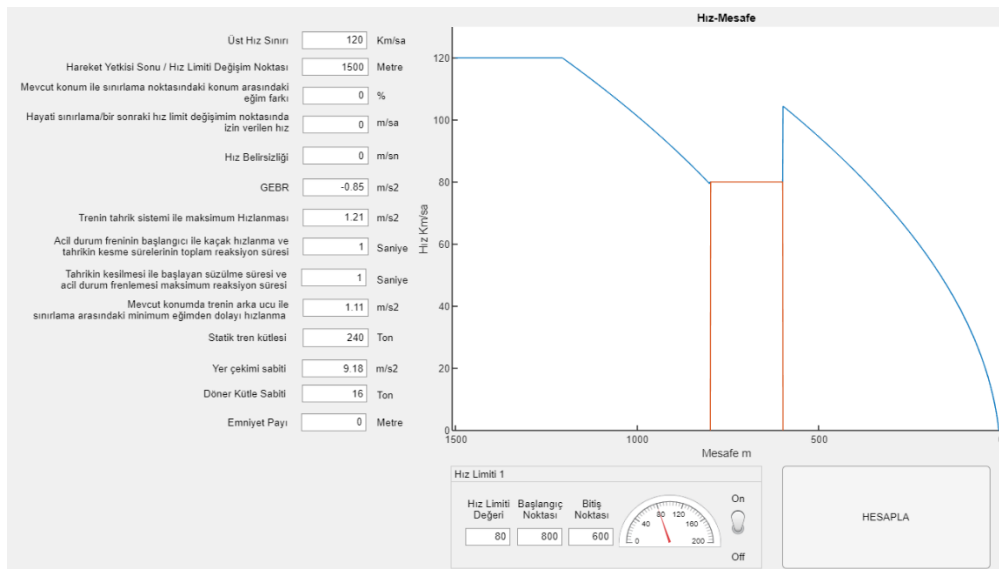
Çizelge 4.13’de 120 km/sa hızla hareket eden bir tren için iki modelin çıktı verilerini nicel olarak karşılaştırılmıştır. İki sonuç dizisinin sonucu olarak hesaplana mesafelerin yakın değerler olduğu görülebilir. Her iki programda da birebir aynı parametreleri girmek zordur. Bu nedenle bazı parametreler birleştirilmiş, bazı parametreler ek olarak girilmiştir. Bunlar;

- Süzülme, kaçak hızlanma ve acil durum freni oluşum süreleri OpenTrack programında ayrı ayrı bulunmadığı için tek bir gecikme süresi olarak girilmiştir.
- Ek olarak Matlab modeline hız belirsizliği (1 m/s) değeri girilmiştir.
- Ek olarak Matlab modeline emniyet payı (20 m) değeri girilmiştir.
- OpenTrack simülasyon programı günümüzde birçok profesyonel firma tarafından günlük olarak kullanılmaktadır [40]. Bu nedenle, benzer çıkan bu sonuçlarla Matlab modelinin doğru olduğu varsayılabilir.

4.6 Emniyetli Fren Modelinin Hız Limitleri ile Uygulanması

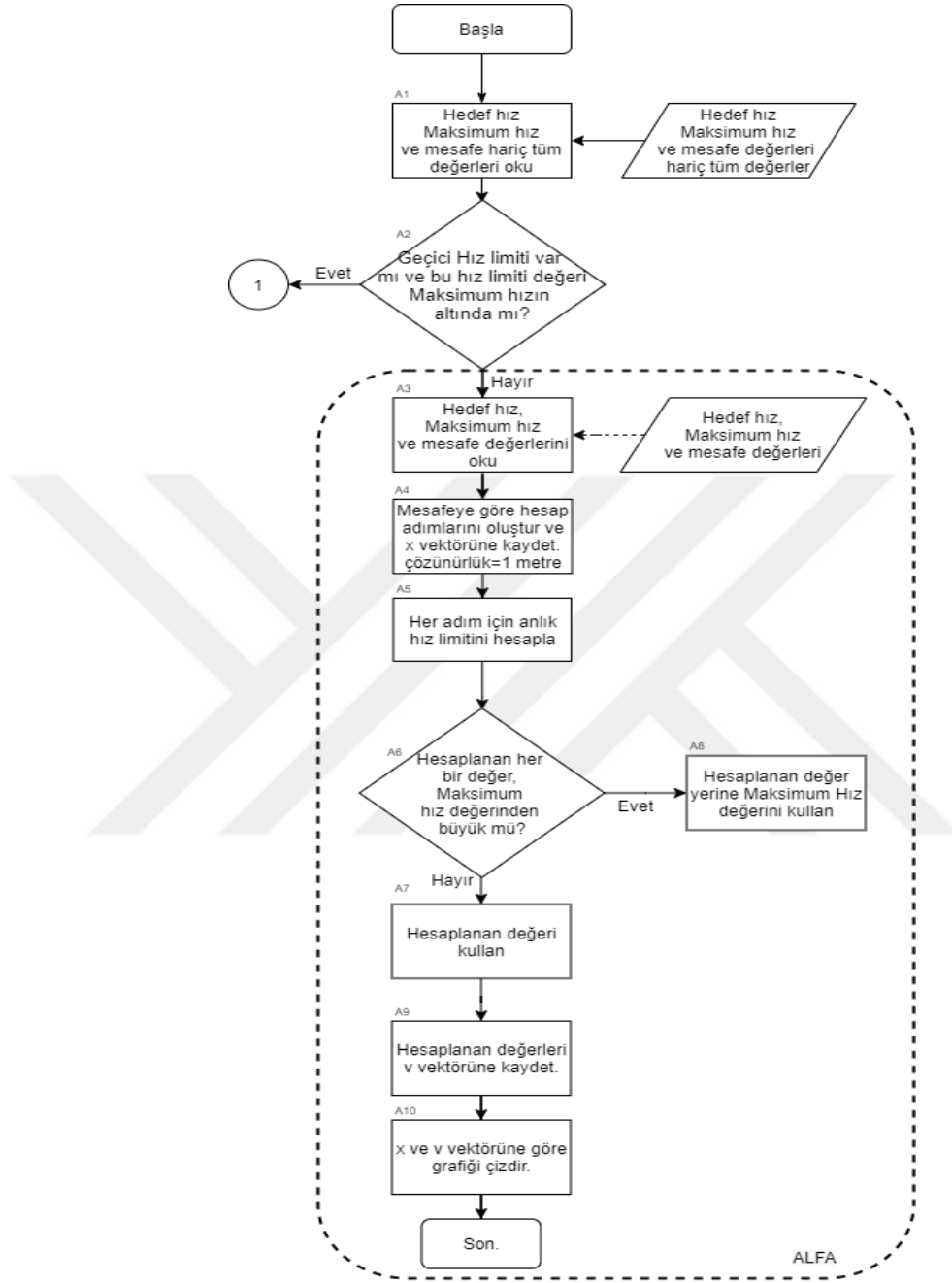
Bu bölüme kadar anlatılan emniyetli fren modeli herhangi bir zamanda sadece tek bir çakışma noktası için frenleme eğrileri hesaplama yeteneğine sahipti. Bu nedenle modelleme sürecinin bir sonraki aşaması olarak modele çakışma noktaları eklenerek modelin hız limitlerine göre hesap yapması sağlanmıştır. Algoritma Alfa ve Beta bölümlerinden oluşmaktadır. Temel frenleme modelinde hız limitlerinin olmadığı kısım alfa bölümündedir. Beta ise herhangi hız limiti olması durumunda fren modeli üzerinde işlem yapan bölümdür. Algoritmada geçen ifadelerin açıklamaları şu şekildedir;

- Hız limiti, genel olarak hareket yetkisi ile birlikte gelen veya geçici olarak hat bölgesinin istenilen kısmına uygulanan trenin ilgili bölgede gidebileceği en yüksek hız değeridir.
- Hesaplanan değer, çakışma noktalarına göre hesaplanan hız değeridir. Hesaplanan değer en kısıtlayıcı hız ilkesine göre belirlenmektedir.
- Maksimum hız, algoritmaya girdi parametrelerden biri olan ve ilgili hat bölgesinde hız limiti olmaması durumunda trenin gidebileceği en yüksek hız değeridir.
- Nihai hız, hedef noktaya (hareket yetkisinin son noktası) göre oluşturulan hız değeridir.



