

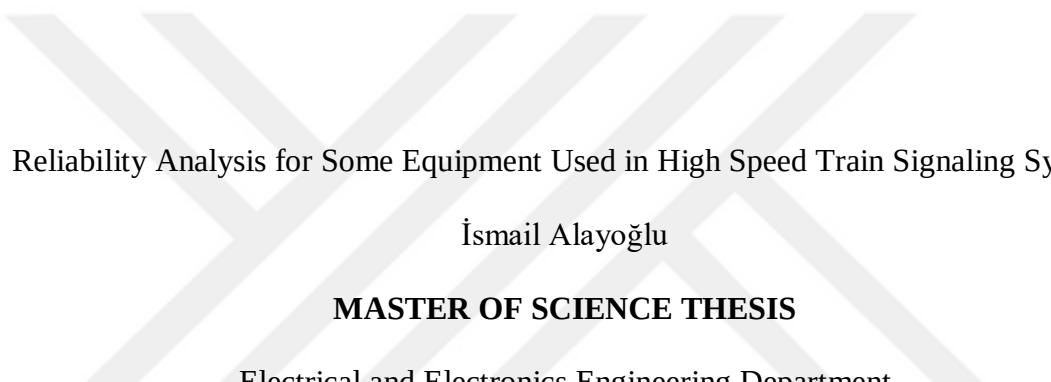
Hızlı Tren Sinyalizasyon Sisteminde Bazı Bileşenlerin Güvenilirlik Analizi

İsmail Alayoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018



Reliability Analysis for Some Equipment Used in High Speed Train Signaling System

İsmail Alayoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Electrical and Electronics Engineering Department

May 2018

Hızlı Tren Sinyalizasyon Sisteminde Bazı Bileşenlerin Güvenilirlik Analizi

İsmail Alayoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon - Sinyal İşleme Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Serhan Yavuz

Mayıs 2018

ONAY

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İsmail Alayoğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “**Hızlı Tren Sinyalizasyon Sisteminde Bazı Bileşenlerin Güvenilirlik Analizi**” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliğiyle kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Serhan Yavuz

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Serhan Yavuz

Üye : Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şener Ağalar

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Hasan Serhan Yavuz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Hızlı Tren Sinyalizasyon Sisteminde Bazı Bileşenlerin Güvenilirlik Analizi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 14/05/2018

İsmail Alayoğlu

İmza

ÖZET

Güvenilirlik, bir ürünün; belirli amaçlar doğrultusunda ve belirli bir kullanım aralığında kendisinden beklenen işi yerine getirme kabiliyetidir. Türkiye’de bulunan hızlı tren hatlarının işletme verimliliğinde, yol boyu ve araç üzerinde bulunan donanımların güvenilirliği önemli rol oynamaktadır. Herhangi bir sinyalizasyon donanımının işletme esnasında arızalanması; tren tehirinden dolayı işletmenin zarar etmesi, yolcuların gidecekleri yere geç kalmaları, arızalı parçanın diğer elektronik donanımlar üzerinde oluşturacağı olumsuz etkiler gibi ciddi sorunlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, hızlı tren sinyalizasyon sisteminde arızalan ve arızalandığında önemli gecikmelere sebep olan bazı donanımların ömür süreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Uygulamada, ülkemizde yakın geçmişte tamamlanan yüksek hızlı tren projelerinin sinyalizasyon sisteminde meydana gelen arıza verileri kullanılmıştır. Donanım bileşenleri içinde özellikle arıza yapması durumunda tren tehiri üzerinde etkili olan bileşenler seçilmiştir. Her bir donanım için en uygun olan olasılık dağılımı belirlenmiş ve ilgili dağılımın parametreleri, çeşitli tahmin yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen parametre tahminleri yardımıyla, tehlike oranı ve güvenilirlik olasılıkları hesaplanmıştır. Çalışmada kullandığımız yöntem, arızalanma zamanları bilinen herhangi bir bileşen için tekrarlanabilir. Arızalandığında tren tehirine sebep olan bu bileşenlerinin ömür sürelerinin tahmin edilmesi sistemin durmadan önce parça değişikliği yapılabilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hızlı tren, sinyalizasyon, verimlilik, güvenilirlik analizi, ömür süresi tahmini

SUMMARY

Reliability is a product's ability to fulfill the job that is expected in the direction of certain goals and within a certain period of use. The reliability of the line side and on-board equipments plays an important role for the productivity of high-speed railway lines' operations in Turkey. The failure of any equipment causes serious problems such as the maintenance company refunds the money due to the delay of the train, the passengers will have latency to their arrivals, and the defective part may affect other electronic equipments. In this study, we tried to estimate the lifetime of some fault equipment and equipment that causes significant train delays when it has a malfunction in the high-speed train signaling system. In this practice, failure data has been obtained from the high-speed train projects' signaling system that has been completed recently in our country. Some equipment within the components whose failures are particularly important and that are effective on the train's delay have been selected. For each equipment, first the most suitable probability distribution has been determined and then related distribution parameters have been calculated by using various estimation methods. As a result, the hazard ratio and reliability probabilities were calculated by using the obtained parameters. The methodology that we've used in our study could be repeated for any other equipment whose failure times are known. Estimating the lifetime of such equipment which cause train delays when they are failed, provides important information regarding replacing component before the system stop.

Keywords: High speed train, signaling, efficiency, reliability analysis, lifetime estimation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanma aşamasında değerli önerilerini ve yardımlarını esirgemeyip, desteğini üzerimden bir an olsun eksik etmeyen danışman hocam, Dr. Öğr. Üyesi Hasan Serhan Yavuz’a,

Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere gerekli kaynakları ve tecrübelerini benimle paylaşarak tezime katkıda bulunan mesai arkadaşlarım, Önder Temizyürek ve Fatih Paçacı’ya,

Çalışmamın tamamlanmasında beni her zaman destekleyip, yanımda olan TCDD’deki değerli abilerim, Erol Karaman, Nuri Çetin, Ulucan Kaymak ve Özenç Akdağ’a,

Son olarak bu günlere ulaşmamda üzerimde büyük emekleri olan, gerek lisans gerekse yüksek lisans eğitimin boyunca maddi ve manevi desteklerini üzerimden eksik etmeyen babam Hasan Alayoğlu, annem Meral Alayoğlu ve kardeşim Meltem Alayoğlu Öztaş’a,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İsmail ALAYOĞLU

Mayıs 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. HIZLI TREN	9
4. ERTMS/ETCS	12
4.1. ETCS Sistem Yapısı	13
4.1.1. Yol boyu donanımları	14
4.1.1.1. <u>Sinyaller</u>	14
4.1.1.2. <u>Tren algılama sistemleri</u>	16
4.1.1.3. <u>Eurobaliz</u>	19
4.1.1.4. <u>Elektrohidrolik makas motoru</u>	20
4.1.1.5. <u>Elektronik anklâşman</u>	22
4.1.2. Araç üstü donanımları	24
4.1.2.1. <u>Avrupa hayati bilgisayarı</u>	25
4.1.2.2. <u>Baliz iletim modülü</u>	25
4.1.2.3. <u>Sürücü makine arayüzü</u>	28
4.1.2.4. <u>Adli kayıt cihazı</u>	28
4.1.2.5. <u>Odometre</u>	29
4.1.2.6. <u>Tren arayüz ünitesi</u>	30
4.2. ETCS Sistemi Çalışması.....	30
4.2.1. ETCS sistemi çalışması: Seviye-0	30
4.2.2. ETCS sistemi çalışması: Seviye-1	30
4.2.3. ETCS sistemi çalışması: Seviye-2	31

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2.4. ETCS sistemi çalışması: Seviye-3	32
4.2.5. ERTMS/ETCS sistemlerinin avantajları	33
5. TÜRKİYE’DE YÜKSEK HIZLI TREN İŞLETMECİLİĞİ	34
5.1. TCDD’nin Tarihçesi ve Faaliyet Alanı	34
5.2. Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu Projeleri	35
5.2.1. Tamamlanan yüksek hızlı demiryolu projeleri	36
5.2.1.1. <u>Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	36
5.2.1.2. <u>Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	37
5.2.2. Yapımı devam eden yüksek hızlı demiryolu projeleri	39
5.2.2.1. <u>Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	40
5.2.2.2. <u>Bursa-Bilecik yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	40
5.2.2.3. <u>Ankara-İzmir yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	42
5.2.2.4. <u>Kayseri-Yerköy yüksek hızlı demiryolu projesi</u>	42
6. MATERYAL VE YÖNTEM	44
6.1. Tehlike Oranları İçin Küvet Eğrisi	48
6.2. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Yöntemler	49
6.2.1. Üstel dağılım	51
6.2.2. Üç parametrelili Weibull dağılımı	52
6.2.3. Normal dağılım.....	55
6.2.4. Rayleigh dağılımı	57
6.2.5. Gama dağılımı	58
6.2.6. Log-normal dağılımı.....	60
6.2.7. Log-lojistik dağılımı	62
6.2.8. En büyük uç değer dağılımı.....	63
6.2.9. En küçük uç değer dağılımı	66
6.3. Kolmogorov-Smirnov Testi.....	69
6.4. Parametre Tahmin Yöntemleri	70
6.4.1. En küçük kareler tahmin yöntemi.....	70
6.4.2. Momentler tahmin yöntemi	71

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.4.3. Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi	72
6.4.4. L-momentler tahmin yöntemi	74
6.4.5. Üç parametrelili Weibull dağılımı	75
6.4.5.1. <u>Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi</u>	76
6.4.5.2. <u>Momentler tahmin yöntemi</u>	76
6.4.5.3. <u>L-momentler tahmin yöntemi</u>	78
6.4.6. En büyük uç değeri dağılımı	80
6.4.6.1. <u>Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi</u>	80
6.4.6.2. <u>Momentler tahmin yöntemi</u>	81
6.4.6.3. <u>L-momentler tahmin yöntemi</u>	82
6.4.7. En küçük uç değeri dağılımı	83
6.4.7.1. <u>Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi</u>	83
6.4.7.2. <u>Momentler tahmin yöntemi</u>	84
6.4.7.3. <u>L-momentler tahmin yöntemi</u>	85
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	86
7.1 Elektronik Giriş-Çıkış Kartı	86
7.2 Sinyal Elektronik Kontrol Kartı	89
7.3 Elektrons Yeşil Sinyal Lambası.....	91
7.4 Baliz Anteni	93
7.5 RG213/214 Konnektör	96
7.6 RG400 Konnektör	98
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	104

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Avrupa'daki hızlı tren hatları	10
3.2. Asya'daki hızlı tren hatları.....	11
4.1. ETCS sistem yapısı.....	13
4.2. Üç bildirimli ana sinyal	15
4.3. Cüce sinyal	15
4.4. Alfa-nümerik sinyal.....	16
4.5. Ray devresi	17
4.6. Elektronik dingil sayıcı (sırası ile verici ve alıcı).....	18
4.7. Sabit eurobaliz	19
4.8. Programlanabilir eurobaliz	20
4.9. Elektrohidrolik makas motoru	21
4.10. Elektrohidrolik makas motoru elemanları	22
4.11. Elektronik anklaşman kabini	23
4.12. E I/O ve SEC kartları.....	24
4.13. Avrupa hayati bilgisayarı	25
4.14. Baliz anteni-I	26
4.15. Baliz anteni-II.....	26
4.16. RG213/214 N tipi erkek konnektör	27
4.17. RG400 SMA tipi erkek konnektör	27
4.18. Sürücü makine arayüzü	28
4.19. Adli kayıt cihazı	29
4.20. Odometre	29
4.21. ETCS sistemi çalışması Seviye-1	31
4.22. ETCS sistemi çalışması Seviye-2	32
4.23. ETCS sistemi çalışması Seviye-3.....	33
5.1. Çekirdek yüksek hızlı demiryolu ağı (2018 yılı itibariyle)	36
5.2. Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu hattı	37
5.3. Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu hattı	38
5.4. Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu hattı kesimleri	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.5. Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)	40
5.6. Bursa-Bilecik yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)	41
5.7. Ankara-İzmir yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)	42
5.8. Kayseri-Yerköy yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)	43
6.1. $R(t)$ ile $F(t)$ arasındaki ilişki	45
6.2. Küvet tehlike oranı eğrisi	48
6.3. Üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	52
6.4. Farklı şekil ve ölçek parametre değerleri için Weibull dağılımı	53
6.5. Weibull dağılımı için $h(t; \alpha, \sigma, \mu)$ fonksiyonu	54
6.6. Normal olasılık dağılımı grafiği	55
6.7. Farklı μ ve σ değerleri için normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	56
6.8. Farklı parametre değerleri için Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu	58
6.9. Gama dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu	59
6.10. Farklı parametre değerleri için log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	61
6.11. LEV dağılım ailesi.....	64
6.12. LEV dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ($\mu = 0, \sigma = 1$)	65
6.13. SEV dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu	67
6.14. SEV dağılımı için birikimli dağılım fonksiyonu	67
6.15. SEV dağılımı için tehlike oranı fonksiyonu	68
6.16. Regresyon doğrusu	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Güvenilirlik analizindeki fonksiyonlar arasındaki ilişkiler	48
6.2. Weibull dağılımının α parametresine göre özellikleri	55
7.1. E I/O kartı için dağılımlar ve olasılık değerleri	87
7.2. Üç parametrelili Weibull dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri	88
7.3. E I/O kartı için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri	88
7.4. SEC kartı için dağılımlar ve olasılık değerleri	89
7.5. LEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri	90
7.6. SEC kartı için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri.....	91
7.7. Elektrons yeşil sinyal lambası için dağılımlar ve olasılık değerleri	92
7.8. LEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri	92
7.9. Elektrons yeşil sinyal lambası için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri.....	93
7.10. Baliz anteni için dağılımlar ve olasılık değerleri.....	94
7.11. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri.....	95
7.12. Baliz anteni için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri	95
7.13. RG213/214 konnektör için dağılımlar ve olasılık değerleri	96
7.14. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri.....	97
7.15. RG213/214 konnektörler için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri	97
7.16. RG400 konnektör için dağılımlar ve olasılık değerleri	98
7.17. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri.....	99
7.18. RG400 konnektörler için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar **Açıklama**

AB	Avrupa Birliği
A.Ş	Anonim Şirketi
BTM	Balise Transmission Module
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DB	Deutsche Bahn
DMI	Driver Machine Interface
DMU	Diesel Multiple Unit
E I/O	Electronic Input/Output
EKK	En Küçük Kareler
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
EVC	European Vital Computer
FRA	Failure Rate Average
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Railway
JRU	Juridical Record Unit
LCD	Liquid Crystal Display
L-CV	L-Coefficient of Variation
LEV	Largest Extreme Value
LL	Log Logistic
MLE	Maximum Likelihood Estimation
PDF	Probability Density Function
RBC	Radio Block Centre
RSSB	Rail Safety and Standards Board
SEC	Signal Electronic Control
SEV	Smallest Extreme Value
STS	Signalling and Transportation Systems
TGV	Train a Grande Vitesse
TIU	Train Interface Unit

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar Açıklama

UIC	Union des Industries Chimiques
VK	Varyasyon Katsayısı
YHT	Yüksek Hızlı Tren
$f(t)$	Genel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
$F(t)$	Genel Birikimli Dağılım Fonksiyonu
$R(t)$	Genel Güvenilirlik Fonksiyonu
$h(t)$	Genel Tehlike Oranı Fonksiyonu
$H(t)$	Genel Birikimli Tehlike Fonksiyonu
α	Olasılık Dağılım Fonksiyonlarının Şekil Parametresi
σ	Olasılık Dağılım Fonksiyonlarının Ölçek Parametresi
μ	Olasılık Dağılım Fonksiyonlarının Konum Parametresi
$\Gamma()$	Gama Fonksiyonu
$\log()$	Logaritma Fonksiyonu
T	Arıza Süresi Rastgele Değişkeni
∞	Sonsuzluk

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Gelişen teknoloji ile birlikte büyüyen şehirlerimizde yaşayan insanların yaşam kalitelerinin artırılması, ulaşımın da yeniden yapılanmasını kaçınılmaz kılmıştır. Tüm dünyada hızlı tren projeleri birbiri ardına hayata geçirilerek, insanların bir şehirden başka bir şehre konforlu, hızlı ve güvenli bir şekilde seyahat etmeleri sağlanmaktadır.

Ülkemizde hızlı tren demiryolu hatlarının işletmeciliği, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından yapılmaktadır. TCDD, hızlı tren seferlerinin, herhangi bir gecikme yaşanmadan tamamlanmasını amaçlamaktadır. Bir trenin birkaç dakika bile geç kalması, zincirleme bir şekilde başka sorunları da beraberinde getirerek, demiryolu trafiğini bütünüyle etkilemektedir. Çünkü her tren birbirine bağlı olarak demiryolu trafiği sisteminin bir parçasıdır. Yani bir tren gecikirse, onun arkasında bulunan trenin yavaşlamasına sebep olur ve böylece o tren de geç kalır.

Meydana gelen tren gecikmelerinin önemli bir bölümü, yol boyunda ve araç üzerinde bulunan sinyalizasyon sistem bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Herhangi bir donanımda oluşacak olan arıza, gecikmelerden dolayı işletmenin zarar etmesi ve prestij kaybı, yolcuların gidecekleri yere geç kalmaları, arızalı bileşenin birlikte çalıştığı donanımlar üzerindeki olumsuz etkisi gibi ciddi sorunlara neden olmaktadır. Tren gecikmelerinin önüne geçilmesi, yol boyu ve araç üstünde bulunan sinyalizasyon sistemi bileşenlerinin kusursuz bir şekilde çalışmasına bağlıdır.

Tren gecikmesini birçok faktör etkilemektedir. Bunlar, arızanın meydana geldiği bölgenin bakım ekiplerine olan uzaklığı, iklimsel değişikliklerin bölgeye ulaşım hızını etkilemesi, arızanın hangi parçadan kaynaklandığının tespit edilmesi ve gerekli müdahalenin gerçekleştirilmesi olarak sıralanabilir.

Bu tez çalışmasının amacı, tamamlanan yüksek hızlı demiryolu projelerinde kullanılan bazı sinyalizasyon donanımlarının güvenilirlik analizi uygulamasını gerçekleştirmektir. Bu sayede, hızlı tren hatlarının verimliliğinin artırılması sağlanacak ve bakım aktivitelerinin desteklenmesine katkı sağlanacaktır. Tez çalışmasında yapılan

uygulama sayesinde, yüksek hızlı tren hatlarında kullanılan bazı bileşenlerin ömür süreleri, arıza durumuna düşmeden önce öngörülmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, tren gecikmelerinin önüne geçilerek ülkemiz ekonomisine katkı sağlanması da düşünülmektedir.

Bu tez çalışması 7 ayrı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, **Literatür Araştırması** bölümüdür. Burada, güvenilirlik analizinin mühendislik alanındaki bazı uygulamaları özetlenmiştir. İkinci bölümde **Hızlı Tren** başlığı altında, hızlı trenin tanımı yapılmış, hızlı tren hatlarının özellikleri konusunda bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm olan **ERTMS/ETCS** bölümünde, ülkemizde hızlı tren hatlarında kullanılan ETCS teknolojisinin tanımı yapılmış, bu teknolojinin seviyeleri arasındaki farklara değinilmiştir. Bunun yanında, ETCS sisteminin yapısı ve bu yapıyı oluşturan yol boyu ve araç üstü donanımlarının sistemdeki işlevleri ile ilgili açıklamalara detaylı olarak yer verilmiştir. Dördüncü bölüm olan **Türkiye’de Yüksek Hızlı Tren İşletmeciliği** bölümünde ise, TCDD’nin tarihçesi ve faaliyet alanı açıklanmıştır. Aynı zamanda, ülkemizde tamamlanmış olan ve yapımı devam eden yüksek hızlı demiryolu projeleri hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. Altıncı bölüm olan **Materyal ve Yöntem** bölümünde ise, güvenilirlik, olasılık dağılım modelleri, Kolmogorov-Smirnov testi, parametre tahmin yöntemlerinin tanımları, matematiksel gösterimleri ve grafiklerine yer verilmiştir. Sonrasında, üç parametrelili Weibull, en büyük uç değer ve en küçük uç değer dağılımlarının parametre tahmin edicilerinin içerikleri ile ilgili bilgilendirmede bulunulmuştur. Daha sonra, sinyalizasyon sistem bileşenlerinden, diğer bileşenlere göre daha sık arızalanan ve arızalandığında sistemin durmasına sebep olan bileşenlerden elektronik giriş-çıkış ve sinyal elektronik kartları, elektrons yeşil sinyal lambası, baliz anteni, RG213/214 konnektör, ve RG400 konnektörlerinden elde edilen arıza verileri kullanılarak ilgili donanımların güvenilirlik analizleri yapılmıştır. **Bulgular ve Tartışma** bölümünde uygulama detaylı olarak verilmiştir. Uygulamada, ilgili donanımlara ait arıza verilerinin hangi olasılık dağılım metoduna uygun olduğu belirlenmiş, ardından belirlenen dağılımın parametreleri, parametre tahmin yöntemleri kullanılarak hesaplanmış, bunlardan hareketle elde edilen parametreler tehlike oranı ve güvenilirlik fonksiyonlarına yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, **Sonuç ve Öneriler** bölümünde bahsedilmiştir. Bu çalışmanın geliştirilebilmesi için önerilerde bulunularak tez çalışması tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Güvenilirlik analizi; tıp, sosyal bilimler ve sigortacılık alanlarının yanı sıra, birçok mühendislik faaliyetlerinde de yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu başlık altında, güvenilirlik analizi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Elektrik ve elektronik mühendisliği alanında, güvenilirlik analizi uygulamaları yapılmış olan çeşitli yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları vardır.

Akçay (2007), enerji iletim sistemlerinde güvenilirlik değerlendirilmesi isimli yüksek lisans tez çalışmasında, güvenilirlik ve güvenilirlik ile ilgili olan kavramların tanımını yaparak, enerji iletim sistemlerinde kullanılan elemanların güvenilirlik değerlendirilmesini yapmıştır.

Nil (2009), eviricilerde yeni bir yumuşak anahtarlama devresinin tasarımı, gerçekleştirilmesi ve analizi adlı doktora tez çalışmasında, SA1 ve SA2 yardımcı anahtarlar yardımıyla S1, S2, S3 ve S4 ana anahtarlarının sıfır akımda ve sıfır gerilimde, iletim ve kesime girmesine göre yeni bir bastırma hücreli darbe genişlik modülasyonu eviricisi sunmuştur.

Çakır (2011), bir analog elektrik devresinin tolerans tabanlı güvenilirlik analizi başlıklı yüksek lisans çalışmasında, bir turbo jet motora pompalanan yakıt miktarını düzenleyen bir yakıt pompası sürücü devresinin güvenilirlik analizini ele almıştır. Bu tür kritik devrelerin arıza durumuna düşmesi durumunda gerek maddi kayıplara gerekse de can kayıplarına sebep olacağı, bu yüzden güvenilirlik analizinin büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir.

Nuroğlu (2011), dağıtılmış üretim içeren dağıtım şebekelerinde merkezi koordinasyon rölesi tasarımı adlı doktora tezinde dağıtılmış üretim kaynaklarının, dağıtım sistemine bağlanmasının bazı teknik, ekonomik ve yönetmelikler konularını da beraberinde getirdiği, bu sebeplerden dolayı gerek jeneratörler için gerekse de şebeke açısından yeni bir koruma yaklaşımına ihtiyaç olduğunu belirtmiş, bu ihtiyaca cevap verebilmek için merkezi koordinasyon rölesi adını taşıyan yeni bir tasarım gerçekleştirmiştir.

Afacan (2011), Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) devrelerde yaşlanma ve yaşlanmaya dayanıklı devre tasarımı adındaki yüksek lisans tez çalışmasında, doğada bulunan her şey gibi elektronik devrelerin de bir ömrünün bulunduğunu belirtmiş, ömür süresini, devrenin fonksiyonunu hatasız bir biçimde gerçekleştirebildiği zaman aralığı olarak ifade etmiştir. CMOS devrelerde yaşlanma sorununu araştırmış ve bu sorunun CMOS devrelerin dayanıklılığına olan etkisini bir analog devre üzerinde güvenilirlik testlerini gerçekleştirerek incelemiştir.

Demircioğlu (2012), hibrit enerji sistemlerinde güvenilirlik analizi başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında, alternatif bir enerji üretim yöntemi olarak her geçen gün önem kazanan hibrit enerjinin tanımını yapmış, rüzgâr türbini, fotovoltaiik panel, dizel jeneratör, klasik santral ve bataryadan oluşan hibrit enerji üretim sistemlerinin güvenilirliklerini ayrı ayrı incelemiş olup, güvenilirliği etkileyen faktörleri belirlemiş ve yük talebinin karşılanabilmesi amacıyla yapılması gereken üretim sistemi planlamasına olanak sağlamıştır.

Aydın (2012), hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinde güvenilirlik analizi adlı yüksek lisans tez çalışmasında, insan ve yük taşımacılığı için hem hız hem de ekonomik açıdan en verimli sistemlerden biri olan raylı sistemlere verilen önemin her geçen gün arttığını belirtmiştir. Bu bağlamda, hafif raylı sistemlerin elektrik güç beslemesinin güvenilirlik analizi yapılmış ve sistemi etkileyen faktörler araştırılmıştır. Elektrik güç besleme sisteminin güvenilirliği, sistemde meydana gelen herhangi bir arızanın, sistemi etkilemeyecek şekilde giderilmesi ve işletme sürekliliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahip olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada örnek olarak İstanbul'da bulunan Habipler-Topkapı hafif raylı sistem hattının elektrik güç beslemesi ele alınıp, örnek sistemin modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra sistemi oluşturan her birim için tek tek güvenilirlik analizi yapılmış bölümün sonunda çeşitli senaryolara göre sistemin toplam davranışı incelenmiştir.

Koyun (2014), bir raylı sistem hattının elektrik besleme sisteminin güvenilirlik analizi adlı yüksek lisans tez çalışmasında, raylı sistemlerde aracın hareketinin sağlanmasında cer gücü besleme sisteminin önemini ve bu gücün iletiminin güvenilir ve kesintisiz bir şekilde sağlanmasının işletme sürekliliği açısından hayati olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, Kabataş-Bağcılar T1 tramvay hattının ana besleme noktasından

katener sistemine kadar olan kısmın elektriksel sistemi ele alınarak güvenilirlik analizi yapılmıştır.

Altuntaş (2014), yarıklı dalga kılavuzu dizi antenlerinin momentler yöntemiyle analizi adlı yüksek lisans tez çalışmasında, yarıklı dalga kılavuzu anten dizilerini analiz etmek için moment metodu tabanlı bir simülasyon yazılımı geliştirmiştir. Geliştirilen kodun, farklı yapıları analiz edebilen çok yönlü bir yazılım için bir yapı taşı olması amaçlanmıştır.

Cömert (2015), elektronik kartların saha verilerine dayalı güvenilirlik analizi adlı yüksek lisans tezinde, içerisinde karmaşık ve farklı tipte elemanlar barındıran elektronik kartlara ait farklı saha verilerini incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, güvenilirlik performansının garanti süresi boyunca yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır.

Haykır (2015), kalın tel antenlerin moment metodu ile analizi adlı yüksek lisans tez çalışmasında, kalın tel antenlerin çözümü moment metodu ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen metot, empedans matrisindeki tekilliği ortadan kaldırmak için ek işler yapma gereğini ortadan kaldırmış ve böylece tel üzerinde indüklenen akım başarılı bir şekilde hesaplanabilmiştir.

Güvenilirlik analizinin demiryolu bileşenleri üzerine de güncel birçok uygulaması mevcuttur. Pascale vd. (2018), elektronik demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin güvenilirlik odaklı karar vermesini sağlamak için Weibull dağılımından yararlanmış, bu dağılımın kullanılmasının uygulamaya kattığı avantajları ifade etmiştir. Weibull parametreleri mevcut bir elektronik sinyal sistemi için hesaplanmış ve üstel dağılıma dayalı mevcut tahmin güvenilirlik verileriyle bir karşılaştırma yapılmıştır. Sinyalizasyon sistemleri için sabit bir tehlike oranına sahip üstel dağılım kullanılarak yapılan analizin tehlikeli durumlara neden olacağı ifade edilmiştir.

Bai vd. (2018), demiryolu işletmelerinin en temel bileşenlerinden biri olan ray donanımının yaşam süresinin doğru tahmin edilmesinin, demiryolu işletmeciliğinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesinde büyük rol oynadığını vurgulamıştır. Bu sebeple, rayın bozulma özellikleri ve ayırık-durum koşullu olasılık yöntemi kullanılarak ray parçalarının hizmet sürelerini tahmin etmek için bir model önerilmiştir. Bu model, daha sonra Pekin Metrosu'ndan elde edilen gerçek demiryolu bakım verileri ile karşılaştırılmış, sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

Oliveira vd. (2018), tren tekerleğinin bozulma verilerini inceleyerek, bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Sistemin güvenilirliğini değerlendirmek için, geriden gelen olasılık dağılımı ele alınmış, veri büyütme tekniğine dayanan bu dağılımı örneklemek için bir algoritma önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen modellerin, alışılmamış veri setlerini analiz etmek için var olan modellerden daha iyi performans gösterdiğini, açık ve simetrik verileri analiz ederken de Weibull modeliyle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir.

