

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SEVİYE ERTMS/ETCS SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ İLE
YÜKSEK HIZLI TREN HATLARINDA HAT KAPASİTESİ
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah Aykut MERT

Bilişim Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Programı

KASIM 2016

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SEVİYE ERTMS/ETCS SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ İLE
YÜKSEK HIZLI TREN HATLARINDA HAT KAPASİTESİ
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdullah Aykut MERT
1303657020**

Bilişim Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Meltem Y. İMAMOĞLU

KASIM 2016

Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 1303657020 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Abdullah Aykut MERT ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemleri İle Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Hat Kapasitesi Optimizasyonu konulu tezini, aşağıda imzaları bulunan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Meltem Y. İMAMOĞLU
Türk Hava Kurumu Üniversitesi



Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Meltem Y. İMAMOĞLU
Türk Hava Kurumu Üniversitesi



: Yrd.Doç.Dr.Tansel DÖKEROĞLU
Türk Hava Kurumu Üniversitesi



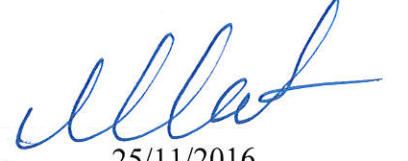
: Yrd.Doç.Dr. Deniz ÇETİNKAYA
Atılım Üniversitesi



Tez Savunma Tarihi: 25.11.2016

**TÜRK HAVA KURUMU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum, “Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemleri İle Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Hat Kapasitesi Optimizasyonu” adlı çalışmanın, tarafımdan akademik etik ve kurallara aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım kaynakların kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yaparak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.



25/11/2016

Abdullah Aykut MERT

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmada beni yönlendiren, bana her konuda yardımcı olup bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen kıymetli hocam, tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. Meltem Y. İMAMOĞLU'na yapmış oldukları yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca bu zamana kadar yetişmeme katkısı olan, bu mesleği bana kazandıran tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi hazırladığım süreçte motivasyon desteği ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Serdar ÜZÜMCÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Yaşamım boyunca benim için her türlü fedakârlığı yapmaktan çekinmeyen anneme ve babama, çalışmamda gösterdiği sabır için eşime teşekkürlerimi sunarım.

Kasım, 2016

Abdullah Aykut MERT

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar	viii
ŞEKİLLER.....	ix
KISALTMALAR	x
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
BİRİNCİ BÖLÜM	17
GİRİŞ.....	17
İKİNCİ BÖLÜM.....	20
SİNYALİZASYON SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ.....	20
2.1. Sinyalizasyon Sistemlerin Tarihsel Gelişimi	20
2.2. Sinyalizasyonun Raylı Sisteme Uygulanması.....	21
2.3. Sinyalizasyonun Sistemleri	22
2.3.1. Röle kilitleme esaslı sinyalizasyon sistemi	24
2.3.2. Sabit blok manuel sürüş sinyalizasyon sistemi	24
2.3.3. Sabit blok otomatik sürüş sinyalizasyon sistemi.....	24
2.3.4. Hareketli (Moving) blok otomatik sürüş sinyalizasyon sistemi.....	25
2.3.5. Tam Otomatik Sürücüsüz Sinyalizasyon Sistemi	26
2.4. Sinyalizasyon Sistemlerinde Emniyet Standartları	26
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	28
ERTMS/ETCS SİNYALİZASYON ve HABERLEŞME SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	28
3.1. ERTMS/ETCS'nin Kısa Tarihçesi.....	29
3.2. ERTMS/ETCS'nin Amaçları	30
3.2.1. Karşılıklı İşletilebilirlik.....	31
3.2.2. Azaltılmış Sinyalizasyon Maliyetleri.....	31

3.3.	ERTMS/ETCS Sistem Bileşenleri	31
3.3.1.	Hat Üstü Ekipmanları.....	31
3.3.1.1.	Sinyaller	31
3.3.1.2.	Makas Motorları.....	32
3.3.1.3.	Ray Devreleri	32
3.3.1.4.	Eurobaliz'ler.....	32
3.3.1.5.	Hat Kenarı Elektronik Ünite	33
3.3.1.6.	Euroloop (infill)	33
3.3.1.7.	Euroradio (GSM-R/LTE-R).....	33
3.3.1.8.	Radyo Blok Merkezi	33
3.3.1.9.	Anklaşman (Interlocking) Sistemi	34
3.3.2.	Araç Üstü (Onboard) Ekipmanları	34
3.3.2.1.	Avrupa Hayati Bilgisayarı.....	34
3.3.2.2.	Sürücü Makine Ara Yüzü.....	34
3.3.2.3.	Odyometre Alt Sistemi.....	35
3.3.2.4.	Eurobaliz Anteni	35
3.3.2.5.	Tren Kayıt Ünitesi.....	35
3.3.2.6.	Özel İletim Modülü	35
3.3.2.7.	Eurobaliz İletim Modülü	36
3.3.2.8.	GNSS Alıcısı.....	36
3.3.2.9.	GSM-R ve LTE-R Radyo Araç Üstü Anteni	36
3.4.	ERTMS/ETCS Sistemi'nin Seviyeleri.....	36
3.4.1.	ERTMS/ETCS Seviye 1.....	36
3.4.2.	ERTMS/ETCS Seviye 2.....	38
3.4.3.	ERTMS/ETCS Seviye 3.....	39
3.5.	ERTMS/ETCS Haberleşme Sistemleri	40
3.5.1.	GSM-R Haberleşme Sistemi.....	41
3.5.2.	LTE-R Haberleşme Sistemi	42
3.5.3.	Uydu Tabanlı Haberleşme Sistemleri	44
3.6.	ERTMS/ETCS Seviye 3 Sinyalizasyon Sisteminin İşleyişi	45
3.7.	Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemlerinin Türkiye'deki Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesine Etkisi ve Altyapı Kullanım Oranı Çalışması	49
3.7.1.	Araştırma Yöntemi.....	49

3.7.2.	Araştırmanın Evreni ve Örneklem	50
3.7.3.	Hat Kapasitesi Hesaplama Yöntemi.....	50
3.7.3.1.	Sınırlamalar	51
3.7.3.2.	Ortalama asgari tren takip mesafesi (Z)	53
3.7.3.3.	Ortalama ara süre (T_p)	54
3.7.3.4.	Eşdeğer Tampon Süre (T_{add})	56
3.7.3.5.	Hat Kapasitesi Hesaplanması (N_{opt})	57
3.8.	Türkiye'deki Yüksek Hızlı Tren Hattı Altyapı Kullanım Oranı Hesaplama Yöntemi	58
3.9.	Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemlerinin Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesine Etkisi ve Altyapı Kullanım Oranı Çalışması Sonuç ve Yorumları	60
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....		68
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		68
4.1.	Değerlendirme.....	68
4.2.	Sonuç.....	68
4.3.	Öneriler	70
KAYNAKLAR		72
ÖZGEÇMİŞ		75

TABLolar

Tablo 2.1: Uluslararası Standartlar [9].....	27
Tablo 3.1: Ankara-Konya-Eskişehir-İstanbul(Pendik) Arasında Her Gün İşleyen Yüksek Hızlı Tren Zaman Çizelgesi.....	52
Tablo 3.2: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan ortalama asgari tren takip mesafesi (Z).....	54
Tablo 3.3: UIC 406 Hükümlerinde verilen altyapı kullanımı için tavsiye edilen değerler (P_{uic}).....	55
Tablo 3.4: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun saat ve Günlük periyot için ortalama ara süreler (T_p).....	56
Tablo 3.5: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun ve Günlük saatler için eşdeğer ara süreleri (T_{add}).....	57
Tablo 3.6: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun ve Günlük saatler için optimum tren sayısı (N_{opt}).....	58
Tablo 3.7: Türkiye'deki YHT hatları için altyapı kullanım oranı için hesaplanan değerleri (n).....	60

ŞEKİLLER

Şekil 3.1: Hiyerarşik belge düzeyi.....	30
Şekil 3.2: ERTMS/ETCS Seviye 1 işleyiş şeması görünümü	37
Şekil 3.3: ERTMS/ETCS Seviye 2 işleyiş şeması görünümü	38
Şekil 3.4: ERTMS/ETCS Seviye 3 işleyiş şeması görünümü	40
Şekil 3.5: GSM-R sisteminden görünüm[15]	42
Şekil 3.6: Demiryolu LTE-R Komünikasyon Sisteminin Geliştirilme Süreci [28]...	43
Şekil 3.7: LTE-R mimarisinden görünüm[17]	44
Şekil 3.8: GNSS/INS sistemi ile konum ve hız tespit bileşeninin görünümü[20].....	45
Şekil 3.9: ETCS Seviye 3 işleyiş şeması görünümü[20]	47
Şekil 3.10: UIC 406 Hükümleri yaklaşımına göre optimum kapasite sonuçları	61
Şekil 3.11: Farklı ETCS Seviyelerine göre Yoğun ve Günlük Saatlere göre Kapasite Artış Oranları	63
Şekil 3.12: YHT Altyapı Kullanım Sonuçları	64
Şekil 3.13: YHT Hatları Altyapı Kullanım Oranları	65
Şekil 3.14: 2019 yılı itibari ile YHT Hatları Altyapı Kullanım Oranları	66
Şekil 3.15: Yıllara göre YHT Yolcu Sayısı [30]	66

KISALTMALAR

- ASFA** : Otomatik Frenleme ve Bilgilendirme Sinyali (Anuncio de Señales y Frenado Automático (Automatic Braking and Announcement of Signals))
- ATC** : Otomatik Tren Kontrol (Automatic Train Control)
- ATP** : Otomatik Tren Koruma (Automatic Train Protection)
- ATO** : Otomatik Tren İşletimi (Automatic Train Operation)
- ATS** : Otomatik Tren Durdurma (Automatic Train Service)
- BTM** : Baliz İletim Modülü (Balise Transmission Module)
- CENELEC**: Avrupa Elektroteknik Standartlar Enstitüsü, (European Committee for Electrotechnical Standards)
- CBTC** : Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolü (Communication Based Train Control)
- CCS** : Komuta Kontrol Sistemi (Command and Control System)
- CTC** : Merkezi Kumandalı Sinyal Sistemi (Centralized Traffic Control)
- DMI** : Sürücü Makine Arayüzü (Driver Machine Interface)
- DB** : Alman Demiryolları (Deutsche Bahn)
- EMI** : Acil Fren Müdahalesi (Emergency Brake Intervention)
- ECI** : Uluslararası Elektrik-Elektronik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
- ERA** : Avrupa Demiryolları Ajansı (European Railway Agency)
- ERTMS** : Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi (European Railway Traffic Management System)
- ERRI** : Avrupa Demiryolları Araştırma Enstitüsü (European Railway Research Institute)
- ETCS** : Avrupa Tren Kontrol Sistemi (European Train Control System)
- EU** : Avrupa Birliği (European Union)
- EUROBALISE** : Baliz

EVC	: Avrupa Hayati Bilgisayarı (European Vital Computer)
FRMTS	: Gelecek Demiryolu Mobil Haberleşme Sistemleri (Future Railway Mobile Telecommunication System)
FS	: İtalya Demiryolları (Ferro vie dello Stato)
GNNS	: Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)
GSM-R	: Küresel Mobil İletişim Sistemi- Demiryolları (Global System for Mobile Communications for Railway)
HT	: Headway Time (Sefer Aralığı)
INS	: Ataletsel Seyrüsefer Sistemi (Inertial Navigation Unit - INS)
IEC	: Uluslararası Elektrik-Elektronik Programlanabilir Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
LTE-R	: Uzun süreli Gelişim – Demiryolları (Long Term Evolution for Railway)
LEU	: Hat Kenarı Elektronik Ünitesi (Lineside Electronics Unit)
OCC	: Trafik Kontrol Merkezi (Operation Control Center)
RBC	: Radyo Blok Merkezi (Radio Block Center)
SIL	: Güvenlik Bütünlük Seviyesi (Safety Integrity Level)
SNCF	: Société Nationale des Chemins de fer Français
STM	: Özel Şanzıman Modülü (Specific Transmission Module)
STRELE-FORMULA	: Strele formülü (method of Schwanhäußer)
SSI	: Elektronik Anlaşman Sistemi (Solid State Interlocking System)
SYRS	: Sistem Gereklilikleri Şartnamesi (System Requirements Specification)
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
TIU	: Tren Arayüz Ünitesi (Train Interface Unit)
TOS	: Tam Otomatik Sürücüsüz
TSI	: Karşılıklı İşletilebilirlik Şartnamesi (Technical Specification for Interoperability)

- TRU** : Tren Kayıt Ünitesi (Train Record Unit)
- UIC** : Uluslararası Demiryolu Birliği (International Union of Railways)
- UIC Code 406** : UIC 406 Hükümleri
- UNIFE** : Avrupa Tren Yolları Endüstrisi (Union des Industries Ferroviaires Européennes - The European Rail Industry)
- UNISIG** : Avrupa Sinyalizasyon Şirketleri Birliği (Union of European Signalling Companies)
- UDSP** : Ulusal Demiryolu Sinyalizasyon Projesi
- YHT** : Yüksek Hızlı Tren
- Vb** : Ve Benzeri

ÖZET

FARKLI SEVİYE ERTMS/ETCS SİNYALİZASYON SİSTEMLERİ İLE YÜKSEK HIZLI TREN HATLARINDA HAT KAPASİTESİ OPTİMİZASYONU

MERT, Abdullah Aykut

Yüksek Lisans, Bilişim Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Meltem Y. İMAMOĞLU

Kasım 2016, 76 sayfa

Demiryolu işletmeciliğinde, mevcut hızlı tren hat kapasitesini ve altyapı kullanım oranlarını yükseltmek amacıyla Avrupa Birliği Komisyonu'nun mali desteğiyle Avrupa Sinyalizasyon Endüstrisi ve Avrupa Demiryolları'nın farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon ve haberleşme sistemleri çalışmaları en uygun çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak ülkemizde ERTMS/ETCS sistemleri ile demiryolu hat kapasitesi ve altyapı kullanım oranlarını artırmaya yönelik bir araştırma bulunmamaktadır.

Bu tez çalışmasında ülkemizdeki mevcutta kullanılan Ankara merkezli Konya, Eskişehir ve İstanbul Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarındaki kapasite ve altyapı kullanım oranları incelenmiştir. Bu hatların, altyapı kullanım oranlarının optimum seviyelere çıkarmak için yapılması gerekenler belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilmekte olan ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sistemi anlatılmış ve bu sistemin konvansiyonel ve hızlı tren hatlarındaki kapasite artışına getireceği kazanımlarına yer verilmiştir. Bu kapsamda, ülkemizde ki mevcutta kullanılan YHT hatlarındaki farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerine geçişte hattın kapasite artışı hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu ortaya çıkan bulgular değerlendirilmiş ve UIC'in belirlediği üst değerlerin çok altında hat kapasitesi

kullanımı olduğu görülmüştür. Bu nedenle YHT setlerinin sayısının artırılması ve farklı ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemine geçişin gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu Hat kapasitesi, Altyapı Kullanım Oranı, ERTMS, ETCS Seviye 1, ETCS Seviye 2, ETCS Seviye 3, Demiryolu Sinyalizasyon, GSM-R, LTE-R

ABSTRACT

OPTIMIZATION of LINE CAPACITY IN HIGH SPEED TRAIN LINES WITH DIFFERENT LEVELS OF ERTMS/ ETCS SIGNALING SYSTEMS

MERT, Abdullah Aykut

Master, Department of Information Technology

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Meltem Y. İMAMOĞLU

November 2016, 76 pages

In railway transportation the studies to increase the existing high-speed line capacity and infrastructure occupation rates of different levels of ERTMS / ETCS signaling and communication systems of the European Signal Railway Industry and European Railways with the financial support of the European Union Commission are the most appropriate solution. However, in our country there is no research to increase the railway line capacity and infrastructure utilization rates with ERTMS / ETCS systems.

In this thesis study capacity utilization and infrastructure occupation rates of the Ankara based Konya, Eskişehir and İstanbul High Speed Train (YHT) lines used in our country are examined. For these lines necessary measures are identified to achieve optimal levels for the infrastructure occupation rates. In addition, the ERTMS / ETCS Level 3 signaling system in development is described, and the gains that this system brings to capacity increase in conventional and fast train lines are mentioned. In this context, capacity upgrade calculations have been made in line with the different levels of ERTMS / ETCS signaling systems in YHT lines currently used in our country. The results of the calculations were evaluated and the use of line capacity was found to be well below the upper values determined by the UIC. For this reason, it is necessary to increase the number of YHT sets and to switch to a different ERTMS / ETCS signaling system.

Keywords: Railway Capacity, Infrastructure Occupation, ERTMS/ETCS Level 1, Level 2, Level-3, Railway Signalling, GSM-R, LTE-R

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Günümüzde sürekli artan nüfus, bununla beraber artan hava kirliliği ve enerji tüketimi ulaşımı içinden çıkılmaz bir hale getirmiştir. Raylı ulaşım bu sorunların en aza indirilmesinde tek çıkış yolu olarak görünmektedir. Özellikle büyük kentlerdeki toplu taşımada, trafik sıkışıklığına neden olmaması, aynı anda daha fazla kişinin taşınmasına olanak sağlama (optimum hat kapasitesine ulaşma), daha emniyetli ve hızlı olması ve enerji verimliliği nedeniyle raylı ulaşım en uygun çözüm olarak yapılan araştırmalarda karşımıza çıkmaktadır [1].

Demiryolu işletmecilerinin ulaşım sistemlerinden beklentileri, merkezden tren hareketlerinin güvenli bir şekilde kontrolü, saha ile merkez arasında kesintisiz iletişim, altyapı kullanım oranlarının ve hat kapasitesinin optimum düzeye çıkarılmasıdır. Teknolojide yaşanan gelişmeler bu sistemleri son derece güvenli, hızlı ve bir o kadar da karmaşık hale getirmiştir. Birkaç dakikanın bile iş ve insan hayatında oldukça önemli olduğu günümüzde dakikalarca tren beklemek için zaman kalmamıştır. Bu noktada, demiryolu trafiğini düzenleyen, daha fazla trenin (optimum kapasiteye ulaşma) daha hızlı ve emniyetli çalıştırılmasını sağlayan ve seyrüseferleri tek bir noktadan kontrol eden sinyalizasyon sisteminin önemi ortaya çıkmaktadır. Demiryolu sisteminin ilk yıllarından günümüze kadar tren sinyalizasyonu ve tren kontrol sistemleri üzerinde yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır (Bakınız Bölüm 2.1). Bu çalışmalar neticesinde bugün çok karmaşık ve teknolojik sinyalizasyon sistemleri geliştirilmiştir (Bakınız Bölüm 3.1). Ülkemizde, konvansiyonel hatlarda TCDD'nin gereksinimlerini karşılayan, uluslararası standartlarla uyumlu, genişleyebilir, esnek ve uygun maliyetli yerli kaynaklar ile geliştirilen Ulusal Demiryolu Sinyalizasyon Projesi (UDSP) ile sinyalizasyon sisteminin etkin çalışır hale gelmesi büyük önem kazanacaktır [2]. Avrupa dışı (Çin, Hindistan, Kuzey Amerika, Suudi Arabistan, Rusya, Avustralya, Kazakistan) ülkelerde ve ülkemizde demiryollarında mevcut haberleşme ve sinyalizasyon sistemleri olarak Avrupa Birliği komisyonlarının belirlemiş olduğu EN 50126, EN 50128 ve EN 50129 emniyet standartları ve kuralları geçerlidir [4]. Hızlı tren hatlarında daha yaygın olmak üzere Küresel Mobil İletişim Sistemi- Demiryolları

(GSM-R) haberleşme ağ alt yapısının kullanıldığı Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi/Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ERTMS/ETCS) Seviye 1 ve 2 sistemleri kullanılmaktadır [6]. Bu sistemlerin sahip oldukları sistem bütünlüğü emniyet seviyeleri Güvenlik Bütünlük Seviyesi 4 (SIL-4 - Safety Integrity Level) seviyesinde olup, tren trafiğinin ve trenin otomatik kontrolü için tren konumunun en hassas şekilde tespitinin yapılması gerektiğinden, hat boyuna tren konumunu algılayıp işleyen çeşitli sinyalizasyon donanımları mevcuttur (Bakınız Bölüm 3.3).

Gelecek nesil sinyalizasyon sistemi olan ERTMS/ETCS Seviye 3'te, sağlayacağı yarar olarak en fazla, hat boyu sinyalizasyon ekipman alım, montaj, bakım ve idame maliyetlerinde tasarruf sağlanması, konvansiyonel ve yüksek hızlı tren hat kapasitesinin optimum seviyelere çıkarılarak tren işletmeciliğinde altyapı kullanım kapasitesi artırması hedeflenmektedir [31]. Ayrıca mevcut hızlı tren hatlarında kullanımda olan demiryolu özgün haberleşme sistemi GSM-R sistemi olup, bu sistem teknolojisi artık eskimiş ve Avrupa'da artan veri iletişim trafiğini kaldıramayacak hale gelmiştir [17]. Bunun yerini Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) tarafından 2025'ten sonra üretimi durdurulup iptal edileceği kararı çıkan GSM-R'in yerini alacak bir IP tabanlı haberleşme sistemi olan 4G mobil iletişim sistemi LTE-R, ETCS Seviye 2 ve 3'de yerini alacaktır [28]. Demiryolu haberleşme sistemleri de artık bu yönde geliştirilmektedir.