Şekil 4.27 : Matlab hız limitlerinin grafik arayüzünde gösterimi.

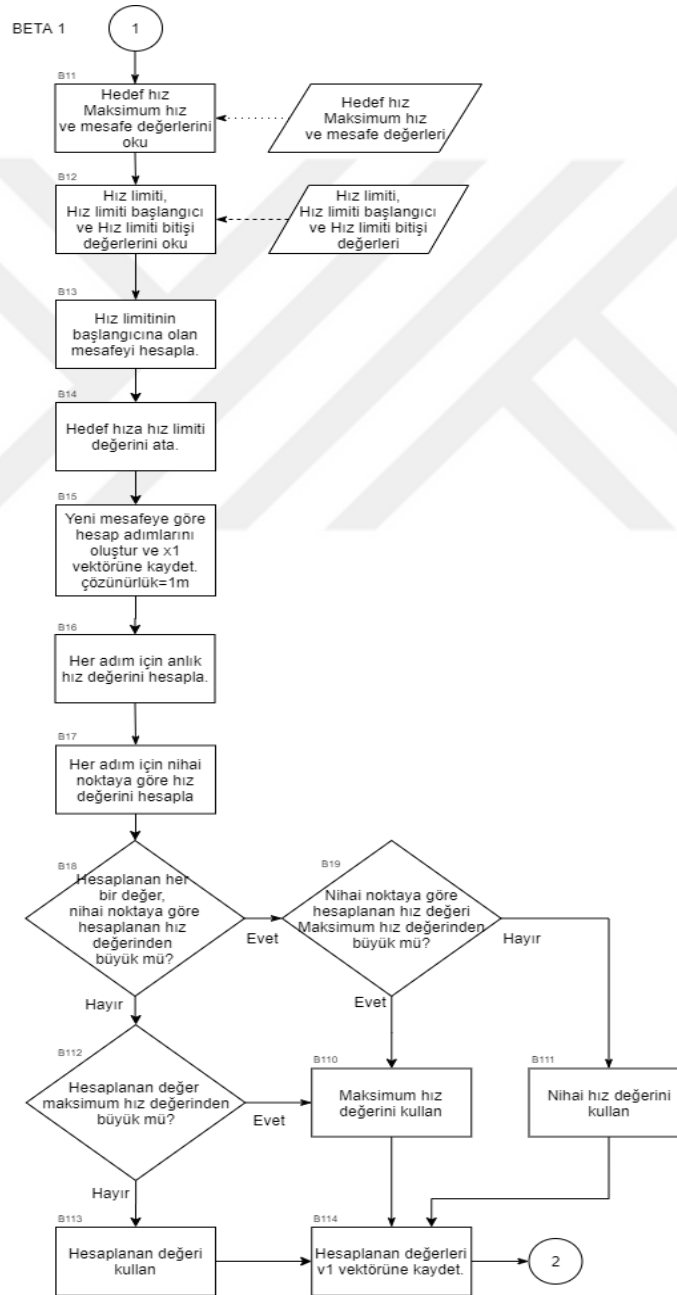
Şekil 4.27’de gösterildiği gibi Matlab grafik arayüzüne yeni bir bölüm eklenerek hız limiti değeri, başlangıç noktası ve bitiş noktası değerleri arayüz oluşturulmuştur.



Şekil 4.28 : Hız limit değışim noktaları kontrolü akış şeması (Alfa).

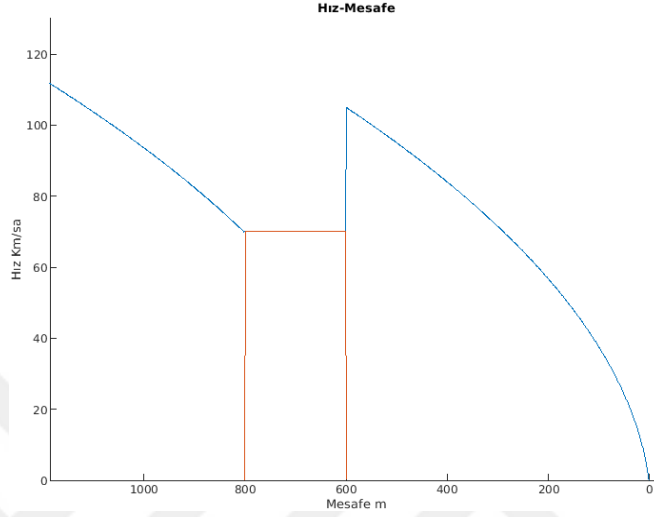
Şekil 4.28, A2 adımımda hareket yetkisi içerisindeki hız limitleri kontrol edilmektedir. Herhangi bir hız limiti olması durumunda algoritmanın Beta kısmına geçiş sağlanır. Hız limiti olmaması veya hız limiti maksimum hızın üstünde ise algoritma hedef noktada verilen hız limitine göre işlem yapmaktadır.

Hız limiti olması durumunda algoritma Beta bölümünden devam edecektir. Beta bölümü 3 bölümden oluşmaktadır. Beta 1 hız limitinin öncesindeki bölgeyi hesaplamaktadır. Beta 2 Hız limitinin olduğu bölgeyi hesaplar. Beta 3 Hız limiti sonrası hedef noktaya kalan bölgeyi hesaplar. Şekil 4.29'da gösterilen Beta 1 algoritması hız limit başlangıcına olan mesafeyi ve 1 metre çözünürlükte her adımda kullanıcı arayüzünden girilen parametreleri de dikkate alarak anlık hız değeri hesaplamaktadır. Anlık hız değeri ile birlikte Beta 1 algoritması sürekli olarak ilgili alandaki nihai noktaya göre hesaplanan hız ve maksimum hız değerlerini kontrol etmektedir.