Mielnik vd. (2017), demiryolu taşımacılığında sıklıkla kullanılan ve oldukça kritik öneme sahip sistemler olan hemzemin geçitlerin güvenilirliği üzerinde çalışmıştır. Yapılan bu çalışmada, boş olan hatta yaklaşan demiryolu aracının belirlenmesi ve hemzemin geçide olan uzaklığı ray devreleri kullanılarak kontrol edilmiş ve sistemin izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece, demiryolu ve karayolu araçlarının çarpışmalarının önüne geçilerek, demiryolu ve karayolu trafiğinin güvenliğinin sağlanması vurgulanmıştır. Son olarak hemzemin geçit sisteminin güvenilirliğini etkileyen faktörler ve önerilen sistemin avantajları tartışılmıştır.

Novák vd. (2017), sansürlü dinamik modeller kullanarak, demiryolu sinyalizasyon sisteminde önemli bir yere sahip olan elektronik ray devrelerinin ömür tahmini çalışmasını önermiştir. Bu çalışmada, ray devrelerinin hatta hareket eden trenlerin konumlarını gerçek zamanlı olarak algılayarak, çarpışmaların önlenmesi için uyarılar veren bir donanım olduğu belirtilmiştir. Ardından, Çek Cumhuriyeti'ndeki demiryollarında faaliyet gösteren ray devrelerinin 10 yıllık arıza raporları elde edilmiş, bu raporlardan hareketle, ilgili donanımın ömür tahmini uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Xu vd. (2017) tarafından, demiryolu havai enerji (katener) hattı sisteminin güvenilirlik değerlendirmesi için Monte Carlo simülasyon yönteminin bir uygulaması yapılmıştır. Sistem bileşeninin tehlike oranının belirlenmesi için Weibull dağılımı kullanılmıştır. Olasılık dağılımı parametreleri, katener hattının bakımı sırasında toplanan gerçek arıza verilerinden elde edilmiştir. Sistem güvenilirlik olasılıkları, Monte Carlo simülasyon yöntemi ile hesaplanmıştır. Simülasyon sonucu, Markov analiz yönteminden elde edilen sonuç ile karşılaştırılmış, sonuçların kabul edilebilir olduğu anlaşılmıştır.

Ghodrati vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, İsveç Demiryolları'nda kullanılan makasların, en fazla gecikmeye neden olan alt sistemlerden biri olduğu belirtilmiş ve bakım maliyetlerinin en az %13'ünü oluşturduğu sebeplerine dayanarak, bu donanımın güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Toplanan saha arıza verileri kullanarak makasların güvenilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, bu verileri işlemek için özel bir istatistik yazılım paketi geliştirilmiştir.

Wang ve Zhao (2017) yapmış olduğu çalışmada, hızlı tren kontrol sisteminin önemli bileşenlerinden olan baliz ve baliz iletim modülünün tren operasyonunun güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için birlikte çalıştıkları ifade edilmiştir. Balizlerin, iletim modülü ile iletişiminin sağlanamaması sorununa değinilmiş, bu sorunun çözümüne ve iki donanım arasındaki iletişimin artırılmasına yönelik modelleme ve optimizasyon çalışması önerilmiştir.

Fourie ve Zhuwaki (2017), demiryolu taşımacılığının güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini sağlamada önemli bir rol oynayan demiryolu altyapısının bakımı ve yönetimi için güvenilirlik tabanlı bir model önermişlerdir. Bu çalışmada, güvenilirlik tabanlı teknikler uygulanarak, bakım verimliliğinin artırılması, buna bağlı olarak işletme harcamalarının azaltılması amaçlanmıştır.

Zhuwaki (2017), demiryolu altyapısının performans değerlendirmeleri için güvenilirlik analizinin uygulanması çalışmasında, güvenilir demiryolu altyapısı sistemlerinin, işletme güvenliğini ve tren seferlerinin sürdürülebilirliğini garanti etmesi gerektiği vurgulanmış, altyapı sistemi içerisindeki arızaların olasılığını veya sıklığını belirlemek ve azaltmak için güvenilirlik kavramından yararlanılmıştır. Buna ek olarak, bazı

altyapı donanımlarının güvenilirlik niteliklerini ve bunların altyapı sisteminin genel performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Chiriac vd. (2017) tarafından, Romanya demiryollarında bulunan 25 kV / 50 Hz demiryolu trafo merkezlerinde meydana gelen arıza verilerinin analizi yapılmıştır. Veriler, iki demiryolu trafo merkezi arasında bir bölüm dikkate alınarak, 2006 ve 2016 yılları arasında 11 yıl süresince meydana gelen ve kaydedilen arızalardan oluşmaktadır. Elde edilen veriler kullanılarak arızaların nedenleri incelenmiş, analizi gerçekleştirilmiş ve sistem bakım aktivitelerinin desteklenmesi amaçlanmıştır.

Yang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, elektromanyetik dalgaların oluşturduğu parazitlerin demiryolu sinyalizasyon sistemi donanımlarından biri olan ray devresi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu etkinin giderilmesine yönelik güvenilirlik ve güvenlik analizinin birlikte oluşturduğu bir nicel analiz yöntemi önerilmiş, böylelikle ray devresinin çalışma performansının artırılması amaçlanmıştır.

Yasniy vd. (2013), demiryolu dingil ömrünün değerlendirilmesi isimli bildirisinde, dingiller üzerinde meydana gelen çatlakların büyüme oranlarının ana nedenleri belirtilmiş ve dingil üzerindeki çatlağın büyümesinin belirlenmesine yönelik bir modelleme tekniği önerilmiştir.

Panja ve Ray (2007), Hindistan demiryolu sinyalizasyon sisteminde kullanılan ray devrelerinin güvenilirlik analizi adlı çalışmasında, ray devresinin karmaşık bir tamir edilebilir yapısı olduğu ve bu donanımın demiryolu hatlarındaki trenlerin varlığını algılayan sistemler olduğu ifade edilmiştir. Ray devresinin çalışmasında, kullanım yoğunluğu, bakım-onarım faaliyetleri ve çevresel etkilere bağlı olarak arızalar meydana geldiği belirtilmiş, bundan hareketle, sistemin arıza olasılığını tahmin etmek için bir yöntem önerilmiştir.

3. HIZLI TREN

Hızlı tren, normal trenlere göre daha hızlı yolculuk etme olanağı sağlayan bir demiryolu aracıdır. Türkiye'de, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD)'ye bağlı işletmesinin adı Yüksek Hızlı Tren (YHT)'dir.

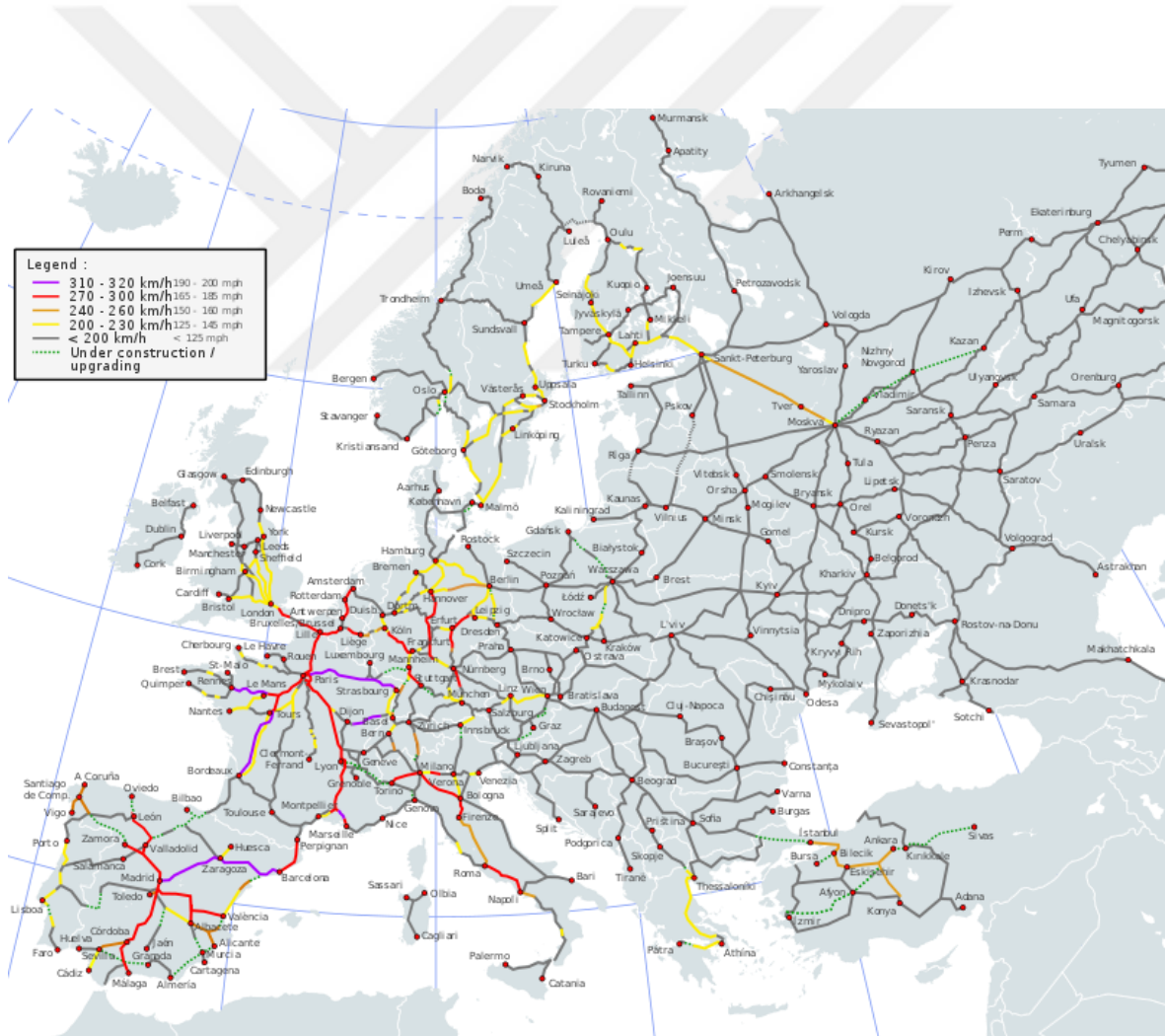
Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC), hızlı treni yeni hatlarda saatte en az 250 km hız yapabilen, var olan hatlarda da saatte en az 200 km hız yapabilen trenler olarak belirlemiştir. Çoğu hızlı tren sisteminin ortak bir dizi özelliği vardır. Çoğu tren üstünde yer alan hatlardan aldığı elektrik ile çalışmaktadır. Ne var ki bu her hızlı tren için geçerli değildir, zira bazı hızlı trenler dizel ile çalışmaktadır.

Hızlı trenin bir tanımı da rayların özelliğiyle ilgilidir. Hızlı tren hatları titreşimi azaltmak ve ray segmentleri arasındaki açılmaları engellemek için hat boyunca kaynak yapılmış raylardan oluşur. Bu sayede üzerinden trenler saatte 200 km hız ile sorunsuz geçebilmektedir. Trenlerin hızında en önemli engel eğim yarıçaplarıdır. Eğim yarıçapları, hatların tasarımlarına göre değişebilmekle birlikte, hızlı tren yollarında eğimler çoğunlukla 5 kilometrelik bir yarıçapta gerçekleşir. Bazı istisnalar bulunsa da hızlı tren yollarında herhangi bir geçişin bulunmaması tüm dünyada kabul gören bir standarttır (UIC, 2018).

Dünyanın ilk yüksek kapasiteli hızlı treni Japonya'nın geliştirdiği ve Ekim 1964'te hizmete giren Tōkaidō Shinkansen adlı tren oldu. Bu hızlı tren, 515 km uzunluğundaki Tokyo-Osaka hattında faaliyete başlamıştır. İlk tren seti 12 vagona meydana gelmiştir. Azami 210 km/saat hızla birlikte Tokyo-Osaka arası 1964 yılında 6,5 saatten 4 saate düşmüştür (Gourvish, 2010).

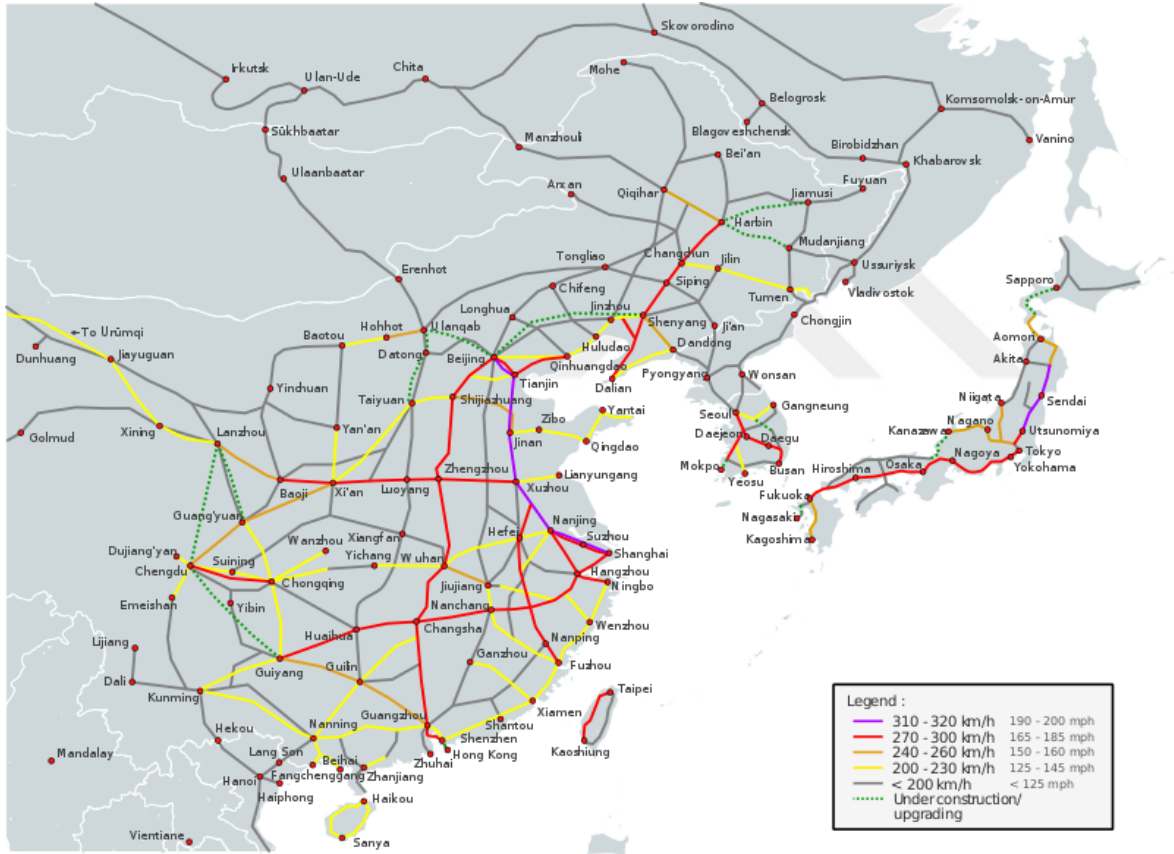
Avrupa kamuoyu hızlı tren ile Ağustos 1965'te gerçekleştirilen Uluslararası Ulaşım Fuarı'nda tanıştı. Deutsche Bahn (DB) Class 103 adlı tren Münih ve Augsburg arasında saatte 200 km hız ile toplam 347 sefer yaptı.

1981 yılında Fransa’da Train a Grande Vitesse (TGV)’nin faaliyete geçmesiyle birlikte Avrupa’da yüksek hızlı tren taşımacılığında, hızlı bir gelişme sağlanmıştır (Ekmen Uçev, 2015). TGV, normal tren trafiğine açık demiryolu üzerinde Mayıs 1990 tarihinde gerçekleştirilen denemede 515,3 km/saat hıza ulaşarak dünya rekorunun sahibi olmuştur (Kaynak, 2001). Bu rekor yine Fransa’ya ait V150 adlı trenle Nisan 2007 tarihinde 574,79 km/saat olarak kırılmıştır (Ekmen Uçev, 2015). UIC’nin Kasım 2013 verilerine göre, Avrupa’da en uzun yüksek hızlı tren hattına sahip ülke, 2.515 km ile İspanya’dır. İspanya’yı Fransa ve Almanya takip etmektedir. Avrupa’da yüksek hızlı trene sahip diğer ülkeler ise İtalya, İngiltere, Belçika, İsviçre, Hollanda, Avusturya ve Türkiye’dir. Avrupa kıtasında bulunan hızlı tren hatları Şekil 3.1’de incelenebilir.



Şekil 3.1. Avrupa’daki hızlı tren hatları ■ 320–350 km/sa ■ 300 km/sa ■ 250-280 km/sa ■ 200-230 km/sa (Anonim-1, 2018)

Asya kıtasında, Çin ve Japonya dışında Güney Kore ve Tayvan'da da yüksek hızlı trenler hizmet vermektedir. En uzun yüksek hızlı demiryolu hattı 2298 km uzunluğu ile Pekin'i Guangzhou şehrine bağlamaktadır. Bu hat 26 Aralık 2012 tarihinde hizmete açılmıştır. Ortalama 300 km/s hızla gidilen bu hat sayesinde yolculuk 22 saatten 8 saate düşmüştür (Demiryolları Taşımacılığı Derneği, 2012). Dünya'da en fazla yüksek hızlı tren demiryolu hattına sahip ülke rekoru ise, UIC'nin 2012 yılı sonu verilerine göre, yaklaşık 8400 km ile yine Çin'e aittir. Asya kıtasında bulunan hızlı tren hatları Şekil 3.2'de incelenebilir.



Şekil 3.2. Asya'daki hızlı tren hatları █ 320–350 km/sa █ 300 km/sa █ 250-280 km/sa █ 200-230 km/sa (Anonim-1, 2018)

4. ERTMS / ETCS

Avrupa ülkelerinde kullanılan farklı sinyalizasyon sistemleri ve trenlerdeki farklı araç üstü donanımlar sebebiyle sınır geçişlerinde ya da farklı sinyalizasyon sistemi tesis edilmiş bölgelerde, mevcut lokomotifler kullanılamamış ya da lokomotiflere kullanılabileceği her hattın sinyal sistemine ait araç üstü donanımlarının montajını gerektirmiştir. European Rail Traffic Management System (ERTMS) / Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi, tren kontrolünde belirli bir standardın oluşturulması ve bu standardın yaygın olarak kullanılması amacıyla doğmuştur. Birçok gelişmiş Avrupa ülkesinde kullanılan sinyal sistemlerinden biridir (Milli Eğitim Bakanlığı, 2014).

Avrupa Tren Kontrol Sistemi / European Train Control System (ETCS)'nin görevi, istasyon içerisindeki ve komşu istasyonlar arasındaki trafiği kontrol etmektir. Bunun yanında hat üzerindeki trafik durumunu, sinyalizasyon sistemlerini oluşturan elemanların durumunu denetlemekten sorumludur (Kılıç, 2015).

ERTMS ise, ETCS ile demiryolu haberleşmesinde kullanılan GSM-R'nin bileşimidir. Bu sistem, son yıllarda Avrupa ülkelerinin gerek ülke içinde ve gerekse ülkeler arası sinyal sisteminde yaşanan sistem farklılıklarını gidermeyi sağlayacak uyum projesi olarak hayata geçmiş önemli bir sinyal projesidir (Milli Eğitim Bakanlığı, 2014).

4.1.1 Yol boyu donanımları

Bu bölümde ETCS sisteminin yapı taşlarından biri olan yol boyu donanımlarından bahsedilecektir. Yol boyu donanımları; sinyal, tren algılama sistemleri (ray devresi / elektronik dingil sayıcı), eurobaliz, elektrohidrolik makas motoru ve elektronik anlaşılmadan oluşmaktadır.

4.1.1.1 Sinyaller

Yol boyu sinyalleri, trenin ilerlemesini düzenleyecek bilgileri ileten donanımlar olup istasyonlarda ve istasyonlar arası güzergâhta yerleştirilir. Yol boyu sinyalleri trene hareket emrini verir. Şöyle ki her bir yol boyu sinyali, ray bölümünü korur ve sürücüye gösterilen cephe, ileriye doğru güvenli yolda hareket iznini verir.

Yol boyu sinyallerini üç grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlar; ana sinyaller, cüce sinyaller ve alfa-nümerik sinyallerdir.

Ana sinyaller, 3 veya 4 bildirimli olup her biri aynı tip direk ve temelden müteşekkildir. Dört bildirimli ana sinyaller istasyon alanında yerleştirilir ve bir makası korurken giriş ve çıkış sinyali olarak kullanılır. Üç bildirimli ana sinyaller (Şekil 4.2) ise, istasyon alanında ve istasyonlar arasındaki güzergâhta blokları korumak için yerleştirilir (Iglesias, 2013).

Alfa-nümerik sinyaller, bir sonraki makas için hız ve/veya yön gösterir. Bu sinyal daima ana sinyal direğine özel bir bağlantıyla yerleştirilir. Şekil 4.4'te ilgili sinyale ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 4.4. Alfa-nümerik sinyal

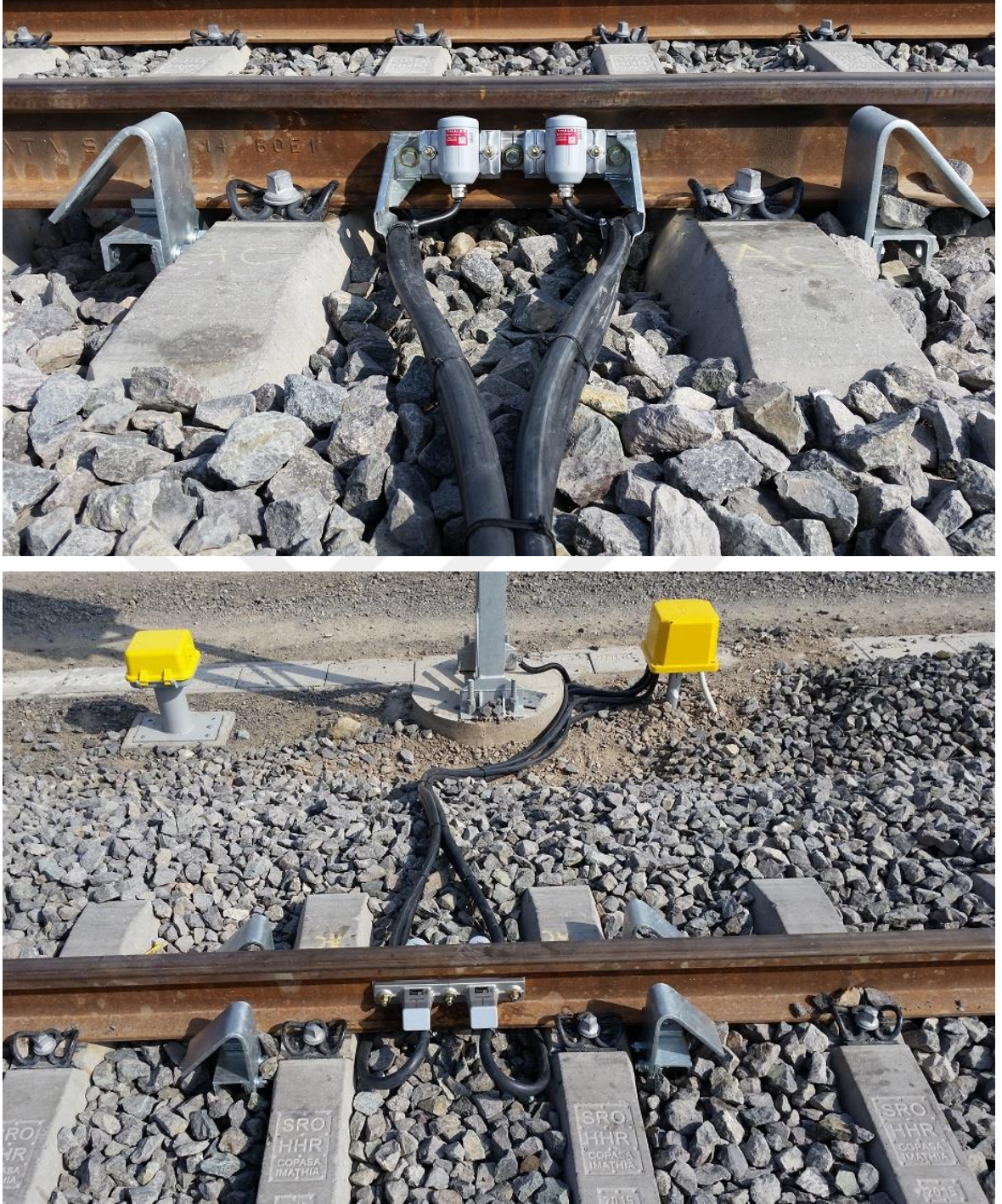
4.1.1.2 Tren algılama sistemleri

Hatta ilerleyen bir trenin algılanabilmesi için ray devresinden ve/veya elektronik dingil sayıcıdan faydalanılabilir. Ray devrelerinin temel ilkesi uyarınca, raylara bir verici (transmitter) vasıtası ile ses frekanslı bir işaret uygulanır ve hat kesiminin diğer ucundaki alıcı ya da alıcılar (receiver) hat kesimi serbest olduğunda gelen işareti alırlar (Şekil 4.5). Bir araç hat kesimine girdiğinde, dingiller raylar arasında kısa devre yaptığı için, alıcının ya da alıcıların aldığı işaret kesintiye uğrar, böylece bu belirti de hattın “meşgul” olduğu şeklinde yorumlanır.



Şekil 4.5. Ray devresi

Elektronik dingil sayıcılar da ray devreleri gibi hattın belirli bir bölümüne giren trenin varlığını tespit eden demiryolu donanımdır (Şekil 4.6). Ray kontaklarında bulunan verici bobinlerinden üretilen manyetik alan, alıcıya gönderilir. Tren dingili, ilgili donanımın üzerinden geçerken ise, gönderilen manyetik alan alıcıya ulaşmaz ve dingiller sayılmaya başlanır. Bir bloğu terk eden tren dingillerinin sayısı, daha önce bu bloğa giren dingillerin sayısına eşit ise, hattın bu bölümü serbest demektir. Eğer bölgeye giren dingil sayısı çıkan dingil sayısına eşit değilse, bölgede tren var kabul edilir (Babacan, 2010).



Şekil 4.6. Elektronik dingil sayıcı (sırası ile verici ve alıcı)

4.1.1.3 Eurobaliz

Eurobalizler, hat üzerine montajı gerçekleştirilen dakik iletim araçlarıdır (Diaz, 2015). Tren üzerinden geçerken baliz anteninden üretilen radyo frekansları aracılığı ile enerjilenen bu aygıt; kodlanmış sinyalizasyon verilerini (telegram) trende bulunan araç üstü donanımına aktarır. Telegram; trenin coğrafi pozisyonu, hattın eğimini, kurp yarıçapı ve seviye geçişleri gibi bilgileri içermektedir (Signalling Team, 2013). Balizler, sabit (Şekil 4.7) ve programlanabilir (Şekil 4.8) olmak üzere iki çeşittir.



Şekil 4.7. Sabit eurobaliz



Şekil 4.8. Programlanabilir eurobaliz (Siemens, 2014)

4.1.1.4 Elektrohidrolik makas motoru

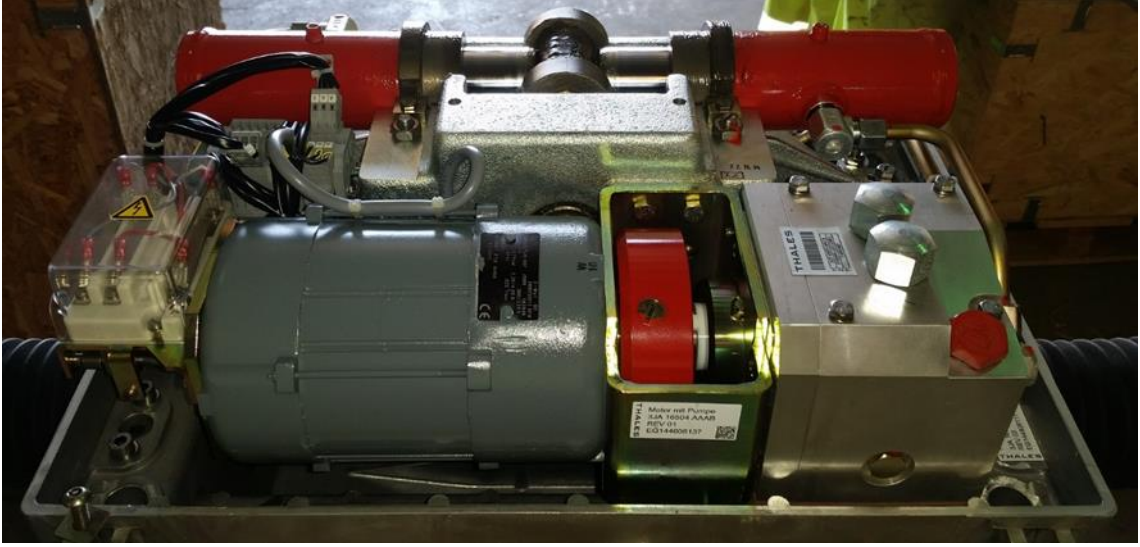
Makaslar, demiryolu araçlarının bir ray üzerinden diğerine geçmelerini veya istasyon içerisinde manevra yapabilmelerini sağlayan, hareketli ve sabit parçalardan oluşan sistemlerdir. Makaslar imal edilirken çekme kuvveti, itme kuvveti, çekme akımı ve çalışma gerilimi gibi özellikler dikkate alınır.