Bu tezde, farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerinden (Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3) bahsedilmiştir. Ayrıca gelecekte Seviye 1 ve 2 sinyalizasyon teknolojilerin yerini alacak henüz geliştirme ve test aşamasında olan ERTMS/ETCS Seviye 3 sistemin işleyişi, bileşenleri (hat üstü ve araç üstü ekipmanları), uydu tabanlı (GNSS/INS) ve IP tabanlı (LTE-R) haberleşme sistemlerinden bahsedilmiştir. Örnek çalışma olarak; farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerinin Türkiye'deki Yüksek Hızlı Tren Hatlarının Hat Kapasitesine ve Altyapı Kullanım Oranlarına etkisi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada optimum hat kapasitesi ve altyapı kullanım oranı hesaplama yöntemi olarak UIC 406 Hükümleri yaklaşımı kullanılmıştır.

Bölüm 2'de demiryolu sinyalizasyon sistemleri geçmişten günümüze alt sistemlerine ve bileşenlerine bölünerek anlatılmıştır. Demiryollarında kullanılan başlıca sinyalizasyon teknikleri uygulamalarıyla genel olarak açıklanmıştır. Bu sistemlerin tasarım kısıtları anlatılmıştır. Demiryollarında sinyalizasyon sistemleri

için kullanılan emniyet standartları da açıklanmıştır. Sinyalizasyon sistemlerinin tarihsel gelişimi ve sinyalizasyon teknikleri, sinyalizasyon sistemi emniyet standartları ve Raylı Sistemlerde Emniyet Standartları ve sinyalizasyon tasarım kriterleri detaylı olarak incelenmiştir.

Bölüm 3’de farklı sinyalizasyon sistemleri ve trenlerdeki farklı araç üstü donanımlar sebebiyle belirli bir standardın oluşturulması ve bu standardın yaygın olarak kullanılması amaçlanmıştır. Genel sinyalizasyon sistemlerinden daha özele Avrupa ülkelerinde kullanılan ERTMS/ETCS demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin tarihsel gelişimi anlatılmıştır. ERTMS/ETCS Sinyalizasyon sistemleri bileşenlerine bölünerek alt seviyelerinden ve haberleşme sistemlerine (LTE-R/GNSS-INS) yer verilmiştir. Farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerinin Türkiye Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesine Etkisi ve Altyapı Kullanım Oranı çalışmaları senaryolar ile anlatılmıştır. Bu çalışmada, optimum hat kapasitesi ve altyapı kullanım oranı hesaplaması UIC 406 Hükümleri yaklaşımı ile teorik yöntem kullanılarak yapılmıştır.

Bölüm 4’de tezin konusu hakkında değerlendirmeler yapıp ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin kullanılması ile getireceği faydalardan bahsedilmiştir. Ayrıca farklı seviye ETCS sistemlerine geçişinde, Türkiye Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesinin nasıl etkilendiği ve Altyapı Kullanım Oranı çalışması ile YHT hatlarının kapasitesinin durumu analiz edilmiş elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

SİNYALİZASYON SİSTEMİNE GENEL BAKIŞ

2.1. Sinyalizasyon Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

Demiryolları yeni yeni gelişmeye başladığı yıllarda sadece hızlı bir ulaşım aracı olarak düşünülmüş ve demiryolu hatları üzerinde herhangi bir önlem almaya gerek duyulmamıştır. Çünkü demiryolu hat ve araçlarının sayısının ve tren hızlarının az olması kontrolü kolaylaştırıyordu. Demiryollarının gelişimine müteakip artan trafik neticesinde yaşanan bu problemlerden sonra çözüm amacıyla özel işaretlerin belirlenmesi ve belirli noktalara yerleştirilmesi, istasyonlarda ve hat üzerlerinde işaretçi diye adlandırılan görevliler konuşlandırılarak basit anlamda işletmesi yapılmaya başlanmıştır. Zamanla demiryollarındaki hızlı gelişme ile özellikle tren hızlarındaki ve vagon sayılarındaki artış nedeniyle makinistlerin görüş mesafesi içinde trenlerin durdurulması emniyetli şekilde ilerletilmesi problemler yaşanmaya başlanmıştır. İlk başlarda çözüm olarak, demiryolu işaretlerinin sayıları artırılmış ve problem yaşanan yerlere işaretçiler yerleştirilmiştir. 1840'lı yıllarda zaman aralığı yöntemi uygulamasına başlanmıştır [33]. Bu yönden de emniyet, ekonomi ve hız bakımından trenler için belirli aralıklar tespit edilmiştir. Bu zaman zarfında da karşılaşma noktalarına ulaşması istenmiştir. Ancak trenler aksi yönde iseler veya aynı yönde ilerliyorlarsa birbirlerinden haberleri olmamaktaydı. Böylece zaman aralık metodundan mesafe aralık metoduna geçildi. Mesafe aralık metodunda demiryolu hattı kısımlara bölünmüş ve blok adıyla tanımlanmıştır. Oluşturulan her bloğun başına bir işaret konulmuştur. Bu işaretler ile makinistler bloklarda tren olup olmadığını anlayabilmekteydiler. Bu yöntemin uygulanması sabit hat sinyal sisteminin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Telgrafın keşfedilmesiyle beraber zil sistemi de kullanılarak sinyal memuru (kontrol operatörü) bir sonraki istasyon operatörüne blokların boş veya dolu olduğunu bildirerek trenlerin seyri yönlendirilmiştir [33].

1900'lü yıllarda demiryolunda sefer yapan trenlerin aralarını belirli bir mesafede tutmak için sinyal memurları tarafından elle çalıştırılan blok sistemi, kontrolü elle çalıştırılabilen blok sistemi, yarı otomatik çalıştırılabilen blok sistemi,

otomatik çalıştırılabilen blok sistemi, mekanik çalıştırılabilen blok sistemi gibi değişik sistemler kullanılmıştır [7]. Ülkemizde günümüze gelindiğinde Merkezi Kumandalı Sinyal Sistemi (CTC) ile kontrol edilen hatların uzunluğu, 2014 yılı itibari ile 3.199 km'dir. Dağılımı şöyledir 2.443 km'si ana hattır, 389 km'si 2. 3. ve 4. hatlardır, 367 km'si tali hatlardır. Yüksek hızlı tren hat uzunluğu 1.184 km'dir ve 29 km de tali hattır. Genel toplamı 4.412 km'dir. Tüm hattın %35,3'ünün idaresi sinyalli sistem ile idame ettirilmektedir [8]. Türkiye'de uygulanan ilk sinyalizasyon sistemi Sirkeci-Halkalı banliyö hattınının 1955 yılında kurulması ile başlatılmış ve 1968 yılında da Haydarpaşa – Ankara hattında sinyalizasyon sistemi kurulması ile yaygınlaştırılma devam etmiştir [3].

2.2. Sinyalizasyonun Raylı Sisteme Uygulanması

Raylı ulaşım sistemi, önemli bir ulaşım ihtiyacına cevap vermek suretiyle yönetimlerdeki yerini ve önemini korumaktadır. Raylı ulaşımında trafik emniyetini temin etme mecburiyeti ve arz ettiği iktisadi değerler, demiryollarında işaret sisteminin doğmasına ve gelişmesine neden olmuştur. İşaretleşme maksadı ile kullanılan ışıklar ve elektrikli telgraf, demiryolu sinyalcilerinin başlangıcıdır. Zamanla özel işaretlerin belirlenmesi ve belirli noktalara yerleştirilmesi, trafik emniyeti ve tren süratlerini arttırmıştır. Daha sonra işaretlerin ve demiryolu makaslarının istasyonlarda belirli bir yerden idare edilmesi çalışmaları yapılmıştır. Makara ve kasnaklar üzerinden gerilen çelik teller aracılığıyla semaforların (mekanik sinyal) uzaktan idareleri mümkün kılınmış, sonra da makas ve semaforların kilitlemeleri temin edilerek çok daha emniyetli bir sistem meydana getirilmiştir. Bu sistemlere elektriğin verilmesi ile yarı elektrikselsel, yarı mekanik emniyet sistemleri geliştirilmiştir. Bu durum, trafik emniyetini personel elinden kurtardığı gibi daha az sayıda personel istihdamına neden olmuştur. Makas ve semaforlar elektrik kumandalı motorlar ile çalıştırılmıştır. Gelişim devam ettiğinden semaforların yerini elektrik lambalı sinyaller almıştır. Buradan hareketle trenlerin dur işaretini gösteren bir sinyali geçmelerini önlemek amacıyla, manyetik olarak çalışan tren durdurucuları geliştirilmiştir. Bütün bu çalışmalar yardımıyla tren işletmeciliğinin gelişmesi karşısında daha çok tren işletebilmek, daha az personel kullanmak, trenlerin istasyonlardan yol alıp verme yöntemiyle sevklerinden doğan gecikmeleri önlemek amacıyla tren trafiğinin merkezden kontrolü sağlanmıştır [34].

Sinyalizasyonun, hattın ve işletme yeteneğinin artırılması, her türlü yük ve yolcu ulaşımın daha hızlı yapılması, hat kapasitesinin artırılması ve bunları yaparken ekonomik ve emniyetli bir işletme sisteminin uygulanmasıdır. Demiryollarında sinyalizasyon, ilgili personele demiryolu vasıtalarının seyirleriyle ilgili yapılan manevralar, yolun durumu vb. hakkında talimat veren bir tesistir. Bu anlamda sinyalizasyona kendine özgü bir haberleşme aracı olarak bakılabilir. Sinyalizasyon tesislerinde yukarıda sayılan bilgiler, tesislerin sinyal olarak adlandırılan ekipmanlarıyla bildirilirler. Yani sinyaller belirlenmiş olan bilgi ve talimatları ilgili personele bildirirler [7].

Merkezden kontrolün faydaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Zaman kısalmır.
- Mevcut demiryolu hattının kapasitesi artar.
- İşletme kolaylaşır ve işletme emniyeti artar.
- Personel sayısı azalır.
- Emirler, zaman ve her türlü şartlar trafik ile kaydedilir.

2.3. Sinyalizasyonun Sistemleri

Sinyalizasyon sistemi genel olarak iki temel ögeden oluşur. Birincisi, hat üstü (sinyaller, makas motorları, ray devreleri, eurobaliz, hat üstü elektronik ünite, euroloop, euroradio, radyo blok merkezi ve anlaşıman) ekipmanlardır. İkincisi ise araç üstü (Avrupa Hayati Bilgisayarı, Sürücü Makine Arayüzü, Tekerlek Sensörler, Doppler Radarı, Baliz Anteni, Tren Kayıt Ünitesi, Özel İletim Modülü, Baliz İletim Modülü) ekipmanlardır.

Sinyalizasyon sisteminin ana fonksiyonları ve amaçları aşağıda listelenmiştir;

- Trenlerin kendi aralarındaki kazaların önlenmesi,
- Makasların yanlış kilitlemesi ve yönlendirilmesi sonucu trenin raydan çıkmasının ve (deray), kazaların önlenmesi,
- Rota yönlendirmesiyle çakışmayacak şekilde trene hareket etme yetkisinin verilmesi,
- Hemzemin geçişlerin korunmasıdır.

Sinyalizasyon sistemlerinde, tasarlanacak sistemlerin “Fail-Safe “ tasarım kriterlerine uygun olarak yapılması gerekmektedir. Fail-Safe ve interlocking kavramları vazgeçilmez bir unsurdur.

Bir sinyalizasyon sisteminin tasarımı yapılırken aşağıdaki kurallara uyulur:

- Demiryolu sinyalizasyon sistemleri ve kontrol merkezleri “fail-safe” prensiplerine uygun olarak tasarlanmalıdır.
- Merkez ve saha kontrol ekipmanları çift eşli (yedekli) olarak tasarlanmalıdır.
- Sinyalizasyon sistemi tasarlanırken, sistemin herhangi bir bölümünde hata oluşması durumunda ilgili sinyal lambasının o bölüm için belirlenmiş/gerekli olan en kısıtlayıcı, güvenli duruma geçecek şekilde tasarlanmalıdır.
- Sinyalizasyon sistemlerindeki, sistem emniyetini etkileyecek tüm elektrik/elektronik kontrol devreleri “kapalı devre” prensibine uygun olarak tasarlanmalıdır.
- Demiryolu sinyali ve kontrol sistemi (sinyalizasyon sistemi) tren hareketini karıştıracak şekilde farklı durumları aynı anda göstermemesi için birbirine bağlı olarak (interlocking) çalışmalıdır.
- Sinyal sistemlerinde kullanılan “rota kilitleme-bölge meşguliyeti” ekipmanları; ray devreleri, aks sayıcılar gibi sistemler tren makas bölgelerinden geçerken, makasın hareketli kısımlarının hareket etmesini engelleyecek, mekanik kilitleme şeklinde tasarlanmalıdır.
- Tasarım sürecinde fonksiyonel emniyet ve sistem emniyeti için fail-safe durumlar belirlenmeli ve hata durumunda fail-safe rutinlerin çalışması sağlanmalıdır.
- Tasarım sürecinde ve sonrasında sistem test edilerek fail-safe rutinlerin çalışması kontrol edilmelidir [5].

İşletmelerde en önemli etken olarak emniyetin sağlanması dışında, sinyalizasyon sisteminin diğer kullanım gereksinimleri; hat kapasitesini arttırmak, zaman çizelgesi iyileştirmesi yapmak, enerji tüketimini asgariye indirmek şeklindedir.

Bu bölümde 5 tip sinyalizasyon tekniğinden bahsedilecektir. İlki konvansiyonel hatlarda kullanılmakta, diğer sinyalizasyon teknikleri her türlü yeraltı treni (metro) ve hızlı tren hatlarında kullanılmaktadır.

1. Röle kilitleme esaslı sinyalizasyon sistemi
2. Sabit blok manuel sürüş sinyalizasyon sistemi
3. Sabit blok otomatik sürüş sinyalizasyon sistemi
4. Hareketli (Moving) blok otomatik sürüş sistemi
5. Tam otomatik sürücüsüz sinyalizasyon sistemi

2.3.1. Rôle kilitleme esaslı sinyalizasyon sistemi

Rôle kilitleme sistemi parçaları; istasyon kumanda masası, rôle rakları, cihaz rakları, yol boyunca cihaz dolapları ve bağlantı kutularından oluşmaktadır. Rak, herhangi bir malzemenin toplu olarak bulunduğu düzene denir. Ayrıca istasyon aralarındaki otomatik blok sinyalleri için blok kontrol rôle devreleri bilgi iletim uydusu (kumandalı blok sinyali KBS için) ray devresi alıcı ve verici cihazları, enerji besleme cihazları ile hemzemin geçit koruma devre ve cihazları, yol boyu otomatik durdurma (Automatic Train Service - ATS) sistemi devre ve ekipmanları da bu sistem içinde vardır. Ülkemizde konvansiyonel hatlarda halen yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.2. Sabit blok manuel sürüş sinyalizasyon sistemi

Sabit blok sinyalizasyon sistemi en yaygın ve geleneksel olarak kullanılan sinyalizasyon tipidir. Hat belli sayıda ve aynı veya farklı uzunlukta bloklara ayrılır. Sadece bir trenin herhangi bir zamanda bir bloğu işgal etmesine izin verilmektedir. Bloğa tren girdiğinde, o blokla ilişkili olan sinyal yeşilden kırmızıya dönüşür. Bu yöntemde sinyal sistemi sinyal lambaları aracılığı ile makinisti yönlendirir. ERTMS/ETCS Seviye 1 ve 2 sinyalizasyon sisteminin temelini oluşturmaktadır. Günümüzde 10 dakikanın altındaki seferlerde zaman çizelgesi uygulaması vardır. Bir sefer aralığı (Headway Time – HT) 10 dakikanın altında ise trenler arasındaki mesafenin korunması gerekmektedir. Fakat Sabit bloklu manuel sürüş sisteminde bu aralıkları tutturmak kolay olmamaktadır. Bu sistemde sefer aralığını tutturmak için makinistlerden faydalanılmaktadır. Örneğin İzmir ve İstanbul Hafif Metro hatlarında, Ankara ve Bursa hafif yeraltı treni hatlarında 10 dakikalık sefer aralığını tutturmak için makinist tecrübesi yerine Makinist Bilgilendirme Sistemi ve Araç Takip Sistemi kullanılmaktadır. Metro sistemlerinde, hızlı tren hatlarında, banliyö hatlarında ve şehirlerarası hatlarda kullanılan bir sinyalizasyon sistemidir. [3].

2.3.3. Sabit blok otomatik sürüş sinyalizasyon sistemi

Bu sinyalizasyon sisteminde trenler kumanda merkezi tarafından bilgisayar aracılığı ile otomatik olarak sürülmektedir. Tren hareket saatleri zaman çizelgesine göre işletme programına kaydedilmektedir. Trenin seyir hızı ve nasıl gideceği tren ile

haberleşme yöntemi veya blokların başına geldiğinde gelen uyarıdan alınmaktadır. Trenin nerede duracağına bilgisi için merkezi anlaşımdan komut gelir. Bu komutta tren konum bilgisi ve durdurulması gereken noktayı ve nasıl duracağı vardır. Trende gelen komut bilgisine göre duracağı yeri, uygulaması gereken fren gücünü hesaplar ve gücü uygular. Eğer tren çalıştırma aralığı minimum seviyede tutulmak isteniyorsa sinyalizasyon sisteminin seviyesine göre ray devrelerinin uzunluğu kısa tutulmalıdır.

Bu sistem 2 dakika civarındaki tren çalışma aralıklarına kadar uygun bir çözümdür. Taksim-4.Levent arasındaki İstanbul Metrosunda bu sistem kullanılmaktadır [3].

2.3.4. Hareketli (Moving) blok otomatik sürüş sinyalizasyon sistemi

Günümüzde sinyalizasyon teknolojisinin geldiği son noktadır. Özellikle metro sistemlerinde, yolcu talebinin sürekli olarak artması var olan sabit blok sinyalizasyon sistemlerinin hat limitlerini zorlamıştır. Bu sistemde her şey sinyalizasyon yazılım ve donanımlarından oluşmaktadır. Tren kumanda merkezi her trenle hat boyunca döşenmiş ekipmanlar aracılığıyla haberleşir. Trenle mutlaka etkileşim halinde olunması gerektiğinden haberleşme sistemi yedeklidir. Hareketli blok sinyalizasyon tekniğinde trenlere sürekli olarak otomatik tren işletimi ve koruması için veri iletimi sağlanır. Bu sürekli veri iletimi sayesinde trenler arası mesafe, ani frenleme mesafelerinden az olmamak şartıyla kontrol edilir. Aynı zamanda tren hızı ve pozisyonu bilgileri yol boyu işlemciler vasıtasıyla merkeze iletilir. Bu iki yönlü veri iletimi, sistemin temelini oluşturduğundan bu sistemler son yıllarda özellikle Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) tarafından açık kod olarak standarda giren Haberleşme Tabanlı Tren Kontrolü (Communication Based Train Control-CBTC) sistemleri olarak isimlendirilir. Bu sinyalizasyon sistemi hat kapasitesini artırma olanağı vermiştir. Bu sistem ile iki tren arasındaki asgari takip mesafesini günlük periyotta en fazla 120 saniye ile yoğun saatte 90 saniyeye düşürmektedir. Kullanım alanı olarak yolcu yoğunluğu olan metro hatlarında kullanılmaktadır. Türkiye’de MARMARAY hattında kullanılmaktadır [23]. Bu sinyalizasyon sistemi sayesinde günlük 219 sefer yapılmaktadır [30]. Avrupa ve dünyada yoğun yolcu kapasitesine sahip metro hatlarında (Londra, Paris, Moskova, Tokyo, Honkok) kullanılmaktadır.

Geliştirilmekte ve test aşamasında olan ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin temelini hareketli blok sistemi oluşturmaktadır. Böylelikle bu sistemde de trenler arası mesafeyi 90 saniyeler mertebesine kadar indirgenebildiği için hat kapasitesinin ciddi anlamda artma olanağını vermiştir.

2.3.5. Tam Otomatik Sürücüsüz Sinyalizasyon Sistemi

Hem hareketli blok hem de sabit blok sistemlerde otomatik sürüş sisteminin zaman içinde geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Kumanda merkezi her trenle hat boyunca döşenmiş sızıntılı kablo veya kablosuz ağ yoluyla haberleşir. Kablosuz ağ yoluyla trenle haberleşilen sistemlerde sinyalizasyonun güvenlik seviyesinin yüksek olması gerektiğinden haberleşme sistemi yedekli kullanılır ve sahadan gelen bilgiler tren üzerinde karşılaştırılır. Trenlerin hangi hattın hangi noktasında olduğu tren tarafından kumanda merkezine aktarılır. Her trenin, önündeki trene ne kadar yaklaşacağı trenin hızına, fren gücüne ve yol durumuna göre anlık yeniden hesaplanarak trene gönderilir ve trenin hızı yeniden ayarlanır. Her trenin bulunduğu blok ayrı ayrı kilitlenir ve her trenin hızı ayrı ayrı hesaplanır.