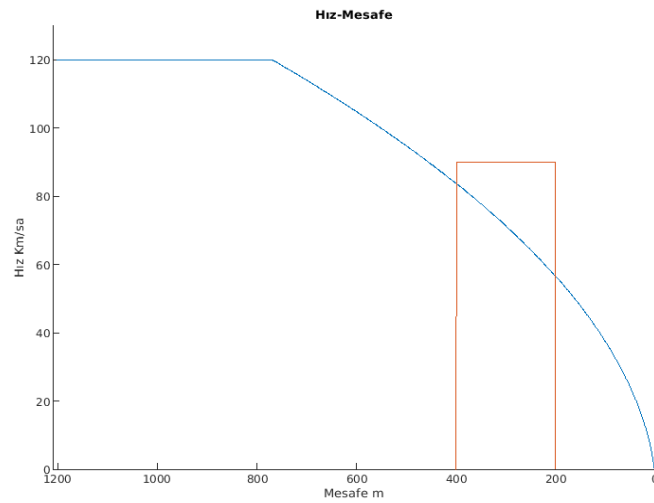
Şekil 4.29 : Beta 1 algoritması akış şeması.

B18 bölümünde hesaplanan değerin nihai hıza göre büyük veya küçük olması karşılaştırıldıktan sonra maksimum hız değerine göre bir karşılaştırma daha yapılarak hangi hız değerinin kullanılacağı belirlenmektedir. Başka bir ifade ile hesaplanan hız, nihai noktaya göre hesaplanan hız ve maksimum hız arasından en kısıtlayıcı olan değer acil durum fren hızı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.30 : Araç-A 800-600 metre arası 70 km/sa hız limiti uygulanması.

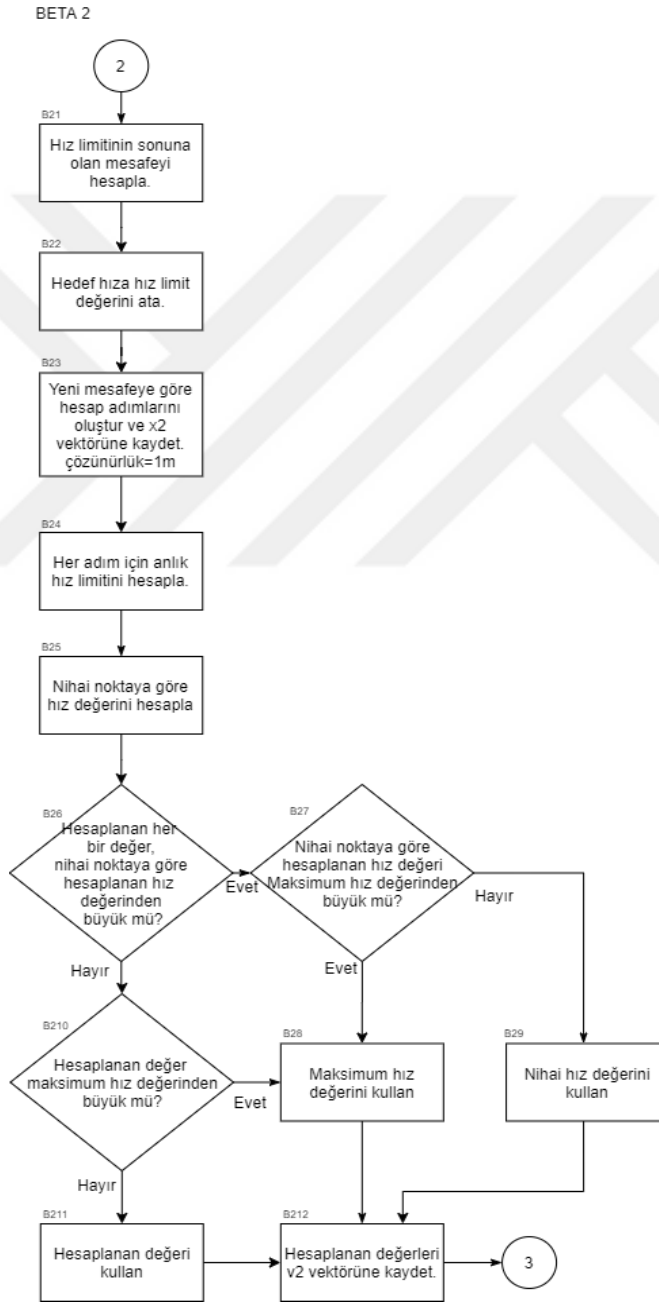
Şekil 4.30 araç-A parametreleri ile birlikte ve hedef noktasına 1200 metre olan bir hat bölgesinde; 800 m ile 600 m arasında 70 km/sa hız limiti girilerek elde edilmiştir. Bu durumda algoritmanın hesaplanan hız değerinin nihai hız değerinden düşük olduğu için hesaplanan değeri kullandığı görülmektedir.



Şekil 4.31 : Araç-A 400-200 metre arası 90 km/sa hız limiti uygulanması.

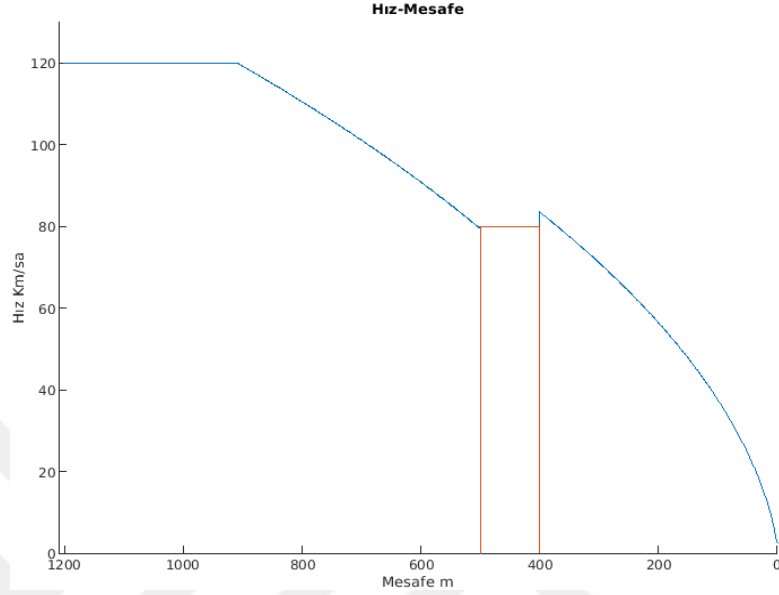
Şekil 4.31, 400 m ile 200 m arasına 90 km/sa hız limiti girilerek elde edilmiştir. Bu durumda algoritmanın hesaplanan hız değerinin nihai hız değerinden yüksek olduğu için nihai hız değeri kullandığı görülmektedir.

Hız limiti başlangıcına olan mesafe hesaplandıktan sonra hız limiti içerisinde iken algoritma Beta 2 bölümüne geçmektedir. Şekil 4.32’de hız limitinin sonuna olan mesafe ile birlikte nihai noktaya kalan mesafedeki hız değeri karşılaştırır ve en kısıtlayıcı hız ilkesi ile en kısıtlayıcı olan hız değeri kullanır.