Elektrohidrolik makas motoru, demiryollarında bulunan makasların konumunun normale ya da sapana döndürülmesini sağlayan donanımdır (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Kumanda merkezi tarafından gönderilen rota tanzim istekleri elektronik anlaşılan yardımı ile motorlara iletilir, bu sayede makasın konumunun değiştirilmesi mümkün olur. Makas konum bildirimlerinin aynı değerde gelmesi, makasın aynı anda hem normal hem de sapan konumda bildiriminin gelmesi, veya hiç bildirim gelmemesi, makasın konum

değiştirme hareketi esnasında yeni konumuna ulaşmadan ortada kalması, gibi hata durumları da anlaşıman tarafından sürekli kontrol altında tutulmaktadır (Durmuş vd., 2011).



Şekil 4.9. Elektrohidrolik makas motoru



Şekil 4.10. Elektrohidrolik makas motoru elemanları

4.1.1.5 Elektronik anlaşıman

Kumanda merkezinden gelen rota tanzim isteklerini (hareket tipi, hareket yönü), sahanın o anki durumuna (makas pozisyonları, sinyal bildirimleri ve ray devreleri / dingil sayıcıların meşgul/serbest durumları) ait bütün bilgileri göz önünde bulundurarak, karşılaştıran, sonrasında değerlendirme yaparak kararlar veren, elektronik kartların oluşturduğu anlaşıman sistemleridir. Sistem, her hareketi oluşturmak ve denetlemek suretiyle, istasyon içerisindeki ve komşu istasyonlar arasındaki kontrol bölgesinde tren trafiğini düzenlemek, dolayısıyla trenlerin güvenli hareketini sağlamak için kullanılır. Her bir istasyonun veya teknik binanın kontrol ettiği alana göre ve kontrol edilecek hat boyu donanımların (sinyaller, makas motorları, ray devreleri, dingil sayıcılar) sayısına bağlı olarak elektronik anlaşımanın boyutu değişir (Binay, 2013). Şekil 4.11’de elektronik anlaşıman kabini yer almaktadır.

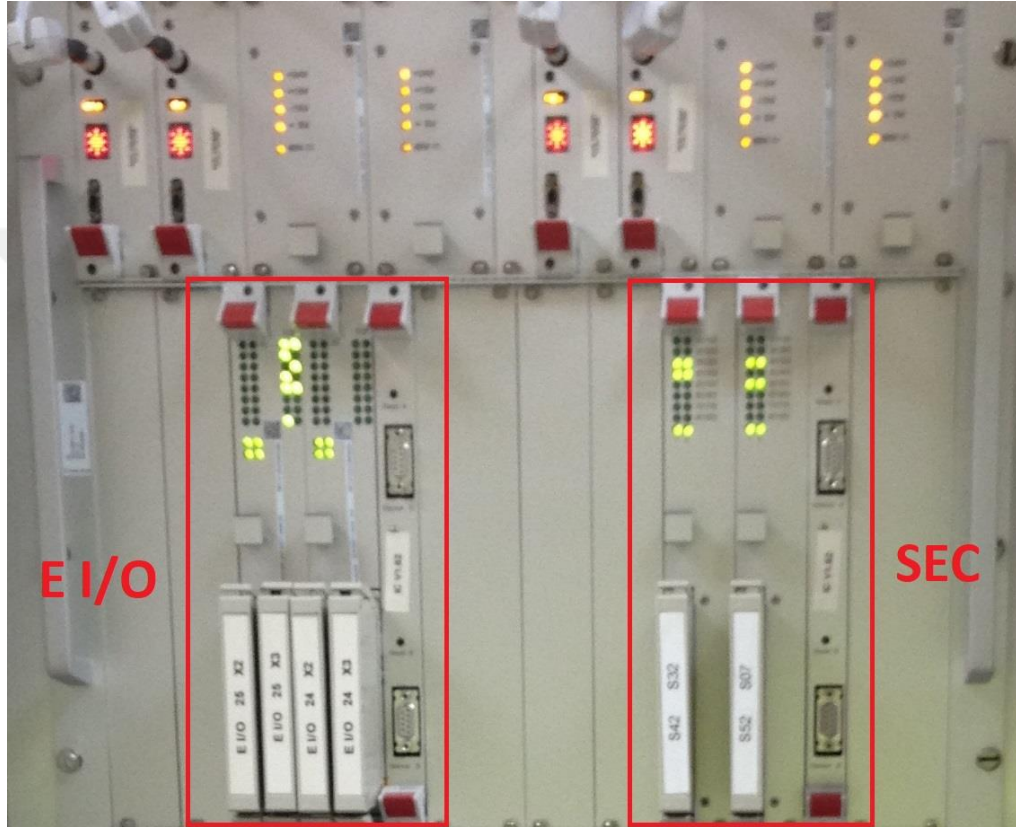


şekil 4.11. Elektronik anlařman kabini

Elektronik giriş-ıkış (E I/O) ve sinyal elektronik kontrol (SEC) kartları anlaşman kabininde yer almaktadır. E I/O kartı, makasların, ray devrelerinin, kilitlerin, blokların ve ayrı gerilim giriş/çıkışına sahip olan her elemanın komutlarının gönderilmesi ve bildirimlerinin alınması kontrolü için kullanılır.

Her E I/O kartı, 16 adet komut gönderebilir. Komutlar iki bağımsız kanal (Kanal A ve Kanal B) aracılığı ile gönderilir. Çıkışlar yedeklidir. Aynı zamanda bu kartlar 16 adet bildirim alma kapasitesine sahiptir.

SEC kartı, 8 adede kadar lambayı kontrol eder. Lambaları açıp kapatır. Akım ve gerilim ölçümleri için devre sağlar. Lambalar ile ilgili meydana gelebilecek kısa devre ve yanma durumlarını tespit ve kontrol eder (Thales Group, 2007). Şekil 4.12’de elektronik anlaşılan kabini üzerinde yer alan E I/O ve SEC kartları görülmektedir.



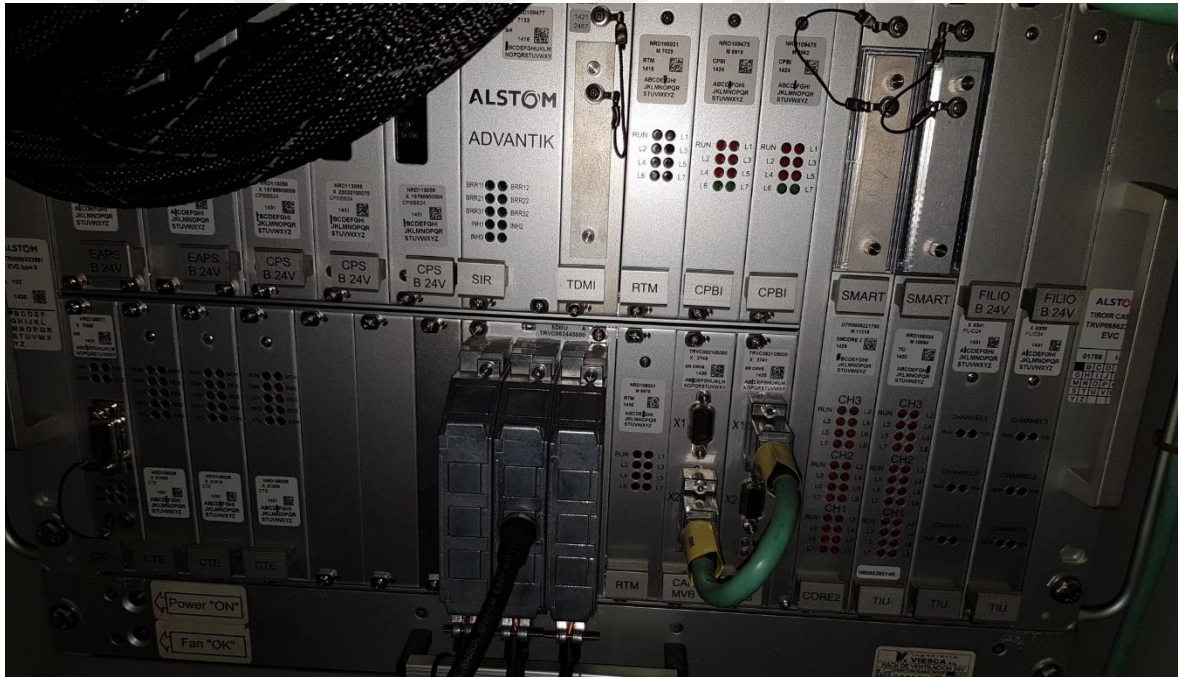
Şekil 4.12. E I/O ve SEC kartları

4.1.2 Araç üstü donanımları

Araç üstü donanımları; Avrupa hayati bilgisayar (European vital computer-EVC), baliz iletim modülü (balise transmission module-BTM), sürücü makine arayüzü (driver machine interface-DMI), adli kayıt cihazı (juridical record unit-JRU), odometre ve tren arayüz ünitesi (train interface unit -TIU)’dan oluşmaktadır.

4.1.2.1 Avrupa hayati bilgisayarı

EVC, ETCS araç üstü donanımlarının kalbi niteliğindedir. Bu bilgisayarın görevi, araç üzerindeki alt sistemin hayati işlevlerini güvenli bir şekilde yönetmektir. Bu işlevlerin kontrolünü sağlarken; saha donanımları, araç üstü odometrisi, sürücü ve diğer saklanmış veri girişlerinden faydalanır. Almış olduğu verilere bağlı olarak tren hareketlerini denetler, DMI vasıtası ile sürücüye, TIU yardımı ile de trenin fren sistemine ve diğer tren fonksiyonlarına veri çıkışı sağlar (RSSB, 2010). Şekil 4.13'te Haramain YHT Projesi hızlı trenlerinde kullanılan EVC görülmektedir.



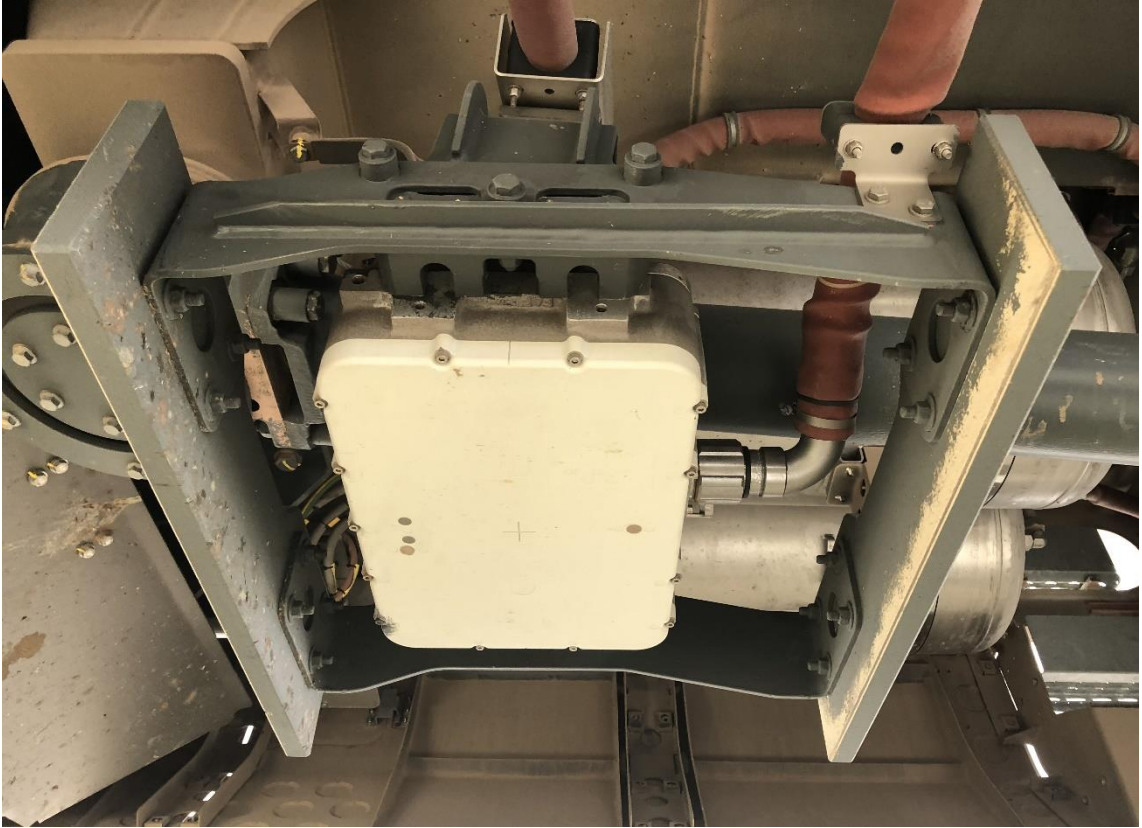
Şekil 4.13. Avrupa hayati bilgisayarı

4.1.2.2 Baliz iletim modülü

BTM, yol boyu donanımları ile tren arasındaki güvenlikle ilgili bilgileri taşımakla yükümlü önemli bir iletim tabanlı donanımdır (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15). Bu donanım, balizlerin aktifleştirilmesi ve okunması amaçlı kombine bir antenden ve eurobaliz bakım amaçlı bir araçla tamamlanmıştır (Lundberg, 2011).



Şekil 4.14. Baliz anteni-I



Şekil 4.15. Baliz anteni-II

RG213/214 ve RG400, anten bağlantı konnektörleridir. Bu konnektörler anten ile baliz okuyucu arasındaki haberleşmeyi sağlayan kabloların konnektörleridir. Balizden alınan kodlanmış sinyalizasyon verileri (telegramlar) RG213/214 ve RG400 konnektörleri yardımı ile baliz okuyucuya gönderilir. Baliz okuyucu, almış olduğu bilgileri işleyerek digital bir veriye dönüştürür, ardından bu verileri hızlı tren ile paylaşır. Şekil 4.16'da RG213/214 N tipi erkek konnektör, Şekil 4.17'de ise, RG400 SMA tipi erkek konnektör görülmektedir.



Şekil 4.16. RG213/214 N tipi erkek konnektör



Şekil 4.17. RG400 SMA tipi erkek konnektör

4.1.2.3 Sürücü makine arayüzü

ETCS araç üstü donanımları, sürücü masasının en üst konumunda bulunan bir kabin içi ekran olan DMI aracılığıyla sürücü ile iletişim kurar (Şekil 4.18). Bu arayüz, kontrol ve gösterge fonksiyonları için bir LCD dokunmatik ekran panelidir ve sürücünün sisteme gerekli giriş verilerini girmesine ve çıktı verilerini görselleştirmesine izin verir. Bu donanım üzerinde, trenin hareket iznine sahip olduğu mesafe, trenin aşmaması gereken maksimum hız, sürücünün frenlemeye başlaması gereken kilometre bilgisi gibi bilgiler sürücü ile paylaşılır (Mense, 2011).



Şekil 4.18. Sürücü makine arayüzü

4.1.2.4 Adli kayıt cihazı

ETCS, JRU adı verilen yerleşik bir veri kayıt cihazının araç üstü donanımlarına dâhil edilmesini zorunlu kılmıştır. Bu cihaz, frenleme eylemleri, ölçülen hız, baliz verileri, denetlenen hız gibi tren, sürücü ve EVC tarafından gönderilen ve alınan tüm sinyalizasyon verilerini kaydeder (Şekil 4.19).

Bu donanım, beklenen en ağır tren kazalarına dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece herhangi bir kaza sonrasında ETCS sistemine katkıda bulunabilecek ve sistemin yeniden yapılandırılmasına olanak sağlanacaktır (Ansaldo STS, 2016).



Şekil 4.19. Adli kayıt cihazı (Siemens, 2014)

4.1.2.5 Odometre

Trende yer alan odometre sistemi, dingil ucuna takılmış takometre ve trenin altına monte edilmiş radardan müteşekkildir (Şekil 4.20). Bu sistem sayesinde trenin mesafe, hız ve ivme bilgileri elde edilir, ardından bu bilgiler EVC ile paylaşılır. EVC, bu bilgileri kullanarak trenin konumunu belirler, bu sayede trenin düzgün bir şekilde denetlenmesi sağlanır (European Commission, 2018).



Şekil 4.20. Odometre (Milli Eğitim Bakanlığı, 2014)

4.1.2.6 Tren arayüz ünitesi

TIU, ETCS'nin trenin araç üstü fonksiyonlarını, kontrol etmesini sağlayan ünedir. Kontrol edilen arayüzler arasında; servis ve acil durum için trenin fren sistemlerini kontrol eden fren arayüzü, tren pantografının yükseltilmesini ve indirilmesini sağlayan kontrol arayüzü ile servis veya acil durum frenleri uygulanırken, trenin çekiş gücünü kesmek için kullanılan motor kontrol arayüzü sıralanabilir (RSSB, 2010).

4.2 ETCS Sistemi Çalışması

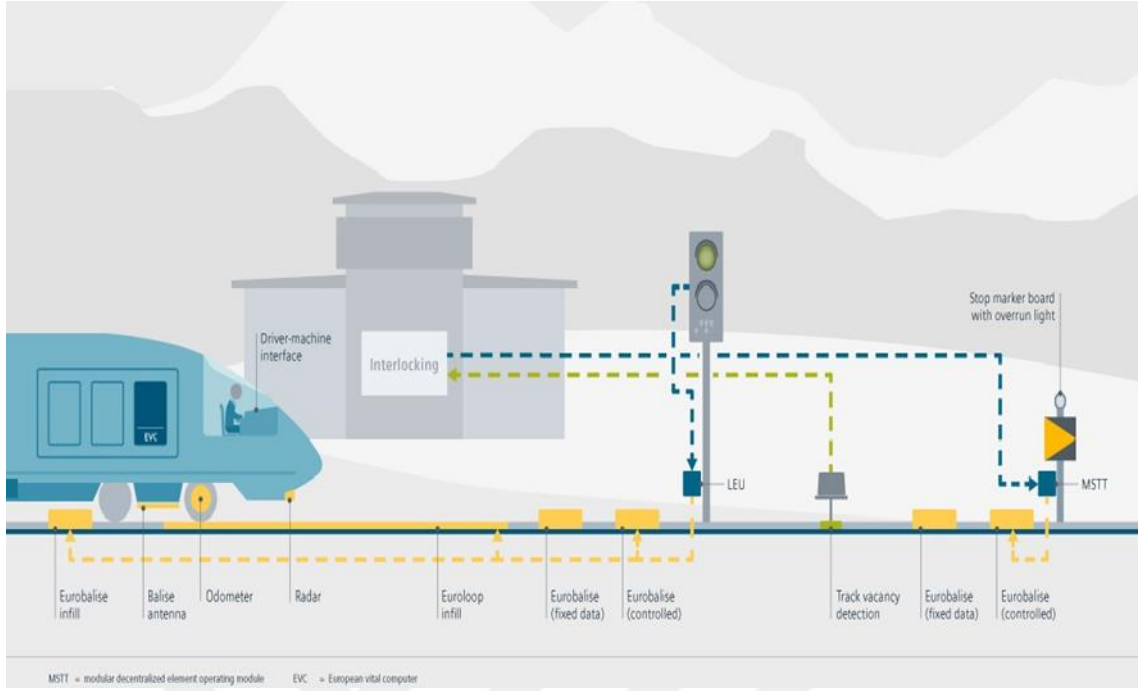
ETCS sisteminin çalışması dört ayrı seviyede incelenebilir. Aşağıdaki alt başlıklarda her bir seviye ile ilgili detaylar verilmiştir.

4.2.1 ETCS sistemi çalışması: Seviye-0

ERTMS/ETCS Seviye-0 sistemi, diğer seviyelere geçişte temel olarak kabul edilir. Hat boyunda bulunan basit ray devreleri ve sinyallerden oluşur. Kırmızı sinyalde duruş sağlayan, trenin hangi iki sinyal bloğu arasında olduğunu bildiren güvenlik seviyesindeki sistemlerdir.

4.2.2 ETCS sistemi çalışması: Seviye-1

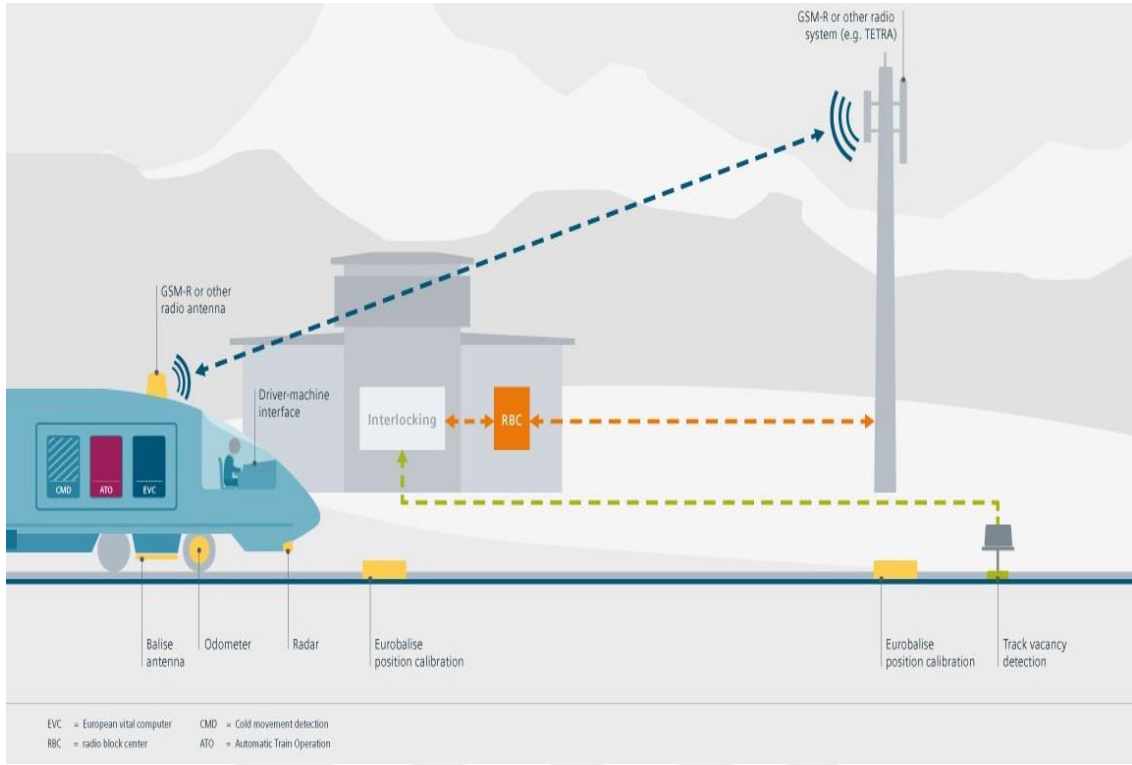
ERTMS/ETCS Seviye-1 sisteminde tren hareket yönündeki varılacak sinyallere ait sinyal renk bildirileri, trenin ilerlediği hat kesiminde yapılacak maksimum hız, trenin duracağı noktaya olan mesafe ve trenin ilerlediği istikametteki kurp, tünel ya da tren hızını sınırlayabilecek bütün bilgiler yol boyuna tahsis edilen donanımlar tarafından tren üzerine tahsis edilmiş araç üstü donanımına iletilmektedir. Yol boyundan alınan bütün bu bilgiler EVC tarafından değerlendirilerek DMI ile sesli ve görsel olarak makiniste bildirilmekte ve tren hızı alınan bilgilere göre sürekli olarak değerlendirilmektedir. Makinistin uyarıları dikkate almaması durumunda araç üzerine tahsis edilmiş EVC, aldığı bilgiye göre otomatik olarak treni yavaşlatmakta ya da frene geçirmektedir. ERTMS/ETCS Seviye-1'in çalışmasını Şekil 4.21'dan incelememiz mümkündür (Milli Eğitim Bakanlığı, 2014).



Şekil 4.21. ETCS sistemi çalışması Seviye-1 (Anonim-2, 2018)

4.2.3 ETCS sistemi çalışması: Seviye-2

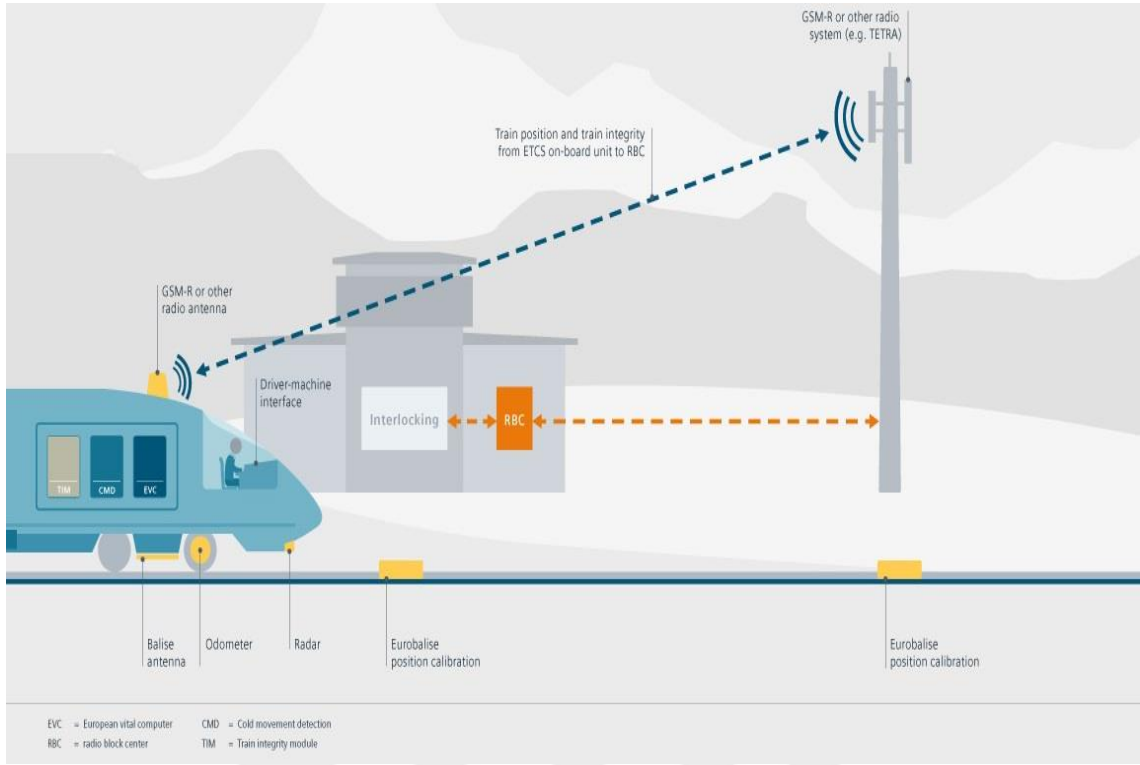
ERTMS/ETCS Seviye-2 sistemini şu şekilde tanımlamak mümkündür. Yol boyu donanımlarından elde edilen bilgiler elektronik anlaşılmaya iletilir. Anlaşımın bu bilgileri RBC ile paylaşır, bu sayede RBC ile trenin araç üstü donanımları arasındaki mesaj alışverişi anlık olarak gerçekleştirilir ve hat üzerinde bulunan trenin varlığını tespit etmek ve kontrolünü sağlamak mümkün olur. Bu alışveriş, GSM-R radyo ağı kullanarak yapılır. Seviye-2 tarafından sağlanan işlevsellik ERTMS/ETCS Seviye-1 tarafından sağlanan tüm özellikleri ve işlevsellikleri kapsamaktadır. Seviye-2'nin çalışmasını, Şekil 4.22'den incelememiz mümkündür (Gilaberte, 2013).



Şekil 4.22. ETCS sistemi çalışması Seviye-2 (Anonim-3, 2018)

4.2.4 ETCS sistemi çalışması: Seviye-3

Seviye-2'deki gibi Seviye-3'te de; trenler hareket yetkisini GSM-R radyo ağını kullanarak RBC'den alırlar. Bu sistemde hat boyunda bulunan sinyallere ihtiyaç yoktur. Tren sürücüsü DMI'ya bakarak gerekli bilgilerin tamamına erişebilir ve ETCS araç üstü donanım sistemi, RBC'den alınan bilgilere göre tren hareketlerini yönetir. Seviye-3, halen test aşamasında olan bir sistemdir. Bu seviyenin çalışma prensibini Şekil 4.23'ten incelememiz mümkündür (Stanley, 2011).



Şekil 4.23. ETCS sistemi çalışması Seviye-3 (Anonim-4, 2018)

4.2.5 ERTMS/ETCS sistemlerinin avantajları

Farklı tren kontrol sistemleri sebebiyle farklı kesimlerde kullanılmak zorunda kalan lokomotiflerin her yerde emniyetli bir şekilde kullanımı sağlanacaktır. Bu da çeken araç parkının en verimli şekilde kullanımını sağlayacaktır.

Komşu ülkeler arasındaki işletmecilikte farklı sistemlerde standarda gidileceğinden sınırlardaki demiryolu işletmeciliği daha basit ve daha emniyetli bir hale gelecektir. Ülkeler arası transit taşımacılık standart tipteki tren kontrol sistemleri sayesinde rahatlıkla ve daha emniyetli bir hale gelecektir (Eschilbeck, 2010).