1960’larda başlayan araştırmalar ve denemelerden sonra ilk Tam Otomatik Sürücüsüz (TOS) Raylı Sistem Fransa’ da Siemens tarafından inşa edilerek 1983 yılında Lille, hizmete açılmıştır. Günümüzde ise haberleşme sistemlerinin gelişmesi ile raylı toplu taşımada sürücüsüz veya tam otomatik sistemler yaygınlaşmaktadır. Kadıköy – Kartal arasındaki İstanbul Metrosu (M4) bu sistemi kullanmaktadır [3].

2.4. Sinyalizasyon Sistemlerinde Emniyet Standartları

Raylı sistemlerde emniyet; işletme, yolcu ve mal güvenliği için son derece önemlidir. Demiryolu emniyet standarttı dendiğinde bir demiryolunu oluşturan tüm sistem ve alt sistem bileşenlerinin emniyet bütünlüğünden bahsetmek gerekmektedir. Bu bileşenlerin ise aynı emniyet seviyesine ve kıstaslarına sahip olması gerekmektedir. Bunu sağlamanın yolu standartlaştırmadan geçmektedir.

Ülkemizde kullanılan Uluslararası Standartlar Avrupa Elektroteknik Standartlar Enstitüsü (European Committee for Electrotechnical Standards – CENELEC), Uluslararası Elektrik-Elektronik Programlanabilir Elektronik standardı (International Electrotechnical Commission-IEC) ile belirtilmiş olup Tablo 2.1’de listesi verilmiştir [7].

Tablo 2.1: Uluslararası Standartlar [9]

Standartlar	Açıklaması
EN 50129	Tüm raylı sistemlerinde emniyet ilişkili elektrik-elektronik, kontrol ve koruma sistemlerinde uygulanır.
EN 50126-1	Demiryolu Uygulamaları-Güvenilirlik, Elde edilebilirlik, Bakım ve Güvenlik tarifleri ve gösterilişini kapsar.
EN 50128	Tüm raylı sistemlerinde emniyet ilişkili kontrol ve koruma sistemleri yazılımlarında uygulanır.
EN 50155	Tüm raylı sistemlerdeki demiryolu araçlarında kullanılan elektronik ekipmanlar için uygulanır.
EN 50125-3	Tüm raylı sistemlerinde kullanılan sinyal ve haberleşme ekipmanları için uygulanır.
EN 61373	Tüm raylı sistemlerdeki demiryolu araçlarında oluşan şok ve titreşim testleri için uygulanır.
EN 50124-1	Demiryolu Uygulamaları-İzolasyon bağlantılarını, Part.1-Temel gereksinimleri, Bütün elektrikli ve elektronik cihazlar için açıklık ve kayma mesafelerini, Tadilat- A1 özelliklerini içerir.
EN 50121-3-2	Demiryolu uygulamaları ve elektro manyetik uyumlulukları kapsar.
EN 60529	Kapatma ile koruma altına alma seviyelerini (IP code) kapsar.
IEC 61508	Programlanabilir Elektronik standardı raylı sistemlerdeki uygulamasını kapsar.

Demiryolları standartları ile CENELEC tarafından geliştirilen EN 50126, EN 50128 ve EN 50129 standartları yeterli bir noktaya gelmiştir. Bu standartlar Metro, Hafif Metro, Tramvay ve diğer demiryolu uygulamalarında kullanılmaktadır. Aşağıdaki tabloda uygulama alanları verilen bu standartlar demiryolu sistemlerinde emniyet süreçlerinin omurgasıdır. EN 50128 ve EN 50129 standartları, IEC 61508 standartının raylı sistemlerdeki uygulamasıdır [4].

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ERTMS/ETCS SİNYALİZASYON ve HABERLEŞME SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

ERTMS (European Rail Traffic Management System – ERTMS) günümüz demiryolu sektöründe kullanılan en son sinyalizasyon teknolojisidir. ERTMS, adından anlaşıldığı üzere demiryolu trafiğinin verimli ve etkin bir biçimde yönetimini içeren genel sinyalizasyon sisteminin adıdır. Demiryolu sinyalizasyonu konusunda günümüze kadar yapılan çalışmaların çoğu Avrupa Tren Kontrol Sistemi (ETCS) adı verilen, ERTMS'nin sinyalizasyon ile ilgili teknolojisinin geliştirilmesine dairdir. Dolayısıyla ETCS sistemi; ERTMS programının bir alt kümesidir ve ERTMS'nin tüm sinyalizasyon teknolojisini içerir. Bundan sonra ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemi teknolojisi, kolaylık açısından ETCS olarak adlandırılacaktır [10]. Bu sistem şimdiye kadar tasarlanmış en ileri Otomatik Tren Kontrol (Automatic Train Control - ATC) ve Kabin Sinyalizasyonunu ihtiva eder. Artık Avrupa Birliği, yeni yapılan bütün hızlı tren hatları için ERTMS'yi zorunlu hale getirmiştir. Yakın bir gelecekte ve mevcut demiryolu hatları da yenilenerek tüm Avrupa'da yapılan demiryolları için ERTMS kullanımı 2020'ye kadar zorunlu hale getirilecektir.

Bu sistem Avrupa Birliğinin Destek Programları kapsamında uydu tabanlı haberleşme sistemlerine Shift2Rail ortak girişimi kapsamında ANSALDO firmasının "3inSAT" ve ALSTOM firmasının "Locoprol" AR-GE projeleri ile çalışmaktadır. Bu projeler ile hedeflenen ERTMS/ETCS Seviye-3'te tren konumunun, yolboyu ekipmanlara gerek kalmadan bütünleşmiş Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System - GNSS) ve Ataletsel Seyrüsefer Sistemi (Inertial Navigation Unit - INS) vasıtasıyla konum güncellemesinin (kaybından sonraki sapma oranını azaltarak) tespit edilmesi ile trenin konum ve hız bilgileri GNSS/INS sistemi vasıtasıyla takip edilip bilgileri LTE-R haberleşme sistemi üzerinden trafik kontrol merkezindeki sinyalizasyon sistemine aktarılması hedeflenmektedir. Bu sistem Avrupa için geliştirilmesine rağmen dünyadaki birçok demiryolu idareleri ERTMS'i kendi ülkeleri için değerlendirmekte ve birçoğunun da duyduğu ilgi gittikçe artmaktadır. (Çin, Avustralya, Yeni Zelanda, Sudi Arabistan, Güney Kore, Mısır vb.) [10]

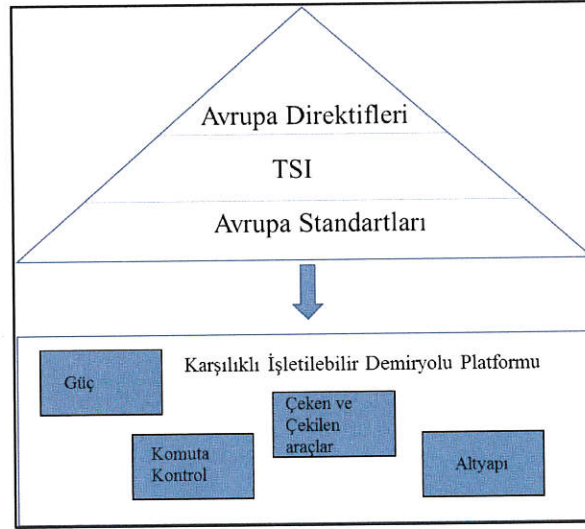
3.1. ERTMS/ETCS'nin Kısa Tarihçesi

ERTMS/ETCS, demiryolları, yetki ve sinyalizasyon sistemleri için ortak ve karşılıklı işletilebilir platform kurmak üzere geliştirilmiş standart bir uluslararası programdır. Günümüzde ERTMS/ETCS'nin kullanımı tüm yüksek hızlı ve kapasiteli demiryolu hatlarında zorunlu olmakla birlikte bu sistem geleneksel hatlarda da kullanılabilir. Bir trenin Avrupa ülkelerinin birinden diğerine geçerken sınırda o ülkenin demiryolu standartlarına geçme zorunluluğu; seyahat süresine, işletme ve bakım maliyetlerine büyük ölçüde etki eder. Sınırlar ötesi tren işletimindeki bu tür kısıtlamaları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan olumsuzlukları ortadan kaldırmak için Avrupa Birliği Komisyonu'nun mali desteğiyle Avrupa Sinyalizasyon Endüstrisi ve Avrupa Demiryolları'nın on yılı aşkın çalışmalarının ürünü olarak sinyalizasyon ara yüzlerini standartlaştırarak bunları ülkelere özgü olmaktan çıkararak, ekipmanlarda açık pazarı teşvik ederek ticari olarak cazip hale getiren ERTMS/ETCS sistemi ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla karşılıklı işletilebilirliği sağlamanın esasları platformun bir dizi alt sistem ve bileşenlerinden oluşmakta ve teknik özellikler geliştirilerek temel gerekliliklerini ve ara yüzlerini ortaya koymaktadır [23].

1990'ların başında iletim tabanlı kabin sinyalizasyonunun farklı yönleri üzerine çeşitli proje ve faaliyetler başlatılmıştır. O zamanlar bir master plan veya genel strateji olmamasına karşın bu projelerin bazıları Avrupa komisyonlarından fon alıyordu. Başlangıç olarak Avrupa demiryolları yeni bir ortak tren koruma sistemi için gerekli kendine özgü kuralları belirleme çalışmalarını üzerine aldı. Buna paralel fakat ayrı olarak Avrupa Sinyalizasyon Endüstrisi gerekli parçalar için kendine kuralları geliştirilmesi üzerine çalıştı. Kademeli olarak Avrupa Komisyonları Uluslararası Demiryolu Birliği (International Union of Railways - UIC) ile birlikte işlerlik sağlayan yüksek hızlı tren şebekesi için ortak bir çalışmaya girdi [23].

Daha sonra 1993'te Avrupa Birliği konseyi Karşılıklı İşletilebilirlik Direktifini yayınladı. Başta Alman Demiryolları (Deutsche Bahn-DB), İtalya Demiryolları (Ferro vie dello Stato-FS) ve Fransa Demiryolları (Société Nationale des Chemins de fer Français -SNCF)'den oluşan, ancak sonrasında Avrupa'daki başka demiryolu şirketlerinden katılımın da olduğu ERTMS Grubu adı verilen demiryolları uzman ekibini oluşturmaya yönelik karar aldı. Burada amaç Karşılıklı İşletilebilirlik Şartnamesi (Technical Specification for Interoperability - TSI)'nin kapsamını belirleyecek bir yapı oluşturulmaktadır [6].

1998 yazında ERTMS projesinin TSI'ını sonuçlandırmak üzere Avrupa'nın Sinyalizasyon şirketleri olan Alcatel, Alstom, Andalso Signal, Bombardier, Invensys Rail ve Siemens'ten oluşan Avrupa Sinyalizasyon Şirketleri Birliği (Union of European Signalling Companies – UNISIG) birliği kuruldu [11]. Söz konusu hiyerarşik düzen Şekil 3.1'te verilmiştir.



Şekil 3.1: Hiyerarşik belge düzeyi

3.2. ERTMS/ETCS'nin Amaçları

ERTMS/ETCS'nin temel iki amacı vardır; birincisi trenlerin demiryolu ağında güvenli işletimini sağlamak, ikincisi ise hat kapasitesinin iyileştirilmesi ve mevcut tren trafik yönetimiyle ilgilenmektir. Bu sistem;

- Sınırlar ötesi tren işletmesindeki kısıtlamaları ortadan kaldıracak,
- Sinyalizasyon ara yüzlerini standartlaştırarak bunları ülkelere özgü olmaktan çıkaracak,
- Daha az hat üstü ekipmanı gerektirdiği için maliyetleri düşürecek,
- Daha kısa işletme aralıkları sunabilecek,
- Ekipmanlarda açık pazarı teşvik ederek ticari olarak cazip hale getirecek,
- Güvenliği ve servis kalitesini arttıracaktır.

Burada amaç TSI'nin kapsamını belirleyecek ve maliyetleri azaltacak bir yapı oluşturmaktır. Bu iki kavram aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.2.1. Karşılıklı İşletilebilirlik

Karşılıklı işletilebilirliğin manası ERTMS/ETCS sisteminde kullanılan tren üstü ve hat üstü ekipmanları gibi önemli alt sistemlerin üretici firmalara bağlı kalmaksızın birbirleriyle iletişim kurabilmesidir. Ekipmanların yapısı birbiriyle aynı olmasa da gerçekleştirdiği fonksiyonlar birbirinin aynısıdır. Yani tren üstü ekipmanları ve hat üstü ekipmanları farklı ERTMS/ETCS üreticilerden tedarik edilse de bu ekipmanlarla donatılan trenler rahatlıkla bir güzergâhtan diğerine geçebilirler. İşte bu, teknik olarak karşılıklı işletilebilirliktir (TSI). Örneğin, dünyadaki uçaklar herhangi bir ülkenin uluslararası havaalanına rahatlıkla iniş yapabilir. Çünkü uçaklar her ülkede geçerli olan ortak bir radyo, radar ve navigasyon sistemlerine sahiptir ve bu sistemlerin işletim metodu, kullanma ara yüzleri birbirinden farklı, tescilli veya patentli olsa dahi gerçekleştirdikleri fonksiyonlar aynıdır. İşte bu karşılıklı işletilebilirliktir. ERTMS/ETCS’de de önemli olan sinyalizasyon sisteminin fonksiyonel işletiminin standartlaşmış olmasıdır.

3.2.2. Azaltılmış Sinyalizasyon Maliyetleri

Sinyalizasyon maliyetlerini düşürmenin iki yolu vardır. Birincisi, sinyalizasyon ekipmanları için geniş ve açık bir pazar meydana getirerek yatırımı teşvik edici ve rekabetçi bir ortam sağlamak, ikincisi ise ERTMS/ETCS ile hat kapasitesi ve hizmet kalitesini yükselterek maliyet-zarar oranını iyileştirmek ve ERTMS/ETCS’yi ileri sinyalizasyon çözümü haline getirmektir.

3.3. ERTMS/ETCS Sistem Bileşenleri

ERTMS/ETCS, hat üstü ekipmanları ve araç üstü ekipmanlarından oluşmaktadır.

3.3.1. Hat Üstü Ekipmanları

3.3.1.1. Sinyaller

Yol girişlerinin veya her ray bölgesinin başlangıcında trenlerin durması veya ilerlemesini kumanda eden renkli, ışıklı bildirim veren trafik ışıkları bulunur. Gidiş yönüne göre sağda yol boyunca bulunan makinist sinyallerin verildiği renk

bildirimlerine göre hareket eder. Kırmızı sinyalin anlamı “dur”, yeşil sinyalin anlamı “geç” manasındadır. Trenin kırmızı ışığa uyup durmaması durumunda tren otomatik olarak durdurulur. Hız sınırları bilgisi, sinyal sisteminin teknolojisine göre her sinyal bölgesinin başlangıcında trene verilerek güvenli seyir etmesi sağlanır. Hareketli (Moving block) blok sinyalizasyon sisteminde bloklar değişebileceğinden sinyaller yoktur ve sadece istasyon veya makas bölgelerine konuşlandırılabilir.

3.3.1.2. Makas Motorları

Makaslar trenlerin yön değişimlerini sağlayan sinyalizasyon alt sistemdir. Fail-Safe mantığına göre demiryolunda tren olduğu veya geçtiği durumlarda komut almaz ve şüpheli durumda komuta edilmesini izin vermeyerek kendini kitlet. Makasın ana hat veya içtinap hattına geçişi, makas motoru sayesinde, kontrol merkezinden yapılır. 3 çeşit makas vardır. Bunlar **Basit Makas**; Trenlerin yalnız iki yol değiştirmesini sağlar. **Bileşik Çift Makas**; İç içe iki basit makastan meydana gelmiştir. Bir yoldan üç yola geçiş yapılabilir ve **Çapraz Makas**; kesişen iki yolda karşılıklı geçişi sağlar. Birden fazla yöne geçiş sağlar.

3.3.1.3. Ray Devreleri

Ray devreleri, bir kısım rayların teşkil ettiği bir elektrik devresi olarak tanımlanabilir. Ray devresinin esas fonksiyonu, trenlerin varlığını hissetmek ve bunu takip eden trenlere bildirmektir. Bir ray devresi açık makasları, istenirse kırık rayları ve tahrip olmuş izole contaları da kontrol edecek şekilde düzenlenebilir. Değişik tiplerde olan bu ekipmanlar tren konumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

3.3.1.4. Eurobaliz’ler

Ray mıknatısı adı verilen Eurobaliz’ler (baliz veya aktarıcılar) üzerlerinden geçildiğinde kodlanmış sinyalizasyon verilerini trene aktaran iletim aygıtlarıdır. Başka bir deyiş ile ETCS mesajı gönderen ve raya kurulu olan ekipmanlardır. ETCS Seviye-1 ve 2’de temel olarak trenin konum yönetimi için kullanılır. Temelde trenlere trenlerin yeniden konumlandırılma işlevi için gerekli bilgiyi vermek ve konum raporlarını kullanarak istasyondaki RBC’yi trenlerin konumu hakkında bilgilendirmek için kullanılır. İki çeşit baliz vardır; üzerinden geçildiğinde trenin

altına yerleştirilmiş baliz anteni sayesinde aktif hale gelerek hafızasına kaydedilen veriyi trene aktaran pasif baliz (Fixed Balise) ve içerisindeki bilgi hat üstü elektronik ünite sayesinde sürekli olarak değiştirilebilen aktif balizdir.

3.3.1.5. Hat Kenarı Elektronik Ünite

Hat Kenarı Elektronik Ünite (Lineside Electronic Unit-LEU) anlaşılan ile diğer harici sistemler ve ray üstüne kurulu değiştirilebilir balizler arasında ara yüz işlevi gören güvenli ekipmandır. Balizlere değişken verileri ileten elektronik cihazlardır. Bir LEU birbirinden bağımsız olarak dört aktif balize veri transfer edebilmektedir. Önceden tanımlı ERTMS/ETCS mesajlarının uygun olanlarını anlaşılan veya harici sistemden gelen bilgilere göre gönderir.

3.3.1.6. Euroloop (infill)

Hat kapasitesini arttırmak için balizlerin önüne eklenen çevrimlerdir. Radyo Infill - Euroloop ile aynı fonksiyonu yerine getirir fakat GSM-R radyo teknolojisini kullanır.

3.3.1.7. Euroradio (GSM-R/LTE-R)

Veri ve ses iletiminde kullanılmak üzere GSM'in demiryoluna özgü düzenlenmiş özel bir çeşididir. GSM-R (ETCS Seviye 2'de kullanılmaktadır) ve LTE-R (ETCS Seviye 3'de kullanılması için çalışılmaktadır) diye adlandırılmaktadır. Tren haberleşme sistemleri Bölüm 3.5'te anlatılmıştır.

3.3.1.8. Radyo Blok Merkezi

Radyo Blok Merkezi (Radio Block Center-RBC) ETCS Seviye 2 ve 3'ün hat boyu sisteminin kalbidir. RBC, ETCS Seviye 2'nin güvenli merkezi hat boyu ekipmanıdır. GSM-R iletişiminin kurulmuş olduğu ETCS Seviye 2'de çalışan tüm trenlerin güvenliğinden sorumludur. Diğer bir deyişle RBC güvenli bir tren yolculuğu ve ayrımı için gerekli veri alışverişini yönetir; bunu yalnızca kendi yönetim alanı çerçevesinde yapar.

3.3.1.9. Anlaşman (Interlocking) Sistemi

Demiryolu anlaşman (interlocking) sistemi istasyon içerisindeki sistemi ve istasyonlar arasındaki trafiği kontrol eden sisteme denir. Bu kontroller raylı sistemlerde makaslar, sinyaller, ray devreleri, tren rotaları ve diğer trenlerin hareketleridir. Bunları yaparken demiryolu kurallarına ve düzenlemelerine uyarak gerçekleştirilir. Anlaşman (Hat kilitleme-Interlocking) ERTMS tanımının resmen bir bileşeni olmamasına rağmen sistemin gerekli parçalarından bir tanesidir. Birçok modern hat kilitleme teknolojisi ETCS kullanımı için uygun olmasına karşın kapasite artırımını için çalışan sistemlerinin modifiyeli edilmesi gerekmektedir.

3.3.2. Araç Üstü (Onboard) Ekipmanları

Trenin kumanda merkezinde bulunan sinyalizasyon sisteminden gelen bilgiler ile treni hareket ettiren veya durdurulmasını yönlendiren elektronik ünedir. Trenlerin sinyaller ile hareket etmesindeki en önemli bileşenidir. Araç üstü ekipmanlar trenin hız sınırını ve diğer uygulanması gereken emniyet sistemlerinin uygulanmadığı anda devreye giren ve treni durduran ekipmanlardır. Bu ekipmanlar devre dışı bırakıldığında birçok kazalar yaşanabilmektedir.