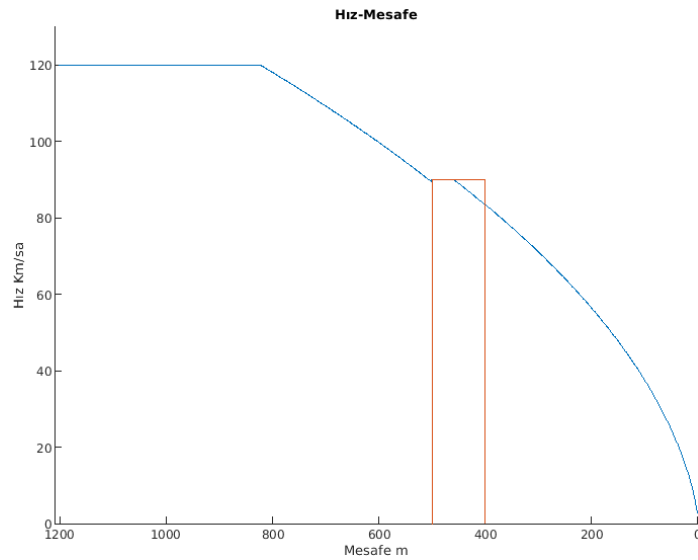
Şekil 4.32 : Beta 2 algoritması akış şeması.

Araç-A parametreleri ile beraber hedef noktasına 1200 metre olan bir hat bölgesine; Şekil 4.33, 500 m ile 400 m arasına 80 km/sa hız limiti girilerek elde edilmiştir. Bu durumda algoritmanın hız limiti sonundaki hız değerinin, nihai noktaya kalan mesafedeki hız değerinden daha düşük olduğu görülmektedir.



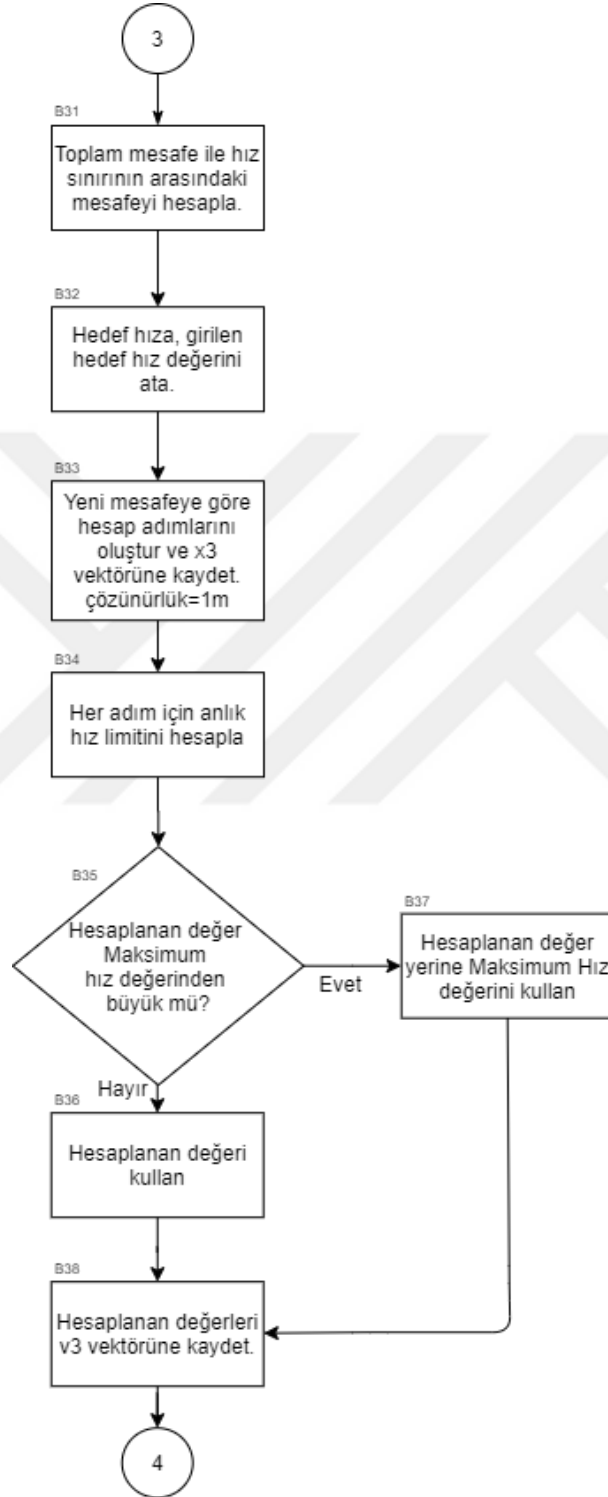
Şekil 4.33 : Araç-A 500-400 metre arası 80 km/sa hız limiti uygulanması.

Şekil 4.34, 500 m ile 400 m arasına 80 km/sa yerine 90 km/sa hız limiti girilerek elde edilmiştir. Bu durumda algoritmanın hız limiti sonundaki hız değerinin, nihai noktaya kalan mesafedeki hız değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda en kısıtlayıcı hız değeri nihai hız değeridir.



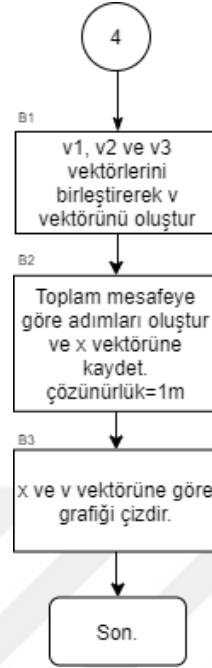
Şekil 4.34 : Araç-A 500-400 metre arası 90 km/sa hız limiti uygulanması.

Hız limiti içerisinde kontroller yapıldıktan sonra algoritma Beta 3 bölümüne geçmektedir (Şekil 4.35). Bu kısımda toplam mesafe, hız sınırı arasındaki mesafe ve maksimum hız değeri karşılaştırılarak eğri çizilmesi sağlanmaktadır.



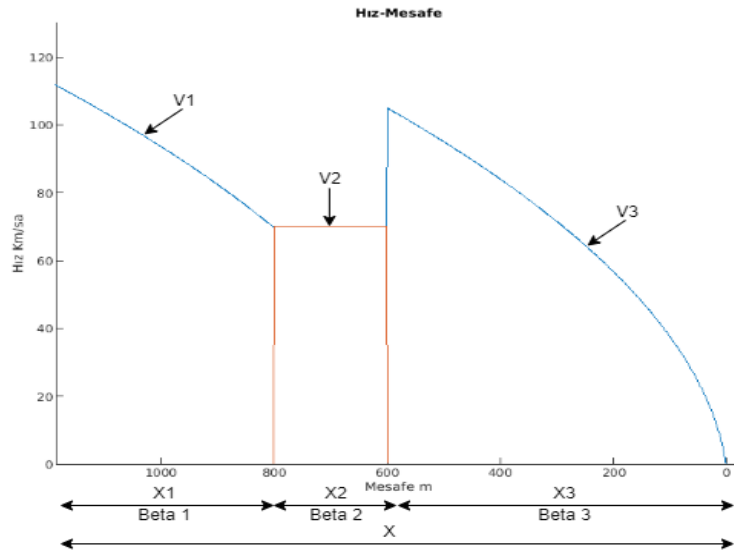
Şekil 4.35 : Beta 3 algoritması akış şeması.

Hız limit hesaplaması yapıldıktan sonra beta algoritmalarında oluşturulan x_1 , x_2 , x_3 ve v_1 , v_2 , v_3 vektörleri birleştirilerek x ve v vektörleri oluşturulmuştur (Şekil 4.36).