5. TÜRKİYE’DE YÜKSEK HIZLI TREN İŞLETMECİLİĞİ

1950’li yıllardan sonra tüm dünyada kara ve hava yollarında yaşanan hızlı gelişmelere karşın demiryollarının ucuz kitle taşımacılığındaki rolü devam etmiştir. Kara ve hava yollarında ulaşılan yüksek standartlar ve yüksek taşıma kapasiteleri demiryollarının gelişmesini bir süre gölgelemiş ise de, 1970’li yıllardan itibaren, demiryolu teknolojisinde elde edilen önemli ilerlemeler bu sistemi yeniden çekici hale getirmiştir.

Ülkemizde, 1950’lere kadar etkin bir demiryolu politikası uygulanırken, 1950’lerden sonra ulaştırma politika tercihleri yoğun bir biçimde karayoluna kaydırılmıştır. Bu nedenle, 1950’lere kadar inşa edilen demiryollarında son 15 yıla kadar yeterli bir iyileştirme sağlanamamıştır. Oysa dünyadaki gelişmiş ülkeler tarafından mevcut demiryolu hatları, daha hızlı, daha konforlu ve daha emniyetli bir şekilde geliştirilerek, yolcu ve yük taşımacılığına ait potansiyelin büyük bir kısmı bu hatlara kaydırılmış ve buna ilave olarak da yeni sürat hatlarının inşasına devam edilmiştir (Öztürk, 1999).

Dünyada gelişmiş ülkeler tarafından tercih edilen YHT taşımacılığı, yüksek yatırım maliyetine rağmen karayollarından daha hızlı ve daha güvenilir, havayolundan ise daha ucuz ve daha düşük enerji harcayan bir ulaşım alternatifi olması nedeniyle ülkemizde de tercih edilmeye başlanmıştır. 2003 yılından itibaren demiryollarının yeniden devlet politikası haline getirilmesi ile ülkemizde yüksek hızlı demiryolu projelerinin yapımına başlanmıştır (TCDD, 2009).

2009 yılında ülkemiz, sadece kendine has olarak inşa edilen hat üzerinde ilerleyen, saatte 250 km hız yapabilen YHT ile tanışmıştır. Ankara-Eskişehir YHT hattının faaliyete geçmesi, demiryolu sektöründe tarihimizin en önemli dönüm noktalarından biri olarak kabul edilmektedir.

5.1 TCDD’nin Tarihçesi ve Faaliyet Alanı

TCDD, ülkemizdeki demiryolu taşımacılığını işleten ve kontrol eden kamu iktisadi teşebbüsüdür. TCDD ilk olarak Anadolu - Bağdat Demiryolları Müdüriyeti Umumiyesi adı

ile kurulmuş, daha sonra Devlet Demiryolları ve Limanları İdare-i Umumiyesi adını almıştır. 1953 yılına kadar katma bütçeli bir devlet idaresi şeklinde yönetilen kuruluş, 29 Temmuz 1953 tarihli 6186 Sayılı Kanun ile "Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi-TCDD" adı altında Kamu İktisadi Devlet Teşekkülü haline getirilmiş, 1984 yılında uygulamaya konulan 233 sayılı Kanun Hükmünde Kararname ile de "Kamu İktisadi Kuruluşu" statüsü kazanmıştır.

1 Mayıs 2013 tarihinde yürürlüğe giren 6461 sayılı Türkiye’de Demiryolu Ulaştırmasının Serbestleştirilmesi Hakkında Kanun ile TCDD, “İktisadi Devlet Teşekkülü” olarak yeniden yapılandırılmış ve dünyadaki gelişmelere paralel olarak demiryolu altyapı ve taşımacılık hizmetleri birbirinden ayrılarak serbestleştirilmiştir. Bu kapsamda, TCDD’nin yürüttüğü demiryolu taşımacılık hizmetleri, TCDD’nin bağlı ortaklığı statüsünde kurulmuş olan TCDD Taşımacılık Anonim Şirketi (A.Ş) tarafından yapılmaktadır, TCDD ise, sadece altyapı işletmecisi olarak faaliyet göstermektedir (Ekmen Uçev, 2015).

5.2 Türkiye’de Yüksek Hızlı Demiryolu Projeleri

Yüksek hızlı demiryolu yapımında, Ankara merkez olmak üzere İstanbul-Ankara-Sivas, Ankara-Afyonkarahisar-İzmir ve Ankara-Konya koridorları çekirdek ağ olarak belirlenmiştir. 15 büyük ilimizin yüksek hızlı trenle birbirine bağlanması planlanarak öncelikle Ankara-Eskişehir, Ankara-Konya, Eskişehir-Konya ve Ankara-İstanbul hatlarında YHT işletmeciliğine başlanılmıştır. Böylece, hedefler doğrultusunda 1.196 km yüksek hızlı demiryolu hattının inşası tamamlanmış, yaklaşık 2.000 km’lik Ankara-Sivas, Ankara-Bursa ve Ankara-İzmir yüksek hızlı demiryolunun ise inşası devam etmektedir. Yapımı devam eden ve tamamlanan projeleri Şekil 5.1’den incelememiz mümkündür.

Devam eden ve planlanan projeler sayesinde YHT’ler, büyükşehirler arasında bağlantıyı sağlayarak, ulaşılabilirlik kavramını yeniden anlamlandıracak ve şehirlerimizi bir demiryolu hattıyla değil, tüm dinamikleriyle birleştirip yeni bir bölgesel gelişme koridoru oluşturacaktır.



Şekil 5.1. Çekirdek yüksek hızlı demiryolu ağı (2018 yılı itibariyle)
(Ulaştırma Bakanlığı, 2014)

5.2.1 Tamamlanan yüksek hızlı demiryolu projeleri

Tamamlanan yüksek hızlı demiryolu projeleri Ankara-Konya ve Ankara-İstanbul şehirleri arasında inşa edilmiştir. Projelerle ilgili detaylı bilgilendirme, alt başlıklarda verilmiştir.

5.2.1.1 Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu projesi

Yerli yükleniciler tarafından, yerli iş gücüyle ve öz kaynaklarla gerçekleştirilen Ankara-Konya YHT Projesi 2011 yılında hizmete girmiştir. Ankara-İstanbul YHT Projesi'nin üzerinde bulunan Polatlı'dan güneye ayrılarak, 212 km uzunluğunda maksimum 300 km/s hıza uygun yüksek hızlı demiryolu inşa edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Ankara-Konya yüksek hızlı demiryolu hattı (Ulaştırma Bakanlığı, 2014)

Proje öncesi konvansiyonel trenler Eskişehir-Kütahya-Afyon güzergâhını kullanarak Ankara'dan Konya'ya 10 saat 30 dakikada ulaşabiliyordu. YHT'lerin kullanılmaya başlanmasıyla, seyahat süresi 1 saat 45 dakikaya inmiştir.

Ayrıca, Karaman ilinin YHT'ler ile Ankara'ya bağlantısını sağlamak üzere, Konya'dan Karaman'a dizel tren setleri (DMU) ile YHT bağlantılı seferler yapılmaktadır. Ankara-Eskişehir ve Ankara-Konya YHT'lerden sonra modern ve hızlı yolculukta üçüncü bir adım da Eskişehir-Konya YHT'lerin seferlere konulması olmuştur. Otobüsle 5,5 saat olan iki kent arası seyahat süresi, 2 saate inmiştir (Ulaştırma Bakanlığı, 2014).

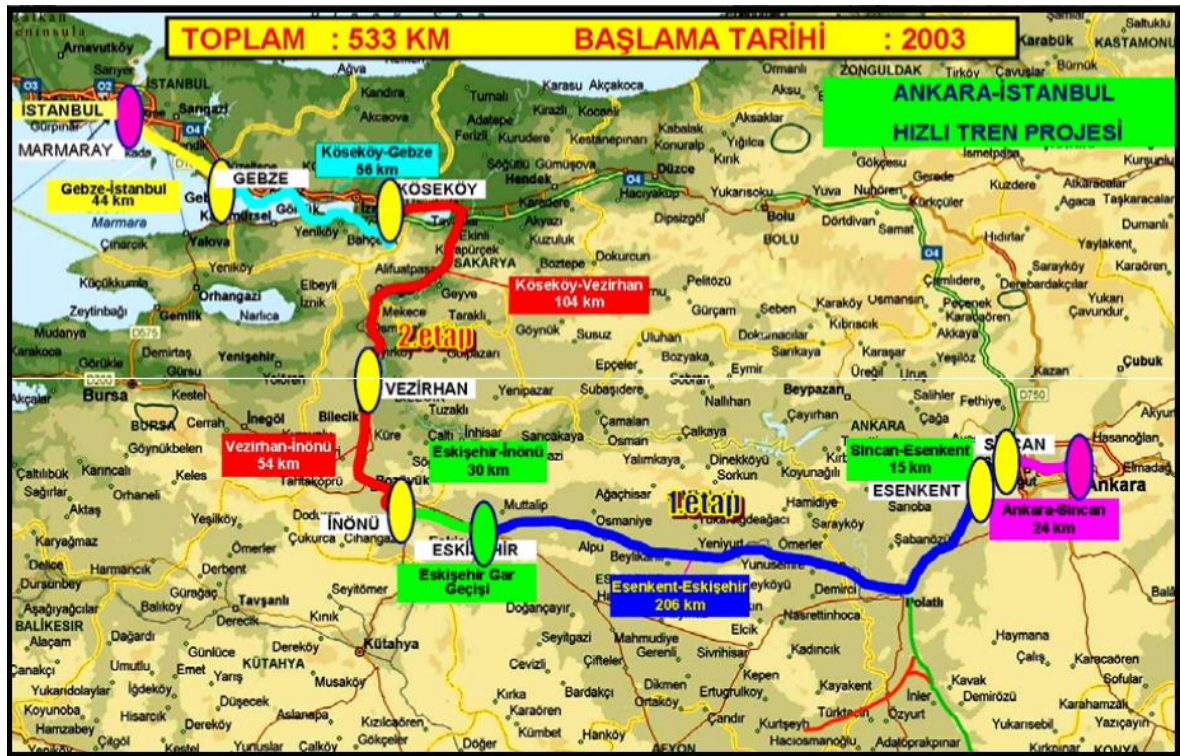
5.2.1.2 Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu projesi

Ülkemizin en büyük iki kenti olan Ankara-İstanbul arasındaki seyahat süresinin azaltılması, hızlı, konforlu ve güvenli bir ulaşım imkânı oluşturulması ve dolayısıyla ulaşımındaki demiryolu payının artırılması amacıyla Ankara-İstanbul YHT Projesi'nin ilk etabını oluşturan Ankara-Eskişehir kesimi 2009 yılında hizmete açılmıştır.

Eskişehir-Pendik kesiminin inşası da tamamlanarak, 25 Temmuz 2014 tarihinde hizmete açılmıştır. 511 km'lik koridor uzunluğunda azami 250 km/sa hıza sahip Ankara-

(54 km) ve Vezirhan-Köseköy (104 km) olmak üzere iki kesimden oluşmaktadır. Üçüncü etap; Köseköy-Gebze (56 km) arasındaki alanı kapsamaktadır.

Gebze-Haydarpaşa Kesimi; Marmaray projesi ile yüzeysel metroya dönüşeceğiinden Ankara-İstanbul YHT Projesi'ne dahil edilmemiştir. Gebze ile Haydarpaşa arasındaki 44 km'lik alanı kapsamaktadır. Şekil 5.4'te proje ile ilgili etapların gösterimine ulaşılabilir.



Şekil 5.4. Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu hattı kesimleri (Demirezer, 2009)

5.2.2 Yapımı devam eden yüksek hızlı demiryolu projeleri

Yapımı devam eden yüksek hızlı demiryolu projeleri Ankara-Sivas, Bursa-Bilecik, Ankara-İzmir ve Kayseri-Yerköy kentleri arasında kapsamaktadır. Projelerle ilgili detaylı bilgilendirme alt başlıklarda verilmiştir.

5.2.2.1 Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu projesi

Küçük Asya ile İpek yolu güzergâhındaki Asya ülkelerini birleştiren demiryolu koridorunun önemli bölümlerinden biri olan Ankara-Sivas YHT'nin yapımı devam etmektedir. Bu projenin ilerleyen süreçte, Sivas-Erzincan, Erzincan-Erzurum-Kars hızlı tren hatlarıyla birlikte Bakü-Tiflis-Kars demiryolu projesiyle entegre edilmesi hedeflenmektedir.

Mevcut Ankara-Sivas demiryolu 603 km olup, seyahat süresi 12 saattir. İki kent arasındaki seyahat süresini kısaltacak projeye maksimum 250 km/saat hıza uygun, çift hatlı, elektrikli, sinyalli 393 km yeni yüksek hızlı demiryolu yapımı hedeflenmiştir. Bu sayede hattın 198 km kısalması sağlanacak ve seyahat süresi 12 saatten 2 saate inecektir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Ankara-Sivas yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)
(Ulaştırma Bakanlığı, 2014)

5.2.2.2 Bursa-Bilecik yüksek hızlı demiryolu projesi

Demiryolu tarihimiz açısından; demiryoluyla ilk tanışan şehirlerimizden biri olan Bursa'nın demiryolu şebekesine bağlantısının sağlanması için inşaat çalışmalarına Ocak

2012’de başlanmıştır. Söz konusu 105 km’lik hattın altyapısı maksimum 250 km/saat hızı uygun, çift hatlı, elektrikli ve sinyalli olarak inşa edilmektedir (Şekil 5.6). Projenin tamamlanmasıyla gelişmiş sanayi şehri olan Bursa; İstanbul, Eskişehir ve Ankara’ya bağlanacaktır. Ankara-Bursa arası 2 saat 15 dakika, Bursa-Eskişehir arası 1 saat ve Bursa-İstanbul ise, 2 saat 15 dakika olacaktır.

Ülkemizin gerek nüfus, gerekse oluşturulan katma değer bakımından önde gelen şehirlerinden biri olan Bursa’nın demiryolu şebekesine bağlanmasıyla, sosyo-ekonomik değeri daha da yükselecektir. Söz konusu Bursa-Bilecik YHT Projesi’nin ilk etabı olan Bursa-Yenişehir kesiminde inşa çalışmaları, Bilecik-Yenişehir kesiminde ise uygulama projesi hazırlama çalışmaları sürdürülmektedir.

Proje tamamlandığında hatta hem yolcu, hem de hızlı yük trenleri çalıştırılacaktır. Yolcu trenleri saatte 200, yük trenleri ise 100 km/saat ile çalışacaktır. Ayrıca, Bursa ve Yenişehir’e hızlı tren ve tren garları yapılacak olup, buradaki hava alanında da hızlı tren istasyonu inşa edilecektir.



Şekil 5.6. Bursa-Bilecik yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)
(Ulaştırma Bakanlığı, 2014)

5.2.2.3 Ankara-İzmir yüksek hızlı demiryolu projesi

Sanayisi, turizm potansiyeli ve limanıyla ülkemizin 3. büyük kenti olan İzmir’i ve güzergâhındaki Manisa, Uşak ve Afyonkarahisar ile Ankara arasındaki seyahat süresinin azaltılması, hızlı, konforlu ve güvenli bir ulaşım imkânı oluşturulması için Ankara-İzmir YHT Projesi’nin yapımına 2012 yılında başlanmıştır.

Mevcut Ankara-İzmir demiryolu 824 kilometre olup, seyahat süresi yaklaşık 14 saattir. Projenin tamamlanması, iki şehir arası mesafeyi 624 kilometreye ve seyahat süresini 3 saat 30 dakikaya düşürecektir. Yapımı devam eden bu projenin güzergâhına Şekil 5.7'den ulaşılabilir.



Şekil 5.7. Ankara-İzmir yüksek hızlı demiryolu hattı (2018 yılı itibariyle)
(Ulaştırma Bakanlığı, 2014)

5.2.2.4 Kayseri-Yerköy yüksek hızlı demiryolu projesi

Kayseri-Yerköy arasında 250 km/saate uygun 142 km’lik çift hatlı, elektrikli ve sinyalli yüksek hızlı demiryolu hattı yapılacaktır. Kayseri-Yerköy YHT projesinin, Ankara-Sivas YHT hattına Yerköy’den bağlantısı sağlanacaktır (Şekil 5.8). Kayseri-Yerköy YHT hattının etüt-proje çalışmaları devam etmektedir (Ulaştırma Bakanlığı, 2014).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'na göre güvenilirlik, bir ürünün; belirli amaçlar doğrultusunda ve belirli bir kullanım aralığında kendisinden beklenen işi yerine getirme kabiliyetidir. Bu tanım bir donanımın yanı sıra bir sistem ya da bir servis için de geçerlidir (Mısra, 1992). Güvenilirlik, başarısızlıkları en aza indirmek, bakım verimliliğini artırmak, onarım sürelerini kısaltmak, müşteri ve organizasyonun beklentilerini karşılamak gibi çok sayıda faydaya sahiptir (Omondi, 2017).

Mühendislik yöntemleri ve istatistik bilimindeki gelişmeler sayesinde bir donanımın ya da sistemin güvenilirliğinin hesaplanması yani geçmişteki verilerin incelenerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunma ihtiyacı her geçen gün önem kazanmaktadır. Sistemin ya da donanımın güvenilirliğinin hesaplanmasında temel olarak olasılık dağılımları kullanılmaktadır (Üçkardeş, 2010). Olasılık dağılımları; sistemlerin, servislerin veya bunları oluşturan donanımların zamana karşı arızalanma ya da bozulma modelleri olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bir donanımın yaşam süresi üzerinde birçok faktör etkilidir. Bunlardan bazıları, üretimde kullanılan madde, çalışma süresi veya çevresel koşullardaki değişimdir. İlk olarak sistemler veya servislerin bir bileşeni için süre bir rastgele değişken olarak alınarak zamana karşı bozulma ya da arızalanma için uygun bir olasılık modeli oluşturulur. Sonra oluşturulan olasılık modelindeki parametreleri tahmin edilir (Aykanat, 2013).

Matematiksel olarak, güvenilirlik (reliability) fonksiyonu $R(t)$, bir sistemin ya da donanımın, 0'dan t zaman aralığı süresince başarılı bir şekilde çalışması olasılığı olarak tanımlanır.

$$R(t) = P(T > t) \quad t \geq 0 \quad (6.1)$$

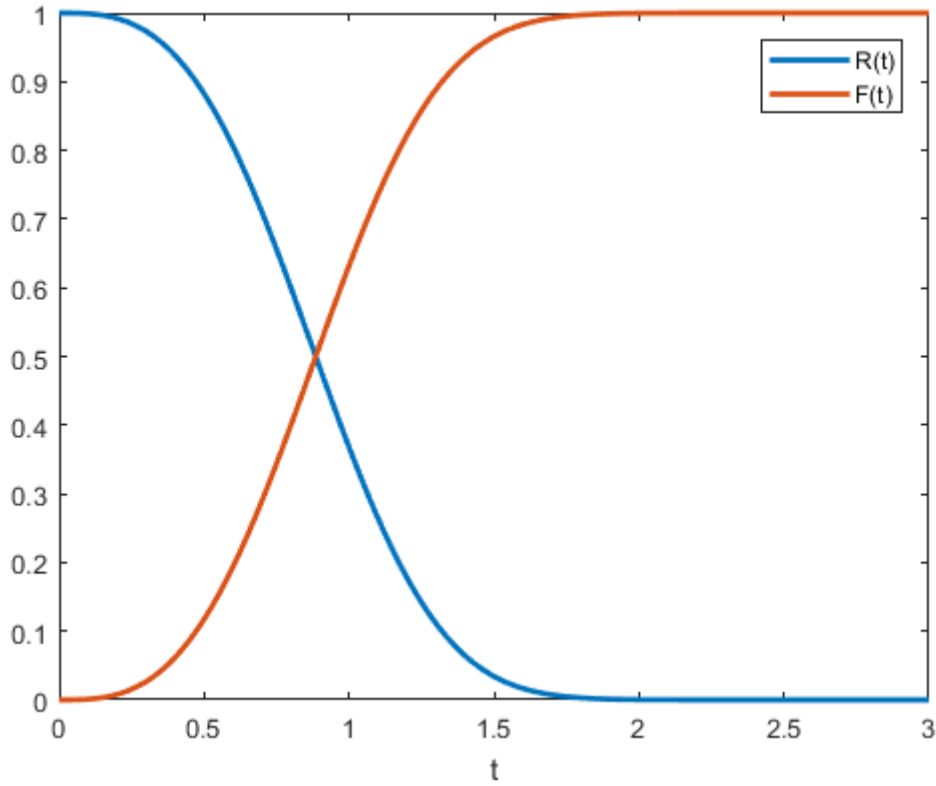
Bu denklemdeki T , başarısızlık süresini belirten rastgele bir değişkendir. Güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$, t zamanında bir donanımın veya sistemin görevlerini yerine getirebilme olasılığını vermektedir. Bu t zamanında elde edilen güvenilirlik fonksiyonu

yalnızca bir olasılıktır. Bir parçanın ya da sistemin güvenilirliği çoğunlukla $R(t)$ güvenilirlik fonksiyonu ile karakterize edilir.

Güvenilmezlik arıza ölçüsü olan $F(t)$, birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function) olarak bilinir ve t zamanına kadar bir sistemin ya da parçanın arızalı duruma düşmesi olasılığı olarak tanımlanabilir.

$$F(t) = P(T \leq t) \quad t \geq 0 \quad (6.2)$$

Yukarıdaki denklemlerde, güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$ ile birikimli dağılım fonksiyonu $F(t)$ arasında birbirlerini bütünleyen bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Bu ilişkiyi, Şekil 6.1 üzerinden de incelemek mümkündür.



Şekil 6.1. $R(t)$ ile $F(t)$ arasındaki ilişki

Eğer T , $f(t)$ şeklindeki bir olasılık yoğunluk fonksiyonuna (oyf) sahipse, $R(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{\infty} f(u)du \quad (6.3)$$

Güvenilirlik analizinde oldukça önemli bir yere sahip olan bir başka fonksiyon, tehlike oranı fonksiyonu (hazard function)'dur. Tehlike oranı fonksiyonu biriken yaşa dayalı anlık arıza frekansını verir. Bir başka ifadeyle, tehlike oranı fonksiyonu, t anına kadar hayatta kalan ürünler için, t anından sonraki belirli bir zaman dilimi içindeki ani başarısızlık oranıdır. Denklem (6.4)'de tehlike oranı fonksiyonu görülmektedir.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.4)$$

Yaşam süresi değişkeninin; $f(t)$, $F(t)$ ve $R(t)$ denklemleri arasında dönüşümü söz konusudur. Bu özellikten yararlanarak,

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} (1 - R(t)) = -R'(t) \quad (6.5)$$

olduğundan, tehlike oranı fonksiyonu,

$$h(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (6.6)$$

şeklinde elde edilir.

Birikimli tehlike fonksiyonu ise, T zamanı içinde belirli bir t anı için hesaplanmış olan başarısızlık olasılıklarının fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu fonksiyon $H(t)$ ile gösterilir ve,

$$H(t) = \int_0^t h(x)dx = -\ln(R(t)) \quad (6.7)$$

biçiminde ifade edilir.

Başlangıç anında bir parçanın güvenilirlik fonksiyonu değeri $(R(0))$ 1' e eşittir. Bu özellikten yararlanarak,

$$\int_0^t h(t)dt = -\ln R(t) \quad (6.8)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (6.8) eşitliğinde $R(t)$ çekilirse,

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t h(u)du\right) \quad (6.9)$$

elde edilir.

Denklem (6.9) ifadesi, genel güvenilirlik fonksiyonu olarak bilinir. Burada tehlike oranı ve $R(t)$ zamana bağlıdır (Türkan, 2011). Çizelge 6.1'de güvenilirlik analizindeki fonksiyonlar arasındaki ilişkiler verilmiştir (Mısra, 1992).

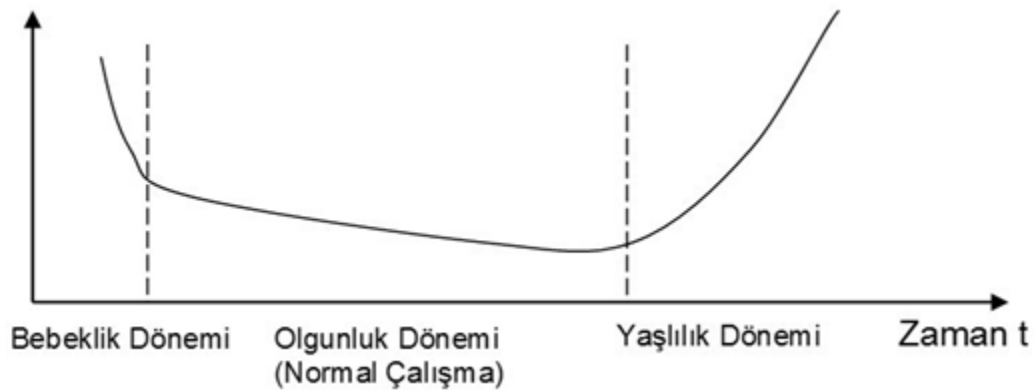
Çizelge 6.1. Güvenilirlik analizindeki fonksiyonlar arasındaki ilişkiler

	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$F(t)$	-	$\int_0^t f(u)du$	$1 - R(t)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$f(t)$	$\frac{d}{dt}F(t)$	-	$-\frac{d}{dt}R(t)$	$h(t)\exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(u)du$	-	$\exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$h(t)$	$\frac{dF(t)/dt}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	$-\frac{d}{dt}\ln R(t)$	-

6.1 Tehlike Oranları İçin Küvet Eğrisi

Tehlike oranı, güvenilirlik analizinde önemli bir yer tutmaktadır. Bir donanımın ya da sistemin yaşamı boyunca oluşan fonksiyonunun nasıl gerçekleştiğini gösterir. Tehlike oranları eğrisi, Şekil 6.2’de verilmiştir. Tehlike oranı eğrisi, şekli nedeniyle banyo küvet eğrisi olarak da adlandırılır ve birçok sistem ya da donanım için güvenilirlik performansının temsili niteliğindedir.

Tehlike Oranı



Şekil 6.2. Küvet tehlike oranı eğrisi

Bu şekildeki düşey eksen, zaman içindeki her noktada oluşan tehlike oranıdır. Daha yüksek değerler, daha yüksek hata olasılıklarını göstermektedir. Küvet tehlike oranı eğrisi, üç dönemde incelenir. Bunlar; bebeklik, olgunluk ve yaşlılık dönemleridir.

Birinci bölge “Bebeklik Dönemi veya Çocukluk Dönemi” adını alır; donanımın kurulduğu andan itibaren yüksek bir tehlike oranı gösterdiğini ve bu oranın zamanla sabitlendiğini belirtir. Bebeklik dönemi aşamasına, erken başarısızlık veya hata ayıklama evresi de denir. Tehlike oranı yüksektir, ancak zamanla kademeli olarak azalır. Bu süre zarfında, mühendislik bölümü, ürünleri veya sistemleri yeterince test etmediğinden ya da bazı kusurlu ürünler imal ettiğinden, arızalar meydana gelir. Bu dönem, hatalı aksam ve parçalar, kötü lehim, bağlantı hatası gibi nedenlerden kaynaklanır.

Banyo küveti eğrisinin ortadaki bölgesi “Olgunluk Dönemi” olarak adlandırılır ve düşük değerde, sabit bir tehlike oranı söz konusudur. Bu süre içerisinde arızalar, rastgele meydana gelir ve sürekli bir başarısızlık oranı ile ifade edilir. Bu dönem, sistemin veya donanımların en verimli çalıştığı dönemdir. Olgunluk dönemi, genellikle tasarım aşamasında ve güvenilirlik değerlendirmesinde en çok dikkate alınan dönemdir (Introduction to reliability, 2012).

Banyo küveti eğrisinin son bölgesi, genellikle “Yaşlılık Dönemi” olarak adlandırılır. Bu dönemde, geçen uzun sürenin ardından mekanik bileşenler yaşlanmaya ve aşınmaya başlar. Bu sebeple, bu dönem, giderek artan bir tehlike oranı ile karakterize edilir. (IIT Bombay, 2018). Artan tehlike oranı genelde bağlantıların oksitlenmesi, elektrolitik kondansatörlerin kuruyup bozulması, ısıl çevrim nedeniyle endüklenen gerilim sonucunda ortaya çıkan kısa devreler gibi yapısal yaşlanmanın bir sonucu olarak meydana gelir (Özkılıç, 2016).

6.2. Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Yöntemler

Güvenilirlik analizi çalışmalarında, analize başlamadan önce hangi analiz yönteminin kullanılacağına karar verilmesi gerekir. Güvenilirlik analizinde kullanılan yöntemler temel olarak 3’e ayrılmaktadır. Bunlar; parametrik analiz, parametrik olmayan analiz ve yarı parametrik analiz şeklindedir.

Parametrik analiz, arıza verilerinin bilinen bir istatistiksel dağılımla modellendiği bir yöntemdir. Gözlemlenen verilerin en iyi uyduğu istatistiksel dağılım belirlenerek yapılır. İstatistiksel dağılım belirlendikten sonra parametreleri tahmin edilir. Daha sonra tahmin edilen parametreler yardımıyla, incelenen donanımın ya da sistemin herhangi bir zamandaki tehlike veya güvenilirliği kullanılabilir. Parametrik analiz yöntemlerini istatistiksel açıdan daha güvenilir ve etkin sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, güvenilirlik analizinde parametrik yöntemler daha çok tercih edilen ve kullanılan yaklaşımlardır.