3.3.2.1. Avrupa Hayati Bilgisayarı

Avrupa Hayati Bilgisayarı (European Vital Computer-EVC) tren üstü ETCS sisteminin kalbidir. Hat üstü ekipmanlarından alınan bilgilere, makinistin gönderdiği bilgilere ve araç üstü algılayıcılardan gelen verilere dayanarak güvenli bir biçimde işleyip trenin güvenli bir şekilde yoluna devam etmesini sağlayan ve GSM-R/LTE-R veya diğer radyo anten aracılığı ile RBC'ye aktaran hatadan yalıtılmış bir donanım sistemidir.

3.3.2.2. Sürücü Makine Ara Yüzü

Sürücü Makine Ara yüzü (Driver Machine Interface-DMI) tren sürücü ile ETCS arasındaki iletişimi sağlayan sistemdir. Tüm makinist kabinlerinde bir monitör yardımıyla sinyal ve göstergelerin gösterilmesi, girilen bilgilere erişim ve bir dizi

anahtar ve buton yardımıyla özel işlevlerin yapılması ve makinist tarafında teknik karşılıklı işletilebilirliğin sağlanması için tasarlanmış bir tren kokpitidir.

3.3.2.3. Odyometre Alt Sistemi

Odyometre, kat edilen mesafenin ölçülmesi için kullanılan sensörlerden gelen bilgilere dayanarak teker üstündeki bir aracın konum ve hızını tahmin etmede kullanılan bir teknolojidir. Odyometre, bir aracın kat ettiği yolu, tekerlerinin dönme sayısını verili bir boyut/ yarıçap üzerinden ölçerek hesaplar. Odyometre alt sisteminin temel ekipmanları; **Tekerlek Sensörü**; Trendeki odyometrik sistemin bir parçası olan bu sensörler trenin hızını ve gidilen mesafeyi hesaplamak için tren tekerinin dönüşünü algırlar. **Hız Ölçer**; Standard tren kaynaklı yapılandırmada hızölçer (Akselerometre) kullanılır ve bu cihaz ETCS tren kaynaklı alt sistemine tren hızı artması/düşmesini temin eder. **Doppler Radarı**; odyometrik sistemin bir parçası olan bu radar Doppler etkisi temeline dayanarak trenin hızını tahmin eder.

3.3.2.4. Eurobaliz Anteni

Eurobaliz anteni hata yerleştirilmiş balizlerin üzerinden geçildiğinde içerisine kaydedilmiş verileri okumaya yarayan cihazdır.

3.3.2.5. Tren Kayıt Ünitesi

Tren Kayıt Ünitesi (Train Record Unit-TRU) tren ve bakım amaçları için veri depolayan kayıt ünitesidir.

3.3.2.6. Özel İletim Modülü

Özel İletim Modülü (Specific Transmission Module-STM) veya tren arayüz ünitesi (Train Interface Unit-TIU) diye de adlandırılan eski sinyalizasyon teknolojileri arasındaki uyumu sağlayan bir ara yüz parçasıdır. Örneğin, İspanya'daki mevcut otomatik frenleme ve bilgilendirme sinyal (Anuncio de Señales y Frenado Automático-ASFA) ATP sistemi ile donatılmış hatlar üzerinde tren işletimine izin veren ASFA STM cihazları gibi.

3.3.2.7. Eurobaliz İletim Modülü

Baliz İletim Modülü (Balise Transmission Module-BTM) diye de adlandırılan Eurobaliz ile olan tren üstü ara yüzüdür.

3.3.2.8. GNSS Alıcısı

GPS uydularından konum verisi sinyalini alıp konum tespiti için EVC araç üstü sinyalizasyon ekipmanına gönderen sistemdir.

3.3.2.9. GSM-R ve LTE-R Radyo Araç Üstü Anteni

Araç üstü ETCS uyumlu haberleşme ekipmanlarından gelen verileri GSM-R veya LTE-R haberleşme sistemine aktaran araç üstü radyo antenidir.

3.4. ERTMS/ETCS Sistemi'nin Seviyeleri

Mevcut hatlarda bulunan sinyalizasyon sistemlerini yeni nesil ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerine en kolay şekilde geçirmek için içerisinde değişik seviyeler tanımlanmıştır. Bu seviyeler geçişi teknik ve ekonomik olarak en kolay şekilde gerçekleştirmek, yeni yapılacak hatlarda ise en az sayıda ekipman kullanarak ekonomik ve teknik yönden optimum koşulları sağlayacak şekilde tanımlanmıştır. ERTMS/ETCS seviyeleri aşağıya doğru birbirini kapsamaktadır, yani Seviye 2 ile donatılmış bir tren Seviye 1 ile tesis edilmiş bir hatta güvenli bir şekilde seyahat edebilir fakat Seviye 1 ile donatılmış bir trenin Seviye 2 ile tesis edilmiş bir hatta güvenli bir şekilde ilerlemesi beklenemez.

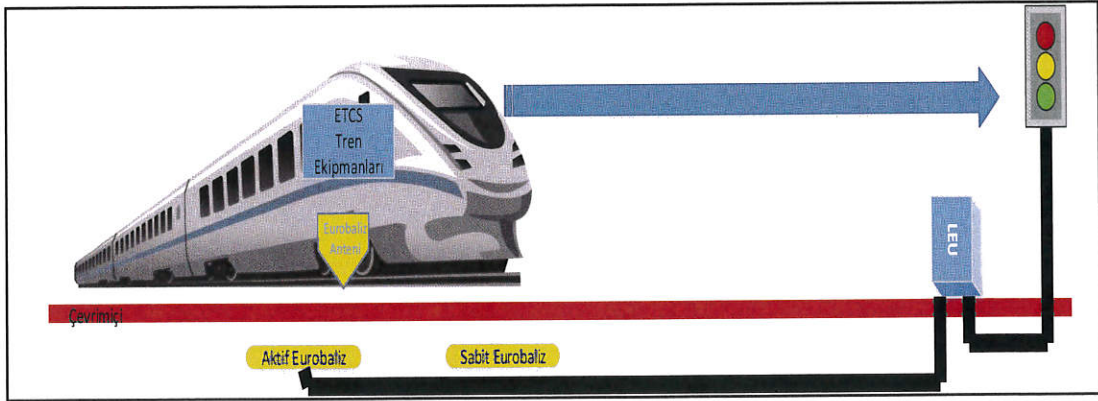
Bunlar ERTMS/ETCS sisteminin seviyeleri Seviye 1, Seviye 2 ve Seviye 3 olarak aşağıda tanımlanmıştır.

3.4.1. ERTMS/ETCS Seviye 1

ERTMS/ETCS Seviye 1'de; geleneksel yol kenarı sinyalleri, tren konumlarını tespit eden sistemler ve hat bilgisi ile programlanmış ve kontrol merkeziyle bağlantılı olan balizler hat boyunca yerleştirilmiştir. Tren tespit ekipmanları trenin pozisyonunu kontrol merkezine gönderir. Hattaki trenin konum bilgisini alan kontrol

merkezi yeni hareket komutunu belirler ve balize iletir. Tren, balizin üzerinden yeni hareket komutunu ve hat bilgisini alarak geçer. Tren üzerinde ise Avrupa Hayati Bilgisayar (EVC) bilgisayarı aldığı hareket komutuna göre bir sonraki balize kadar olan mesafe için hız profilini hesaplar. Bu bilgi tren sürücüsünün önündeki ekrana da yansıtılır. Sabit balizden gelen kilometre bilgisi ile araç üzerindeki mesafe algılayıcısının bilgilerinin birbiri ile tutmaması durumunda tren otomatik olarak durdurulur. Ayrıca yol boyundaki bütün balizleri EVC yol boyundaki yerleşim sıralarına göre izler. Yol boyundaki balizden bilgi almamaması halinde tren otomatik duruşa geçer. Sabit blok sinyalizasyon sistemi kullanılan ETCS Seviye 1’de hat kapasitesini artırmak için balizlerin önüne dolgu baliz (Infill Eurobalise) denilen çevrimler eklenir. Bilgiler bir sonraki balizden çevrime gönderilir ve tren çevrimin üzerinden geçerken çevrim boyunca aktarılır. Tren üstü bilgisayarı bir sonraki hareket komutu ve ilerdeki hattın karakteristik bilgilerini daha balize gelmeden alır. Bu sayede yeni frenleme noktasını önceden öğrenen sürücü hız kesmeden yoluna devam eder ve böylece seyahat süresi önemli ölçüde azalır.

ETCS Seviye 1; mevcut sinyalizasyon sistemlerinin ekipmanları korunarak, bu sistemlere bir takım donanımın ve bunlara ilişkin yazılımın yüklenmesi suretiyle, belirli noktalara yerleştirilmiş balizler aracılığıyla tren ile iletişimin aralıklı olarak gerçekleştirildiği ve tren hızının sürekli olarak denetlenmesini ve hızın aşılmamasını sağlar [12].



Şekil 3.2: ERTMS/ETCS Seviye 1 işleyiş şeması görünümü

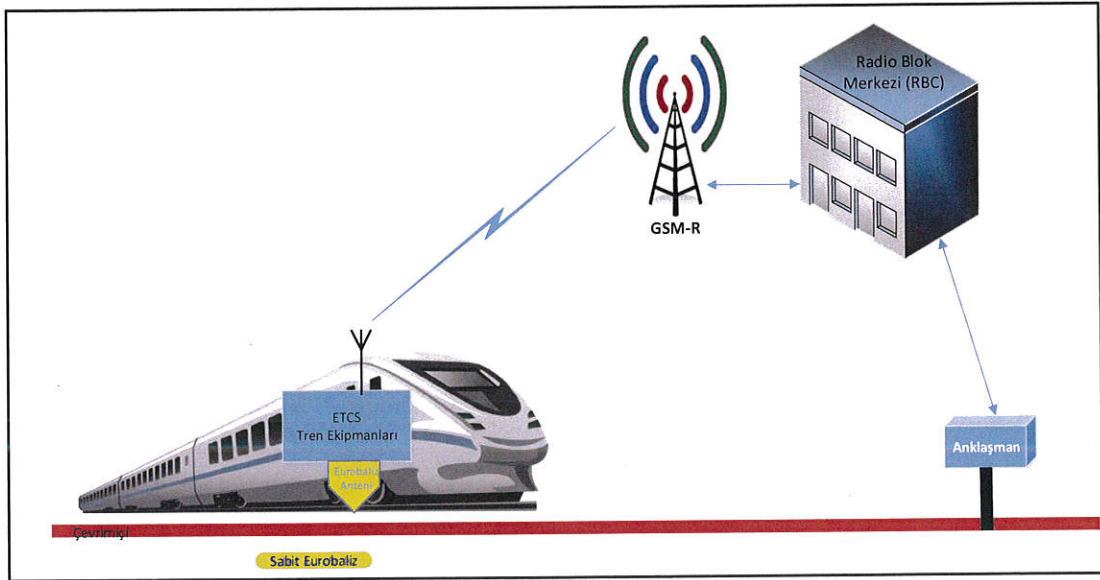
Bu sistem kurulum maliyetleri yüksek olduğu için hızlı tren hatlarında tercih edilmektedir. Avrupa’da Avusturya, İngiltere, İspanya’daki bazı hatlarda ve ülkemizde Polatlı – Eskişehir arasındaki yüksek hızlı hatta kuruludur [29].

3.4.2. ERTMS/ETCS Seviye 2

ERTMS/ETCS Seviye 2; tren ile iletişim sürekli sağlandığı ve değişken yol verilerinin trene sürekli aktarıldığı bir tren kontrol sistemidir. Bu sistemde hem veri ve ses sistemi iletişimi yapılabilmektedir. Bu iletişimi GSM-R (Bakınız Bölüm 3.5.1) denilen demiryolu işletmeciliğine özgü frekans değerleri kullanılarak yapılmaktadır.

ETCS Seviye 2’de değişken balizlerin, LEU ekipmanlarının ve yol boyu sinyallerinin kullanılmasına gerek yoktur. Fakat ETCS Seviye 1’de olduğu gibi sabit blok sinyalizasyon sistemini temel almıştır. Her bir blok arası bölünmüştür. Ray devreleri ile hat üzerindeki trenlerin varlığı ve tren bütünlüğünün kontrolü yine ERTMS/ETCS Seviye1’de olduğu gibi kontrol edilmektedir. ETCS Seviye 2’de tren üstü EVC bilgisayarına iletilmesi gereken bilgiler, hattın belirli bir bölgesini kontrol eden “Radyo Blok Merkezleri” (RBC)’ne uygun ara yüzler kullanılarak iletilir. Her RBC’nin sorumluluk alanı vardır. Bu alanlardan geçen trenlere bilgileri aktarır. Trenin konumu RBC’nin kapsama alanında sürekli takip edilmektedir. Tren üzerindeki EVC bilgisayarları da bu bilgileri işleyerek uygun hız profilini belirleyerek sürücü önündeki konsolda uyarıyı verir [12].

Bu sistem ETCS Seviye 1 gibi kurulum maliyetleri yüksek olduğu için hızlı tren hatlarında tercih edilmektedir. Bu sistem birçok Avrupa ülkesinde ve ülkemizde Polatlı – Eskişehir arasındaki yüksek hızlı hat ve diğer kullanılan ve inşası devam eden (Ankara Sivas) yüksek hızlı hatlarda kullanılacaktır [29].



Şekil 3.3: ERTMS/ETCS Seviye 2 işleyiş şeması görünümü

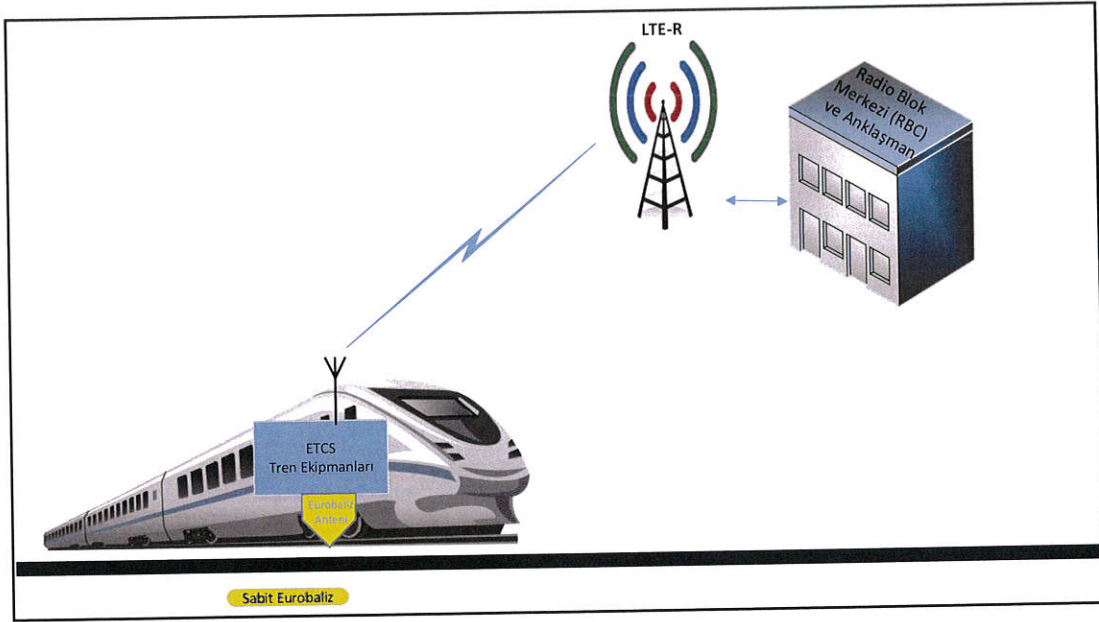
3.4.3. ERTMS/ETCS Seviye 3

Geliştirilmekte ve test aşamasında olan ERTMS/ETCS Seviye 3’de trenle iletişimin sürekli sağlandığı ve değişken verilerin de trene sürekli iletiildiği bir tren kontrol sistemidir. Bu sistemde hem veri ve ses sistemi iletişimi yapılabilmektedir. Haberleşme sistemi olarak LTE-R (Bakınız Bölüm 3.5.2) teknolojisi kullanılmaktadır.

Bu sistemin geliştirilme amacı konvansiyonel hatlarda da kullanılmak istenmesidir. ETCS Seviye 1 ve Seviye 2 sinyalizasyon sistemine göre daha az kurulum ve bakım maliyetlerine sahip olacağı hedeflendiği için hızlı tren hatlarının yanında konvansiyonel ve uzak mesafe hatlarda tercih edilecektir. ETCS Seviye 3’de değişken balizlerin, LEU ekipmanlarının ve yol boyu sinyallerinin kullanılmasına gerek yoktur. ETCS Seviye 2’de kullanılan sabit blok sistemi yerine hareketli blok sistemi kullanılmaktadır (Bakınız Bölüm 2.4.4). Herhangi bir blok meşguliyeti sağlanmadığı sürece bunun içinde trenler arası mesafe sağlanması gerekiyor trenin durmasına gerek yoktur. Blok uzunluğu 50 metre olarak standartlaştırılmaktadır. Bu da hat kapasitesini artırır. Araç bütünlüğü kontrolü EVC bilgisayarını ile sağlanır ve bu bilgisayar radyo haberleşme sistemi (LTE-R) ile RBC’yle sürekli iletişim içindedir.

ETCS Seviye 3’de de tren üstü EVC bilgisayarına iletilmesi gereken bilgiler, hattın belirli bir bölgesini kontrol eden “Radyo Blok Merkezleri” (RBC)’ne uygun ara yüzler kullanılarak iletilir. Her RBC’nin sorumluluk alanı vardır. Bu alanlardan geçen trenlere bilgileri aktarır. Trenin konumu RBC’nin kapsama alanında sürekli takip edilmektedir. Tren üzerindeki EVC bilgisayarları da bu bilgileri işleyerek uygun hız profilini belirleyerek sürücü önündeki konsolda uyarıyı verir [12].

Geliştirilme safhasında olan bu sistem İsveç, İtalya ve birkaç Avrupa ülkesinde test alanlarında hala test edilmektedir.



Şekil 3.4: ERTMS/ETCS Seviye 3 işleyiş şeması görünümü

3.5. ERTMS/ETCS Haberleşme Sistemleri

Demiryolu haberleşme sistemlerinin temelindeki teknolojiler, ilk modern raylı sistemlerden bu yana çok az gelişim göstermiştir. Demiryolu ağlarında 1800'lü yıllardaki lokomotif operatörünün de aşına olabileceği basit görsel sinyal sistemleri kullanılmaktadır. Yeni kablosuz veri aktarım teknolojileri, ileri düzeyde tren haberleşme sistemleri yaratmayı mümkün kılmaktadır.

Günümüzde tren yolcuları geçmişe nazaran daha fazla güvenlik, kolaylık ve hizmet bekliyor. Bu beklentileri karşılamak için demiryolu işletmecileri, gerçek zamanlı gözetim sağlayan sistemlerin yanı sıra yolcularına hava durumu, oyunlar, güncel haberler ve hatta internet erişimi sunan modern yolcu eğlence-bilgilendirme (infotainment) sistemlerini hizmete almak istiyor. Bu sistemdeki uygulamalar için geniş bant ihtiyacı ortaya çıkıyor. Bu geniş bant ile görüntü, ses ve tren operasyonel verilerini tek bir tren kontrol ağında bir araya getirmek, böylece işletim ve bakımı büyük ölçüde basitleştirmek de mümkün hale getiriyor [17]. Demiryolu haberleşme sistemleri gelişen ihtiyaçlara göre daha fazla olanak sunmalı. Bugünün ve geleceğin demiryolu uygulamalarının ihtiyacı daha kısa tepki süreleri ve daha fazla bant genişliği ile hem tren içi, hem tren ile RBC arası, hem de hat boyu haberleşme ağlarının daha dayanıklı olması gerekiyor. Bu gereksinimlerden yola çıkarak, ihtiyaçları karşılayabilmek için standart GSM teknolojisine demiryollarına

uyarlanmış hali olan ve ek özellikler ilave edilerek GSM-R mobil haberleşme sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca üzerinde çalışılan ve test aşamasında olan LTE teknolojisinin demiryoluna uyarlanmış hali olan LTE-R mobil haberleşme sistemleri ve uydu tabanlı haberleşme sistemleri de geliştirilmekte ve test sahalarında uygulamaları yapılmaktadır [13].

Aşağıda bu haberleşme sistemleri kısaca açıklanmıştır.