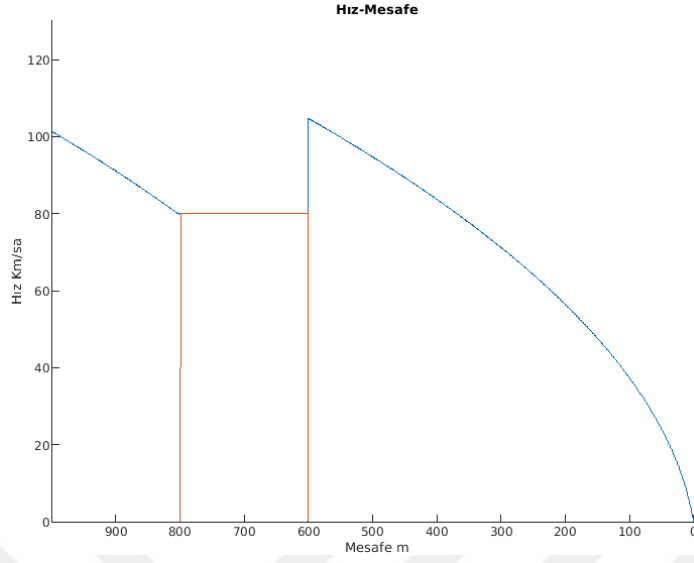
Şekil 4.36 : Beta birleştirilmiş algoritma akış şeması.

Şekil 4.37’de Beta algoritmaları akış semalarında anlatılan x_1 , x_2 , x_3 ve v_1 , v_2 , v_3 vektörleri gösterilmektedir. Burada x vektörleri toplanarak frenleme mesafesi hesaplanmaktadır. Şekilde gösterilen mavi eğrinin acil durum fren hızıdır. Bu eğri her bir adımda sürekli olarak hesaplanan değeri maksimum hız, nihai hız değeri ile karşılaştırarak en kısıtlayıcı hız değerine göre işlem yapmaktadır.



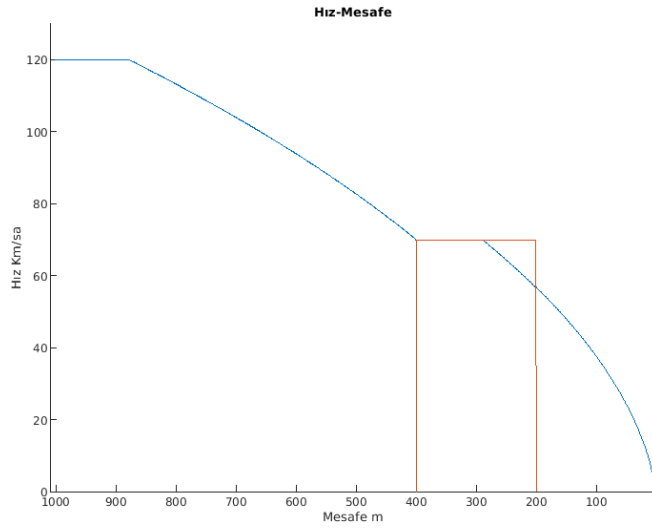
Şekil 4.37 : Beta algoritmalarının eğri üzerinde gösterilmesi.

Başka bir uygulama yapılarak, Araç-A parametreleri, çakışma noktasına 1000 metre mesafe ve maksimum 120 km/sa hız girilerek;



Şekil 4.38 : Araç-A 800-600 metre mesafe 80 km/sa hız limiti uygulaması.

Şekil 4.38, 800-600 m arasında 80 km/sa hız limit noktası bulunmaktadır. Hız limiti uygulanan noktada model sürekli olarak hız limit bitişine kalan mesafe ve nihai hız değerlerini karşılaştırarak en kısıtlayıcı hız limitini bulmaya çalışmaktadır.



Şekil 4.39 : Araç-A 400-200 metre mesafe 70 km/sa hız limiti uygulaması.

Hız limiti 400-200 m arasına alınıp 70 km/sa girildiğinde bulunan model ortaya çıkmıştır (Şekil 4.39). Modelde hız limiti içerisinde sürekli olarak kontrol edilen hız sınırı bitiş noktası ve çakışma noktası arasındaki frenleme modelinin hız sınırı bitiş noktasına gelmeden 290 metrede düştüğü görülmektedir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında haberleşme temelli tren kontrol (CBTC) genel mimarisi gereksinimleri, fonksiyonları ve otomasyon seviyeleri detaylı olarak anlatılmıştır. CBTC sistem ana fonksiyonlarından araç üstü otomatik tren koruma (ATP), emniyetli tren ayrımı kapsamında trenlerin, ray hattında hareketli blok olarak işletilmesini sağlayan emniyetli fren model formülasyonu oluşturulmuştur. İki farklı araç parametresi kullanılarak bir Matlab uygulaması yardımı ile bu modelin uygulanabilirliği ve OpenTrack simülasyon programı ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir. Oluşturulan emniyetli fren modeline hız limitleri girdi yapılacak şekilde genişletilerek

Alfa, Beta algoritmaları elde edilmiştir. Böylelikle modele çakışma noktaları eklenerek modelin en kısıtlayıcı hız limitine göre hesap yapması sağlanmıştır.

Emniyetli fren modeli, trenlerin ayrımında hayati rol oynamaktadır. Fren modelini emniyetli yapan unsur, en kötü durum ve arıza senaryolarının bir kombinasyonunu sağlayarak hareket yetkisi tarafından garanti edilen mesafeye eşit veya daha az bir mesafede treni durduracak şekilde tasarlanmasıdır. En kötü durum, tüm tren kontrol sistemlerinin tasarımı ve kapasitesinin temeli olan tren durma mesafesinin belirlenmesinde emniyetli yaklaşımlardan biridir.

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere farklı standartlar ve yaklaşımlar incelenerek 14 girdi parametresi belirlenmiştir. IEEE 1698 standardına göre formülasyon oluşturulmuş ve tasarım sürecinde daha etkin kullanımı için Matlab uygulamasında kodlanarak grafik arayüzü yardımı ile bu parametrenin model üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Formülasyonda girdi yapılan parametrelerin model üzerindeki etkileri incelendiğinde garanti edilen acil durum fren değeri çakışma noktasına kalan mesafe 1000 metre, 120 km ile seyahat eden, 0.85 m/s^2 garanti edilen acil durum fren değeri olan trenin emniyetli fren modelleri incelenmiştir. Her bir 0,05 GEBR değeri azaldığında trenin acil durum freni uygulama hızının yaklaşık olarak 4 km düştüğü, acil durum fren

hızının düşmeye başladığı mesafenin ise yaklaşık 60 metre arttığı gözlemlenmiştir. Oluşturulan emniyetli fren modeline hız limitleri girdi yapılacak şekilde genişletilerek

Alfa, Beta algoritmaları elde edilmiştir. Böylelikle modele çakışma noktaları eklenerek modelin en kısıtlayıcı hız limitine göre hesap yapması sağlanmıştır.

Emniyetli fren modeli, trenlerin ayrımında hayati rol oynamaktadır. Fren modelini emniyetli yapan unsur, en kötü durum ve arıza senaryolarının bir kombinasyonunu sağlayarak hareket yetkisi tarafından garanti edilen mesafeye eşit veya daha az bir mesafede treni durduracak şekilde tasarlanmasıdır. En kötü durum, tüm tren kontrol sistemlerinin tasarımı ve kapasitesinin temeli olan tren durma mesafesinin belirlenmesinde emniyetli yaklaşımlardan biridir.