Parametrik olmayan yöntemler, arıza verileri için uygun bir olasılık dağılım fonksiyonunun olmadığı durumlarda, arıza verilerini analiz etmeye olanak sağlayan yöntemlerdir. Parametrik yöntemlerde, arıza verileri için belirlenen dağılım hakkında yanlış varsayımlar yapılması durumunda ortaya çıkabilecek muhtemel büyük hatalar, bu yöntemde söz konusu olmamaktadır. Belli bir dağılım varsayımı gerektirmediği için pratikte daha kullanışlı olmaktadır. Ancak daha profesyonel sonuçlar vermesi sebebiyle genellikle parametrik yöntem tercih edilmektedir.

Birçok istatistiksel çalışmada neden sonuç ilişkisine dayalı yaklaşımlar tercih edilmektedir. Araştırılan unsur etkileyen tek bir neden var ise, bu ilişkinin değerlendirilmesinde tek değişkenli istatistiksel analizler uygun olmaktadır. Ancak çoğu bilimsel çalışmada olayları etkileyen nedenleri tek bir değişkenle açıklamak olanaksızdır ve bu şekilde yapılan analiz sonuçları güvenilir olmamaktadır. Bu durumda, olayların çok değişkenli istatistikler teknikler kullanılarak analiz edilmesi gerekmektedir. Yarı parametrik analizde, arıza verilerinin açıklanan değişken olarak ele alındığı ve bu değişkeni açıkladığı düşünülen diğer değişkenlerin de analizde yer aldığı regresyon modelleri kullanılmaktadır (İnceoğlu, 2013).

Bu çalışmada arıza verilerinin modellenmesinde ve analizinde parametrik yöntemler kullanılmıştır. Bu nedenle çalışmanın ilerleyen kısımlarında parametrik yöntemlerden daha detaylı olarak bahsedilecektir.

Güvenilirlik analizinde, verilerin parametrik yöntemler kullanılarak analizi gerçekleştirilirken kullanılan çeşitli olasılık dağılımları mevcuttur. Bunlar yaşam dağılımları olarak da adlandırılır. En en yaygın olarak kullanılan olasılık dağılım

modelleri; üstel, Weibull, normal, Rayleigh, gama, log-normal, log-lojistik, en büyük uç değer, en küçük uç değer dağılımlarıdır.

Aşağıdaki bölümlerde bu dağılım modellerinin olasılık yoğunluk, birikimli dağılım, güvenilirlik ve tehlike oranı fonksiyonları verilecektir.

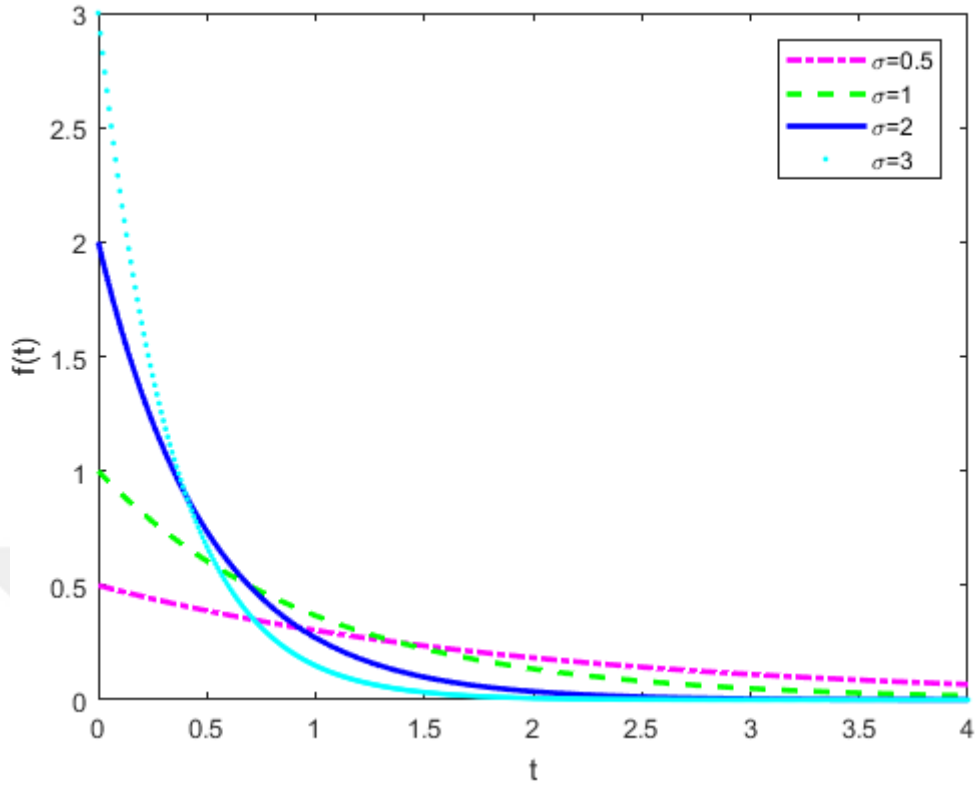
6.2.1 Üstel dağılım

Üstel (exponential) dağılım, sabit tehlike oranına sahip verileri modellemek için kullanılır. Bu durum, üstel dağılımın yaygın olarak kullanılmasının temel nedenidir (Pham, 2006).

$h(t) = \sigma$ ise, üstel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(t; \sigma)$) ve güvenilirlik fonksiyonu ($R(t; \sigma)$) sırasıyla denklem (6.10) ve (6.11)'de verilmiştir. Bu dağılım için, $\sigma = 0.5, 1, 2, 3$ değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.3'te görülmektedir.

$$f(t; \sigma) = \sigma e^{-\sigma t}, \quad t \geq 0 \quad (6.10)$$

$$R(t; \sigma) = e^{-\sigma t}, \quad t \geq 0 \quad (6.11)$$



Şekil 6.3. Üstel dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu

6.2.2 Üç parametrelili Weibull dağılımı

Güvenilirlik analizi için en yaygın kullanım alanına sahip dağılım, Weibull olasılık dağılımıdır. Weibull dağılımı, pek çok farklı veri setini modellemede kullanılan esnek bir dağılımdır. Bu dağılım, bileşen ömrünü dalgalı tehlike oranı fonksiyonlarıyla modellemek ve çeşitli mühendislik uygulamalarını temsil etmek için uygundur. İki parametrelili ve üç parametrelili Weibull dağılım modelleri mevcuttur. Weibull dağılımı sadece şekil ve ölçek parametresini içeriyorsa iki parametrelili Weibull dağılımı olarak adlandırılır. Eğer arıza verileri için bir eşik (threshold) değeri söz konusu ise, konum, ölçek ve şekil parametresi içeren üç parametrelili Weibull dağılımı kullanılmalıdır. Weibull dağılımı şekil parametresinin aldığı farklı değerlere göre oldukça farklı veri yapılarını modellemede başarılı bir dağılımdır. Şekil parametre değeri 1 olduğunda üstel dağılım, 2 olduğunda Raiyleigh dağılımı, 3.4 olduğunda ise normal dağılıma dönüşmektedir. Üç parametrelili Weibull dağılımının oyf denklemi (6.12)'de verilmiştir.

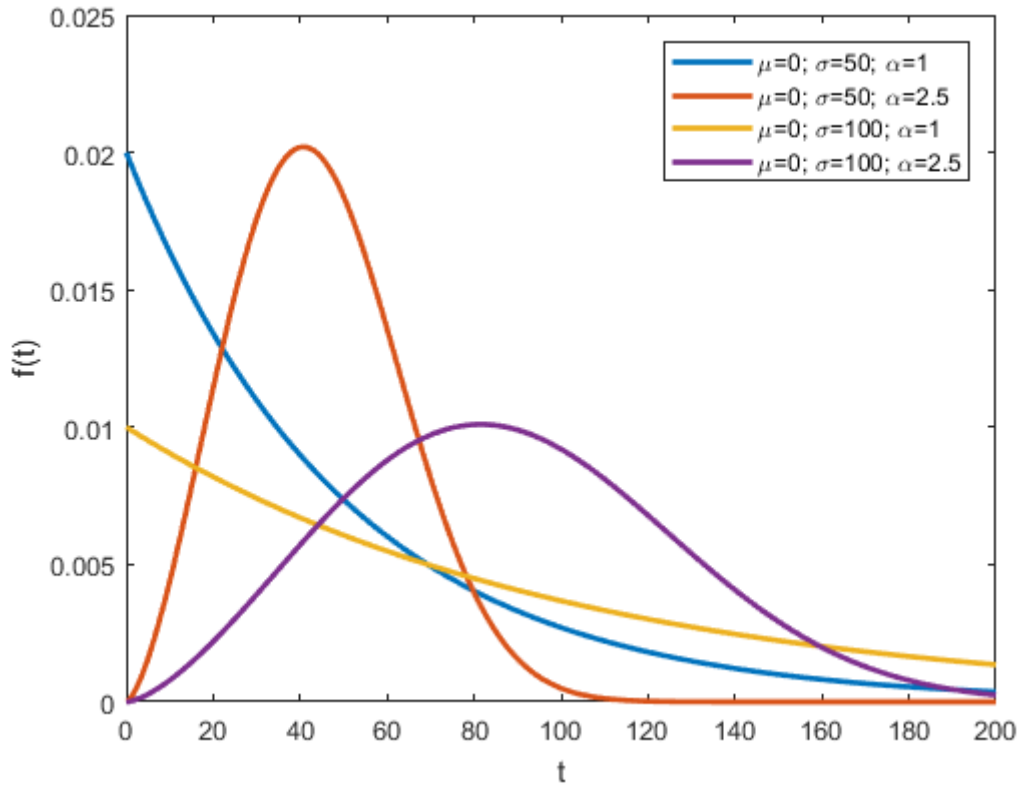
$$f(t; \alpha, \sigma, \mu) = \frac{\alpha(t-\mu)^{\alpha-1}}{\sigma^\alpha} e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^\alpha} \quad t \geq \mu \geq 0 \quad (6.12)$$

Üç parametrelili Weibull dağılımının birikimli dağılım fonksiyonu,

$$F(t; \alpha, \sigma, \mu) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^\alpha} \quad t \geq \mu \geq 0 \quad (6.13)$$

biçimindedir.

Şekil ve ölçek parametrelerinin farklı değerleri için Weibull dağılımının oyf'si, Şekil 6.4'te gösterildiği gibidir.

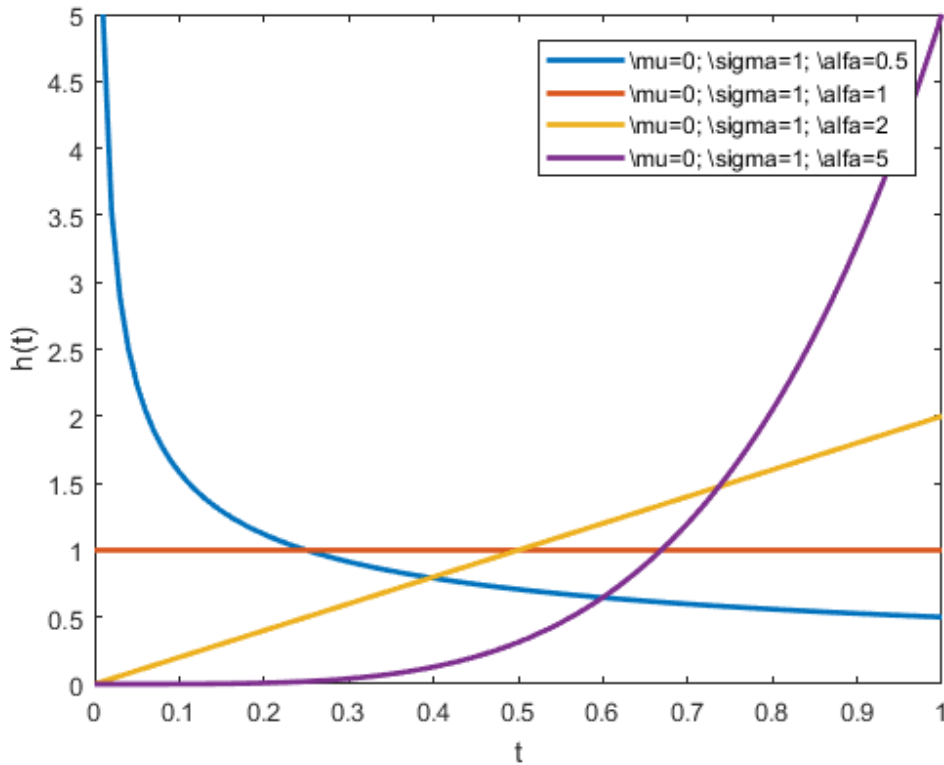


Şekil 6.4. Farklı şekil ve ölçek parametre değerleri için Weibull dağılımı

Bu denklemlerde, σ ve α sırasıyla ölçek ve şekil parametreleri olarak bilinir. μ ise, konum parametresi olarak bilinir. Bu parametreler her zaman pozitifdir (Bain ve Engelhardt, 1991). $t \geq \mu$ için Weibull dağılımına ait $R(t; \alpha, \sigma, \mu)$ ve $h(t; \alpha, \sigma, \mu)$ fonksiyonları sırasıyla denklem (6.14) ve (6.15)'te verilmiştir. Şekil 6.5'te ise, şekil parametresinin farklı değerleri için $h(t; \alpha, \sigma, \mu)$ fonksiyonu yer almaktadır. Şekil parametresi 1 olduğunda (üstel dağılım) $h(t; \alpha, \sigma, \mu)$ fonksiyonunun sabit, 1'den küçükken üstel olarak azalan, 2 olduğunda (Raiyleigh dağılımı) lineer olarak artan ve 5 (2'den büyük) olduğunda ise üstel olarak artan olduğu görülmektedir. Bu durum, Çizelge 6.2'de ayrıntılı olarak verilmiştir (Saraçoğlu, 2018).

$$R(t; \alpha, \sigma, \mu) = e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^\alpha}, \quad t > \mu > 0, \alpha > 0, \sigma > 0 \quad (6.14)$$

$$h(t; \alpha, \sigma, \mu) = \frac{\alpha(t-\mu)^{\alpha-1}}{\sigma^\alpha}, \quad t > \mu > 0, \alpha > 0, \sigma > 0 \quad (6.15)$$



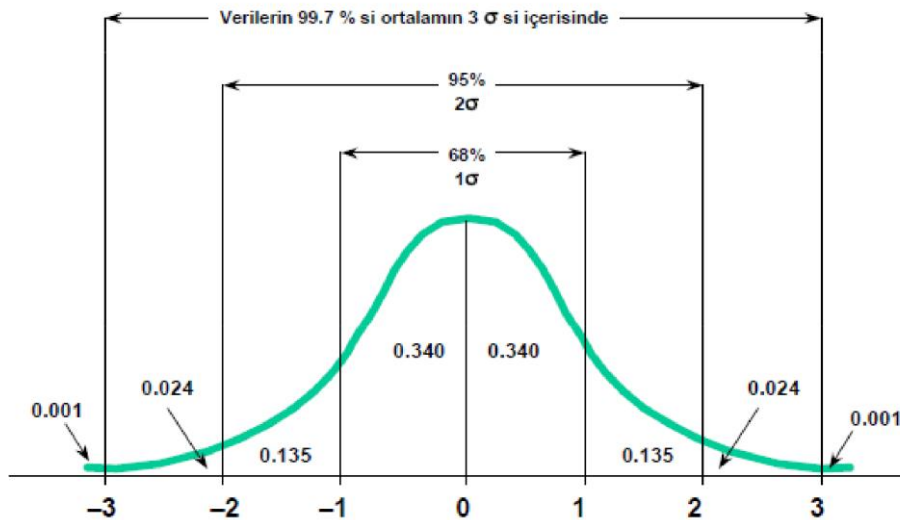
Şekil 6.5. Weibull dağılımı için $h(t; \alpha, \sigma, \mu)$ fonksiyonu

Çizelge 6.2. Weibull dağılımının α parametresine göre özellikleri

Şekil Parametresi (α)	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu ($f(x)$)	Tehlike Oranı Fonksiyonu ($h(x)$)
$0 < \alpha < 1$	Sonsuzdan üstel azalan	Sonsuzdan üstel azalan
$\alpha = 1$	$\frac{1}{\sigma}$ 'dan üstel azalan	Sabit
$\alpha > 1$	Tepe noktasına yükselen ve sonra azalan	Artan
$\alpha = 2$	Rayleigh dağılımı	Doğrusal olarak artan
$\alpha = 3.4$	“Normal” çan şeklinde görünüm	Hızla artan
$\alpha > 4$	Pozitif çarpık görünüm	Üstel artan

6.2.3 Normal dağılım

Normal (gaussian) dağılım, güvenilirlik analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan olasılık dağılımlardan biridir. Bu dağılımın olasılık dağılımı grafiği, Şekil 6.6'da gösterildiği gibi simetriktir.

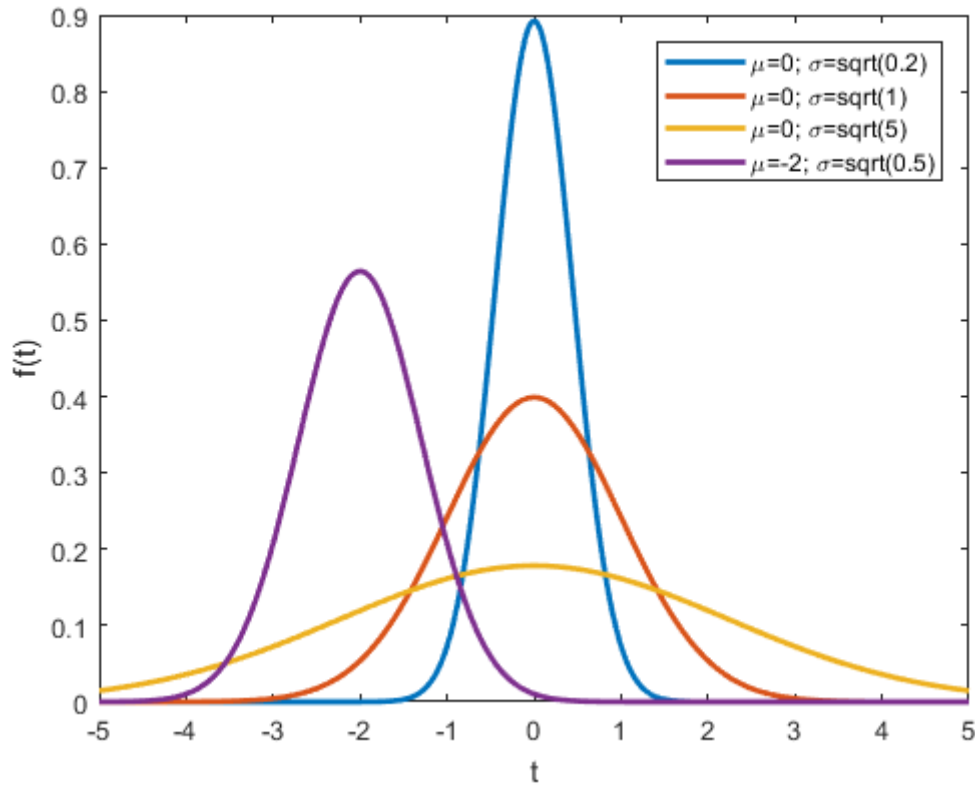


Şekil 6.6. Normal olasılık dağılımı grafiği

Popülasyonun yaklaşık %68'i ortalamadan bir standart sapma mesafesine konumlanmıştır. %95'i iki standart sapma mesafesinde, ve %99'un üzerindeki popülasyon üç standart sapmanın içerisinde konumlanmıştır. Bu dağılımın oyf denklemi, (6.16)'daki gibidir. Normal dağılımın iki parametresi (μ ve σ) mevcuttur. Bunlar sırası ile normal dağılımın konum ve ölçek parametreleridir (Demir, 2015).

$$f(t; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad -\infty < t < \infty \quad -\infty < \mu < \infty \quad \sigma > 0 \quad (6.16)$$

Değişen μ ve σ değerlerinin etkisi tamamen farklıdır. μ değişirken, bu değişiklik eğrinin konumunu etkiler. Öte yandan, dağılımın değişkenlik ölçüsü olan σ değişirken, Şekil 6.7'de gösterildiği gibi eğrinin genişliğini (standart sapması) veya yayılımı etkilenir.



Şekil 6.7. Farklı μ ve σ değerleri için normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu

Normal dağılımın $F(t; \sigma, \mu)$, $R(t; \sigma, \mu)$ ve $h(t; \sigma, \mu)$ fonksiyonları sırası ile (6.17), (6.18) ve (6.19) denklemlerinde gösterilmiştir.

$$F(t; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2\right) du \quad (6.17)$$

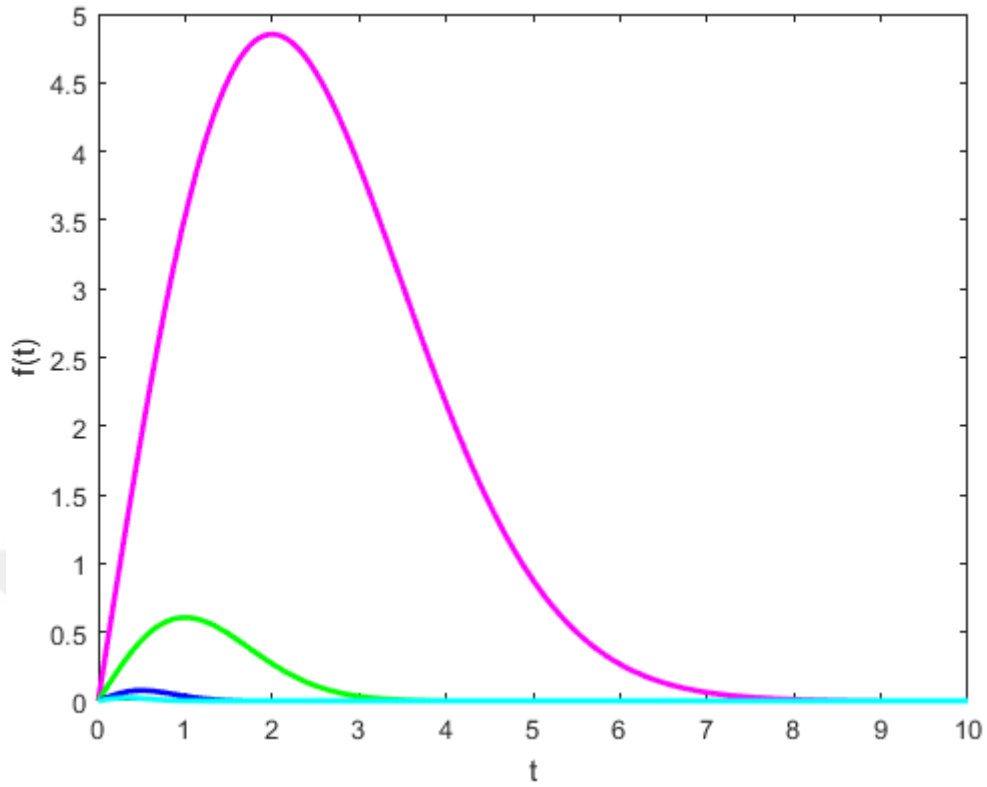
$$R(t; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2\right) du \quad (6.18)$$

$$h(t; \sigma, \mu) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}{\int_t^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{(2\pi)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2\right] du} \quad (6.19)$$

6.2.4 Rayleigh dağılımı

Rayleigh dağılımı, olasılık teorisinde ve istatistikte, pozitif değerli verilerin modellenmesinde sıklıkla kullanılan sürekli bir olasılık dağılımıdır (Shooman, 2001). Rayleigh dağılımının oyf denklemi, (6.20)'de verilmiştir.

$$f(t; \sigma) = \frac{t}{\sigma^2} e^{\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (6.20)$$



Şekil 6.8. Farklı parametre değerleri için Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu

Rayleigh dağılımının aritmetik ortalaması, varyansı, ve güvenilirlik fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\text{Aritmetik ortalama} = \sigma \left(\frac{\pi}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

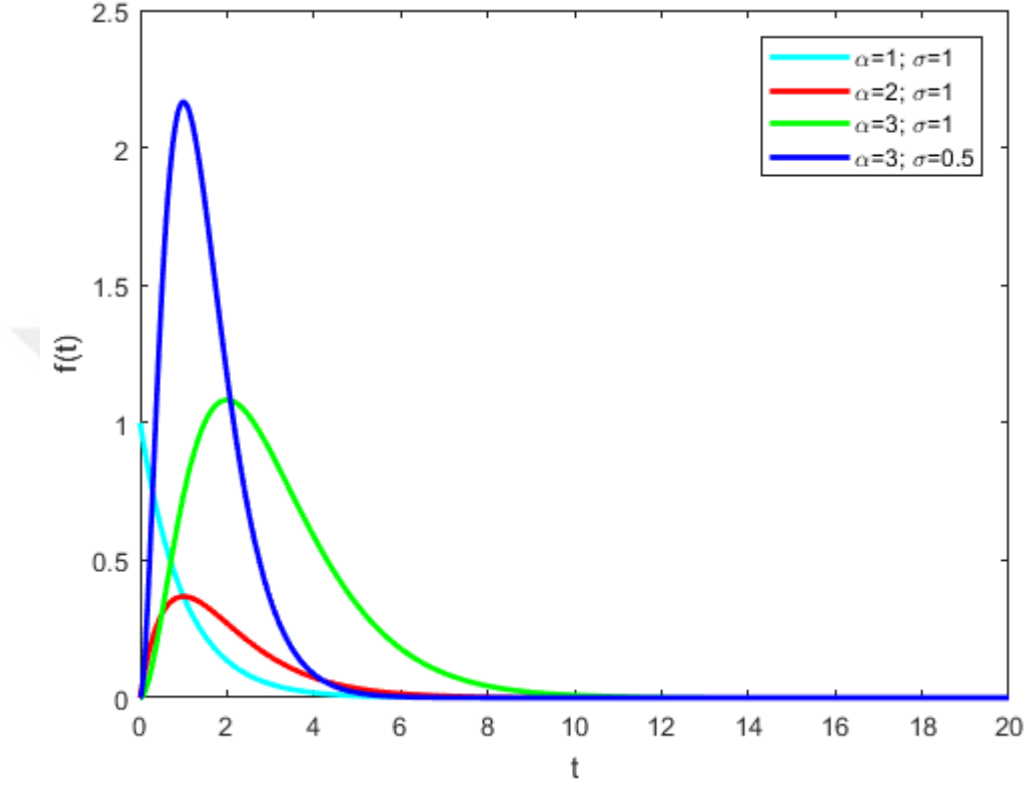
$$\text{Varyans} = \left(2 - \frac{\pi}{2} \right) \sigma^2$$

$$R(t; \sigma) = e^{-\frac{\sigma^2 t^2}{2}} \quad (6.21)$$

6.2.5 Gama dağılımı

Gama (gamma) dağılımı, arıza verilerinin çarpık bir olasılık dağılımına sahip olması durumunda, tercih edilen bir dağılım şeklidir. İki parametrelili standart gama dağılımında, T değişkeninin oyf denklemi, (6.22)'de görülmektedir.

$$f(t; \alpha, \sigma) = \frac{t^{\alpha-1}}{\sigma^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\sigma}} \quad t \geq 0, \quad \alpha, \sigma > 0 \quad (6.22)$$



Şekil 6.9. Gama dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu

Burada α , şekil parametresidir ve σ , ölçek parametresidir. Gama dağılımı kullanılarak modellenen arıza verilerine ilişkin güvenilirlik fonksiyonu $R(t; \alpha, \sigma)$ (6.23)'deki gibi elde edilir.

$$R(t; \alpha, \sigma) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma^\alpha \Gamma(\alpha)} u^{\alpha-1} e^{-\frac{u}{\sigma}} du \quad (6.23)$$

Eğer α bir tamsayı ise, $R(t; \alpha, \sigma)$ şu şekilde de ifade edilebilir.

$$R(t; \alpha, \sigma) = e^{-\frac{t}{\sigma}} \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{\left(\frac{t}{\sigma}\right)^i}{i!} \quad (6.24)$$

Tehlike oranı fonksiyonu ise,

$$h(t; \alpha, \sigma) = \frac{f(t; \alpha, \sigma)}{R(t; \alpha, \sigma)} = \frac{\frac{t^{\alpha-1}}{\sigma^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{t}{\sigma}}}{e^{-\frac{t}{\sigma}} \sum_{i=0}^{\alpha-1} \frac{\left(\frac{t}{\sigma}\right)^i}{i!}} \quad (6.25)$$

biçimindedir.