3.5.1. GSM-R Haberleşme Sistemi

GSM-R, yalnızca demiryolu sektöründe kullanılan bir 2G mobil iletişim sistemi diyebiliriz. Avrupa'da trenlerin ülkeler arası geçişi sağlamak ve 35 farklı haberleşme sistemini teke indirmek için demiryollarında standart bir uygulama sağlamak üzere geliştirilmiştir. GSM-R sistemi tren haberleşmesini 250 km/saat ile 500 km/saat hızına kadar haberleşmenin kesintisiz olarak yapılabilmesini destekleyecektir. Ayrıca GSM-R haberleşme sistemi, trende bulunan personelin sürekli iletişimini, makinistlerin yol boyunca ilgili dispeçler ile bağlantısını, güzergâh üzeri istasyonlar ve buralarda çalışan personel ile iletişimi sağlamaktadır. ERTMS/ETCS Seviye 2 sinyalizasyon sisteminin gereksinimlerini karşılaması ve treni kontrol ve koordine eden ATC sisteminin, tren ile yer arasındaki veri haberleşmesini sağlamasını yapacak geleceğin ortak bir iletişim platformudur. GSM-R haberleşme sistemi şuan Avrupa haberleşme teknolojileri standardıdır. Bu haberleşme sistemi Avrupa Birliği'nin 96/48 ve 2001/16 tarihli kararlarına göre ERTMS (European Railway Traffic Management System) ETCS (European Train Control System) sistemi olarak seçilmiştir. Bu kararlardan sonra 32 demiryolu işletmesi (EIRENE MoU), dâhili servisleri ve demiryolu uygulamaları için GSM-R'ı kullanmak üzere ortak bir çalışma kararı alınarak Avrupa demiryollarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Avrupa dışında; Çin, Hindistan, Kuzey Amerika, Suudi Arabistan, Rusya, Avustralya, Kazakistan gibi ülkelerde geçiş için test ve ihale süreçleri devam etmektedir. Ülkemizde yüksek hızlı tren hatlarında kullanılmaktadır [14].

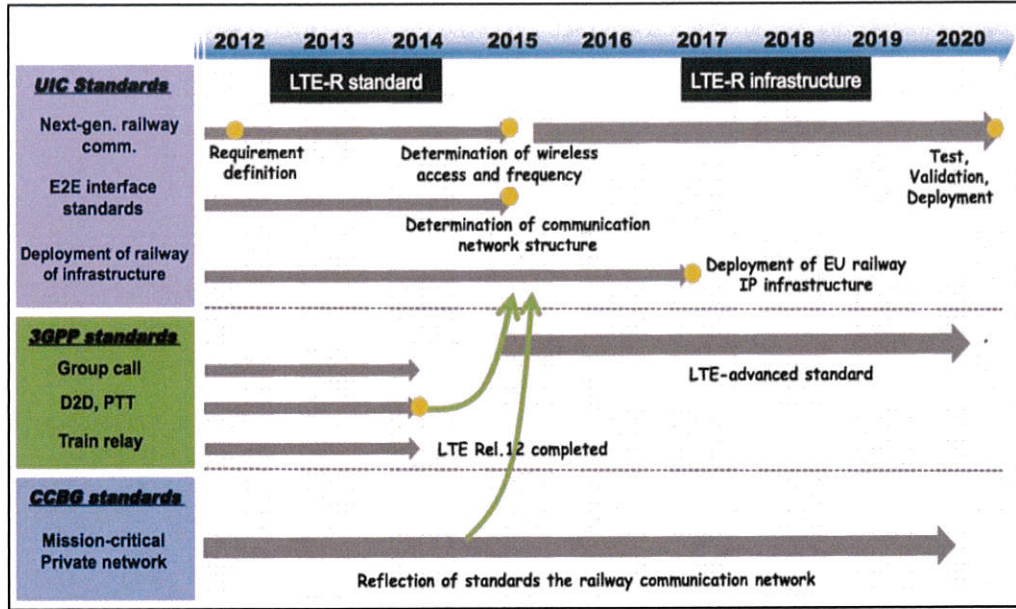


Şekil 3.5: GSM-R sisteminden görünüm[15]

3.5.2. LTE-R Haberleşme Sistemi

Dünyada hızlı tren hatlarında kullanımda olan demiryolu özgün haberleşme sistemi GSM-R sistemi olup, bu sistem teknolojisi artık eskimiş ve Avrupa’da artan veri iletişim trafiğini kaldıramayacak hale gelmiştir. UIC, 2025’ten sonra üretimi durdurulup iptal edileceği kararı çıkan GSM-R’ın yerini alacak bir IP tabanlı haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik Avrupa Birliği Destek Programları duyurulmuştur.

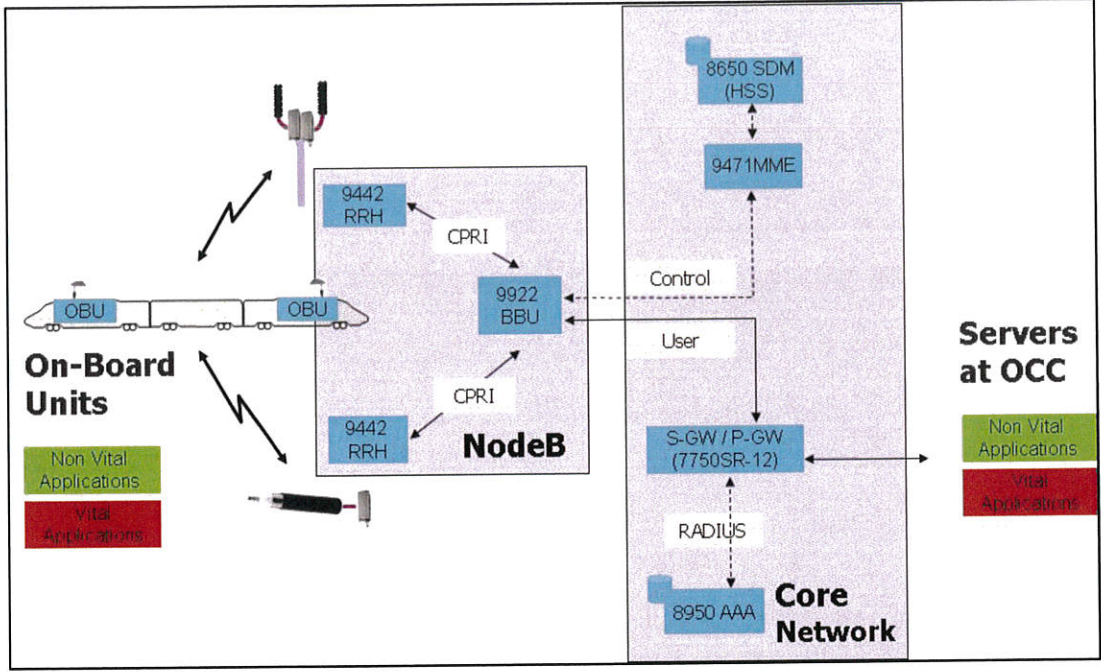
Böyle bir Uzun süreli Gelişim – Demiryolları (Long Term Evolution for Railway - LTE-R veya LTE for Railways) iletişim sistemi dünyada henüz uygulamada olmayıp, Avrupa Birliği destek programları çerçevesinde Gelecek Demiryolu Mobil Haberleşme Sistemleri (Future Railway Mobile Telecommunication System (FRMTS) projesini başlatmıştır ve Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir [19]. Aşağıdaki şekilde geliştirilme süreçleri mevcuttur. LTE-R, yalnızca demiryolu sektöründe kullanılmak üzere geliştirilen bir 4G mobil iletişim sistemidir.



Şekil 3.6: Demiryolu LTE-R Komünikasyon Sisteminin Geliştirilme Süreci [28]

Sistem ERTMS/ETCS Seviye 3 gereksinimlerini karşılayarak geleceğin tren kontrol sistemleri için ortak bir iletişim platformu olacaktır [16].

Demiryolu için standart bir LTE mimarisi aşağıdaki resimde belirtilmiş olup, zorunlu ve zorunlu olmayan trafik bilgileri trafik kontrol merkezi (Operation Control Center - OCC) ve araç üstü uygulamalarının sunucuları arasında paylaşılır. Sabit altyapıda telsiz sistemi ya yönlendirilmiş anten veya kablosuz yayın özelliği olan anten ekipmanları ile kablosuz iletişim sinyalleri araç üstü ekipmanlar (On-Board Unit) ile paylaşılır. Diğer bir deyişle demiryolu ulaşımında hassas ve çok yüksek hızda veri aktarımı ihtiyaçlarını karşılarken yine tren yolcularının geniş bant haberleşme ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik bir sistemdir [17].



Şekil 3.7: LTE-R mimarisinden görünüm[17]

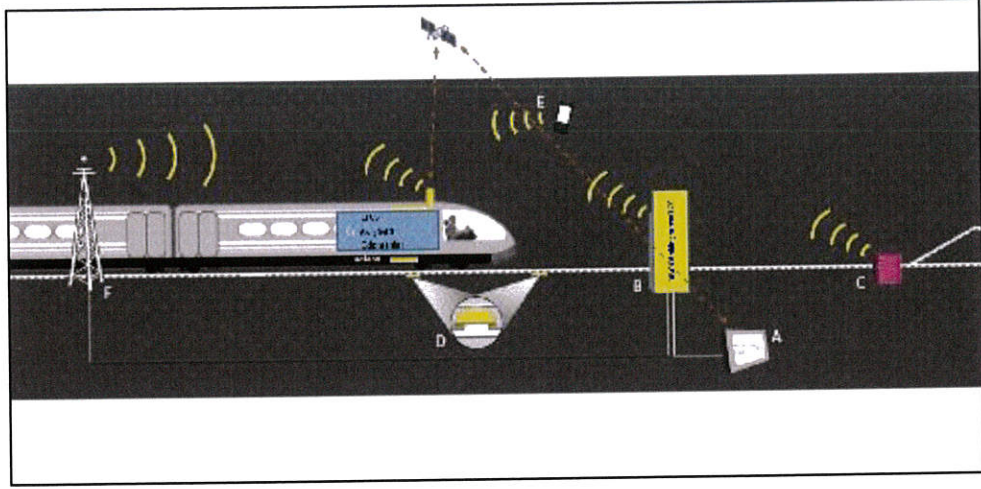
3.5.3. Uydu Tabanlı Haberleşme Sistemleri

Tren konumu ve hız bilgisi tespitinde uydu tabanlı GNSS/INS sistemi için Galileo Uydu Projesi'nin hedeflerinden biri olan üzerinde çalışılan ve test aşamasında olan uydu tabanlı haberleşme sistemleridir [18].

Geliştirilme safhasındaki ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon ve haberleşme sisteminde yol boyu ekipmanlara gerek kalmadan tren konumunun ve hız bilgisinin entegre Küresel Seyrüsefer Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System - GNSS) ve Ataletsel Seyrüsefer Sistemi (Inertial Navigation Unit - INS) sistemi vasıtasıyla konum güncellemesinin kaybından sonraki sapma oranını azaltarak tespit edilmesi planlanmaktadır [19].

Bu sistemin çalışma prensibi, trenin konum ve hız bilgileri GNSS/INS sistemi vasıtasıyla takip edilip bilgileri LTE-R haberleşme sistemi üzerinden trafik kontrol merkezindeki sinyalizasyon sistemine aktarılır. Trafik Kontrol Merkezi'ndeki (A) Trafik kontrolörü sinyalizasyon sisteminin bilgisayar ara yüz programı üzerinde hat üzerinde bir lokasyondan diğerine tren güzergâhı oluşturulmasını talep eder [20].

Avrupa Birliği Destek Programları kapsamında uydu tabanlı haberleşme sistemlerine Shift2Rail ortak girişimi kapsamında ANSALDO firmasının "3inSAT", ALSTOM firmasının "Locoprol" ve İsveç Trafikverket kuruluşunun "ERTMS Regional" AR-GE projeleri ile çalışmaktadır [21].



Şekil 3.8: GNSS/INS sistemi ile konum ve hız tespit bileşeninin görünümü[20]

3.6. ERTMS/ETCS Seviye 3 Sinyalizasyon Sisteminin İşleyişi

ETCS Seviye 3 sisteminin işleyişini anlayabilmek için Seviye 1 ve 2 sistemlerinin işleyişini anlamamız gerekiyor.

ETCS Seviye 1’de; sabit blok sinyalizasyon sistemi temeline dayanan, geleneksel yol kenarı sinyalleri, tren konumlarını tespit eden sistemler ve hat bilgisi ile programlanmış ve kontrol merkeziyle bağlantılı olan balizler hat boyunca yerleştirilmiştir. Tren tespit ekipmanları trenin pozisyonunu kontrol merkezine gönderir. Hattaki trenin konum bilgisini alan kontrol merkezi yeni hareket komutunu belirler ve balize iletir. Tren, balizin üzerinden yeni hareket komutunu ve hat bilgisini alarak geçer. Tren üstü bilgisayar aldığı hareket komutuna göre bir sonraki balize kadar olan mesafe için hız profilini hesaplar. Bu bilgi tren sürücüsünün önündeki ekrana da yansıtılır. ETCS Seviye 1’de hat kapasitesini arttırmak için balizlerin önüne infill denilen çevrimler eklenir. Bilgiler bir sonraki balizden çevrime gönderilir ve tren çevrimin üzerinden geçerken çevrim boyunca aktarılır. Tren üstü bilgisayar bir sonraki hareket komutu ve ilerdeki hattın karakteristik bilgilerini daha balize gelmeden alır. Bu sayede yeni frenleme noktasını önceden öğrenen sürücü hız kesmeden yoluna devam eder ve böylece seyahat süresi önemli ölçüde azalır.

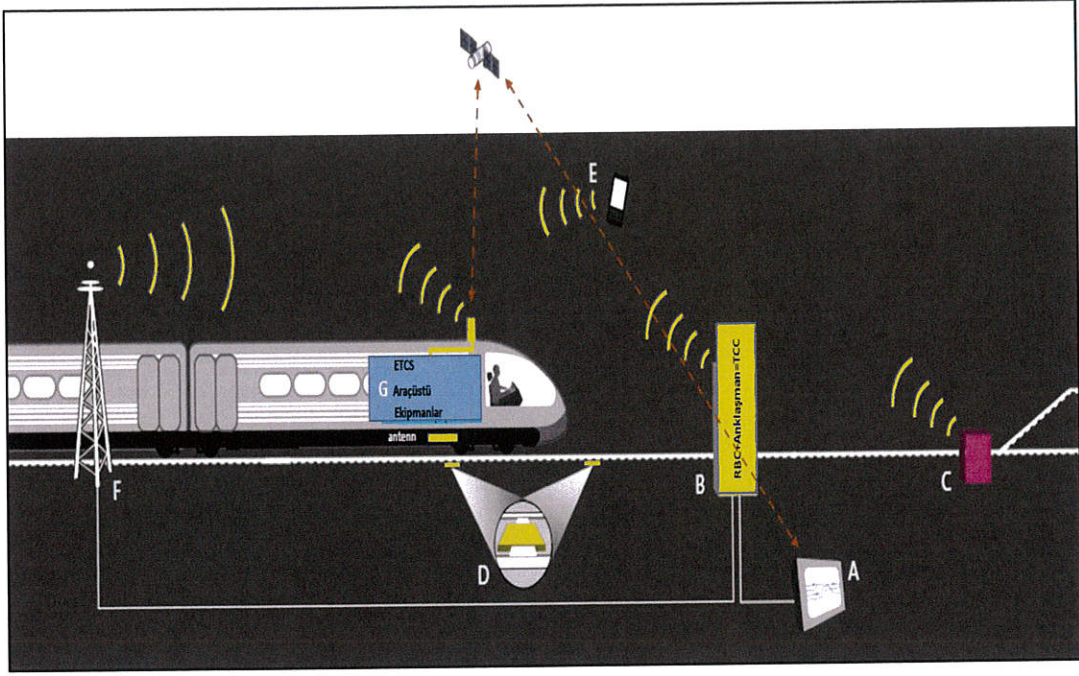
ETCS Seviye 2 de; sabit blok sinyalizasyon sistemi temeline dayanır. Geleneksel yol kenarı sinyallerine ihtiyaç duyulmaz. Ancak hat üzerinde tren tespit ekipmanları gereklidir. Ayrıca sistemde tren üstü bilgisayarın kontrol merkeziyle haberleşmesini sağlayan radyo dalga sistemi (GSM-R) vardır. Hattaki balizler

bağımsız ve basit bir elektronik pozisyon belirteci. Hat karakteristikleri tren üstü bilgisayara önceden girilmiştir. Tren tespit ekipmanları trenin konumunu algılayarak kontrol merkezine iletir. Bütün trenlerin konumlarını alan kontrol merkezi yeni hareket komutlarını belirler ve hattaki trenleri GSM-R sistemi ile iletir. Daha sonra tren üstü bilgisayarı hareket komutuna göre hız profilini ve bir sonraki frenleme noktasını hesaplar. Bu bilgi tren sürücüsüne önündeki ekran vasıtasıyla aktarılır. Güvenli bir seyahat sağlamak için tren üstü bilgisayarı sürekli olarak trenin pozisyonunu belirler ve trenin o andaki hızını kontrol ederek gidilen mesafeyi doğrular.

ETCS Seviye 3 de; Seviye 2 ile benzer özellikler gösterir. Temel ayırım olarak hareketli blok sinyalizasyon sistemini temel alır. Trenin eksiksiz olduğunu gösteren tren üstü istikamet tespit sistemi vardır. Bu yüzden tren tespit ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaz ve hattan kaldırılabilir. ETCS Seviye 3 sistemi de tren üstü bilgisayarının kontrol merkeziyle haberleşmesini sağlayan tren üstü radyo sistemine (LTE-R) ihtiyaç duyar. Bağımsız pasif balizler sadece konum bilgilerini içerir. Hat karakteristiği önceden tren üstü bilgisayara yüklenmiştir. Tren balizin üzerinden geçerken bir sonraki konum bilgisini alır. Tren bilgisayarı, trenin o anda nerde olduğunu belirleyerek LTE-R haberleşme sistemi ile RBC kontrol merkezine iletir. Radyo yardımı ile trenin pozisyonunu alan kontrol merkezi yeni hareket komutunu belirler ve bunu yine radyo aracılığı ile trene iletir. Daha sonra tren üstü bilgisayarı aldığı bu yeni hareket komutuna göre hız profilini ve bir sonraki frenleme noktasını hesaplar. Bu bilgiler tren sürücüsüne önündeki ekran vasıtasıyla yansıtılır. Radyo iletimi ile hareket komutunu sık olarak güncelleme imkânı trenlere birbirini yakından takip etme imkânı sağlar ve bu da hat kapasitesini oldukça artırır.

Trenin konumu GNSS/INS sistemi vasıtasıyla takip edilip bilgileri LTE-R haberleşme sistemi üzerinden trafik kontrol merkezindeki sinyalizasyon sistemine aktarılır. Trafik Kontrol Merkezi'ndeki (A) Trafik kontrolörü sinyalizasyon sisteminin bilgisayar ara yüz programı üzerinde hat üzerinde bir lokasyondan diğerine tren güzergâhı oluşturulmasını talep eder. Ardından Anlaşman (B) makasları (C) set edip, güzergâh talebinde bulunulan yolun üzerinde bir engel olmadığını teyit sinyalini gönderir. Anlaşman, ilgili güzergâhı tahsis edip Radyo Blok Merkezine (B) trene hareket izni çıkarılabileceğini bildirir. Harekete başlayan trenin altında bulunan antenin hat boyuna takılı baliz (D) üzerinden geçerken balizi

aktive etmesiyle beraber, balizden araç üstü sisteme gönderilen konum (lokasyon) mesajı trenin kilometre sayacının güncellenmesini sağlar [20].



Şekil 3.9: ETCS Seviye 3 işleyiş şeması görünümü[20]

Yukardaki şekilde belirtilen Ana Alt Sistemlerin açıklaması aşağıdaki gibidir:

- A) Trafik Kumanda Merkezi: Trafik Kumanda Merkezindeki trafik kontrolörü izlediği ve komutlar gönderebildiği bilgisayar ekranları üzerinde makas konumlarını ve trenlerin hareketlerini izleyerek, makasların konumlarının otomatik olarak set edilmesiyle tren güzergâhlarını tahsis eder.
- B) Entegre Anklaşman & RBC sunucusu: Her bir ERTMS hattı, hat üzerinde emniyetli işletim koşullarını yöneten merkezi bir bilgisayar sistemine sahiptir. Ekipmanlar, LTE-R haberleşme sistemi aracılığıyla trenle, işletim sistemiyle (merkezi trafik kontrol merkezi), el birimleriyle ve ray ekipmanları ile haberleşir.
- C) Tüm makaslar ve hemzemin geçiş bariyerleri açık hat ve istasyon bölgesi ekipmanları hat kenarında bulunan teknik binalar içerisindeki ve istasyonlardaki teknik odalarda bulunan kabinler içerisindeki ekipmanlar tarafından denetlenir.
- D) Balizler: "Eurobalizler" veya aktarıcılar, ray üzerinde aralıklarla yerleştirilmişlerdir ve esas amaçları trenin kilometre sayacını güncellemektir. Yalnızca sabit kodlu balizler kullanılmaktadır.
- E) El Birimleri: Ray alanında çalışan bakım personeli, örnek olarak çalışma alanını trafiğe kapatmak için taşınabilir birimler kullanmaktadır.

F) İletim sistemi: Alt-sistemler birbirleri arasında, sabit ve radyo frekans-tabanlı ağlar üzerinden (GSM-R/LTE-R) çeşitli haberleşme iletim sistemleri aracılığıyla haberleşebilirler.