Çizelge 5.1 : Emniyetli fren model parametreleri.

No	Parametre
1.	Hareket yetki limiti/hız limiti değişim noktasına kalan mesafe
2.	Hayati çakışma noktasında izin verilen hız
3.	Hız belirsizliği
4.	Mevcut ile çakışma noktasındaki konum arasındaki ortalama eğim
5.	Mevcut konumda ile çakışma noktası eğimden dolayı hızlanma
6.	Yer çekimi sabiti
7.	Garanti edilen acil durum fren değeri
8.	Tren tahrik sistemi ile maksimum hızlanma ivmesi
9.	Kaçak hızlanma ve tahrik kuvveti kesme sürelerinin toplamı
10.	Süzülme ve acil durum freni oluşum sürelerinin toplamı
11.	Statik tren kütlesi
12.	Tren eylemsizlik veya dinamik kütlesi
13.	Döner kütle
14.	Emniyet payı

Emniyetli fren modelinde emniyet ve kullanılabilirlik arasında sıkı bir denge vardır. Fren modelinde parametrelere daha fazla emniyet unsuru konulması işletme kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle emniyet ile kullanılabilirlik arasındaki ilişki göz önünde bulundurularak tasarım yapılmalıdır. Literatürdeki çalışmalara ve özel sektörde uygulanan fren modellerine bakıldığında genel olarak en kötü koşullar temel alınarak bir model geliştirilmesi ve parametrik olarak bu modelin değiştirilmesi yaklaşımı kullanılmaktadır. Büyük sinyal tedarikçi firmaların birden fazla fren modeli olduğu ve benzer hatlara bu modelleri değiştirerek uyguladığı bilinmektedir.

İşletme performansının artırılması gereken durumlar da emniyetli fren modeli emniyet temelinden uzaklaşmayacak şekilde, belirli tehlike analizleri yapılarak aşağıdaki öneriler ile işletme performansının artırılmasında önemli bir rol oynar;

- Model üzerindeki emniyet payını sabit değer olarak almak yerine trenin anlık hızına göre değiştirilebilir değer olarak alınması,
- Model üzerindeki eğim ve kurb değerinin en kötü koşuldaki değerini almak yerine ray hat bölgelerine göre değiştirilebilir değer olarak alınması,
- Model üzerindeki eğim ve kurb etkilerini standartların belirlediği yaklaşımlar yerine formülasyon ile kesin değer olarak alınması,
- Model üzerindeki eğim değerlerini sabit değer olarak almak yerine ortalama eğim değeri olarak alınması,
- Garanti edilen acil durum frenini sabit değer olarak almak yerine ray hattının belirli bölgelerinde değiştirilmesi amacıyla birden fazla değer (adezyon katsayısı düşük yerlerde kullanılmak üzere vb.) olarak alınması,
- Odometre sisteminin doğruluğu sağlanarak hız ve konum belirsizlik değerlerinin düşürülmesi,
- Araç tedarikçisi tarafından hızlanma, tahrik kuvveti kesme, süzülme ve acil durum freni uygulama sürelerinin en iyi şekilde iyileştirilmesi yapıldıktan sonra modelin güncellenmesi (tasarım aşamasında çıkarılan modeldeki parametrelerin saha testlerinden sonra güncellenebilir olması),
- Aerodinamik etkinin fazla olabileceği ve seyir direnci parametresinde belirtilmeyen tünel etki değerinin algoritmaya girdi yapılması,
- Tren ivmelenmesindeki kuyruk rüzgârı etki değerinin alınması,
- Araç ağırlık değerinin sabit değerler yerine anlık olarak alınması.

Bu öneriler emniyetli fren model algoritmasını karmaşık hale getirebilir ve algoritmanın çevrim süresinin artmasına sebep olabilir. Fakat bu öneriler kentsel raylı sistem otoritelerini, yeni hatlar inşa etmeye veya mevcut hatlarının kapasitelerini maksimize etme çalışmalarında ihtiyaç duyulan sefer sıklığını ve işletme performansı artırılmasını mümkün kılmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Gregor, T. & Vlasenko, S.** (2019). *Railway Signalling and Interlocking*. Eurail Press.
- [2] **Authority, T. A.** (2018). *Signalling Design Principle – Braking Distance*. Transport for NSW 2018
- [3] **Scalise, J.** (2014). How Track Circuits detect and protect trains. *Railway Signalling Eu*.
- [4] **Choi Quan, A. & Park, C.** (2011). Modeling for CBTC car-borne ATP/ATO functions and its applications. *SICE Annual Conference*, (s. 1929-1932).
- [5] **Winter, P.** (2009). *Compendium on ERTMS* (s. 31). Eurail Press.
- [6] **Thurston, D.** (2016). CBTC and Beyond. *Institution of Railway Signal Engineers*.
- [7] **IEEE** (2008). *1474.3 Communications-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations*. IEEE Vehicular Technology Society.
- [8] **IEEE** (2004). *1474.1 Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirement*. IEEE Vehicular Technology Society.
- [9] **IEEE** (2003). *1474.2 User Interface Requirements in Communications Based Train Control Systems*. IEEE Vehicular Technology Society.
- [10] **Yoon, Oh, S., Yoon, Y., & Kim, Y.** (2013). Design of ATP functions and communication interface specifications for Korean Radio-based Train Control System., *International Conference on Control Automation and Systems* (s. 1330-1333).
- [11] **Carvajal, W., Cucala, A., Fernández, A., & Soder, L.** (2015). *Energy efficient driving algorithms for non-disturbed and disturbed trains with the CBTC signalling system*. (Doktora tezi). Delft University of Technology. Delft, Hollanda
- [12] **Wang, H., Zhao, N., Bin, T., & Chai, M.** (2018). *Safety monitor for Train-Centric CBTC System*. University of Birmingham. Birmingham, UK
- [13] **IEEE** (2011). *1474.4 Recommended Practice for Functional Testing of a Communications-Based Train Control System*. IEEE Vehicular Technology Society

- [14] **Woodland, D.** (2004). *Optimisation of Automatic Train Protection Systems*. University of Sheffield. Sheffield, İngiltere
- [15] **Pachl, J.** (2008). Energy Efficient Train Operation. *Railway Timetable & Traffic* (s. 104-105). Eurail Press.
- [16] **Zhou, Y., & Tao, X.** (2018). Robust Safety Monitoring and Synergistic Operation Planning Between Time- and Energy-Efficient Movements of High-Speed Trains Based on MPC. *IEEE Access*.
- [17] **Gill, D. C., & Goodman, C. J.** (1992). Computer-based optimisation techniques for mass transit signalling design. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, (s. 261-275).
- [18] **IEEE** (1998). *1477- Passenger Information System for Rail Transit Vehicles*. IEEE Vehicular Technology Society.
- [19] **IEC** (2014). *62290.1 Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts*. International Electrotechnical Commission
- [20] **IEC** (2009). *62267 Safety requirements standart*. Automated urban guided transport (AUGT).
- [21] **IEC** (2019). *62290-3 Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 3: System requirements specification*. International Electrotechnical Commission
- [22] **Railway, Shipping & Aviation industry.** (2017). *APTA Rail Conference: Baltimore: Implications of Increasing Grade of Automation*. [PowerPoint sunumu]. Erişilen yer https://www.apta.com/wp-content/uploads/RC17-Keavill_Dave.pdf
- [23] **Gibson, T.** (2016). *Modelling the European Train Control System Braking and Supervision Curves*. University of Strathclyde Engineering.
- [24] **BSİ** (2015). *14531.2 Railway applications - Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking - Part 2: Step by step calculations for train sets or single vehicles*. British Standards Institution.
- [25] **BSİ** (2015). *14531.1 Railway applications - Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking - Part 1: General algorithms utilizing mean value calculation for train sets or single vehicles*. British Standards Institution.
- [26] **Vincze, B., & Tarnai, G.** (2011). Development and Analysis of Train Brake Curve Calculation Methods with Complex Simulation. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*.