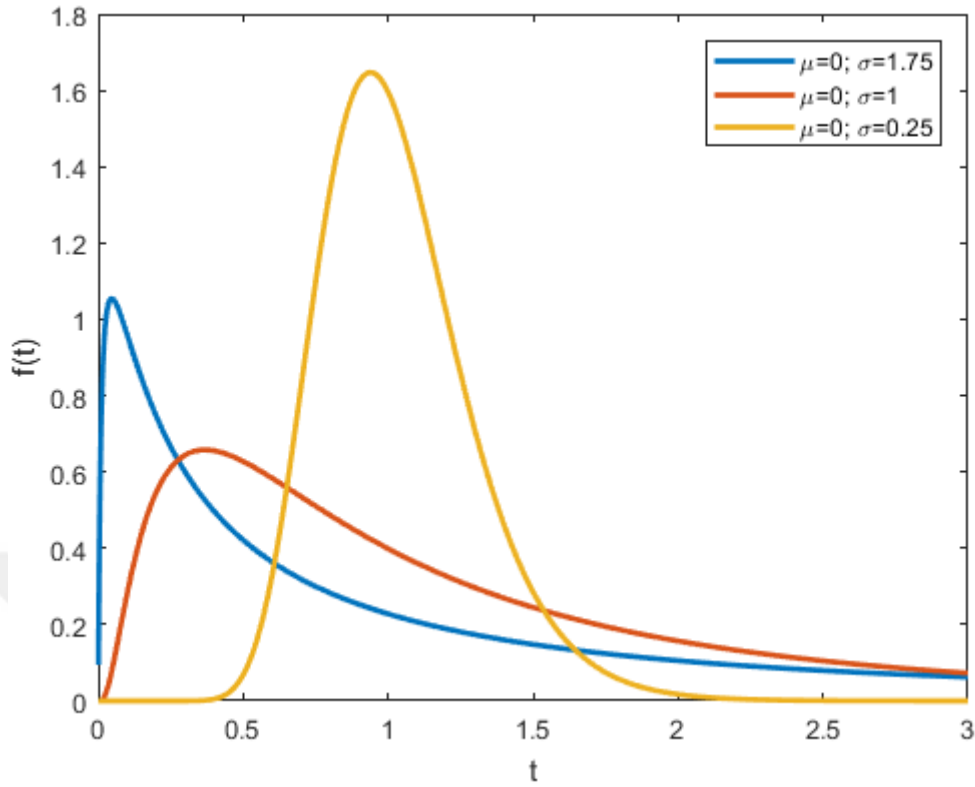
Gama dağılımı, şekil ve ölçek parametrelerinin yalnızca pozitif değerlere sahip olması koşuluyla $\alpha=1$ özel durumunda sabit tehlike oranı $\frac{1}{\sigma}$ ile üstel dağılıma dönüşmektedir (Carolynne, 2013).

6.2.6 Log-normal dağılımı

Olasılık teorisinde log-normal dağılım, logaritması normal dağılan rastgele değişkenlerin oluşturduğu dağılım yöntemidir. $\text{Log}(t)$ 'nin tanımlı olabilmesi, t 'nin pozitif değerler alabilmesi ile mümkündür. Yani, log-normal dağılımın uygulanabilmesi için, ilgili rastgele değişkenin pozitif değerler alması gerekir (Curt, 2012).

Bu model, normal dağılım modelinin dönüştürülmesi ile elde edilir. Örneğin Y , parametreleri μ ve σ olan normal dağılım ise, $X = e^Y$ log-normal dağılıma sahip olur (Hekimoğlu, 2016).

$$f(t; \mu, \sigma) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad t > 0 \quad +\infty > \mu > -\infty \quad \sigma > 0 \quad (6.26)$$



Şekil 6.10. Farklı parametre değerleri için log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonu

Burada μ , arıza zamanlarının aritmetik ortalamasının logaritmasıdır, σ ise, arıza zamanlarının standart sapmasının logaritmasıdır. Log-normal dağılımın $F(t; \mu, \sigma)$ fonksiyonu denklem (6.27) veya (6.28) biçiminde ifade edilebilir.

$$F(t; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln u - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] du \quad (6.27)$$

$$F(t; \mu, \sigma) = \Phi \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right) \quad (6.28)$$

Dağılım fonksiyonundan hareketle, log-normal dağılımın $R(t; \mu, \sigma)$ fonksiyonu denklem (6.29) ve (6.30)'daki biçimde elde edilir.

$$R(t; \mu, \sigma) = \int_t^{+\infty} \frac{1}{u\sigma\sqrt{(2\pi)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln u - \mu}{\sigma}\right)^2\right] du \quad (6.29)$$

$$R(t; \mu, \sigma) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad (6.30)$$

6.2.7 Log-lojistik dağılımı

Çok popüler bir dağılım olan log-lojistik (log-logistic-LL) dağılımı ilk olarak, Verhulst (1838) tarafından nüfus artışının modellenmesinde kullanılmıştır. LL dağılımı, Fisk (1961) tarafından bulunması nedeniyle Fisk dağılımı olarak da bilinir ve güvenilirlik, ömür tahmini analizi, sigorta, ekonomi, mühendislik, su bilimi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dağılım, tehlike oranının başlangıçta arttığı ve daha sonra düştüğü ve kimi zaman kambur şeklindeki hayatta kalma sürelerinin hesaplanmasına yönelik kullanılan modeller arasındadır ve oldukça esnek bir yapıya sahiptir (Bennett, 1983). Bu dağılım, Weibull ve log-normal dağılımına uygun bir alternatif olarak gösterilebilir (Al-Shomrani vd., 2016).

Bain'in (1974), LL dağılımını iyi bilinen bir lojistik değişkene dönüştürerek modellemiştir. Kantam vd. (2001), bu dağılımı kullanarak kabul örnekleme planını önermişlerdir. Benzer şekilde Kantam vd. (2006) LL dağılımını kullanarak ekonomik kabul örnekleme planı tasarlamış, Kantam ve Rao (2002), bu dağılımın maksimum olabilirlik tahmin edicisini elde etmiştir. Rosaiah vd. (2007) ise, LL dağılımının parametreleri için güven aralıkları türetmişlerdir. Üstel ve yarı lojistik dağılım yöntemlerini kullanarak doğrusal arıza hızının özellikleri, tahmini ve testi Rao (2013) tarafından kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır.

Bir rastgele değişken olan T , şekil parametresi $\alpha > 0$ olan ve ölçek parametresi $\sigma > 0$ olan LL dağılımına sahipse, $T \sim LL(\alpha, \sigma)$ biçiminde gösterilebilir. LL dağılımının $f(t; \alpha, \sigma)$, $F(t; \alpha, \sigma)$, $R(t; \alpha, \sigma)$, $h(t; \alpha, \sigma)$ ve $H(t)$ fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki denklemlerde ifade edilmiştir.

$$f(t; \alpha, \sigma) = \frac{(\alpha/\sigma)(t/\sigma)^{\alpha-1}}{(1+(t/\sigma)^\alpha)^2}, \quad \alpha > 0, \quad \sigma > 0, \quad t \geq 0 \quad (6.31)$$

$$F(t; \alpha, \sigma) = 1/(1+(t/\sigma)^\alpha), \quad \alpha > 0, \quad \sigma > 0, \quad t \geq 0 \quad (6.32)$$

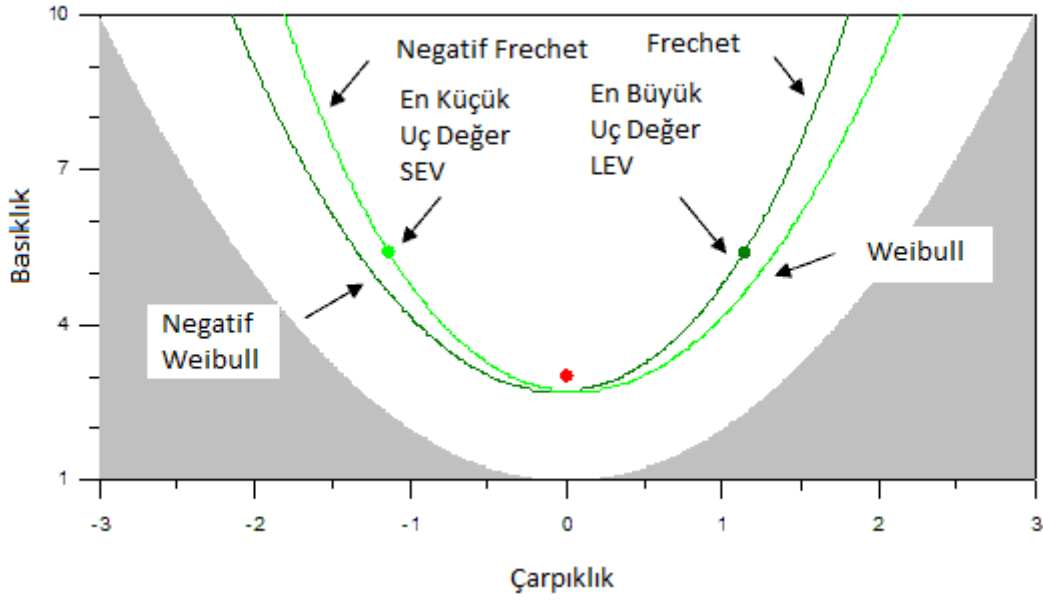
$$R(t; \alpha, \sigma) = 1 - F(t; \alpha, \sigma) = (t/\sigma)^{-\alpha} / (1+(t/\sigma)^\alpha), \quad \alpha > 0, \quad \sigma > 0, \quad t \geq 0 \quad (6.33)$$

$$h(t; \alpha, \sigma) = \frac{f(t; \alpha, \sigma)}{R(t; \alpha, \sigma)} = \frac{\alpha}{t[1+(t/\sigma)^\alpha]} \quad (6.34)$$

$$H(t) = -\log R(t) = \int_0^t h(u) du \quad (6.35)$$

6.2.8 En büyük uç değer dağılımı

En büyük uç değer (largest extreme value-LEV) dağılım ailesi, üç dağılımdan oluşur. Bunlar; Fréchet, negatif Weibull ve LEV dağılımlarıdır. Dağılımın çarpıklığı, herhangi bir ortalama ve standart sapma için 5,6051382'nin altında bir değere sahiptir. Şekil 6.11'de gösterildiği gibi, çarpıklık-basıklık grafiğinde bir eğri ile temsil edilen bir dağılım ailesidir. Dağılımın çarpıklığı 1,139547'nin üzerinde ise Fréchet dağılımı, 1,139547'nin altında ise, negatif Weibull dağılımı olarak adlandırılır. Çarpıklık değeri, 1,139547'ye eşit olduğunda, LEV dağılımı olarak adlandırılır.

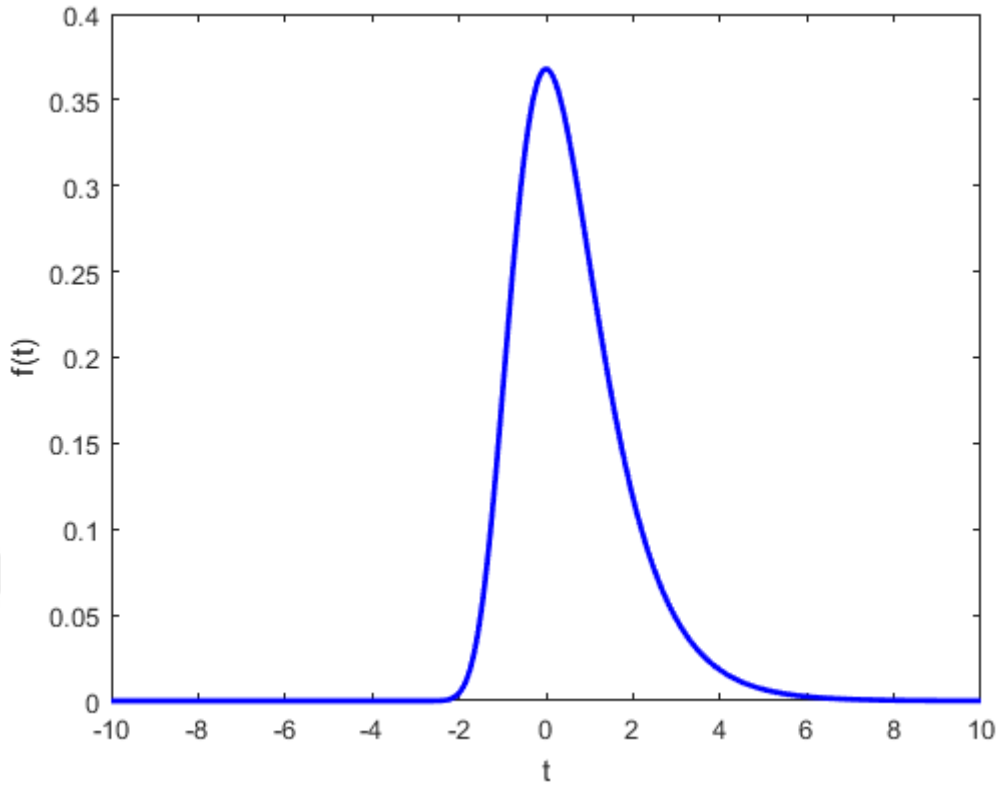


Şekil 6.11. LEV dağılım ailesi (Anonim-5, 2018)

T , LEV dağılımında bir değişken olmak üzere $(T \sim LEV(\sigma, \mu))$, T 'nin oyf denklemi, (6.36)'daki gibidir. Burada μ konum parametresi (modu), σ ise ölçek parametresidir.

$$f(t; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]; \quad t \in (-\infty, \infty) \quad (6.36)$$

LEV dağılımının $f(t; \sigma, \mu)$ grafiği Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12. LEV dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ($\mu = 0$, $\sigma = 1$)

T 'in dağılım fonksiyonu ise denklem (6.37)'de verilmiştir.

$$F(t; \sigma, \mu) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \right], \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.37)$$

Dağılım fonksiyonundan hareketle, güvenilirlik fonksiyonu denklem (6.38)'deki gibi elde edilir.

$$R(t; \sigma, \mu) = 1 - F(t; \mu, \sigma) = 1 - \exp \left[-\exp \left(-\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \right]; \quad (\mu, \sigma) > 0, \quad t > 0 \quad (6.38)$$

Tehlike oranı fonksiyonu, denklem (6.39)'daki gibidir.

$$h(t; \sigma, \mu) = \frac{f(t; \mu, \sigma)}{R(t; \mu, \sigma)} = \frac{1}{\sigma} \exp \left(-\frac{t - \mu}{\sigma} \right); \quad t \in (-\infty, \infty), \quad \mu \in (-\infty, \infty), \quad \sigma > 0 \quad (6.39)$$

6.2.9 En küçük uç değer dağılımı

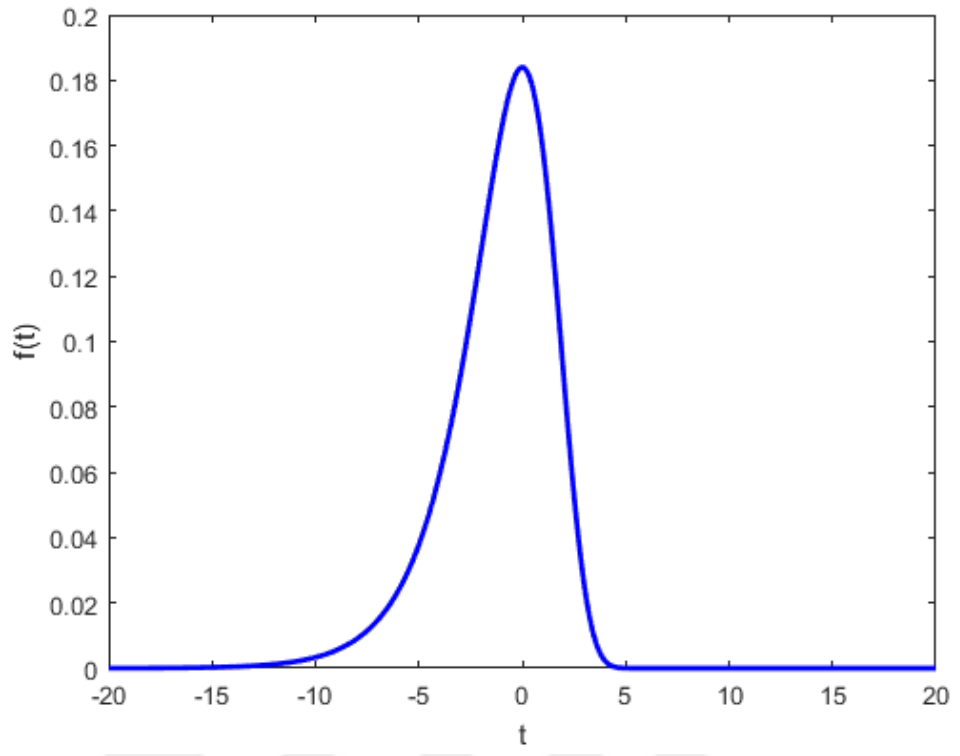
En küçük uç değer (smallest extreme value-SEV) dağılım modeli, aynı rastgele dağılım modellerinden çok fazla rastgele gözlemin minimumunu belirlemek için kullanılır. Bu dağılım, birçok özdeş ve bağımsız sürecin arızaya yol açabileceği ve arızanın meydana geleceği ilk zamanın süresini belirlediği için kullanışlıdır (Minitab, 2018). Ayrıca, sıcaklık düşüşü, kuraklık sırasında yağmur yağışı, malzemelerin elektriksel dayanıklılığı ve belli tipteki yaşam verilerinde, örneğin yaşlıların ölümleri gibi, bazı uç durumlarda kullanılır.

Şekil 6.13’de verildiği gibi, SEV ile Weibull dağılımı arasında yakın bir ilişki vardır. SEV dağılımı da Weibull dağılımında olduğu gibi bir ürünün minimum yaşam süresinin belirlenmesi için kullanışlıdır. SEV dağılımının oyf denklemi (6.40)’da ifade edilmiştir.

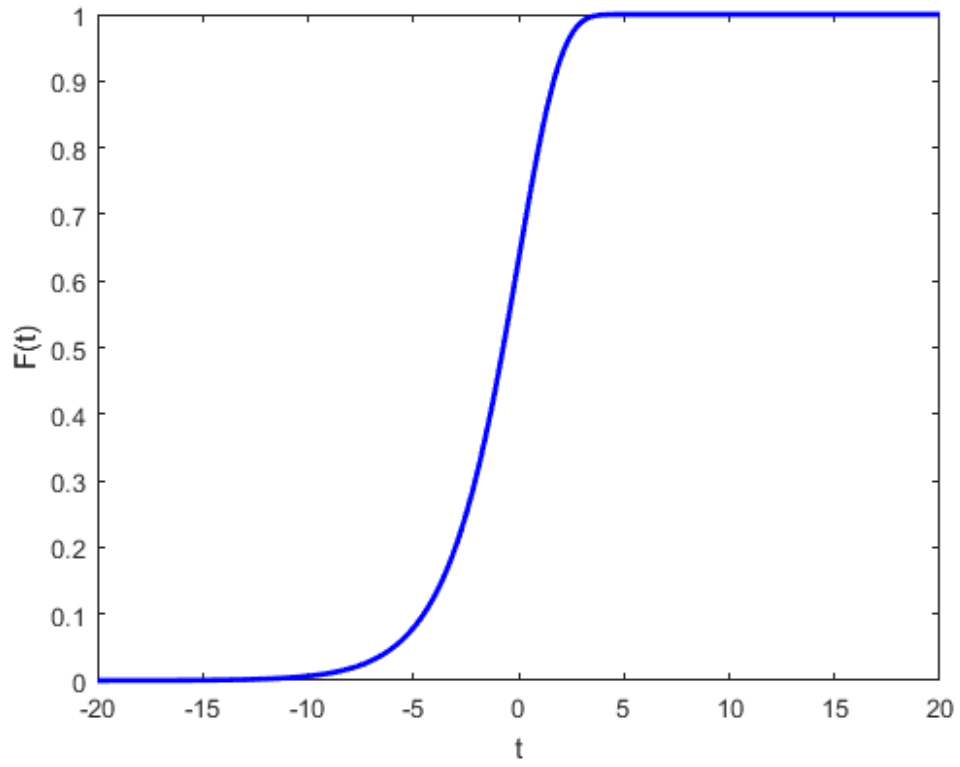
$$f(t; \sigma, \mu) = (1/\sigma) \exp[(t - \mu)/\sigma] \exp\{-\exp[(t - \mu)/\sigma]\}, \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.40)$$

Bu denklemdeki, μ , konum parametresidir, bu parametre dağılımın modunu ifade etmektedir ve $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değer alabilir. σ , ölçek parametresi olarak adlandırılır ve pozitif olmalıdır. Muhtemel t sonuçlarının aralığı $-\infty$ ile $+\infty$ arasındadır. Yaşam süreleri elbette pozitiftir. Böylece, sıfırın altındaki dağılım oranı, uç değer dağılımının pratikte tatmin edici olması için küçük olmalıdır. Önemli sonuçlar elde etmek için, yer parametresi μ ’nün, ölçek parametresi σ kadar büyük olması beklenir. Bu modelin $F(t; \sigma, \mu)$ fonksiyonu, aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$F(t; \sigma, \mu) = 1 - \exp\{-\exp[(t - \mu)/\sigma]\}, \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.41)$$



Şekil 6.13. SEV dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 6.14. SEV dağılımı için birikimli dağılım fonksiyonu

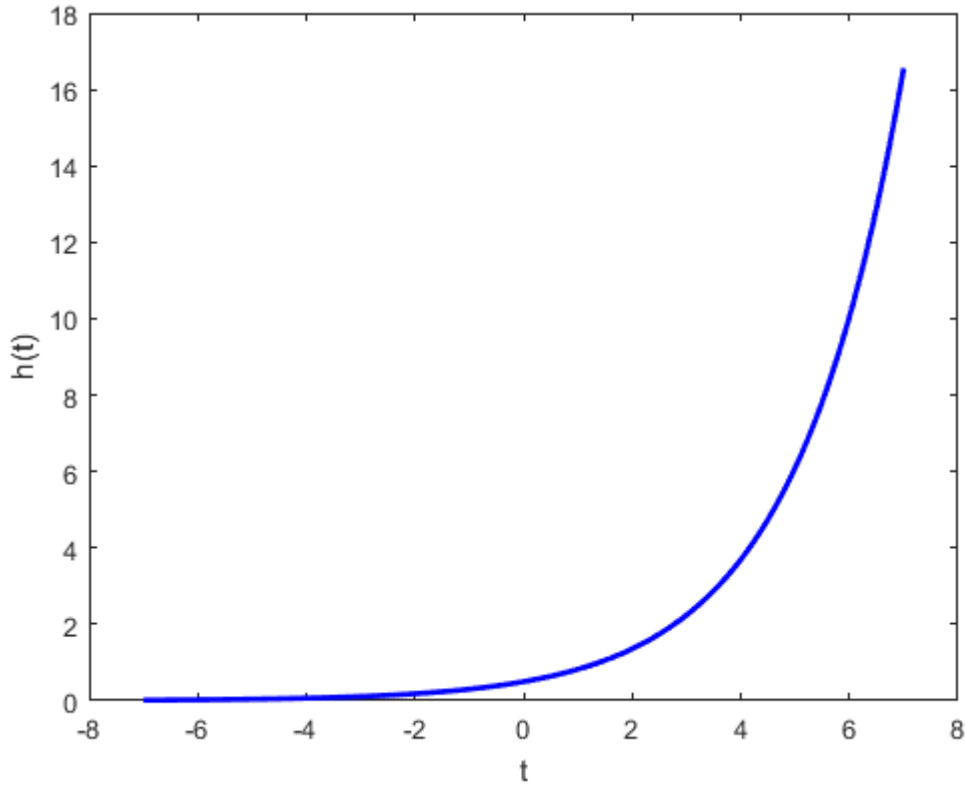
SEV dağılımı için $R(t; \sigma, \mu)$ ve $h(t; \sigma, \mu)$ fonksiyonları sırası ile,

$$R(t; \sigma, \mu) = 1 - F(t; \sigma, \mu) = \exp\{-\exp[(t - \mu)/\sigma]\}, \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.42)$$

$$h(t; \sigma, \mu) = \frac{f(t; \sigma, \mu)}{R(t; \sigma, \mu)} = (1/\sigma) \exp[(t - \mu)/\sigma], \quad -\infty < t < +\infty \quad (6.43)$$

şeklinde elde edilir.

Şekil 6.15 $h(t; \sigma, \mu)$ 'nin zamana bağlı olarak üstel olarak arttığını göstermektedir. SEV dağılımı, yaşlılıkta insan ölümleri hakkında yeterli bilgi sağlar. Yani, insanlar üstel olarak artan bir tehlike oranı ile yaşlanmaktadırlar.



Şekil 6.15. SEV dağılımı için tehlike oranı fonksiyonu

6.3 Kolmogorov-Smirnov Testi

Arıza verilerinin uygun olduğu olasılık dağılımının belirlenmesi aşamasında, istatistiksel olarak dağılıma uygunluk testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Dağılıma uygunluk çalışmalarında çok çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Ancak birçok paket programda bulunması ve hesaplama kolaylığı nedeniyle literatürde yaygın olarak Kolmogorov-Smirnov testi tercih edilmektedir.

1933 yılında, Rus matematikçi Andrey Nikolaevich Kolmogorov tarafından önerilen Kolmogorov-Smirnov (KS) testi, 1939 yılında Smirnov tarafından geliştirilmiştir. Bu test, beklenen ve birikimli dağılım fonksiyonları arasındaki maksimum mutlak farka dayanır.

KS test istatistiği; $D = \max |S_n(T) - F_0(T)|$ ifadesi kullanılarak elde edilir. Bu ifadede yer alan $S_n(T)$, örneklemden gözlenen T değişkeninin birikimli dağılım fonksiyonudur. $F_0(T)$ ise, T tesadüf değişkeninin beklenen dağılım fonksiyonudur. KS testi sonucunda çeşitli istatistikler elde edilmektedir.

- $KS = \max [D^+, D^-]$
- $D^+ = \max [i/n - u_i]$
- $D^- = \max [(i-1)/n - u_i]$

Bu ifadelerde, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ve n : örneklemden toplam gözlem sayısıdır. $u_i = F_0(T)$ ise, birikimli $N(0,1)$ dağılım fonksiyonudur.

Örnekleme ait gözlem değerleri küçükten büyüğe sıralanarak, $S_n(T)$ birikimli dağılım fonksiyonuna ait değerleri hesaplamak mümkündür. Daha sonra, gözlemlere teorik dağılım fonksiyonu değerleri hesaplanır. Bunlar arasındaki mutlak farklara dayalı olarak yukarıdaki istatistikler elde edilir (Özer, 2007).

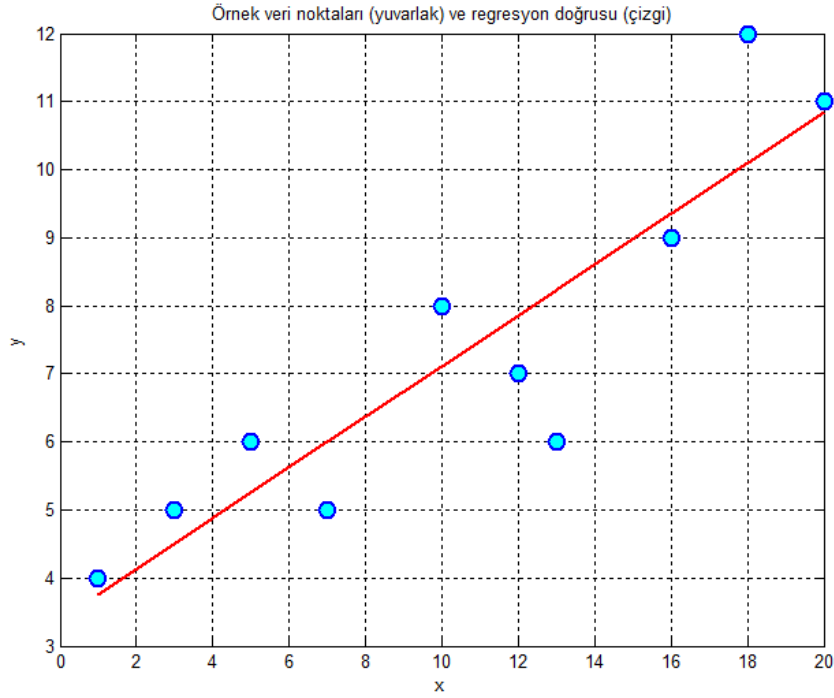
6.4 Parametre Tahmin Yöntemleri

Parametre tahmini, arıza verilerini bilinen bir istatistiksel dağılımı kullanılarak modellenmesine olanak sağlayan yöntemler bütünüdür. Parametrik analiz, gözlemlenen verilere en iyi uyan istatistiksel bir dağılım metodu seçilerek yapılır. İstatistiksel dağılım parametreleri tahmin edildikten sonra, parametrik analiz, herhangi noktadaki tehlike veya güvenilirliği tahmin etmek için kullanılır (Ford, 2006).

Ömür tahmini uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan parametre tahmin yöntemleri; en küçük kareler, momentler, maksimum olabilirlik ve L-momentler tahmin yöntemleridir. Aşağıdaki alt başlıklarda parametre tahmin yöntemleri ile ilgili ayrıntılar verilmektedir.

6.4.1 En küçük kareler tahmin yöntemi

En küçük kareler (least squares-EKK) yöntemi, tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler arasındaki sapmaların karelerini en aza indirmek için mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir model kurulması ve bu modelin parametrelerin tahmin edilmesi işlemidir (Van De Geer, 2005). Çoğu zaman bu veriler için tam olarak uyan bir fonksiyon bulmak mümkün olmaz, en iyi uyan fonksiyon belirlenmeye çalışılır. Bu verilere en iyi uyan fonksiyonu bulma sürecine regresyon analizi denir (Golayoglu, 2013). Bu durum, Şekil 6.16'da gösterilmektedir. Daireler veri noktalarını temsil etmekte ve çizgiye dik gelen noktalı çizgiler ise, tahmin edilen değerlerden sapmayı göstermektedir.



Şekil 6.16. Regresyon doğrusu

Güvenilirlikle ilgili veriler ele alındığı zaman, öncelikle veriye bir dağılım ataması yapılır. Sonrasında veri, ilgili dağılımın dağılım fonksiyonunu lineer hale getiren bir grafik üzerine yerleştirilir ve EKK tahmin yöntemi kullanılarak regresyon katsayıları tahmin edilir. Daha sonra regresyon katsayıları yardımıyla ilgili dağılımın parametre tahminleri hesaplanır. Böylelikle arıza zamanları için uygun olan dağılımın parametre değerleri tahmin edilmiş olur (Cömert, 2015).