G) Araç üstü sistem: ERTMS ile donatılmış hatlarda işleyen trenlerin tümüne ERTMS araç üstü sistemi kurulmuş olmalıdır. Trenin konumu GNSS/INS sistemi vasıtasıyla takip edilip bilgileri LTE-R haberleşme sistemi üzerinden trafik kontrol merkezindeki sinyalizasyon sistemine aktarılır.

3.7. Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemlerinin Türkiye'deki Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesine Etkisi ve Altyapı Kullanım Oranı Çalışması

Yukardaki bölümlerde ETCS sinyalizasyon sistem seviyeleri anlatılmıştır. Bu bölümde YHT hatları için iki konu üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada UIC 406 Hükümlerinde tanımlanan Hat Kapasite Hesabı ve Altyapı Kullanım Oranı hesapları teorik yöntem uygulaması kullanılarak çıktılar elde edilmiştir. Bu kapsamda farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerinin Türkiye'deki mevcut yüksek hızlı tren hatlarındaki günlük periyot (Daily Period) ve yoğun saatlerdeki (Peak Hours) hat kapasitesi ve altyapı kullanım oranları hesaplanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, örnek çalışmayla ilgili; teorik uygulama yöntemleri, hesaplama yöntemi, sınırlamalardan, sonuç ve yorumlardan bahsedilmiştir.

3.7.1. Araştırma Yöntemi

Demiryolu hat kapasitesini ve altyapı kullanım oranını etkileyen parametrelerden biri de sinyalizasyon sistemidir. Hat kapasitesini;

- sinyalizasyon sistemi,
- trenlerin hız profilleri,
- hat üstündeki istasyonlar,
- hattın operasyonel işletim (sefer çizelgesi) modelleri,
- hattaki kesişim (kavşaklar) noktaları,
- sabit veya hareketli blok sinyalizasyon sistemi ve
- tren set sayıları ve türevleri (YHT, Banliyö, Yük vb.)

etkileyen faktörlerdendir. Bu nedenle, tüm demiryolu hatları için bahsi geçen kapasite şekillerini genellemek mümkün değildir. Fakat ETCS'nin hattın kullanım kapasitesi ve altyapı kullanım oranı üzerine etkisi konusunda fikir verebilir.

Sinyalizasyon sistemlerinin genel amacı daha fazla sayıda trenin işlemlerini sağlamak ve böylelikle kalite ve güvenlik gerekliliklerini karşılamak için mesafeyi optimize etmektir. Demiryolu kapasitesini değerlendirmek için analitik yöntemler, optimizasyon (en uygun şekle sokma) yöntemleri ve simülasyon yöntemleri şeklinde

üç gruba ayrılabilir. Ama bir yandan da bu yöntemler birbirini tamamlayıcıdır. **Analitik yöntemler;** altyapıyı basit bir yolla modellemek ve ilk tahmin sonuçlarını sağlamak için matematiksel ifadeler ve formüller kullanır. **Simülasyon yöntemleri;** sefer tarife verilerini doğrulamak için aksaklıklar dâhil gerçek dünya sistemlerini yansıtan modeller oluşturur. Son olarak buna karşılık **optimizasyon yöntemleri;** optimumun doygun tarifeleri matematiksel programlama teknikleri kullanarak elde etmeye dayalıdır; bu kategoriye giren temel yöntem, tarifeye azami seviyede ilave tren hizmetleri ekleyerek planlama yapma ile hat kapasitesine ulaşılan dolgunlaştırma yöntemidir [32].

Bu kısımda, örnek çalışmanın farklı sinyalizasyon sistemlerine göre optimum hat kapasitesini ve altyapı kullanım oranını hesaplamak için teorik uygulama kullanılmıştır. Optimum hat kapasitesi; belirlenmiş bir zaman aralığı boyunca bir rota üzerinde sürekli ve tercihen en düşük tren takip mesafesinde işletilebilir trenlerin sayısını belirtmektedir. Hattın altyapı kullanım oranı ise işletilebilir trenlerin sayısının hattın kullanımında geçen toplam zamanına oranıyla hesaplanır.

3.7.2. Araştırmanın Evreni ve Örneklem

Bu çalışmada ülkemizde Ankara merkezli faaliyet gösteren Konya, Eskişehir ve İstanbul YHT hatlarında hesaplama yapılmıştır. Bu hatlar üzerindeki günlük periyod ve yoğun saat işletme zaman çizelgeleri kullanılmıştır. Ayrıca işletmede olan 15 adet YHT seti hesaplamalara katılmıştır.

3.7.3. Hat Kapasitesi Hesaplama Yöntemi

Optimum hat kapasitesini hesaplamak için hızlı tren hattında sefer yapan optimum tren sayısının hesaplanması gerekmektedir. Bunun için üç öğenin hesaplanması gerekecektir, ihtiyacımız olan: ortalama asgari tren takip mesafesi (Z) (the average minimum headway), ortalama ara süre (T_p) (average buffer time) ve eşdeğer ara süre (T_{add}) (equivalent buffer time)'dir. Birinci öğede; Ortalama asgari tren takip mesafesi hesabı sabit blok sinyalizasyon ve hareketli blok sinyalizasyon sistemine göre değişmektedir. ERTMS/ETCS Seviye 1 ve Seviye 2 sinyalizasyon sisteminde sabit blok sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır. ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminde ise hareketli blok sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır

(Sabit ve Hareketli blok sistemleri Bölüm 2.4’de açıklanmıştır). Ülkelerin demiryolu altyapılarına göre iki tren arasındaki asgari takip mesafesi farklılıklar göstermektedir. İkinci öge olan ortalama ara süre hesabında iki ayrı yaklaşım izlenerek hesaplanması önerilmektedir. Bu yöntemler UIC tarafından kabul edilen ve hesaplama yöntemi olarak tavsiye edilen UIC 406 Hükümleri ve STRELE Formülüdür. STRELE yöntemi planlanmayan bekleme süreleri ile tanımlanan işletimin kalite ölçütünü göz önünde bulunduran ve özellikle örnek çalışmalarından gelen gerçek verileri girdi varsayan Schwanhäußer Metodudur. UIC 406 Hükümleri ise özellikle gecikme verilerini hesaba katmayarak altyapı kullanımının genel tavsiye edilen değerlerini göz önünde bulunduran metodudur. Her iki metot ile hesaplanan ortalama ara sürenin hat kapasitesine etkisi bir birine yakındır [22]. Üçüncü öge olan eşdeğer ara süre iki tren arasındaki gecikmeyi azaltmak için programlanan ek süredir. Bu gecikme blok kesitlerinde hat ve tren arasındaki devamlı bilgi akışının olmayışının göz önünde bulundurulması ile eklenen ekstra ara süredir. Burada ortalama ara sürenin %10’u eşdeğer ara süre olarak dikkate alınmıştır [31].

3.7.3.1. Sınırlamalar

Bu çalışmada YHT hattındaki günlük periyot ve pik (yoğun) saatlerdeki optimum tren sayısı (N_{opt}) ve altyapı kullanım oranı (n) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sınırlamalar dâhilinde yapılmıştır. Bu kısıtlamalar aşağıda listelenmiştir:

- Hat kapasitesi hesaplama yöntemi olarak UIC 406 Hükümleri teorik yöntem modeli kullanılmıştır.
- Türkiye’deki işletilen Ankara’dan Konya, Ankara’dan Eskişehir ve Ankara’dan İstanbul Yüksek Hızlı Tren hatları için hesaplama yapılmıştır.
- Farklı sinyalizasyon seviyelerinde ortalama asgari tren takip mesafesi (Z) hesabı için TCDD’nin Marmaray demiryolu hattında belirlediği Seviye 1 için iki sefer aralığının olması gereken değer 5 (beş) dakika ile en fazla 20 (yirmi) dakikadır. Bu çalışmada alt sınır olan 5 (beş) dakika alınmıştır [23]. Seviye 2 için; İtalya’daki Roma Napoli hızlı tren hattında Seviye 1 sinyalizasyon sistemine göre Seviye 2’ye geçişte “Z” değeri %15 ile %25 arasında azalma olmuştur. Böylelikle bu çalışma

için “Z” değeri ortalama değeri olan 4 (dört) dakika alınmıştır [27]. Seviye 3 için; hareketli blok sinyal sistemi kullanıldığı için bu sistem ile hedeflenen “Z” değeri yoğun saatte 1,5 (bir buçuk) dakika ile günlük periyotta 2 (iki) dakika aralığındadır. Bu çalışmada “Z” değeri 1,5 (bir buçuk) dakika alınmıştır (Bakınız Bölüm 2.4.4).

- Ortalama ara süre (T_p) hesabında kullanılan yoğun saat ve günlük periyot aralıkları TCDD'nin güncel YHT seyahat çizelgesinden alınmıştır. Aşağıdaki Tablo 3.1'ten anlaşılacağı üzere günlük periyot 06.00 ile 24.00 saatleri arasındadır. Yoğun saat aralığı ise 10.00 ile 18.00 saatleridir. Ayrıca Ankara'dan Konya'ya 7 sefer, Ankara'dan Eskişehir'e 11 sefer, Ankara'dan İstanbul'a 6 sefer düzenlenmektedir [24].

Tablo 3.1: Ankara-Konya-Eskişehir-İstanbul(Pendik) Arasında Her Gün İşleyen Yüksek Hızlı Tren Zaman Çizelgesi

YHT No	Ankara	Konya	Eskişehir	İstanbul
	Kalkış	Varış	Varış	Varış
91001	06.00		07.40	10.15
91051	06.30		8.06	
91201	06.45	08.40		
91003	08.40		10.17	12.45
91203	08.55	10.50		
91053	11.05		12.41	
91205	11.40	13.32		
91005	12.00		13.40	16.08
91207	13.50	15.45		
91007	14.05		15.42	18.10
91055	16.00		17.36	
91209	16.35	18.30		
91009	17.00		18.40	21.15
91057	18.00		19.36	
91211	18.40	20.35		
91011	19.00		20.37	23.05
91059	20.50		22.26	
91213	21.40	23.35		

- Eşdeğer ara süre (T_{add}) hesaplamasında ETCS Seviye 1 için ortalama ara sürenin (T_p) %10'u hesaba katılmıştır. ETCS Seviye 2 ve 3 için ise bu değer 0 (sıfır) olarak hesaba katılmıştır [31].
- Tren hatlarındaki günlük periyot (Daily Period) ve yoğun saatlerdeki (Peak Hours) bir hattın trafik yoğunluğunun üst değeri UIC'in belirlediği değerler alınmış olup Tablo 3.3'te yer almaktadır [26].
- Yüksek Hızlı Tren seti sayısı (N) Türkiye'de 2019 sonu itibari ile hedeflenen 106 adet olduğu için altyapı kullanım oranı (n) hesabında bu sayı alınmıştır [25].

3.7.3.2. Ortalama asgari tren takip mesafesi (Z)

Ortalama asgari tren takip mesafesi (Z) (the average minimum headway); birbirini takip eden iki tren arasındaki izin verilen asgari sefer aralığıdır. Bu süre hesabı için, iki trenin her blok kesitindeki hareket esnasında önde giden trenin frenleme mesafesine göre arkadan gelen trenin emniyetli şekilde durma süresi hesaba katılır. Bu süre sabit blok sinyalizasyon ve hareketli blok sinyalizasyon sistemine göre değişmektedir. ERTMS/ETCS Seviye 1 ve Seviye 2 sinyalizasyon sisteminde sabit blok sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır. Sabit blok sinyalizasyon sistemi ülkeden ülkeye değişmekle beraber Türkiye'de 3000 metre olarak kullanılmaktadır [12]. Geliştirilmekte olan ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminde ise hareketli blok sinyalizasyon sistemi kullanılmakta ve bu blok uzunluğu 50 metre olarak standartlaştırılmaktadır [22].

TCDD'nin belirlediği iki tren arasındaki ortalama asgari takip mesafesi için Marmaray hattında kullanılan ETCS Seviye 1 için 5 dakika aralık değeri kullanılmaktadır [23]. Ankara – Eskişehir – İstanbul YHT hatlarında ERTMS/ETCS Seviye 1 sinyalizasyon sistemi kullanılmaktadır. YHT seti az olduğundan dolayı iki sefer aralığı bir saatten fazladır. Bu çalışmamızda ETCS Seviye 1 için Marmaray hattında kullanılan “Z” değerini 5 dakika (300 sec) olarak alınmıştır.

Avrupa Demiryolu Endüstrisi birliğinin (UNIFE) yayınladığı ERTMS/ETCS Seviye 2'ye geçişteki kapasiteye etkisi adlı bilgi notunda; ERTMS/ETCS Seviye 1'den Seviye 2'ye geçişte %15 ile %25 arasında hat kapasitesini artırdığı ayrıca iki tren arasındaki asgari sefer süresinin 5 dakikadan aza indirildiği yazmaktadır. Bu bilgiler İtalya'da Roma – Napoli hızlı tren hattından alınmıştır [27]. Bundan dolayı

çalışmamızda ETCS Seviye 2 için “Z” değerini 4 dakika (240 sec) olarak alınmıştır. ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin temelini hareketli blok sinyalizasyon sistem oluşturmaktadır. Bu sistem ile hedeflenen iki tren arasındaki asgari takip mesafesi en fazla 1,5 dakika (90 sec) altına inmektedir (Bakınız Bölüm 2.4.4). Bu çalışmamızda ETCS Seviye 3 için “Z” üst değer olan 1,5 dakika (90 sec) olarak alınmıştır.

Farklı sinyalizasyon sistemlerine göre ortalama minimum hat takip mesafelerinin değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan ortalama asgari tren takip mesafesi (Z)

Sinyalizasyon Seviyesi	Z (sec)
ETCS L1	300
ETCS L2	240
ETCS L3	90

3.7.3.3. Ortalama ara süre (Tp)

Ortalama ara süreler (Tp) (the average buffer time) planlanmış tren tarife çizelgesindeki iki tren arasındaki planlanan sürelerdeki gecikme oranını azaltmak için koyulan ek tampon süredir. Eğer süreler doğru hesaplanamazsa hat kullanımı azalacağından kapasite düşüşü yaşanacaktır. Bunun için ortalama tampon sürelerin doğru hesaplanması gerekmektedir.

Ortalama ara (tampon) süre hesabı iki farklı yaklaşım kullanılarak hesaplanabilir. Bunlar; STRELE Formülüne ve diğeri de UIC 406 Hükümlerine dayalı hesaplama yöntemidir. Bu çalışmamızda farklı sinyalizasyon seviyeleri için UIC 406 Hükümleri standardında belirtilen kapasite hesabı yöntemi uygulanacaktır [26].

UIC 406 Hükümleri ile hesaplanan Tp

UIC 406 hükümleri yaklaşımına göre, farklı sinyalizasyon sistemlerinde ortalama tampon sürelerin hesaplanması için verilen formül aşağıda belirtilmiş ve bu çalışmada hesaplanan değerler Tablo 3.4'de verilmiştir.

$$T_p = \frac{Z \cdot (1 - P_{uic})}{P_{uic}} \quad (1)$$

(1) formülünün bileşenleri [31];

$Z \rightarrow$ ortalama asgari tren takip mesafesi (the average minimum headway) (bu değer farklı seviyeler için Tablo 3.1'den alınacaktır).

$T_p \rightarrow$ ortalama ara süre (the average buffer time); gecikmenin yayılımını azaltmak için iki tren arasında programlanan ek süredir.

$P_{uic} \rightarrow$ UIC 406 Hükümlerinde verilen tren trafiğinin altyapı kullanımı için tavsiye edilen değeridir. Bu değerler UIC birliği tarafından belirlenmiş ve trafik yoğunluğunun bu oranları geçmemesi tavsiye edilmiştir. Örnek çalışma için Yoğun saat için P_{uic} değeri; 0,75 ve Günlük periyot için P_{uic} değeri 0,6 olarak alınmıştır.

Tablo 3.3: UIC 406 Hükümlerinde verilen altyapı kullanımı için tavsiye edilen değerler (P_{uic})

Hat Tipi	Yoğun Saat oranı %	Günlük Saat Oranı %
Banliyö Tren Hattı	85	70
Hızlı Tren Hattı	75	60
Karışık Hatlar	75	60

(1)'deki formülde Yoğun saat için P_{uic} değeri; 0,75 alınmıştır. Farklı Seviyeler için Z değerleri Tablo 3.2'den alınmıştır.

$$T_{pSeviye1} = \frac{300 \cdot (1 - 0,75)}{0,75} = 100$$

$$T_{pSeviye2} = \frac{240 \cdot (1 - 0,75)}{0,75} = 80$$

$$T_{pSeviye3} = \frac{90 \cdot (1 - 0,75)}{0,75} = 30$$

(1)'deki formülde Günlük periyot için P_{uic} değeri; 0,6 alınmıştır. Farklı Seviyeler için Z değerleri Tablo 3.2'den alınmıştır.

$$T_{pSeviye1} = \frac{300 \cdot (1 - 0,6)}{0,6} = 200$$

$$T_{pSeviye2} = \frac{240 \cdot (1 - 0,6)}{0,75} = 160$$

$$T_{pSeviye3} = \frac{90 \cdot (1 - 0,6)}{0,75} = 60$$

(1)'de verilen farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan yoğun saat ve günlük periyot oranlarına göre T_p değerleri aşağıda Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun saat ve Günlük periyot için ortalama ara süreler (T_p)

ETCS Seviyesi	Yoğun Saat T_p (sec)	Günlük Periyot T_p (sec)
Seviye 1	100	200
Seviye 2	80	160
Seviye 3	30	60

3.7.3.4. Eşdeğer Tampon Süre (T_{add})

Eşdeğer tampon (ara) süre (the equivalent buffer time); planlanmış tren tarife çizelgesindeki iki tren arasındaki planlanan sürelerdeki gecikme oranını azaltmak için koyulan ek ara süreye fazladan eklenen ara süredir. Çünkü blok kesitlerinde hat ve tren arasındaki devamlı olan bilgi akışı kesilebileceği göz önünde bulundurulabilme ihtimaline karşı eşdeğer ara süre eklenmelidir. İşletim sırasında, tren gecikebilir. Eğer takip eden tren gecikenden daha hızlı veya aynı hızdaysa ($v_1 \leq v_2$) ve bir sonraki blok kesit meşgulse, ikinci trenin hızı otomatik tren kontrol sistemi tarafından düşürülecek veya durdurulacaktır. Eğer bir sonraki blok kesiti açıldıysa, takip eden tren yoluna devam edebilir. ETCS Seviye 1 sinyalizasyon sisteminde hat ve tren arasındaki bilgi akışı LEU ekipmanı (Bakınız Bölüm 3.3.1.5) ile yapılmaktadır. Dolayısı ile bu ekipmanın bozulma ihtimaline göre hesaplanan eşdeğer ara süre (T_{add}) hesaplanması için, ortalama tampon sürenin (T_p) %10'u eşdeğer tampon süre olarak dikkate alınmıştır. ETCS Seviye 2 ve 3'de LEU ekipmanı olmadığı için hat ve tren arasındaki bilgi akışı GSM-R üzerinden yapılmaktadır. Böylece eşdeğer ara süre her iki seviye için 0(sıfır) olarak hesaplanmıştır [31].

Bu durumda, farklı sinyalizasyon sistemleri için yoğun ve günlük periyot oranlarına göre T_{add} değerleri aşağıda Tablo 3.5'de verilmiştir;

Tablo 3.5: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun ve Günlük saatler için eşdeğer ara süreleri (T_{add})

ETCS Seviyesi	Yoğun Saatte T_{add} (sec)	Günlük Periyotta T_{add} (sec)
Seviye 1	10	20
Seviye 2	0	0
Seviye 3	0	0

3.7.3.5. Hat Kapasitesi Hesaplanması (N_{opt})

Yüksek Hızlı Tren hattı üzerindeki günlük periyot ve pik (yoğun) saatlerdeki optimum tren sayısını (N_{opt}) hesaplamak için gereken formül:

$$N_{opt} = \frac{T}{Z + T_p + T_{add}} \quad (2)$$

(2) formülünün bileşenleri [31];

$T \rightarrow$ varsayılan süreden geçen toplam zamanı ifade etmektedir.

$Z \rightarrow$ ortalama asgari tren takip mesafesi (the average minimum headway); birbirini takip eden iki tren arasındaki izin verilen asgari süre aralığıdır.

$T_p \rightarrow$ ortalama ara süre (the average buffer time); gecikmenin yayılımını azaltmak için iki tren arasında programlanan ek süredir.

$T_{add} \rightarrow$ eşdeğer ara süre (the equivalent buffer time); blok kesitlerindeki tren ve hat arasındaki devamlı veri akışının olmaması halinde eklenen ekstra ara süredir.