- [27] **ERTMS/ETCS signalling system** (2013). *An overview on the standart european interoperable signalling and train control system*. Railway Signalling EU.
- [28] **ERTMS** (2016). Subset-026-03 System Requirements Specification Chapter 3 Principles. European Railway Transport Management.
- [29] **Wei, S., Bai-gen, C., Jing-jing, W., & Jian, W.** (2010). Research and analysis of ETCS controlling curves model. *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE)*, (s. 178-181).
- [30] **Havryliuk, V.I.** (2017). *An Overview of the ETCS Braking Curves*. European Railway Transport Management.
- [31] **IEC** (2014). 62290.2 -2- *Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 2: Functional requirements specification*. International Electrotechnical Commission
- [32] **IEEE** (2009). 1698 - *Calculation of Braking Distances for Rail Transit Vehicles*. IEEE Vehicular Technology Society.
- [33] **Landex, A., & Jensen, L. W.** (2019) Infrastructure Capacity in the ERTMS Signaling System.
- [34] **CENELEC** (2018). 14478, *Railway applications - Braking - Generic vocabulary*. European Committee for Standardization.
- [35] **Chinnarao Mokka pati, R. D.** (2011). A Simple and Efficient Train Braking Algorithm for PTC Systems. *2011 AREMA*. Minneapolis.
- [36] **Sirong Yi.** (2018). *Principles of Railway Location and Design Traction Calculation*. Academic Press.
- [37] **Mickoski, H., Djidrov, M., & Mickoski, I.** (2019). Estimation and analysis of various influential factors in the braking process of rail vehicles. *Vehicle System Dynamics*, (s.1-16).
- [38] **UIC** (2004). 544-1 *Brakes - Braking Power*. International Union of Railways
- [39] **Altyapı Yatırımlar Genel Müdürlüğü.** (2017). *İstanbul yeni havalimanı metro hattı araç alım şartnamesi*. EKAP.
- [40] **OpenTrack Simulation** (Versiyon 2.2) [Bilgisayar yazılımı]. Zurich, OpenTrack Railway Technology.
- [41] **Url-1** < <http://metroautomation.org> >, erişim tarihi 22.05.2020.
- [42] **Url-2** <<http://metrotrainsimulation.com/definition.html#ques1>>, erişim tarihi 05.03.2020.
- [43] **Url-3** <<https://www.coalstonewcastle.com.au/physics/steam-adhesion/>>, erişim tarihi 03.03.2020.

EKLER

EK A: Matlab Kodları



EK A

Sabit Değişkenleri Oku

% Hız limiti eklenmesi ile değişmeyen değişkenleri grafik arayuzundan oku

```
delta_h =  
app.MevcutkonumilesnrlamanoktasndakikonumarasndakieimfarkEditField.Value;  
delta_Vm = app.KontrolrsnrEditField.Value;  
a_eb = app.GEBREditField.Value;  
a_a = app.TrenintahriksistemiilemaksimumHzlanmasEditField.Value;  
T_a = app.T_aEditField.Value;  
T_c = app.T_cEditField.Value;  
a_gmin = app.a_gminEditField.Value;  
M_p = app.StatiktrenktlesiEditField.Value;  
g = app.YerekimisabitiEditField.Value;  
M_rot = app.DnerKtleSabitiEditField.Value;  
emniyetpayi = app.EmniyetPayEditField.Value;
```

% Okunan degiskenleri bir vektore kaydet

```
sabitDegiskenler = [delta_h delta_Vm a_eb a_a T_a T_c a_gmin M_p g M_rot  
emniyetpayi];
```

Hız Hesapla

```
function [hiz] = hizhesapla(V1, delta_s, hizsiniri, sabit_degiskenler)  
    % Sabit degiskenler vektorunu aciyoruz  
    delta_h = sabit_degiskenler(1);  
    delta_Vm = sabit_degiskenler(2);  
    a_eb = sabit_degiskenler(3);  
    a_a = sabit_degiskenler(4);  
    T_a = sabit_degiskenler(5);  
    T_c = sabit_degiskenler(6);  
    a_gmin = sabit_degiskenler(7);  
    M_p = sabit_degiskenler(8);  
    g = sabit_degiskenler(9);  
    M_rot = sabit_degiskenler(10);  
    emniyetpayi = sabit_degiskenler(11);  
    % Hız degerini m/s cinsine çeviriyoruz  
    V1 = V1/3.6;  
    % Denklem icindeki K'ları ve Mi'yi hesaplıyoruz  
    K0 = a_eb * (T_a + T_c) - a_a * T_a;  
    K1 = a_eb * ((T_a + T_c)^2) - a_a * ((T_a)^2);  
    M_i = M_p + M_rot * M_p;  
    % Hızı hesaplıyoruz  
    hiz_ = 3.6 * (-delta_Vm + K0 + sqrt( ((V1)^2) - 2*a_eb*delta_s-  
emniyetpayi + 2*(M_p / M_i)*g*delta_h + K1*(a_eb+a_gmin)));  
    % Hesaplanan hızın hız sınırından büyük olup olmadığını kontrol ediyoruz  
    if hiz_ > hizsiniri  
        hiz_=hizsiniri;  
    end  
    % Hesaplanan hızı veriyoruz  
  
hiz=hiz_;  
end
```

Alfa Kodu

Not: Bu kısımda yapılan numaralandırmalar (A3, A4, A5 vb.) emniyetli fren modelinin hız limitleri uygulanması kısmında belirtilen numaralara karşılık gelmektedir.

```
%% ALFA
%% A3
V1 = app.V1EditField.Value;
delta_s = app.HareketYetkisiSonuHzLimitiDeimNoktasEditField.Value;
hizsiniri = app.stHzSnrEditField.Value;
%% A4
x = delta_s:-1:0;
%% A5
v = zeros(1,length(x));
i=1;
    for k = delta_s:-1: 0
        v(i) = hizhesapla(V1, k, hizsiniri, sabitDegiskenler);
%% A6-7-8-9
        if(v(i) > hizsiniri)
            v(i) = hizsiniri;
        end
        if(v(i) < 0)
            v(i)= 0;
        end
        i = i+1;
    end
%% A10
plot(app.UIAxes, x, v);
ylim(app.UIAxes,[0 hizsiniri])
xlim(app.UIAxes,[delta_s])
set(app.UIAxes,'XDir','reverse')
```