6.4.2 Momentler tahmin yöntemi

Momentler (moments) tahmin yöntemi, 1800'lü yılların sonlarında Karl Pearson'a kadar dayanan en eski tahmin yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemi aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür.

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)' \in \Theta \subset \mathcal{R}^r$ olmak üzere, $r(r \geq 1)$ bileşenli θ parametre vektörünü tahmin etmek isteyelim. $X_1, X_2, \dots, X_n$, oyf $f(x; \theta)$, $\theta \in \Theta$ olan dağılımdan bir örneklem

olsun. Bu durumda $f(x;\theta)$, $\theta \in \Theta$ dağılımının kitle dağılımının momentleri (var olması koşulu altında),

$$\alpha_k = E_\theta(X^k) = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6.44)$$

şeklinde elde edilir.

Arıza zamanı verilerinden hareketle, örneklem momentleri denklem (6.45)'teki gibi hesaplanır.

$$\hat{\alpha}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^k \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6.45)$$

Tahmin edilecek parametre sayısı kadar aynı sıradaki ana kitle momentleri ile örneklem momentlerinin eşitlenmesi ile bir denklem sistemi elde edilir. Elde edilen ve $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ bilinmeyenlerine göre r tane denklemden oluşan denklem sisteminin çözümü olan,

$$\tilde{\theta}_1(X_1, X_2, \dots, X_n), \tilde{\theta}_2(X_1, X_2, \dots, X_n), \dots, \tilde{\theta}_r(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

istatistiklerine momentler tahmin edicileri denir (Öztürk, 2012).

6.4.3 Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi

Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi (maximum likelihood estimation-MLE) 1930'lu yıllarda İngiltere'de Ronald Fisher tarafından geliştirilmiştir. MLE tahmin yöntemi, parametrelerin tahmininde sıkça kullanılan tekniklerden biridir.

Bir $L(\theta)$ olabilirlik fonksiyonu, olasılık dağılımı θ parametresiyle $f(t, \theta)$ olduğu bilinen bir ana kitleden rasgele seçilmiş $(t_1, t_2, \dots, t_i)$ örnekleminin ortaya çıkma olasılığını

gösteren fonksiyondur. Burada α , bilinmeyen parametrelerdir $f(t)$, arıza süresi için ilgili yoğunluk fonksiyonudur ve parametreler $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i)$ ise, oyf $f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, t)$ olarak elde edilir.

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ örnekleminin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu $f_\theta(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)$ biçiminde yazılabilir. Gözlemlenen $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ değerleri göz önünde bulundurulduğunda, θ bilinmeyen bir rassal değişkendir. θ 'nın bir fonksiyonu olarak verilen $L(\theta) = f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta)$ olabilirlik fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır (Holmes, 2001).

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta) \quad (6.46)$$

Denklem (6.46)'daki fonksiyonu maksimum yapmak her zaman kolay olmayabilir. Bu durumda $L(\theta)$ fonksiyonunun denklem (6.47)'de verilen logaritmasını kullanmak daha kullanışlı olmaktadır. Her iki fonksiyon yardımıyla elde edilecek parametre tahmin sonucu aynıdır.

$$\ln(\theta) = \sum_{i=1}^n \log(f(x_i | \theta)) \quad (6.47)$$

Denklem (6.46) ya da (6.47) eşitliğinin ilgili parametrelere göre türevleri alınıp, sıfıra eşitlenerek normal denklem adı verilen eşitlikler elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \ln(L) = 0 \quad (6.48)$$

Bu eşitliklerin eş zamanlı çözümü ile elde edilen $\hat{\theta}$ tahmin edicisine, MLE tahmin edicisi denir. $\hat{\theta}$ MLE tahmin edicisi, $L(\theta)$ 'nın değerini en büyük yapan θ değeridir. Bir başka ifade ile gözlemlenen verilerin gözlemlenme olasılığını maksimum yapan parametre değeridir.

6.4.4 L-momentler tahmin yöntemi

L-momentler (L-moments) yöntemi, olasılık ağırlık momentleri yardımıyla bulunan istatistiksel değerler olup, olasılık ağırlık momentleri tabanlı analizlerin kullanımı kolaylaştıran ve doğruluğunu arttıran bir metottur (Aydoğan, 2008). L-momentleri λ ile gösterilir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0, \quad (6.49)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0, \quad (6.50)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0, \quad (6.51)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (6.52)$$

L-momentlerin boyutsuz versiyonlarını tanımlamak mümkündür. Bu, yüksek dereceli L-momentlerini λ_2 'ye bölmek ile gerçekleştirilir. L-moment oranını denklem (6.53)'de görmemiz mümkündür.

$$\tau_r = \lambda_r / \lambda_2, \quad r = 3, 4, \dots \quad (6.53)$$

L-momentleri oranları ölçüm ölçeğinden bağımsız olarak dağılımın şeklini ölçer. L-varyasyon katsayısı (L-coefficient of variation (L-CV))'ni ise şu şekilde tanımlamamız mümkündür.

$$\tau = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (6.54)$$

L-momentleri olan λ_1 ve λ_2 , L-CV τ , ve L-momentler oranları τ_3 ve τ_4 olasılık dağılımlarının özetlenmesi için çok kullanışlı parametrelerdir. L-momentler tahmin yönteminin dolayısı ile bahsedilen parametrelerin özelliklerinden şu şekilde bahsedebiliriz.

Varoluş, eğer dağılımın ortalaması varsa, o zaman tüm L-momentleri vardır. Teklik, eğer dağılımın ortalaması varsa, o zaman bu dağılımı tanımlayan L-momentleri biriciktir, diğer bir deyişle, aynı L-momentine sahip iki dağılım yoktur.

Terimler, λ_1 'e L-konumu ya da dağılımın ortalaması, λ_2 'ye L-ölçeği, τ 'ye L-CV, τ_3 'e L-çarpıklığı, τ_4 'e ise L-basıklığı denilmektedir. Numerik değerler, λ_1 herhangi bir değer alabilir. $\lambda_2 \geq 0$ olmak zorundadır. Yalnızca pozitif değerler alan bir dağılım için, $0 \leq \tau < 1$ olmalıdır. L-moment oranı, tüm $r \geq 3$ için $|\tau_r| < 1$ ifadesini sağlar. Tüm τ_r 'ler için sıkı ilişkiler kurulabilir. Örneğin τ_4 ile τ_3 arasında aşağıdaki ilişki kurulabilir.

$$\frac{1}{4}(5\tau_3^2 - 1) \leq \tau_4 < 1 \quad (6.55)$$

Lineer Dönüşümler, X ve Y rastgele değişkenli L-momentler (λ_r) ve $(\lambda_r)^*$ olsun ve $Y=aX+b$ olursa,

$$(\lambda_1)^* = a(\lambda_1) + b \quad (6.56)$$

$$(\lambda_2)^* = |a|(\lambda_2) \quad (6.57)$$

$$(\tau_r)^* = (\text{sign})^r(\tau_r) \quad (6.58)$$

Simetri, X, μ aritmetik ortalamasına sahip simetrik rastgele değişken olsun. Tüm x için, $\Pr(X \geq \mu + x) = \Pr(X < \mu - x)$ ise X'in tek sayılı L-moment oranları 0 olacaktır (Hosking ve Wallis, 1997).

$$(\tau_r) = 0, r = 3, 5, \dots \quad (6.59)$$

6.4.5 Üç parametrelili Weibull dağılımı

Bu kısımda, üç parametrelili Weibull dağılımının parametrelerinin tahmin edilmesi amacıyla; maksimum olabilirlik, L-momentler ve momentler tahmin yöntemlerinin denklemleri kullanılacaktır. EKK yöntemi, uygulamada karşılaşılan diğer olasılık dağılımlarının parametre tahminleri için uygulanamadığından ele alınmamıştır.

6.4.5.1 Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi

Weibull dağılımının parametrelerini tahmin etmek için birçok tahmin yöntemi önerilmiştir. MLE tahmin yöntemi (Sirvanci ve Yang, 1984), momentler tahmin yöntemi (Cohen vd., 1984; Cran, 1988), Bayes tahmin yöntemi (Tsionas, 2000), logaritmik moment tahmin edicisi (Johnson vd., 1994) ve olasılık ağırlıklı moment tahmini (Bartolucci vd., 1999) bunlardan bazılarıdır. Bunlar arasında en yaygın kullanıma sahip olan MLE tahmin yöntemidir. Weibull dağılımının parametre tahmini için L fonksiyonu ve logaritması (6.60) ve (6.61) denklemlerinde verilmiştir (Moeini vd., 2013).

$$L(x_1, \dots, x_n; \sigma, \alpha, \mu) = \prod_{i=1}^n \frac{\alpha}{\sigma} \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^\alpha}; \quad \sigma, \alpha > 0, \quad x_i \geq \mu \quad (6.60)$$

$$\ln[L(x_1, \dots, x_n; \sigma, \alpha, \mu)] = \ln\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right) + \sum_{i=1}^n \left(-\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^\alpha + (\alpha - 1) \ln\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right) \quad (6.61)$$

Bu fonksiyonların σ, α ve μ 'ye göre türevleri alınarak, eş zamanlı çözüldüğünde ilgili parametrelerin MLE tahmin edicileri elde edilmiş olur.

6.4.5.2 Momentler tahmin yöntemi

Üç parametrelili Weibull dağılımının ana kitle için (k^{th}) momenti,

$$\mu'_k = \mu + \frac{\sigma \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{k^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (6.62)$$

şeklinde elde edilir.

$k = 1$ olduğunda, başarısızlığın ortalama zamanı elde edilir.

$$\mu'_1 = \mu + \sigma \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (6.63)$$

$k = 2$ olduğunda, ikinci ana kitle momenti elde edilir.

$$\mu'_2 = \mu + \frac{\sigma \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)}{2^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (6.64)$$

Dağılımın varyansı, (6.63) ve (6.64) denklemleri kullanılarak, aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Var = \sigma^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^2 \right\} \quad (6.65)$$

$t_{(1)} \leq t_{(2)} \leq \dots \leq t_{(n)}$ verilen rastgele örneklemden gözlemleri göstermek üzere, örneklemden elde edilen k 'inci dereceden moment,

$$m'_k = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^k}{n} \quad (6.66)$$

şeklinde hesaplanır.

Cran (1988)'e göre, $m'_1 = \bar{t}$, verilerin aritmetik ortalamasını ifade eder. İlgili derecedeki ilk üç örneklem momentinin ana kitle momentine eşitlenmesi ile Weibull dağılımının parametreleri için momentler tahmin edicileri,

$$\mu = \frac{\mu'_1 \mu'_4 - \mu'^2_2}{\mu'_1 + \mu'_4 - 2\mu'_2},$$

$$\sigma = \frac{\mu'_1 - \mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}, \quad (6.67)$$

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{\ln(\mu'_1 - \mu'_2) - \ln(\mu'_2 - \mu'_4)}$$

olarak elde edilir.

Burada μ , Weibull dağılımının konum parametresidir ve $t_{(1)}$ den küçük değer alamaz. Bu durumda, μ 'nün momentler tahmin edicisi aşağıdaki gibi elde edilir (Chikr el-Mezouar, 2010).

$$\mu = t_{(1)} - \frac{\sigma \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{n^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (6.68)$$

6.4.5.3 L-momentler tahmin yöntemi

Weibull dağılımı için r 'inci dereceden ana kitle L-moment, denklem (6.69)'da verilmiştir.

$$L_r = \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k}^2 \sum_{j=0}^{r-k-1} \frac{(-1)^j \binom{r-k-1}{j}}{(k+j+1)} \left[\frac{\sigma \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{(k+j+1)^{\frac{1}{\alpha}}} + \mu \right] \quad (6.69)$$

$r=1, 2, 3$ ve 4 değerlerine karşılık gelen ilk dört L-moment, aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$L_1 = \sigma \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + \mu \quad (6.70)$$

$$L_2 = \sigma \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \quad (6.71)$$

$$L_3 = \sigma \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left[1 - 3 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + 2 \left(\frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \quad (6.72)$$

$$L_4 = \sigma \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left[1 - 6 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + 10 \left(\frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 5 \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right] \quad (6.73)$$

L-çarpıklık (τ_3) ve L-basıklık (τ_4) denklemleri ise,

$$\tau_3 = \frac{L_3}{L_2} = 1 - 2 \left(\frac{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - \left(\frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{\alpha}}}{1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}}} \right) \quad (6.74)$$

$$\tau_4 = \frac{L_4}{L_2} = 1 - 5 \left(\frac{\left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 2 \left(\frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1}{\alpha}}}{1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{\alpha}}} \right) \quad (6.75)$$

olarak hesaplanır.

Momentler tahmin edicisinde olduğu gibi örnekleme dayalı L-momentler, denklem (6.76) kullanılarak hesaplanabilir.

$$l_r = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} \binom{i-1}{r-k-1} \binom{n-i}{k}}{\binom{n}{r}} x_{i:n} \quad (6.76)$$

(6.70), (6.71) ve (6.72) denklemlerinin, (6.76) denklemi ile, verilen ilk üç örneklem momentine eşitlenmesi sonucunda,

$$l_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i:n} = \bar{x} = \sigma_L \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + \mu_L \quad (6.77)$$

$$l_2 = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (i-1)x_{i:n} - \bar{x} = \sigma_L \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left[1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right] \quad (6.78)$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{k=0}^{3-1} (-1)^k \binom{3-1}{k} \binom{i-1}{3-k-1} \binom{n-i}{k}}{\binom{n}{3}} x_{i:n} = \sigma_L \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left[1 - 3\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{\alpha}} + 2\left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right] \quad (6.79)$$

denklem sistemi elde edilir.

Bu denklem sisteminin çözümü ile elde edilecek olan sonuç, ilgili parametrelerin L-moment tahmin edicileri olarak adlandırılır (Abdul-Moniem, 2010).

6.4.6 En büyük uç değer dağılımı

Bu kısımda LEV dağılımının maksimum olabilirlik, momentler ve L moment tahmin edicilerinin elde edilişi açıklanacaktır.

6.4.6.1 Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi

LEV dağılımı için log-likelihood fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$\log L = -n \log \sigma - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (6.80)$$

Bu denklemden μ ve σ 'nın maksimum olabilirlik tahmin edicileri elde edebilmek amacıyla kısmi türevler alındığında,

$$\frac{\partial \log L}{\partial \mu} = \frac{n}{\sigma} - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} = 0 \quad (6.81)$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial \sigma} = -\frac{n}{\sigma} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma^2} \right) \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} \right] = 0 \quad (6.82)$$

denklemleri elde edilir.

Denklemlerin kapalı bir çözümü yoktur. Bu nedenle iteratif olarak μ ve σ 'nın maksimum olabilirlik tahmin edicileri hesaplanabilir (Srivastava ve Kumar, 2011).

6.4.6.2 Momentler tahmin yöntemi

LEV dağılımının parametreleri için momentler tahmin edicisi aşağıdaki şekilde elde edilir. r 'inci dereceden ana kitle momenti, denklem (6.83)'deki gibi elde edilir.

$$\mu_r = E(X^r) = \sum_{k=0}^r \binom{r}{k} \sigma^{r-k} \int_0^\infty y^{r-k} \exp[-y + \exp(-y)] dy \quad (6.83)$$

$r=1$ ve $r=2$ durumunda, gerekli hesaplama ve sadeleştirme işlemlerinin yapılmasının ardından denklem (6.84) ve (6.85) elde edilir.

$$\mu_1 = \sigma\gamma + \mu \quad (6.84)$$

$$\mu_2 = \sigma^2 J + 2\sigma\mu\gamma + \mu^2 \quad (6.85)$$

Burada, γ 'nın yaklaşık değeri, 0,577215 ve J 'nin yaklaşık değeri ise, 1,978 olarak bulunur. Yukarıdaki denklem sisteminin çözülmesiyle, μ ve σ 'nın momentler tahmin edicileri,

$$\sigma = \left[\frac{\overline{x^2} - \bar{x}^2}{J - \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.86)$$

$$\mu = \bar{x} - \gamma \sigma \quad (6.87)$$

olarak elde edilir.

Buradaki $\bar{x}$ ve $\overline{x^2}$, ilk iki örneklem momentleridir (Smail ve Cenac, 2004).

6.4.6.3 L-momentler tahmin yöntemi

μ ve σ parametrelerinin L moment tahmin edicilerinin elde edilebilmesi için, öncelikle birikimli dağılım fonksiyonunun tersinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu fonksiyona kantil fonksiyonu denir. LEV dağılımı için kuantil fonksiyonu,

$$x(F) = \mu - \sigma \{\ln(-\ln(F))\} \quad (6.88)$$

olarak elde edilir. r^{th} dereceden bir moment olan β_r ,

$$\beta_r = \int_0^1 x(F) F^r dF = \frac{1}{r+1} [\mu + \sigma(\gamma + \ln(r+1))] \quad (6.89)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem (6.89)'daki γ , Euler sabiti olarak bilinir ve yaklaşık değeri 0,577215'tir. σ ve μ 'nın L moment tahmin edicileri sırasıyla, (6.90) ve (6.91) denklemleri ile verilmiştir.

$$\sigma = \frac{(r+1)\beta_r - (s+1)\beta_s}{\ln(r+1) - \ln(s+1)} \quad (6.90)$$

$$\mu = (r+1)\beta_r - \mu[\ln(r+1) + \gamma] \quad (6.91)$$

Buradan örnekleme dayalı bir momentler denklemi (6.92) ile hesaplanabilir.

$$\beta_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\binom{i-1}{r}}{\binom{n-1}{r}} x_{(i)} \quad r = 1, \dots, n \quad (6.92)$$

$x_{(i)}$ değerleri, $x_1, \dots, x_n$ 'in örneklem verilerinin sıralanmış halini ifade eder (Smail ve Cenac, 2004).

6.4.7 En küçük uç değer dağılımı

Bu kısımda, daha önce Weibull ve LEV dağılımında olduğu gibi, SEV dağılımının parametre tahminleri için maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin edicileri ele alınacaktır.

6.4.7.1 Maksimum olabilirlik tahmin yöntemi

SEV dağılımı için log-likelihood fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$\log L = -n \log \sigma + \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (6.93)$$

Denklem (6.93)'ün μ ve σ 'ya göre türevleri alındığında,

$$\frac{\partial \log L}{\partial \mu} = -\frac{n}{\sigma} - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n \exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} = 0 \quad (6.94)$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial \sigma} = -\frac{n}{\sigma} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma^2} \right) \left[\exp \left\{ - \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right) \right\} - 1 \right] = 0 \quad (6.95)$$

eşitlikleri elde edilir.

Bu eşitliklerin çözümü için, iteratif yaklaşımlar kullanılır (Srivastava ve Kumar, 2011).

6.4.7.2 Momentler tahmin yöntemi

SEV dağılımının parametreleri için momentler tahmin edicisi, LEV dağılıma benzer olarak aşağıdaki şekilde elde edilebilir. r 'inci dereceden ana kitle momenti,

$$\mu_r = E(X^r) = \sum_{k=0}^r \binom{r}{k} \sigma^{r-k} \int_{-\infty}^{\infty} y^k \exp[-y + \exp(-y)] dy \quad (6.96)$$

eşitliği yardımıyla elde edilebilir.

Bu denklemde $r = 1$ ve $r = 2$ alındığında, ilk iki ana kitle momenti,

$$\mu_1 = \mu - \sigma\gamma \quad (6.97)$$

$$\mu_2 = \sigma^2 J + 2\sigma\mu\gamma + \mu^2 \quad (6.98)$$

olarak bulunur.

Yukarıdaki denklem sisteminin çözülmesiyle, μ ve σ 'nın momentler tahmin edicileri,

$$\sigma = \left[\frac{\overline{x^2} - \bar{x}^2}{J - \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.99)$$

$$\mu = \bar{x} + \gamma\sigma \quad (6.100)$$

olarak elde edilir (Smail ve Cenac, 2004).

6.4.7.3 L-momentler tahmin yöntemi

SEV dağılımının μ ve σ parametreleri için L moment tahmin edicileri, LEV dağılımına benzer olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$x(F) = \mu - \sigma \{\ln(-\ln(1-F))\} \quad (6.101)$$

Ana kitlenin r^{th} dereceden L momenti olan β_r ,

$$\beta_r = \int_0^1 x(F) F^r dF = \frac{1}{r+1} [\mu + \sigma(\gamma + \ln(r+1))] \quad (6.102)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem 6.102'deki γ , Euler sabiti olarak bilinir ve yaklaşık değeri 0,577215'tir. σ ve μ 'nün L moment tahmin edicileri sırasıyla, (6.103) ve (6.104) denklemleri ile verilmiştir.

$$\sigma = \frac{(r+1)\beta_r - (s+1)\beta_s}{\ln(r+1) - \ln(s+1)} \quad (6.103)$$

$$\mu = (r+1)\beta_r + \mu [\ln(r+1) + \gamma] \quad (6.104)$$

Buradan örnekleme dayalı bir momentler denklemi (6.105) ile hesaplanabilir.

$$\beta_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\binom{i-1}{r}}{\binom{n-1}{r}} x_{(i)} \quad r = 1, \dots, n \quad (6.105)$$

$x_{(i)}$ değerleri, $x_1, \dots, x_n$ 'in örneklem verilerinin sıralanmış halini ifade eder (Smail ve Cenac, 2004).

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hızlı tren sinyalizasyon sistemindeki bazı bileşenlerin güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bu bileşenler; E I/O kartı, SEC kartı, elektrons yeşil sinyal lambası, baliz anteni, RG213/214 konnektörü ve RG400 konnektöründen oluşmaktadır. Analizler, bileşenlerden elde edilen gerçek arıza verileri kullanılarak elde edilmiştir. E I/O ve SEC kartlarına ait veriler, 2009-2017 yılları arasındaki 9 yıllık süre kapsamında kaydedilen arızalardan elde edilmiştir. Bu arızalar E I/O ve SEC kartları için sırasıyla, Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1’de bulunan 456. ve 498. kilometrelerdeki teknik binalarda meydana gelmiştir. Elektrons yeşil sinyal lambasına ait veriler, 2011-2017 yılları arasındaki 7 senelik süre kapsamında gerçekleşen arızalardan oluşmaktadır. İlgili bileşene ait arızalar, Ankara-Konya YHT Projesi kapsamındaki bölgelerden biri olan Siding-2’deki S03 numaralı sinyale aittir. Baliz anteni, RG213/214 ve RG400 konnektörlerine ait arıza verileri, Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1 ve Ankara-Konya YHT Projesi kapsamındaki muhtelif il ve ilçeler arasında seferler yapan 65008 TCF adlı hızlı trenden elde edilmiştir. Bu bileşenlere ait veriler, 2012-2017 yılları arasındaki 6 yıllık süre zarfında kaydedilen arızalardan meydana gelmektedir.

7.1 Elektronik Giriş-Çıkış Kartı

E I/O kartının sinyalizasyon sistemindeki işlevi tezin 4.1.1.5 bölümünde aktarılmıştır. E I/O kartının güvenilirlik analizini için ilk olarak, bu kartın arıza zamanlarının hangi dağılıma uygun olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Arıza verilerinin uygun olduğu dağılım şeklini belirlemek amacıyla güvenilirlik analizinde yer alan ve yaygın olarak kullanılan dağılımlar ile son yıllarda arıza verilerinin modellenmesi için önerilen 14 farklı olasılık dağılımı göz önünde bulundurulmuştur. E I/O kartı için, 2009 yılında Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1’de hızlı tren işletmeciliğinin başladığı ilk günden, 2017 yılı Mayıs ayına kadar 456. kilometredeki teknik binada gözlemlenen toplam 13 adet arıza kaydı söz konusudur. Bu veriler için dağılıma uygunluk araştırması Kolmogorov-Smirnov testi ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. E I/O kartı için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,146566	0,123136	0,146566	0,958793
<i>Exponential</i>	0,236387	0,440344	0,440344	0,019053
<i>Exponential Power</i>	0,150404	0,128197	0,150404	0,948894
<i>Folded Normal</i>	0,157561	0,131174	0,157561	0,926967
<i>Gamma</i>	0,152237	0,123707	0,152237	0,943705
<i>Half Normal</i>	0,0949373	0,153084	0,153084	0,941208
<i>Inverse Gaussian</i>	0,146509	0,123704	0,146509	0,958929
<i>Largest Extreme Value</i>	0,142537	0,12661	0,142537	0,967794
<i>Loglogistic</i>	0,153862	0,114071	0,153862	0,938858
<i>Maxwell</i>	0,159378	0,126803	0,159378	0,920692
<i>Rayleigh</i>	0,157721	0,124283	0,157721	0,926422
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,144687	0,127241	0,144687	0,963167
<i>Weibull</i>	0,154949	0,12884	0,154949	0,935486
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,129864	0,135701	0,135701	0,979943

Çizelge 7.1’de görüleceği üzere, E I/O kartının ele alınan her olasılık dağılımına uyumunu gösteren olasılık değerleri, tablonun son sütununda yer almaktadır. Bu olasılık değerlerinden en yüksek olasılığa sahip olan dağılım, ilgili arıza verilerinin modellenmesi için en uygun olan dağılımdır. E I/O kartı için en uygun olan olasılık dağılımı, 0,979943 olasılık değeri ile üç parametrelili Weibull dağılımı olarak belirlenmiştir.

İlgili kart için uygun olan olasılık dağılımının üç parametrelili Weibull olarak belirlenmesinin ardından, bu dağılımın parametrelerini tahmin edebilmek için maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler parametre tahmin yöntemlerinden yararlanılmıştır. *Konum* (μ), *Şekil* (α) ve *Ölçek* (σ) parametreleri için tahmin değerleri, R istatistik paket programı kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı parametre tahmin yöntemleri ile elde edilen tahmin değerleri, Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Üç parametrelili Weibull dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Moment Tahmin Yöntemi
$Konum (\mu)$	123,129	70,8363	39,675923
$\text{Şekil } (\alpha)$	1,53439	2,564	2,85562
$\text{Ölçek } (\sigma)$	115,15	176,3583	210,676744

Donanıma ait verilerin uygunluk gösterdiği dağılımın belirlenip parametre tahminlerinin yapılmasının ardından, bunlardan hareketle ürünün güvenilirlik analizi çalışması yapılmıştır. Her bir tahmin yönteminden elde edilen parametre tahmin değerleri kullanılarak, tehlike oranı ve güvenilirlik fonksiyonlarının olasılıkları hesaplanmıştır. E I/O kartı için elde edilen sonuçlar, Çizelge 7.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. E I/O kartı için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
124	0,00098	0,999444	0,002229	0,954843	0,002478	0,929429
150	0,006123	0,898324	0,004154	0,879632	0,004081	0,854139
180	0,00914	0,712647	0,006866	0,746522	0,006377	0,730995
210	0,011462	0,522597	0,010038	0,579955	0,009136	0,579904
240	0,013431	0,359506	0,013622	0,407094	0,012345	0,420638
270	0,015175	0,233964	0,017584	0,255153	0,015993	0,275281
300	0,01676	0,144863	0,021899	0,141241	0,020073	0,160431
330	0,018224	0,085692	0,026545	0,068347	0,024576	0,082202
360	0,019592	0,048585	0,031506	0,028634	0,029496	0,036567

Çizelge 7.3'te görüleceği üzere, üç parametrelili Weibull dağılımının 124. günden başlayarak sırasıyla 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. günlerdeki tehlike oranı ve güvenilirlik fonksiyonlarına ait olasılık değerleri maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin yöntemleri sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler göstermektedir ki, E I/O kartının yaşam olasılığı zaman ilerledikçe azalmaktadır. Özellikle, 210. günde hayatta kalma olasılığında ani bir düşüş görülmektedir. 210. günden itibaren

ise, bu değer kademeli olarak azalmaya devam etmektedir. Gerçekleşen bu ani düşüşten yola çıkarak, 180. günün ardından E I/O kartının işlevselliğinin, teknik ekipler tarafından kontrol edilmesi ve izlenmesi yerinde olacaktır.

7.2 Sinyal Elektronik Kontrol Kartı

SEC kartının sinyalizasyon sistemindeki görevi, tezin 4.1.1.5 başlığı altında ifade edilmiştir. Bu bölümde, SEC kartının güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, E I/O kartında olduğu gibi arıza verilerinin dağılım şekli belirlenmeye çalışılmıştır. SEC kartı için, 2009-2017 yılları arasındaki 9 senelik süre kapsamında, Ankara İstanbul YHT Projesi Etap-1’de 498. kilometredeki teknik binada gerçekleşen 10 adet arıza kaydı bulunmaktadır. Elde edilen arıza verilerinin hangi dağılıma uygun olduğu, Kolmogorov-Smirnov testi yardımı ile belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 7.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. SEC kartı için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,269828	0,226578	0,269828	0,544636
<i>Exponential</i>	0,23945	0,457716	0,457716	0,046055
<i>Exponential Power</i>	0,125283	0,261676	0,261676	0,568684
<i>Folded Normal</i>	0,336432	0,221072	0,336432	0,261035
<i>Gamma</i>	0,288089	0,224165	0,288089	0,45152
<i>Generalized Gamma</i>	0,261029	0,23057	0,261029	0,571891
<i>Half Normal</i>	0,294678	0,239858	0,294678	0,420927
<i>Inverse Gaussian</i>	0,268763	0,227438	0,268763	0,550455
<i>Largest Extreme Value</i>	0,230566	0,226638	0,230566	0,72501
<i>Loglogistic</i>	0,173558	0,239563	0,239563	0,679941
<i>Maxwell</i>	0,326915	0,194073	0,326915	0,292581
<i>Rayleigh</i>	0,327994	0,18744	0,327994	0,288867
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,378727	0,261362	0,378727	0,151305
<i>Weibull</i>	0,324701	0,254532	0,324701	0,300314
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,166478	0,399363	0,399363	0,113314

Çizelge 7.4'ün son sütununda, SEC kartı için her bir olasılık dağılım metoduna ait olasılık değerleri görülmektedir. Bu değerler incelendiğinde, olasılık değerlerinden en yükseğine sahip olan dağılım, ilgili kartın arıza verilerinin modellenmesi için en uygun olan dağılımdır. Olasılığı en büyük olan dağılımın, 0,72501 değeri ile LEV dağılımı olduğu anlaşılmıştır.