(2)'deki formülde T zamanı Günlük periyot için 18 saat (64800 saniye) alınmıştır. Farklı Seviyeler için Z değerleri Tablo 3.2'den, T_p değerleri Tablo 3.4'ten son olarak T_{add} değerleri ise Tablo 3.5'ten alınmıştır. Virgülden sonrası yuvarlanmıştır.

$$N_{opt \text{ Seviye 1}} = \frac{64800}{300 + 200 + 20} = 125$$

$$N_{opt \text{ Seviye } 2} = \frac{64800}{240 + 160 + 0} = 162$$

$$N_{opt \text{ Seviye } 3} = \frac{64800}{90 + 60 + 0} = 432$$

(2)'deki formülde T zamanı Yoğun saat için 8 saat (28800 saniye) alınmıştır. Farklı Seviyeler için Z değerleri Tablo 3.2'den, T_p değerleri Tablo 3.4'ten son olarak T_{add} değerleri ise Tablo 3.5'ten alınmıştır. Virgülden sonrası yuvarlanmıştır.

$$N_{opt \text{ Seviye } 1} = \frac{28800}{300 + 100 + 20} = 70$$

$$N_{opt \text{ Seviye } 2} = \frac{28800}{240 + 80 + 0} = 90$$

$$N_{opt \text{ Seviye } 3} = \frac{28800}{90 + 30 + 0} = 240$$

Bu durumda, farklı sinyalizasyon sistemleri için yoğun ve günlük periyot oranlarına göre hesaplanan N_{opt} değerleri aşağıda Tablo 3.6'de verilmiştir;

Tablo 3.6: Farklı sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan Yoğun ve Günlük saatler için optimum tren sayısı (N_{opt})

ETCS Seviyesi	Yoğun Saatte (adet)	N_{opt}	Günlük Periyotta (adet)	N_{opt}
Seviye 1		70		125
Seviye 2		90		162
Seviye 3		240		432

3.8. Türkiye'deki Yüksek Hızlı Tren Hattı Altyapı Kullanım Oranı Hesaplama Yöntemi

Tüm tren hatlarındaki günlük periyot (Daily Period) ve yoğun (Peak Hours) saatlerdeki bir hattın trafik yoğunluğunun üst değeri UIC tarafından belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 3.3'de verilmiştir. Üye ülkelere bu değerlerin aşılması tavsiyesinde bulunulmuştur. UIC 406 Hükümlerinde verilen altyapı kullanım oranı (n) hesabı için hatta kullanılan tren sayısı ile ortalama asgari takip mesafesi ile

çarpımından hesaplanan değerin hattın kullanımında geçen günlük periyot ve yoğun saatin toplam zamanına oranıyla hesaplanır. Gereken formül:

$$n = \frac{N \times Z}{T} \quad (3)$$

(3) formülünün bileşenleri [22];

N → Bir hatta kullanılan yüksek hızlı tren sayısıdır. Bu çalışmada alınacak değerler; Tablo 3.1'den anlaşılacağı üzere günlük Ankara'dan Konya'ya 7 set, Ankara'dan Eskişehir'e 11 set, Ankara'dan İstanbul'a 6 set sefer sayıları bulunmaktadır.

Z → ortalama asgari tren takip mesafesi (the average minimum headway); birbirini takip eden iki tren arasındaki izin verilen asgari süre aralığıdır. Değerleri Tablo 3.2'de hesaplanmıştır.

T → Hattın kullanımında geçen günlük periyot ve yoğun saatin toplam zamanını ifade etmektedir. Bu çalışmada alınacak değerler Tablo 3.1'den anlaşılacağı üzere günlük periyot 18 saat (64800 saniye eşdeğer), yoğun saat ise 8 (28800 saniyeye eşdeğer) saattir.

(3)'deki formülde T zamanı Günlük periyot için 18 saat (64800 saniye) alınmıştır. Ankara Konya YHT hattı için Seviye 2 değeri, Eskişehir hattı için Seviye 1 ve İstanbul hattı için Seviye 1 değerlerinin Z değerleri Tablo 3.2'den, yine bu YHT hatlarındaki çalışan set (N) değerleri Tablo 3.1'den alınmıştır.

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{Kon Seviye 2}} = \frac{7 \times 240}{64800} = 0,02$$

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{Esk Seviye 1}} = \frac{11 \times 300}{64800} = 0,05$$

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{İst Seviye 1}} = \frac{6 \times 300}{64800} = 0,03$$

(3)'deki formülde T zamanı Yoğun Saat için 8 saat (28800 saniye) alınmıştır. Ankara Konya YHT hattı için Seviye 2 değeri, Eskişehir hattı için Seviye 1 ve İstanbul hattı

için Seviye 1 değerlerinin Z değerleri Tablo 3.2'den, yine bu YHT hatlarındaki çalışan set (N) değerleri Tablo 3.1'den alınmıştır.

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{Kon Seviye 2}} = \frac{7 \times 240}{28800} = 0,05$$

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{Esk Seviye 1}} = \frac{11 \times 300}{28800} = 0,11$$

$$n_{\text{Ank} \rightarrow \text{İst Seviye 1}} = \frac{6 \times 300}{28800} = 0,06$$

Bu durumda, farklı YHT hatları için altyapı kullanım oranı hesaplanan yoğun saat ve günlük periyot oranlarına göre (n) değerleri aşağıda Tablo 3.7'de verilmiştir;

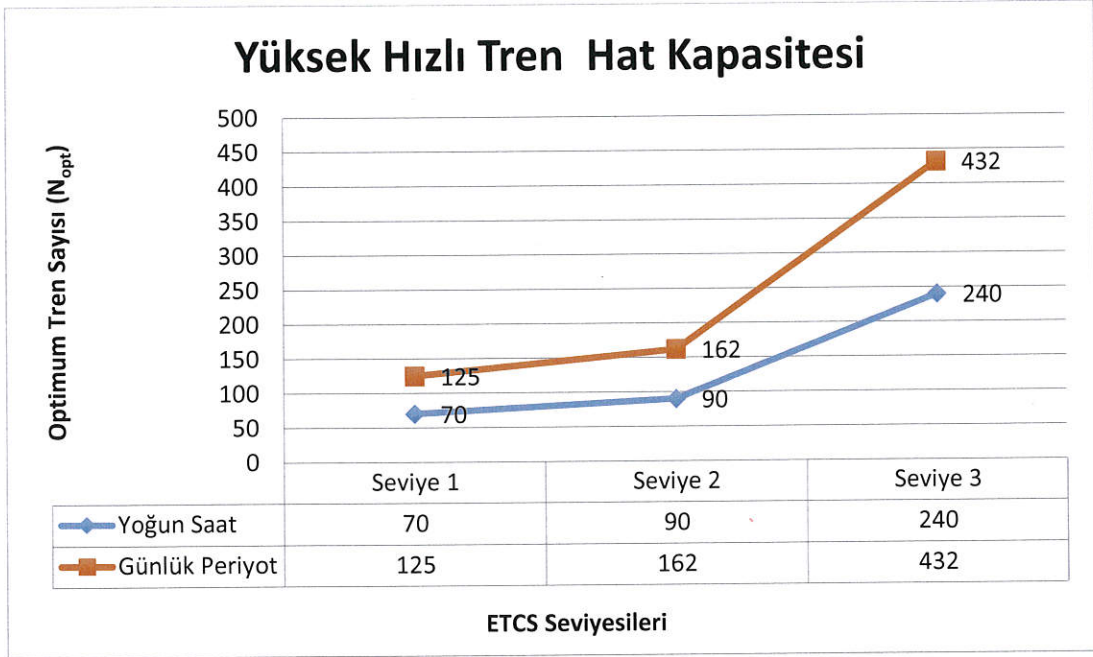
Tablo 3.7: Türkiye'deki YHT hatları için altyapı kullanım oranı için hesaplanan değerleri (n)

YHT Hattı	Yoğun Saat oranı %	Günlük Periyot Oranı %
Ankara Konya Hattı (Seviye 2)	5	2
Ankara Eskişehir Hattı (Seviye 1)	11	5
Ankara İstanbul Hattı (Seviye 1)	6	3

3.9. Farklı Seviye ERTMS/ETCS Sinyalizasyon Sistemlerinin Yüksek Hızlı Tren Hat Kapasitesine Etkisi ve Altyapı Kullanım Oranı Çalışması Sonuç ve Yorumları

Bu çalışmada, farklı seviye ETCS sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan yoğun saat ve günlük periyot dilimlerine göre YHT hat kapasitesi ve hattın altyapı kullanım oranı analizi gerçekleştirilmiştir. Optimum hat kapasitesi; belirlenmiş bir

zaman aralığı boyunca bir rota üzerinde sürekli ve tercihen en düşük tren takip mesafesinde işletilebilir trenlerin sayısını belirtmektedir. Buradan yola çıkarak bu çalışmada, Uluslararası Demiryolu Birliği'nin belirlediği 406 hükümleri ile teorik yöntem kullanılarak farklı seviye ETCS sinyalizasyon sistemleri için hesaplanan, günlük periyot ve yoğun saat oranlarına göre hesaplanan YHT hattındaki optimum tren kapasitesi (N_{opt}) sonuçları Şekil 3.10'de gösterilmiştir.



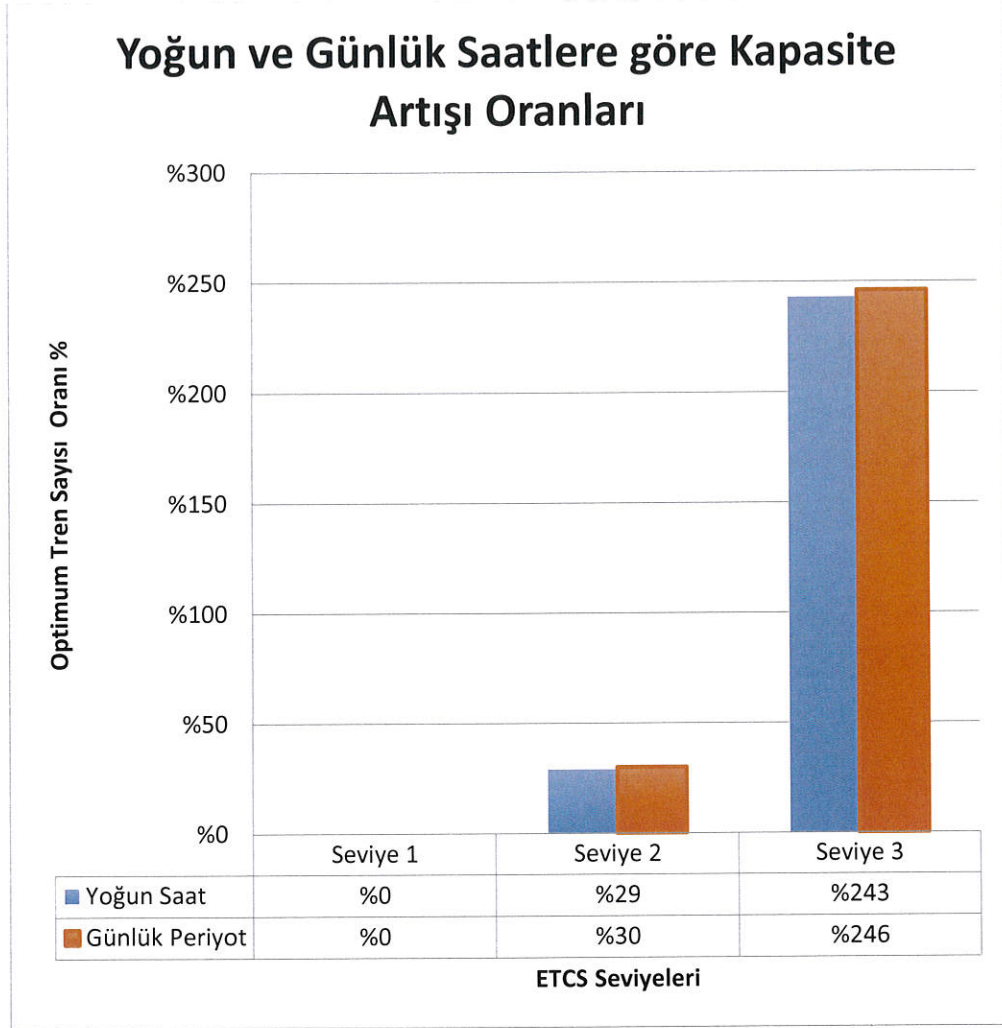
Şekil 3.10: UIC 406 Hükümleri yaklaşımına göre optimum kapasite sonuçları

Türkiye'deki mevcut YHT hatlarında, farklı seviye ETCS sinyalizasyon sistemine geçişte hat kapasitesinin arttığı sonucuna Şekil 3.10 grafiğine bakarak anlayabiliriz. Grafiğin analizini yapacak olursak; burada yoğun saat ve günlük periyotta ETCS Seviye 1'den ETCS Seviye 2'ye geçildiğinde lineer artış görülmektedir. ETCS Seviye 3'e geçildiğinde eksponensiyel artış görülmektedir. Yüzdesele oranlara baktığımızda (Referans değeri %100 kapasiteye sahip ETCS Seviye 1 alınmıştır ve sonuçları Şekil 3.11'de gösterilmiştir) ETCS Seviye 1'den ETCS Seviye 2'ye yaklaşık %30'luk bir artış görülmektedir. Avrupa'da (özellikle İtalya, Almanya, Danimarka ve İsveç) ETCS Seviye 2'ye geçilen hızlı tren hatlarında bu artış oranlarına ulaşılmıştır [27]. Türkiye'de işleyen YHT hatları ETCS Seviye 1 sinyalizasyon sistemine sahiptir. Yalnızca Polatlı Konya arasında ETCS Seviye 2 sinyalizasyon sistemi vardır. Bu artış oranı gösteriyor ki diğer hızlı tren hatlarının

ETCS Seviye 2'ye geçirilmesi ile hat kapasitesinde kabul edilebilir bir artış olacağı görülmektedir. Günümüzde, örnek çalışmada incelenen ülkemizin hızlı tren hattıyla ilgili bilinen işletmesel gerçeklerden dolayı teorik yöntemle hesaplanan optimum hat kapasitesi rakamlarına ulaşmak mümkün gözüküyor. Ancak Şekil 3.11'de görüldüğü üzere orantısız artışlar yakalanabilir.

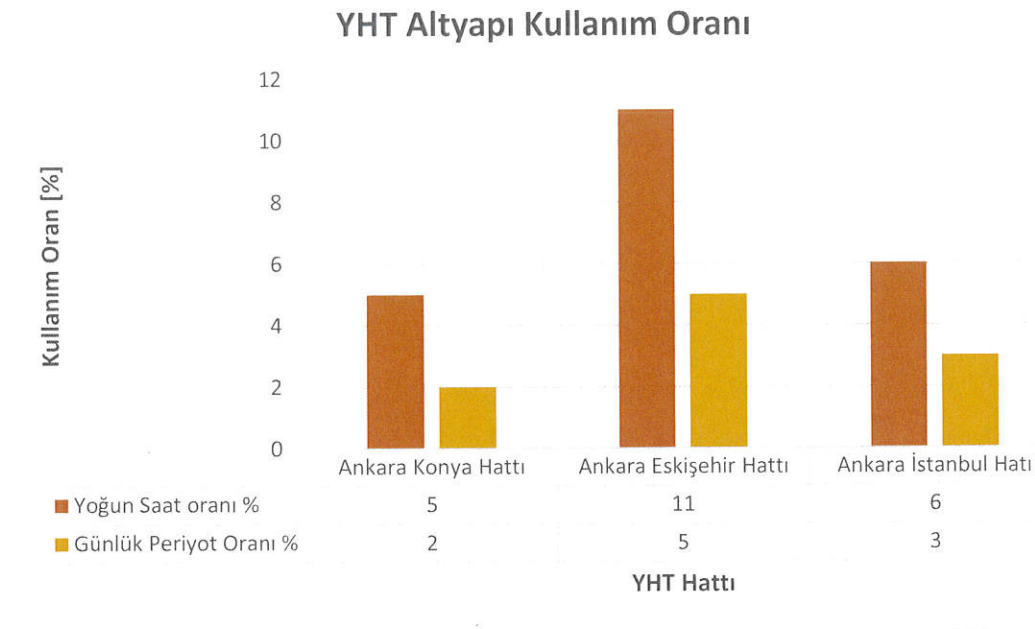
Şekil 3.10'deki sonuçlardan biri olan, ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin diğer ETCS Seviye 1 ve 2 ile karşılaştırıldığında ciddi bir kapasite artışına ulaşıldığı görülmektedir. Tabii bu optimum artış oranını göstermektedir. Avrupa'da özellikle Danimarka ve İsveç'te kurulmuş test sahalarında yapılan ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sistem çalışmaları da yaklaşık sonuçları vermektedir [22]. ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin temelini oluşturan hareketli blok sinyalizasyon sistemi Marmaray'da kullanılmakta ve günde 219 sefer yapılmaktadır. Bu rakam bile Şekil 3.10'deki Seviye 3 değerlerine ulaşılabilirliğini göstermektedir.

ETCS Seviye 3 henüz geliştirme ve test aşamasında olduğu için teorik yöntem ile yapılan hesaplamaların sonucu dahi gösteriyor ki bu sinyalizasyon sisteminin üzerinde durulması gerekmektedir. Avrupa Birliği, demiryolu yatırım fonları ile desteklediği birçok proje bulunmaktadır. Türkiye'de, yeni nesil ETCS sinyalizasyon sistemi ile ilgili projeler için AR-GE fonlarından faydalanmalıdır.



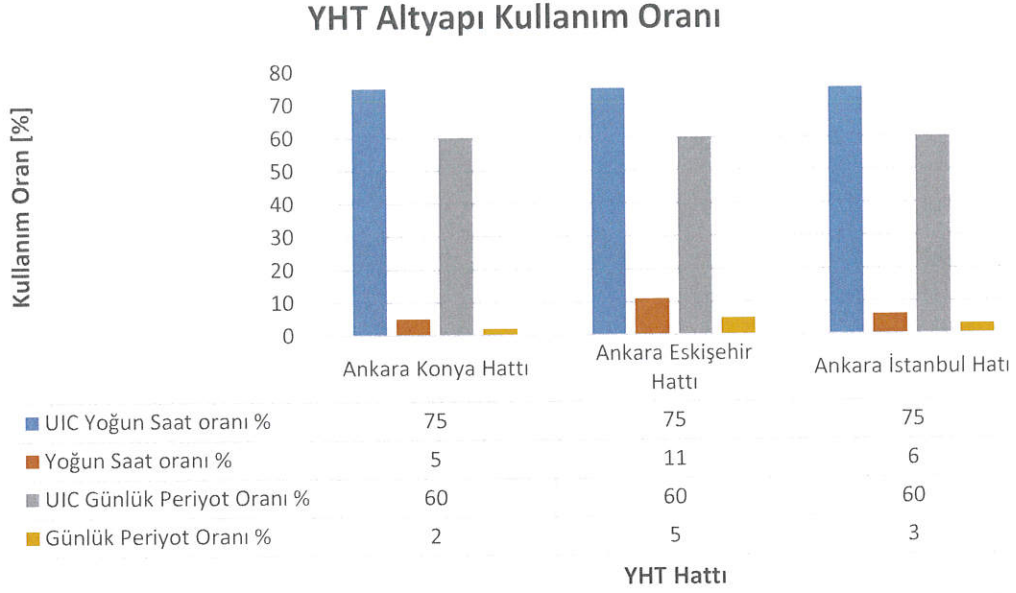
Şekil 3.11: Farklı ETCS Seviyelerine göre Yoğun ve Günlük Saatlere göre Kapasite Artış Oranları

Diğer çalışma olarak, Türkiye'deki YHT hatlarındaki günlük periyot ve yoğun saatlerdeki üç hattın altyapı kullanım oranı hesaplamasının sonucu aşağıda Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



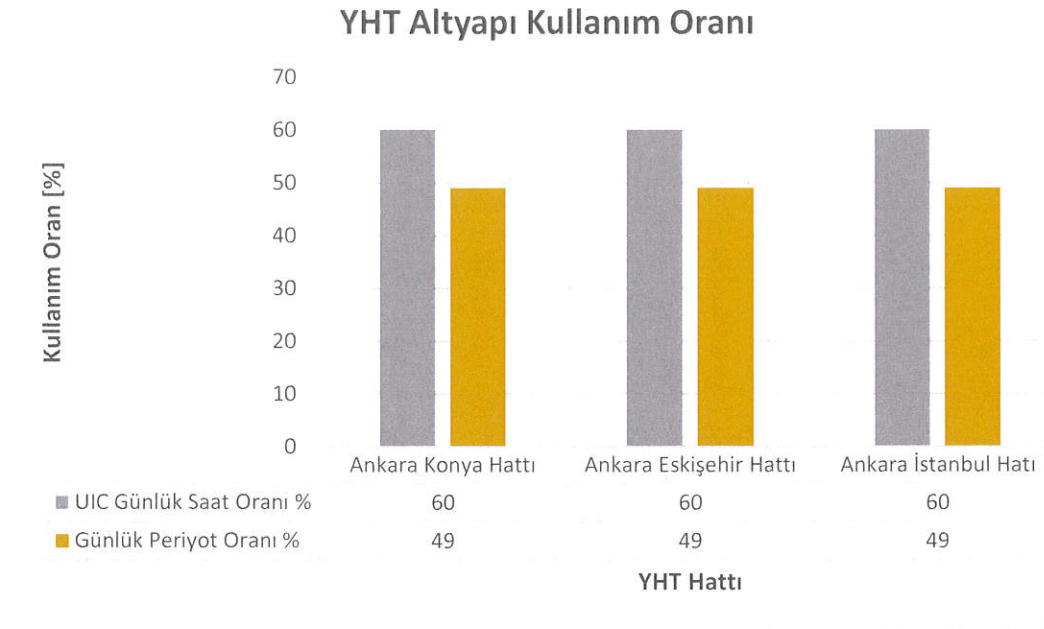
Şekil 3.12: YHT Altyapı Kullanım Sonuçları

Bu çalışmada, hesaplanan yoğun saat ve günlük periyot dilimlerine göre hızlı tren hatlarının altyapı kullanımı analizi gerçekleştirilmiştir. Grafiği incelersek; Yoğun saat aralığı sabah 10 ile akşam 18 saatleri arasındaki hattın trafik yoğunluğunu görebilmekteyiz. Günlük periyot aralığı ise ilk YHT saferinin başladığı sabah 06'dan son seferin tamamlandığı gece 24 saatleri arasındaki hattın trafik yoğunluğunu görmekteyiz. Hesaplanan değerler gösteriyor ki mevcut hızlı tren hatlarının altyapı kullanımının gerekenden çok altında olduğudur. Bu durumu da karşılaştırmalı olarak Şekil 3.13'de görmekteyiz. UIC'in belirlediği günlük periyot ve yoğun saatlere göre kullanım oranları ile karşılaştırıldığında günlük periyottaki oran yoğun saate göre çok düşüktür. Bu ise mevcut hızlı tren altyapımızın yeterince kullanılmadığını göstermektedir.