Beta Kodu

Beta-1 Kodu

```
%% BETA 1
%% B11
V1 = app.V1EditField.Value;
delta_s = app.HareketYetkisiSonuHzLimitiDeimNoktasEditField.Value;
hizsiniri = app.stHzSnrEditField.Value;
%% B12
hizLimitiBaslangic = app.edtBaslangicNoktasi1.Value;
hizLimitiBitis = app.edtBitisNoktasi1.Value;
hizLimiti = app.edtHizLimiti1.Value;
%% B13
d = delta_s - hizLimitiBaslangic;
%% B14
V1 = hizLimiti;
%% B15
x1 = d:-1:0;
%% B16
v1 = zeros(1,length(x1));
i=1;
    for k = d:-1: 0
```

```

        v1(i) = hizhesapla(V1, k, hizsiniri, sabitDegiskenler); %B24
        n = hizhesapla(app.V1EditField.Value, k+hizLimitiBaslangic,
hizsiniri, sabitDegiskenler); %B25
        if (v1(i)>n) %B17
            if (n>app.stHzSnrEditField.Value) %B19
                v1(i)=app.stHzSnrEditField.Value; %B110
            else
                v1(i)=n; %B111
            end
        else
            if (v1(i)>app.stHzSnrEditField.Value) %B112
                v1(i)=app.stHzSnrEditField.Value; %B110
            else
                %B113
            end
        end
        i = i+1;
    end
end

```

Beta-2 Kodu

```

%% BETA 2
%% B21
d = hizLimitiBaslangic - hizLimitiBitis;
% d = hizLimitiBaslangic;
%% B22
V1 = hizLimiti;
%% B23
x2 = d:-1:0;
%% B24
v2 = zeros(1,length(x2));
n = zeros(1,length(x2));
i=1;
    for k = d:-1: 0
        v2(i) = hizhesapla(V1, k, hizsiniri, sabitDegiskenler); %B24
        n(i) = hizhesapla(app.V1EditField.Value, k+hizLimitiBitis,
hizsiniri, sabitDegiskenler); %B25

        if (v2(i)>=n(i)) %B26
            if (n>app.stHzSnrEditField.Value) %B27
                v2(i)=app.stHzSnrEditField.Value; %B28
            else
                v2(i)=n(i); %B29
            end
        else
            if (v2(i)>app.stHzSnrEditField.Value) %B210
                v2(i)=app.stHzSnrEditField.Value; %B28
            else
                if (v2(i)<hizLimiti)
                    v2(i) = hizLimiti;
                end
                %B211
            end
        end
    end
end

```

```

        if(v2(i) > hizLimiti)
            v2(i) = hizLimiti;
        end

        i = i+1;
    end

```

Beta-3 Kodu

```

%% BETA 3
%% B31
d = hizLimitiBitis;
%% B32
V1 = app.V1EditField.Value;
%% B33
x3 = d:-1:0;
%% B34
v3 = zeros(1,length(x3));
i=1;
    for k = d:-1: 0
        v3(i) = hizhesapla(V1, k, hizsiniri, sabitDegiskenler); %B38
        if(v3(i) > hizsiniri) % B35
            v3(i) = hizsiniri; % B37
        end
        i = i+1;
    end

%% BETA
%% B1
V = [v1 v2 v3];
%% B2
X = (length(V)-1):-1:0;
%% B3
r = hizLimitiBaslangic : -1 : hizLimitiBitis;
l=hizLimiti+zeros(1, length(r));
l(1)=0;
l(length(l))=0;
plot(app.UIAxes, X, V, r, l);
ylim(app.UIAxes,[0 hizsiniri ])
xlim(app.UIAxes,[0 delta_s ])
set(app.UIAxes,'XDir','reverse')

```

Grafik Arayüz Kodu

```

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Value changed function: stHzSnrEditField
function stHzSnrEditFieldValueChanged(app, event)
    value = app.stHzSnrEditField.Value; % ÜST HIZ LİMİTİ DEĞİŞTİĞİNDE
    SLIDER'IN DE ÜST SINIRI DEĞİŞİYOR
end

% Callback function
function HzLimiti1CheckBoxValueChanged(app, event)
    value = app.HzLimiti1CheckBox.Value;

```

```

if app.HzLimiti1CheckBox.Value == true % CHECK BOX TIKLANDIĞINDA DİĞER
BİLEŞENLERİ AKTİF EDİYOR
app.HzLimiti1CheckBox.Text="Hız Limiti 1 Aktif";
app.kms1Slider.Enable=true;
app.edtBaslangicNoktasi1.Enable=true;
app.edtBitisNoktasi1.Enable=true;
else % CHECK BOX TIKLANDIĞINDA DİĞER BİLEŞENLERİ DEAKTİF EDİYOR
app.HzLimiti1CheckBox.Text="Hız Limiti 1 Deaktif"
app.kms1Slider.Enable= false;
app.edtBaslangicNoktasi1.Enable= false;
app.edtBitisNoktasi1.Enable= false;
end

end
% Value changed function: swcHizLimiti1
function swcHizLimiti1ValueChanged(app, event)
    value = app.swcHizLimiti1.Value;

    %msgbox('Hız limiti üst hız sınırından büyük olamaz.',
'Hata','error');
    if value == "On"; % CHECK BOX
TIKLANDIĞINDA DİĞER BİLEŞENLERİ AKTİF EDİYOR
        app.edtHizLimiti1.Enable = true;
        app.edtBaslangicNoktasi1.Enable=true;
        app.edtBitisNoktasi1.Enable=true;
        app.gugHizLimiti1.Enable = true;
    else
% CHECK BOX TIKLANDIĞINDA DİĞER BİLEŞENLERİ DEAKTİF EDİYOR
        app.edtHizLimiti1.Enable = false;
        app.edtBaslangicNoktasi1.Enable= false;
        app.edtBitisNoktasi1.Enable = false;
        app.gugHizLimiti1.Enable = false;
    end
end
% Callback function
function swcHizLimiti2ValueChanged(app, event)

end
% Callback function
function swcHizLimiti3ValueChanged(app, event)

end
% Button pushed function: HESAPLAButton
function HESAPLAButtonPushed(app, event)
    %% A1
    sabitDegiskenleriOku;
    %% A2
    if (app.swcHizLimiti1.Value == "On"
&&app.edtHizLimiti1.Value<app.stHzSnrEditField.Value)
        beta1x;
        beta2x;
        beta3;
        beta;
    else
        alfa;
    end
end

```

```

        end
    end
    % Value changed function: edtHizLimiti1
    function edtHizLimiti1ValueChanged(app, event)
        app.gugHizLimiti1.Value = app.edtHizLimiti1.Value;
    end
    % Value changed function:
    % HareketYetkisiSonuHzLimitiDeiimNoktasEditField
    function
HareketYetkisiSonuHzLimitiDeiimNoktasEditFieldValueChanged(app, event)
        value =
app.HareketYetkisiSonuHzLimitiDeiimNoktasEditField.Value;

    end
    % Value changed function: EmniyetPayEditField
    function EmniyetPayEditFieldValueChanged(app, event)
        value = app.EmniyetPayEditField.Value;
    end
end

```


ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Can Berk GENÇER
Doğum Tarihi ve Yeri : 1994 - Ereğli / Konya
E-posta : gencercanberk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri ASELSAN firmasında Sistem Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.
- 2018 – 2019 yılları arasında Yapı Merkezi İDİS firmasında Sinyalizasyon Mühendisi olarak çalıştı.
- 2018 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesini birinci olarak bitirdi.