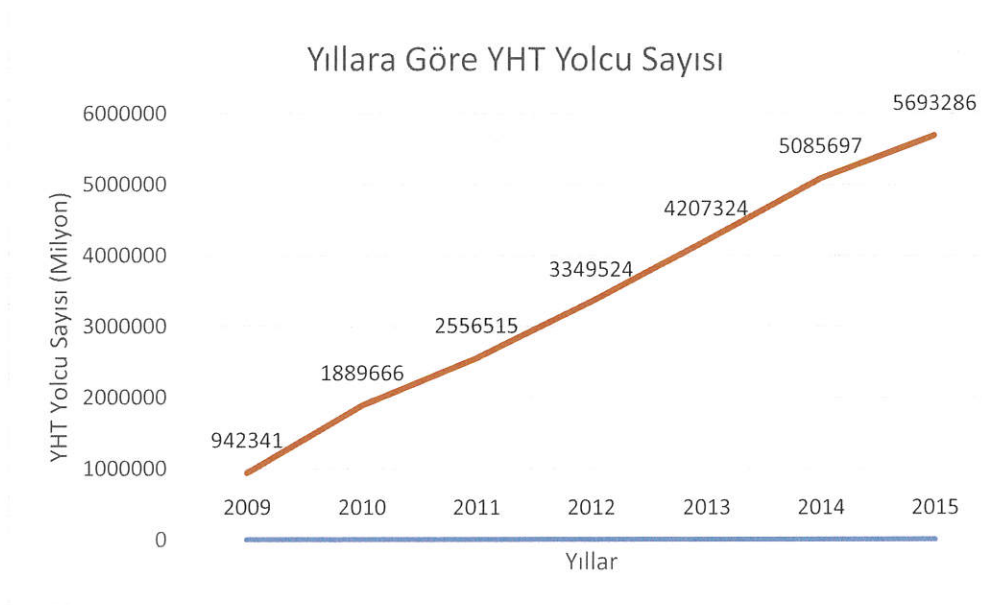
Şekil 3.13: YHT Hatları Altyapı Kullanım Oranları

YHT Altyapı kullanım oranlarının düşük olmasının en baştaki nedeni hızlı tren setlerinin çok az olmasıdır. Türkiye’de mevcutta 15 adet YHT seti vardır. Bu sayının artması ile altyapı kullanım oranı artacaktır. Türkiye 2023 vizyonunda, 2019 yılına kadar Ankara merkezli hızlı tren çekirdek ağı 3623 km’ye çıkarılmasıdır. Bu kapsamda ihtiyaç duyulan hızlı tren seti sayısı da 15 setten 106 sete çıkarılma hedefi koyulmuştur [25]. YHT setinin hedeflenen 106’ya çıkarıldığında, Bölüm 4.8’de ki (2) nolu formülde altyapı kullanım oranı hesaplama yöntemindeki tren seti sayısını 106 olarak hesaba kattığımızda aşağıdaki Şekil 3.14’ü elde etmiş oluruz. Bu grafikten günlük periyotta %49’luk bir altyapı kullanım oranına ulaşılabileceği hesaplanmaktadır. Burada UIC’in tavsiye ettiği hızlı tren hatlarındaki günlük periyottaki altyapı kullanım oranı olan %60’a yaklaşmaktadır.



Şekil 3.14: 2019 yılı itibari ile YHT Hatları Altyapı Kullanım Oranları

Yukarda elde edilen hat kapasitesinin sonuçları ile aşağıdaki Şekil 3.15'deki sonuçları karşılaştırsak, hat kapasitesinin artırılması ile taşınan yolcu sayısında da orantısal bir artış gözlenmiş olacak.



Şekil 3.15: Yıllara göre YHT Yolcu Sayısı [30]

Bu sonuç gösteriyor ki; YHT'nin ilk kullanıma başladığı 2009 yılı itibari ile yolcu sayısı bir önceki yıla göre 2010 yılında %100, 2011 yılında %35, 2012 yılında %31, 2013 yılında %26, 2014 yılında %21, 2015 yılında %12 artışla 5.693.286

yolcuya ulaşmıştır. Bu rakamlara ulaşılması, hem YHT tren setlerinin artışı hem de tren ağının yaygınlaşmasıyla elde edilmiştir. Bu yıllara göre ortalama %12 artış oranları ile 2019 yılında yaklaşık 9 milyon yolcu taşımacılığına ulaşılmış olacaktır [30].

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Değerlendirme

Yüksek Hızlı Tren ve Metro gibi raylı toplu taşıma sistemlerinin her kesimce kullanımının artırılarak karayolu ulaşımına bir alternatif haline getirilmesi; hızlı, dakik, konforlu ve güvenli taşıma hizmetinin sunulmasına bağlıdır. Buda sinyalizasyon sistemlerine bağlıdır. Sinyalizasyon sistemindeki teknolojik gelişmeler aşama aşama sistemin güvenliğini insan hatalarından bağımsız hale getirmiş, tren setleri ve demiryolu trafiği üzerinde bir güvenlik alanı oluşturarak son derece emniyetli bir seyahat imkânı sunarak yolcuların karşılaşacağı kaza risklerini normal hayatta karşılaşacağı risk mertebesine düşürmüştür. Bu çalışmada günümüzdeki raylı toplu taşıma sistemlerinde kullanılan sinyalizasyon sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Farklı seviye ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemlerinin hızlı tren hatlarındaki hat kapasite artışına ve altyapı kullanım oranlarına etkisine bakılmıştır.

4.2. Sonuç

Avrupa ülkelerinde ERTMS'in gerçekleştirilmesi için demiryolu ağlarında ortak bir tren yönetim sistemi kurarak karşılıklı işletilebilirliğinin sağlanması hedeflenmiştir. ERTMS'in alt bileşeni GSM-R ve ETCS'dir. ETCS ile tüm Avrupa demiryolu ağının sinyalizasyon açısından bütünlüklü bir yapıya kavuşturulması için farklı Avrupa ülkelerinin mevcut sinyalizasyon altyapısının değiştirilmeden üzerine belirli bir standarda dayanan ortak sinyalizasyon sistemi kurulması hedeflenmiştir. Böylece herhangi bir Avrupa ülkesinde seyahat eden tren tüm Avrupa ülkelerindeki demiryolu ağlarında sefer yapabilecektir. Bu ETCS sistemi ile bu sistemin aynı standartları taşıyan ve aynı işlevleri gerçekleştiren malzemelerin kullanımı sağlanmıştır. Böylece sinyalizasyon malzemeleri ve sistemleri üretiminde rekabetçi pazar oluşmuş, bakım, yedek parça ve işletme maliyetleri azalmıştır. Teknik personel temini kolaylaşmıştır. Avrupa ülkeleri arasındaki ortak çalışmalar sonucunda güvenilirlik, elde edilebilirlik, bakım, emniyet derecelerinde önemli ilerlemeler

sağlanmış daha yüksek güvenlik seviyesine sahip sinyalizasyon sistemleri teknolojisi elde edilmiştir.

Günümüzde, Türkiye’de ve bazı dünya ülkelerinin demiryolu hatlarında (ağırlıklı olarak hızlı tren hatlarında); ERTMS/ETCS sinyalizasyon sistemleriyle donatılmasına öncelik verilmiştir. Ülkemizde ETCS sinyalizasyon sistemine geçiş için öncelikle YHT hatlarında ETCS Seviye 1 (Ankara – İstanbul arasında) ve Seviye 2 (Konya - Polatlı) sinyalizasyon sisteminin kurulmasıyla başlanmıştır. Farklı seviye ETCS sinyalizasyon sistemlerinin YHT hatlarındaki, hat kapasitesini artırmadaki olumlu etkisini (Bakınız Bölüm 4.9) bu tez çalışması ile gösterilmiş oldu. Ayrıca yine YHT hatlarındaki altyapı kullanım oranının, UIC’in belirlediği seviyelerde olmadığını (Bakınız Bölüm 4.9) ve istenen oranlara ulaşılabilmesi için YHT set sayısının artırılması gerektiği de bu tez çalışması ile gösterilmiş oldu.

Bu ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sistemin geliştirilme amacı konvansiyonel hatlarda da kullanılmak istenmesidir. ETCS Seviye 1 ve 2 sinyalizasyon sistemlerinin ilk kurulum maliyetinin yüksek olması bu sistemlerin, az yoğunlukta tren işletiminin yapıldığı konvansiyonel ve uzak mesafe hatlarda kurulmasını engellemiştir. Geliştirilme ve test aşamasında olan ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin kullanımda olan ETCS Seviye 1 ve 2 sinyalizasyon sistemlerine göre kurulum ve bakım maliyetleri daha ekonomik olması ve hat kapasitesini artırması hedeflenmektedir. Çünkü ETCS Seviye 3’te ray devreleri ve eurobalizler gibi hat boyu sinyalizasyon ekipmanlarına gereksinim bulunmadığından, hat boyu sinyalizasyon donanım/yazılım temin, kurulum ve bakım maliyetlerinden tasarruf edilmesi hedeflenmektedir. Bu sistemin hem ülkemizde hem de diğer ülkelerde kurulması ile demiryolu işletmelerinin bakım ve onarım işlerinde daha ekonomik ve ulaşılması kolay hizmet ve destek alma olanağı da sağlanmış olacaktır.

Bu ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin kurulmasının getireceği faydalar (ekonomik ve ulusal kazanımlar) aşağıdaki gibi olacaktır:

- Hızlı tren ve konvansiyonel hatlarda tren işletimi daha emniyetli, daha hızlı ve daha sık aralıklarla yapılabilecektir.
- Kurulum ve bakım maliyetleri diğer seviye sinyalizasyon sistemlerine göre daha az maliyetli olduğu için konvansiyonel ve uzak mesafe demiryolu hatlarında da kurulabilecektir.

- Demiryolu hat kapasitesinin artması ile seyahat ve yük taşımacılığının karayolları yerine tercih sebebi olacaktır.
- Haberleşme sistemi olarak LTE-R teknolojisine geçiş ile trenlerde yolculara sürekli internet bağlantı imkânı sağlayacaktır.

ERTMS'in diğer alt bileşeni hızlı tren hatlarında kullanımda olan demiryolu özgün haberleşme sistemi GSM-R sistemi olup, bu sistem teknolojisi artık eskimiş ve Avrupa'da artan veri iletişim trafiğini kaldıramayacak hale gelmiştir. Avrupa Birliği'nden 2025'ten sonra üretimi durdurulup iptal edileceği kararı çıkan GSM-R haberleşme sisteminin yerine henüz geliştirilmekte olan LTE-R sistemi (Bakınız Bölüm 3.5.2) alacaktır.

ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin üzerine çalışmalar demiryolu ulaşım sektörüne sağlayacağı imkânlar sebebiyle önem ve ivme kazanmıştır. Bu doğrultuda Avrupa Birliği destek programları çerçevesinde kurulan Shift2Rail ortak girişimi, sektörün önde gelen 19 yabancı demiryolları alanında faaliyet gösteren sinyalizasyon firmalarından oluşmaktadır. Bu ortak girişim altında birçok ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sistemi Ar-Ge projeleri bulunmaktadır ve HORIZON 2020 fonları ile desteklenmektedir. Bu firmaların çalışmalarında öne çıkan projeler şöyledir; tren konumu tespitinde uydu tabanlı GNSS/INS sistemi için Galileo Uydu Projesi'nin hedeflerinden biri olan ALCATEL firmasının "Lucent LTE-R Ar-Ge Projesi", ANSALDO firmasının "3inSAT" Ar-Ge Projesi, İsveç Demiryolları Araştırma Enstitüsünün (Trafikverket) "ERTMS Regional" Ar-Ge Projesi ve İspanya Bask Üniversitesinin I2T Araştırma Grubunun "Broadband" Ar-Ge Projesi gibi çalışmaları vardır.

4.3. Öneriler

ERTMS/ETCS Seviye 3 sinyalizasyon sisteminin getireceği yarar olarak en fazla, hat boyu sinyalizasyon ekipman alım, montaj, bakım ve idame maliyetlerinde tasarruf sağlanmasıdır. Ayrıca Şekil 3.10'den de anlaşıldığı üzere konvansiyonel ve yüksek hızlı tren hat kapasitesinin artması ile bu sistemlere yatırımların yapılması gerektiği önerilmektedir. Bunun için TCDD'nin bu sistemlerin gelişiminde kullanıcı olarak ön ayak olmalıdır. Ülkemizdeki YHT hatlarının UIC standartlarında belirtilen günlük periyot ve yoğun saatteki altyapı kullanım oranlarının Şekil 3.13'den de anlaşılacağı üzere çok altında olması YHT altyapımızın yeterince

kullanamadığımızın göstergesidir. Bu durumu düzeltmek ve istenen oranlara ulaşmak için 2019 yılı için hedeflenen hızlı tren set sayısına artırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Uludağ, M., Kentsel Ulaşımında Karayolu ve Raylı Taşıma sistemlerinin Bazı Önemli Faktörlere göre Karşılaştırılması, Atatürk Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. bölümü, Erzurum, 2014.
- [2] GÜNCAN M., Demiryolu Sinyalizasyonunda Yerli Adımlar, TÜBİTAK BİLGEM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü, Eskişehir, 14 Haziran 2013.
- [3] Açıkbaz, S., Söyler, H., Raylı Toplu Taşımda Sinyalizasyon Sistemleri, İstanbul, 2006.
- [4] Gündoğdu, F., Açıkbaz, S., Raylı Sistemlerde Emniyet Standartları ve Makas Otomasyon Sistemine Uygulaması, İstanbul, 2007.
- [5] Gündoğdu F., Söyler H., Demiryolu Sinyalizasyon Sistemlerinde Tasarım Kriterleri Ve “Fail-Safe” Kavramı, 2008.
- [6] Palumbo M., Ruscigno, M., Scalise, J., The ERTMS/ETCS Signalling System, Railway Signalling Europe Community, London, 15 Mart 2015.
- [7] Gülener, Y., Bir Raylı Ulaşım Sinyalizasyon Sistemi Gerçekleştirme, İTÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009.
- [8] Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, TCDD 2014 Faaliyet Raporu, TCDD Yayın No: 2015-05, Ankara, 2014.
- [9] Pektaş, İ., ARUS, Raylı Ulaşım Sistem Standartları, <http://anadoluraylisistemler.org/tr/announcementDetail/rayli-ulasim-sistem-standartlari/87>, Erişim tarihi: 02 Aralık 2015.
- [10] Vinck, K., ERTMS Work Plan of the European Coordinator, Belgium, 2015.
- [11] UNIFE, UNISIG an industrial consortium to develop ERTMS/ETCS technical specifications Factsheets No 8, UNIFE, 2014.
- [12] Binay İ., Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Avrupa Tren Kontrol Sisteminin (ETCS) Türkiye’deki Demiryoluna Uygulamasının İncelenmesi, İstanbul, 2013.

- [13] DÖNMEZ, M., GSM-R: Demiryolu İletişimi ve Uygulamaları için Uluslararası Kablosuz İletişim Standardı, 16. Akademik Bilişim Konferansı, Mersin Üniversitesi, Mersin, 2014.
- [14] Uras, M., TCDD Tesisler Dairesi Başkanlığı, GSM-R Haberleşme Sistemleri, Ankara, 2007.
- [15] <http://www.networkrail.co.uk/asp/6386.aspx>, Erişim tarihi: 15 Aralık 2015.
- [16] Van Liefferinge, M., Paties, L., Preparing the future communication system for ERTMS, European Railway Review Volume 21, Issue 1, 2015.
- [17] Bertout, A., Bernard E., Next generation of railway and metros wireless communication systems, Institution of Railway Signal Engineers, ASPECT 2012.
- [18] Yetkilendirme gerektiren gerekli seyrüsefer performansı yaklaşımları uçuşa elverişlilik onayı ve operasyonlarına ilişkin talimat (sht rnp 20-26), Kısım: Atalet referans sisteminin kullanımı, s24-25, <http://web.shgm.gov.tr/doc5/sht-rnpt.pdf>.
- [19] Capua, R., Neri, A., Rispoli, F., High Integrity augmentation systems for Train Control Systems, IGAW 25-26 Sept. 2014 Workshop, Rome, 2014.
- [20] ERTMS Regional, Swedish Rail Administration, Bangalore Henningssons tryckeri, Sweden, July 2009.
- [21] Rispoli, F., GNSS for Train Control Systems - A step-change innovation for the competitiveness of the rail industry, ANSALDO STS, June 2013, Brussels, 2013.
- [22] Magnarini, M., Evaluation of ETCS on railway capacity in congested areas, KTH Vetenskap och Konst (KTH Railway Group) Master Tezi, Stockholm, October 2010.
- [23] Yüksel, H., Raylı Toplu Tasıma Sinyalizasyon Sistemleri Ve Marmaray Projesinin Sinyalizasyonu, Niğde Üniversitesi FBE Yüksek Lisans Tezi, Niğde, Ekim 2007.
- [24] <http://www.tcdd.gov.tr/yuksekhizli-tren+m96>, Erişim tarihi: 15 Eylül 2015.
- [25] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğünün 2015-2019 Yılı Stratejik Plan Raporu, Ankara, 2015.

- [26] UIC Code 406, International Union of Railways, 1 June 2004.
- [27] UNIFE, Increasing Infrastructure Capacity How ERTMS Improves Railway Performance Factsheets No 10, UNIFE 2014.
- [28] Yeong Choi H., Song Y., Kim Y., Standards of Future Railway Wireless Communication in Korea, Korea Railroad Research Institute, Korea, 2014.
- [29] TCDD Tesisler Dairesi Başkanlığı, ETMS/ETCS sistemi Kurulacak Hatlar, Ankara, 2007.
- [30] TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğünün 2015 Yılı Demiryolu Sektör Raporu, Ankara, 2015.
- [31] Winter, P., Influence of ETCS on the line capacity, International Union of Railways (UIC) ERTMS Programme Manager Platform Infrastructure Department, Aachen, March 2008.
- [32] Abril M., Barber F., Ingolotti L., Salido M.A., Tormos P., Lova A., An Assessment of railway capacity, Transportation Research Part E, Vol. 4, Spain, 2008.
- [33] MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI, Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi - Raylı Sistem Teknolojisi – Raylı Sistemler, Ankara 2006.
- [34] Can C., Demiryollarında Sinyalizasyon ve Elektronik Kilitleme, GYTE Mühendislik ve FBE Yüksek Lisans Tezi, Gebze 2001.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Abdullah Aykut MERT

Uyruğu: TC

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara 24.07.1978

Medeni Hali: Evli

Adres: Şenlik Mah. Ş.T.Sümer Sok. No:1/11 Ankara

E-Posta Adresi: aamert@gmail.com

İletişim (Telefon): 0532 6843191



EĞİTİM

Lise: Ankara Atatürk Lisesi (Ankara) - 1995

Lisans: Selçuk Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği (Konya) - 2002

Yüksek Lisans: Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Teknolojileri (Ankara) - 2016

MESLEKİ DENEYİM

2004-2009 Havelsan A.Ş. Yazılım Mühendisi

2009-2014 Havelsan A.Ş. Sistem Entegrasyon Mühendisi

2014-2016 Havelsan A.Ş. Sistem Mühendisliği Takım Liderliği

2016- Havelsan A.Ş. Çözüm Mühendisliği Yöneticisi

YABANCI DİL

İngilizce