En uygun olan olasılık dağılım yöntemi olarak LEV dağılımının belirlenmesinin ardından, bu dağılımın parametrelerinin tahmini 3 farklı yöntemle elde edilmiştir. Elde edilen *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) parametre tahmin değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. LEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Momentler Tahmin Yöntemi
<i>Konum</i> (μ)	257,328	250,2412	193,722
<i>Ölçek</i> (σ)	64,9807	85,43504	58,3745

Parametre değerlerinin tahmin edilmesinin ardından elde edilen bu değerler, maksimum olabilirlik momentler ve L-momentler tahmin yöntemlerinin tehlike oranı ve güvenilirlik fonksiyonlarına yerleştirilerek $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri elde edilmiştir. SEC kartının güvenilirlik analizi çalışmasının sonuçları Çizelge 7.6'da görülmektedir.

Çizelge 7.6. SEC kartı için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
30	0,508801	1	0,154143	0,999998	0,283032	1
60	0,32066	1	0,108498	0,999906	0,169294	0,999949
90	0,202089	0,999998	0,07637	0,998533	0,101262	0,997291
120	0,127362	0,999745	0,053756	0,989874	0,060569	0,970862
150	0,080267	0,99457	0,037838	0,960547	0,036229	0,879351
180	0,050586	0,962639	0,026633	0,897245	0,02167	0,717759
210	0,031881	0,874021	0,018747	0,79843	0,012962	0,530764
240	0,020092	0,728991	0,013195	0,67611	0,007753	0,364019
270	0,012663	0,560811	0,009288	0,547751	0,004638	0,237164
300	0,00798	0,404627	0,006538	0,42796	0,002774	0,149495
330	0,005029	0,278782	0,004602	0,325073	0,001659	0,092312
360	0,00317	0,18614	0,003239	0,241743	0,000992	0,056287

Çizelge 7.6’da görüleceği üzere, LEV dağılımının maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin yöntemlerinin yardımı ile elde edilen tehlike oranı ve güvenilirlik olasılık değerleri, 30. günden başlanılarak, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. güne kadar sıralanmıştır. Hesaplanan değerler göstermektedir ki, SEC kartının yaşam olasılığı zaman ilerledikçe azalmaktadır. Bilhassa, 210. günde güvenilirlik olasılığı değerinde keskin bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Görülen bu düşüşten yola çıkılarak SEC kartının kontrolünün, 180. günden itibaren teknik ekipler tarafından yapılması yerinde olacaktır.

7.3 Elektrons Yeşil Sinyal Lambası

Elektrons yeşil sinyal lambasına ait güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesi için ilk olarak arıza verilerinin dağılım şeklinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu donanım için, Ankara-Konya YHT Projesi’nde 2011 ve 2017 yılları arasında gerçekleşen 13 adet arızalanma durumu gözlemlenmiştir. Arıza verilerin hangi dağılıma uygun olduğu Kolmogorov-Smirnov testi kullanılarak araştırılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 7.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.7. Elektrans yeşil sinyal lambası için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,162154	0,285722	0,285722	0,282311
<i>Exponential</i>	0,216475	0,403755	0,403755	0,039984
<i>Exponential Power</i>	0,0843916	0,171971	0,171971	0,869894
<i>Folded Normal</i>	0,0996357	0,174441	0,174441	0,858564
<i>Gamma</i>	0,135661	0,186761	0,186761	0,796704
<i>Half Normal</i>	0,13798	0,334257	0,334257	0,136948
<i>Inverse Gaussian</i>	0,163259	0,287105	0,287105	0,276975
<i>Largest Extreme Value</i>	0,152452	0,166443	0,166443	0,893699
<i>Maxwell</i>	0,113315	0,174482	0,174482	0,858373
<i>Rayleigh</i>	0,122924	0,217742	0,217742	0,619968
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,163749	0,183281	0,183281	0,814981
<i>Weibull</i>	0,0862175	0,177704	0,177704	0,843001
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,150425	0,185002	0,185002	0,806012

Çizelge 7.7'nin en son sütununda elektrans yeşil sinyal lambası için olasılık dağılım metotlarına ait olasılık değerleri bulunmaktadır. Bu değerler incelendiğinde, 0,893699 olasılık değerine sahip olan LEV dağılımı, arıza verilerinin modellenmesi için en uygun olasılık dağılımı olarak görülmektedir.

İlgili donanım için uygun olan olasılık dağılımının LEV olarak belirlenmesinin ardından, bu dağılımın parametrelerini tahmin edebilmek için 3 farklı parametre tahmin yöntemlerinden faydalanılmıştır. *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) parametreleri, R istatistik paket programı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen tahmin değerleri, Çizelge 7.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.8. LEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Momentler Tahmin Yöntemi
<i>Konum</i> (μ)	135,469	139,9897	136,5395
<i>Ölçek</i> (σ)	68,6534	50,69213	56,6695

Bu bileşen için, en uygun olan olasılık dağılımının ve bu dağılımın parametrelerinin belirlenmesinin ardından, elde edilen parametre değerleri, her bir parametre tahmin yöntemi için $h(t)$ ve $R(t)$ fonksiyonlarına yerleştirilmiş, bu fonksiyonların olasılık değerleri elde edilmiştir. Elektrons yeşil sinyal lambasına ait güvenilirlik analizi sonuçları, Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Elektrons yeşil sinyal lambası için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
30	0,06769	0,990411	0,172732	0,999843	0,11565	0,998575
60	0,043727	0,950312	0,095577	0,992133	0,06811	0,978929
90	0,028247	0,856187	0,052885	0,931497	0,04012	0,897031
120	0,018247	0,714275	0,029263	0,773135	0,02363	0,73787
150	0,011787	0,554805	0,016192	0,559922	0,01392	0,545509
180	0,007614	0,407117	0,008959	0,365026	0,0082	0,371516
210	0,004919	0,286587	0,004957	0,222215	0,00483	0,23932
240	0,003177	0,195992	0,002743	0,129819	0,00284	0,1488
270	0,002053	0,131441	0,001518	0,074056	0,00167	0,090524
300	0,001326	0,087011	0,00084	0,04168	0,00099	0,054352
330	0,000857	0,05711	0,000465	0,023282	0,00058	0,032379
360	0,000553	0,037275	0,000257	0,01295	0,00034	0,019199

Elde edilen sonuçlar, 30. günden başlayarak 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. günler için sıralanmıştır. Çizelge 7.9’daki olasılık değerleri incelendiğinde, yaşam olasılığının gün geçtikçe azaldığı görülmektedir. Özellikle, 150. günde meydana gelen sert düşüş göstermektedir ki, 120. günün ardından teknik personel, ilgili donanımın işlevselliğini kontrol etmelidir.

7.4 Baliz Anteni

Baliz anteninin arıza zamanlarının güvenilirlik analizinin yapılabilmesi için, öncelikle bu verilere uygun olan dağılım metodunun belirlenmesi gerekir. Baliz anteni için, 2012 yılları ile 2017 yılları arasındaki 6 yıllık süreçte, Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1 ve Ankara-Konya YHT Projesi’nde kullanılan 65008 TCF isimli trende meydana gelen

toplam 9 adet arıza belirlenmiştir. Bu verilerin dağılım metodunun belirlenmesi için Kolmogorov-Smirnov testinden yararlanılmış, elde edilen test sonuçları Çizelge 7.10’da sıralanmıştır.

Çizelge 7.10. Baliz anteni için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,195276	0,419415	0,419415	0,119878
<i>Exponential</i>	0,237303	0,389871	0,389871	0,175784
<i>Exponential Power</i>	0,340496	0,47378	0,47378	0,0551158
<i>Folded Normal</i>	0,304575	0,368495	0,368495	0,227928
<i>Gamma</i>	0,243908	0,390303	0,390303	0,174838
<i>Half Normal</i>	0,336472	0,390526	0,390526	0,17435
<i>Inverse Gaussian</i>	0,203906	0,442125	0,442125	0,0876505
<i>Largest Extreme Value</i>	0,254842	0,370618	0,370618	0,222264
<i>Loglogistic</i>	0,243938	0,352917	0,352917	0,272968
<i>Maxwell</i>	0,27026	0,377253	0,377253	0,20527
<i>Rayleigh</i>	0,277913	0,381551	0,381551	0,194818
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,283992	0,348996	0,348996	0,28531
<i>Weibull</i>	0,265862	0,39132	0,39132	0,172626
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,233659	0,359858	0,359858	0,252129

Çizelge 7.10 incelendiğinde, baliz antenine ait arıza verilerinin modellemesinde kullanılacak olan en uygun dağılımın, 0,28531 olasılık değeri ile SEV dağılımı olduğu anlaşılmaktadır.

Baliz anteni arıza verileri için en uygun olan dağılımın SEV dağılımı olarak belirlenmesinin ardından, bu dağılımın parametrelerinin tahmin edilmesi gerekmektedir. 3 farklı parametre tahmin yöntemi kullanılarak elde edilen *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) tahmin değerleri Çizelge 7.11’de yer almaktadır.

Çizelge 7.11. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Momentler Tahmin Yöntemi
Konum (μ)	312,2	162,9277	157,2878
Ölçek (σ)	117,984	127,0277	136,7984

Elde edilen parametre tahmin değerleri maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin yöntemlerinin $h(t)$ ve $R(t)$ formüllerine yerleştirilmiş ve ilgili donanıma ait güvenilirlik analizi tamamlanmıştır. Analiz sonuçlarını, Çizelge 7.12'den incelememiz mümkündür.

Çizelge 7.12. Baliz anteni için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
30	0,09267	0,99998	0,02242	0,94201	0,01854	0,92080
60	0,07186	0,99979	0,01770	0,89445	0,01489	0,86950
90	0,05573	0,99861	0,01398	0,83061	0,01195	0,80512
120	0,04322	0,99390	0,01104	0,75391	0,00960	0,73108
150	0,03351	0,98082	0,00872	0,66949	0,00771	0,65171
180	0,02599	0,95341	0,00688	0,58282	0,00619	0,57131
210	0,02015	0,90726	0,00543	0,49860	0,00497	0,49350
240	0,01563	0,84182	0,00429	0,42023	0,00399	0,42090
270	0,01212	0,76069	0,00339	0,34979	0,00321	0,35513
300	0,00940	0,67009	0,00268	0,28817	0,00258	0,29694
330	0,00729	0,57682	0,00211	0,23541	0,00207	0,24643
360	0,00565	0,48669	0,00167	0,19099	0,00166	0,20326

Çizelge 7.12'de görüleceği üzere, $h(t)$ ve $R(t)$ fonksiyonları ve elde edilen parametreler kullanılarak hesaplanan olasılık değerleri 30. günden başlayarak, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. günler için sıralanmıştır. 180. günde incelenen yaşam olasılığı değerlerinde ani bir düşüş görülmektedir. Bu sebeple 150. günün ardından ilgili donanımın işlevselliği, teknik ekipler tarafından kontrol edilmelidir.

7.5 RG213/214 Konnektör

RG213/214 konnektöre ait arıza verileri Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1 ve Ankara-Konya YHT Projesi'nde kullanılan 65008 TCF adlı hızlı trenden elde edilmiştir. 2012 yılının başından 2017 yılının Nisan ayına kadar, bu bileşene ait 10 adet arıza meydana gelmiştir. Bu veriler için dağılıma uygunluk araştırması, Kolmogorov-Smirnov testi ile yapılmış, elde edilen sonuçlara Çizelge 7.13'te yer verilmiştir.

Çizelge 7.13. RG213/214 konnektör için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,227138	0,365366	0,365366	0,180984
<i>Exponential</i>	0,290926	0,349777	0,349777	0,221272
<i>Exponential Power</i>	0,407298	0,441246	0,441246	0,0601206
<i>Folded Normal</i>	0,357176	0,327203	0,357176	0,201353
<i>Gamma</i>	0,269568	0,347685	0,347685	0,227171
<i>Half Normal</i>	0,403015	0,340057	0,403015	0,107491
<i>Inverse Gaussian</i>	0,222527	0,39122	0,39122	0,12724
<i>Largest Extreme Value</i>	0,289928	0,337872	0,337872	0,256498
<i>Loglogistic</i>	0,251814	0,327341	0,327341	0,291109
<i>Maxwell</i>	0,308332	0,335054	0,335054	0,265434
<i>Rayleigh</i>	0,320539	0,336983	0,336983	0,259292
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,313529	0,305167	0,313529	0,341711
<i>Weibull</i>	0,28259	0,349152	0,349152	0,223022
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,235649	0,355892	0,355892	0,204706

Çizelge 7.13 incelendiğinde, RG213/214 konnektörünün arıza verilerinin modellenmesi için en uygun olan dağılımın, 0,341711 değeri ile SEV dağılımı olduğu görülmüştür. SEV dağılımının *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) parametreleri, 3 farklı parametre tahmin yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplanan parametreler, Çizelge 7.14'te bulunmaktadır.

Çizelge 7.14. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Momentler Tahmin Yöntemi
Konum (μ)	289,771	135,6393	130,4496
Ölçek (σ)	129,729	128,8267	137,8175

RG213/214 konnektörü için hesaplanan parametre tahmin değerleri, maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin yöntemlerinin tehlike oranı ve güvenilirlik olasılıklarını elde etmek için kullanılmıştır. İlgili donanıma ait güvenilirlik analizi sonuçlarına Çizelge 7.15'ten ulaşmamız mümkündür.

Çizelge 7.15. RG213/214 konnektörler için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
30	0,05710	0,99939	0,01762	0,89674	0,01504	0,87416
60	0,04531	0,99720	0,01396	0,83451	0,01210	0,81124
90	0,03595	0,99057	0,01106	0,75952	0,00973	0,73845
120	0,02853	0,97531	0,00876	0,67667	0,00783	0,65999
150	0,02264	0,94698	0,00694	0,59119	0,00630	0,58010
180	0,01797	0,90277	0,00550	0,50771	0,00506	0,50242
210	0,01426	0,84268	0,00436	0,42962	0,00407	0,42962
240	0,01131	0,76953	0,00345	0,35906	0,00328	0,36341
270	0,00898	0,68796	0,00274	0,29701	0,00264	0,30461
300	0,00712	0,60314	0,00217	0,24361	0,00212	0,25339
330	0,00565	0,51971	0,00172	0,19844	0,00171	0,20947
360	0,00449	0,44120	0,00136	0,16075	0,00137	0,17228

Çizelge 7.15'te, ilgili bileşenin güvenilirlik analizi sonuçları, 30. günden, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. güne kadar elde edilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, 120. günde yaşam olasılığı değerlerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu sebeple, 90. günün sonrasında, ilgili donanımın kontrolünün teknik ekipler tarafından yapılması yerinde olacaktır.

7.6 RG400 Konnektör

RG400 konnektörünün arıza verileri Ankara-İstanbul YHT Projesi Etap-1 ve Ankara-Konya YHT Projesi'nde kullanılan 65008 TCF isimli trenden elde edilmiştir. Arıza verilerinin oluşma tarihleri, 2012 ile 2017 yılları arasındaki 6 seneyi kapsamaktadır. Bu süre zarfında meydana gelmiş olan 10 adet arıza verisi bulunmaktadır. Arıza verilerinin uygun olduğu dağılım şeklinin belirlenmesi amacıyla, 14 farklı olasılık dağılım yöntemi kullanılmış, Kolmogorov-Smirnov testi yardımıyla, bu dağılımların olasılık değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçları, Çizelge 7.16'dan incelememiz mümkündür.

Çizelge 7.16. RG400 konnektör için dağılımlar ve olasılık değerleri

DAĞILIMLAR	DPLUS	DMINUS	DN	P-Value
<i>Birnbaum-Saunders</i>	0,244266	0,367447	0,367447	0,176079
<i>Exponential</i>	0,289647	0,352708	0,352708	0,213204
<i>Exponential Power</i>	0,40842	0,414269	0,414269	0,091087
<i>Folded Normal</i>	0,356154	0,334571	0,356154	0,204018
<i>Gamma</i>	0,279039	0,351518	0,351518	0,216451
<i>Half Normal</i>	0,402405	0,346741	0,402405	0,108445
<i>Inverse Gaussian</i>	0,243064	0,390414	0,390414	0,128692
<i>Largest Extreme Value</i>	0,293505	0,343835	0,343835	0,238349
<i>Loglogistic</i>	0,264042	0,329982	0,329982	0,282113
<i>Maxwell</i>	0,311853	0,342204	0,342204	0,243214
<i>Rayleigh</i>	0,324322	0,343946	0,343946	0,238022
<i>Smallest Extreme Value</i>	0,314299	0,316403	0,316403	0,330678
<i>Weibull</i>	0,292091	0,352935	0,352935	0,212590
<i>Weibull (3-Parameter)</i>	0,213204	0,350079	0,350079	0,220428

Çizelge 7.16'da bulunan olasılık değerleri incelendiğinde, RG400 konnektörünün güvenilirlik analizi uygulamasının yapılabilmesi için en uygun dağılımın, 0,330678 değeri ile SEV dağılımı olduğu anlaşılmaktadır.

Ardından SEV dağılımının *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) parametreleri, farklı tahmin yöntemleri ve R istatistik paket programının kullanılması sonucu elde edilmiştir. SEV dağılımı için elde edilen parametre değerleri Çizelge 7.17'de verilmiştir.

Çizelge 7.17. SEV dağılımı için elde edilen parametre tahmin değerleri

PARAMETRELER	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi	Momentler Tahmin Yöntemi	L-Momentler Tahmin Yöntemi
$Konum (\mu)$	286,317	135,262	129,8330
$Ölçek (\sigma)$	127,559	126,2079	135,613

Bu bileşen için, en uygun olan olasılık dağılımının ve bu dağılımın parametrelerinin belirlenmesinin ardından, elde edilen parametre tahmin değerleri, farklı tahmin yöntemlerine ait $h(t)$ ve $R(t)$ fonksiyonlarına yerleştirilmiş, bu fonksiyonların olasılık değerleri elde edilmiştir. RG400 konnektörü için elde edilen sonuçlar, Çizelge 7.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.18. RG400 konnektörler için $h(t)$ ve $R(t)$ değerleri

t	Maksimum Olabilirlik Tahmin Yöntemi		Momentler Tahmin Yöntemi		L-Momentler Tahmin Yöntemi	
	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$	$h(t)$	$R(t)$
30	0,05847	0,99942	0,01824	0,90000	0,01540	0,87606
60	0,04622	0,99725	0,01438	0,83724	0,01234	0,81242
90	0,03653	0,99053	0,01134	0,76102	0,00989	0,73853
120	0,02888	0,97486	0,00894	0,67650	0,00793	0,65878
150	0,02282	0,94560	0,00705	0,58926	0,00636	0,57761
180	0,01804	0,89987	0,00556	0,50418	0,00509	0,49882
210	0,01426	0,83781	0,00438	0,42485	0,00408	0,35842
240	0,01127	0,76255	0,00346	0,35345	0,00327	0,29934
270	0,00891	0,67905	0,00272	0,29096	0,00262	0,24809
300	0,00704	0,59273	0,00215	0,23745	0,00210	0,20431
330	0,00557	0,50837	0,00169	0,19244	0,00169	0,16739
360	0,00440	0,42949	0,00134	0,15509	0,00135	0,13657

Çizelge 7.18’de gözlemlenen RG400 konnektörüne ait olan güvenilirlik analizi sonuçları, 30. günden, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 ve 360. güne kadar elde edilmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde, 120. günde yaşam olasılığı değerlerinde ciddi bir düşüş meydana gelmiştir. Bu sebeple, 90. günün sonrasında, bu bileşenin işlevselliğinin kontrolü, teknik ekipler tarafından yapılmalıdır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güvenilirlik analizi, teknolojinin gelişmesi ile birlikte hemen her alanda olduğu gibi mühendislik uygulamalarında da önemli bir kullanım alanına sahiptir. Ülkemizdeki mühendislik faaliyetlerinin bir sonucu olarak, yapımı tamamlanan ve işletmeye açılan yüksek hızlı demiryolu hatları ile insanlarımızın bir şehirden başka bir şehre seyahat etmeleri konforlu olmasının yanında hızlı ve güvenli bir şekilde gerçekleşmektedir.

Seyahat süresince, sinyalizasyon sistem donanımlarının bir ya da birden fazlasının arızalanması, tren tehirleri başta olmak üzere, zincirleme bir şekilde başka sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu, hem yolcular, hem de TCDD açısından istenmeyen bir durumdur. İşletme esnasında gerçekleşecek herhangi donanım arızası, yolcular açısından memnuniyetsizliğe, işletmeci firmalar açısından ise maliyet ve prestij kaybına neden olmaktadır. Bu noktada, yol boyunca ve araç üzerinde bulunan sinyalizasyon bileşenlerinin ömür tahminlerinin yapılması, arıza yaşanmadan önce gerekli önleyici faaliyetlerin gerçekleştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, yapımı tamamlanan ve işletmeye açılan, Ankara-Konya ve Ankara-İstanbul yüksek hızlı demiryolu projelerinden elde edilen arıza verileri, elektronik giriş-çıkış kartı, sinyal elektronik kontrol kartı, elektrons yeşil sinyal lambası, baliz anteni, RG231/214 konnektör ve RG 400 konnektör bileşenlerinden elde edilmiştir. Bu bileşenlerin her biri için güvenilirlik analizi uygulaması yapılmıştır.

Literatürde yapılan güvenilirlik analizi çalışmalarında sınırlı sayıda olasılık dağılım metotlarının kullanıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada ise, yukarıda belirtilen sinyalizasyon donanımlarının her biri için, uygun olan olasılık dağılım metodunun belirlenmesi amacıyla en az 13, en çok 15 adet dağılım metodundan faydalanılmıştır.

Arıza istatistiki verileri, Kolmogorov-Smirnov testine tabii tutularak DPLUS, DMINUS, DN, ve P-Value değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelgelerde gösterilmiş, olasılık değeri (P-Value) en yüksek olan olasılık dağılım yöntemi, ilgili

sinyalizasyon donanımının güvenilirlik analizi modellenmesi için en uygun dağılım olarak belirlenmiştir. E I/O kartı için, üç parametrelili Weibull dağılımı, SEC ve elektrons yeşil sinyal lambası için, LEV dağılımı, baliz anteni, RG213/214 ve RG400 konnektörleri için, SEV olasılık dağılım yöntemleri uygun bulunmuştur.

Her bir donanım için belirlenen olasılık dağılım yönteminin parametreleri, ömür tahmini uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan parametre tahmin yöntemleri olan; maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin yöntemleri tarafından hesaplanmıştır. Üç parametrelili Weibull olasılık dağılım modeli için; *Konum* (μ), *Şekil* (α) ve *Ölçek* (σ) parametreleri, LEV ve SEV dağılımları için *Konum* (μ) ve *Ölçek* (σ) parametreleri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan hareketle, hesaplanan parametre değerleri; maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler tahmin edicilerinin tehlike oranı fonksiyonu $h(t)$ ve güvenilirlik fonksiyonu $R(t)$ denklemlerine yerleştirilmiş, yapılan hesaplamalar sonucunda tehlike oranı ve güvenilirlik fonksiyonu olasılık değerlerine ulaşılmıştır. Çizelgeler incelendiğinde E I/O kartı için, üç parametrelili Weibull dağılımının karakteristik özelliğinden kaynaklı nedenlerden dolayı (*Konum* (μ) parametre değeri 123,129 elde edilmiştir.) hesaplamalar 124. günden başlanılarak otuzar gün artırmak suretiyle, 360. güne kadar incelenmiştir. LEV ve SEV dağılımları için ise, 30. günden başlanılarak otuzar gün artırılmış ve 360. güne kadar sonuçlar incelenmiştir.

Yapılan incelemeler göstermektedir ki, E I/O kartı için, 180. günde hesaplanan güvenilirlik olasılığı değeri, maksimum olabilirlik tahmin yöntemi için, 0,712647, momentler için, 0,746522, L-momentler için ise, 0,730995 değerlerindedir. Fakat 210. güne gelindiğinde hayatta kalma olasılığı ilgili tahmin yöntemleri için sırasıyla, 0,522597, 0,579955, 0,579904'lere kadar gerilemiştir. SEC kartı için ise, 210. güne gelindiğinde, kartın hayatta kalma olasılıkları maksimum olabilirlik için, 0,874021, momentler için, 0,79843, L-momentler için, 0,530764 olarak görülmektedir. Buradan hareketle, ilgili donanımlar için 180. günün ardından sonra sorumlu bakım ekiplerinin, ilgili kartların fonksiyonlarını takip etmesi ve gerekli önleyici bakımlarını yapması uygun olacaktır.

Kartların işlevlerinde bazı sorunlar gözlemlenir ise, herhangi bir arıza durumuna sebebiyet vermeden kartın değiştirilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Elektrans yeşil sinyal lambası için, 150. güne gelindiğinde, ilgili donanımın hayatta kalma olasılıkları maksimum olabilirlik için, 0,554805, momentler için, 0,559922, L-momentler için, 0,545509 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen olasılıklardan yola çıkılarak, 120. günün ardından sorumlu bakım ekiplerinin, ilgili donanımın işlevlerini takip etmesi ve gerekli önleyici bakımlarını yapması uygun olacaktır. İlgili donanımın fonksiyonlarında bazı sorunlar gözlemlenmesi halinde bu donanımın yenisi ile değiştirilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Baliz anteni için 180. güne gelindiğinde, antenin hayatta kalma olasılıkları maksimum olabilirlik için, 0,95341, momentler için, 0,58282, L-momentler için, 0,57131 değerlerine gerilemiştir. Elde edilen olasılıklardan yola çıkılarak, 150. günün ardından sorumlu bakım ekiplerinin, ilgili donanımın işlevlerini takip etmesi, gerekmesi halinde bu donanımın yenisi ile değiştirilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

RG213/214 konnektör için, 120. güne gelindiğinde, konnektörün hayatta kalma olasılıkları maksimum olabilirlik için, 0,97531, momentler için, 0,67667, L-momentler için, 0,65999 olarak görülmektedir. RG400 konnektör için 120. güne gelindiğinde, hesaplanan hayatta kalma olasılıkları maksimum olabilirlik, momentler ve L-momentler yöntemleri için sırasıyla, 0,97486, 0,67650 ve 0,65878 değerlerine gerilediği görülmüştür. Dolayısıyla, 90. günün ardından, bakım ekiplerinin ilgili bağlantı konnektörlerini değiştirmesi yerinde olacaktır.

Yapılan uygulama sonucunda elde edilen olasılık değerlerine bağlı olarak, yukarıda belirtilen günlere ulaşıldığında, ilgili sinyalizasyon donanımlarının değişimi sonucu oluşacak yedek parça maliyeti, tren tehirinin yaşanması durumunda karşılaşılan maliyetle kıyaslandığında, belirlenen olasılıkların altındaki donanımların değiştirilmesinin yerinde olacağı öngörülmüştür.

Bu tez çalışmasında incelenen sinyalizasyon sistemi bileşenleri, ülkemizde işletme durumunda bulunan, yüksek hızlı demiryollarındaki yol boyu ve araç üzerinde kullanılan

donanımların çok kısıtlı bir bölümünü oluşturmaktadır. Tez çalışmasında detaylı olarak verilen metodoloji kullanılarak diğer donanımlar ile ilgili ömür süresi tahminleri yapılabilir. Ülkemizde hızlı tren işletmeciliği uzun süreli geçmişe sahip olmadığı için diğer birçok bileşenin yeterli arıza kaydı verisi yoktur. Gelecekte oluşacak olan arıza kayıtları uygulamaya dahil edilerek başka donanım bileşenlerinin ömür tahminleri gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdul-Moniem, İ. B., 2010, TL-moments and L-moments estimation for the Weibull distribution, *Advances and Applications in Statistics*, Vol. 15, Number 1, 85-87.
- Afacan, E., 2011, Aging in CMOS Circuits and Circuit Design Robust to Aging Phenomena, Master of Science Thesis, Boğaziçi University, 77 s.
- Akçay, E., 2007, Enerji İletim Sistemlerinde Güvenilirlik Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 89-91.
- Al Shomrani, A. A., Shawky, A. I., Arif, O. H., Aslam, M., 2016, Log-logistic distribution for survival data analysis using MCMC, 1 s.
- Altuntaş, A., 2014, Method of Moments Analysis of Slotted Waveguide Antenna Arrays, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, 51 s.
- Anonim-1, 2018, Hızlı tren, http://www.wikiwand.com/tr/Hızlı_tren, erişim tarihi 12.03.2018.
- Anonim-2, 2018, Siemens Trainguard 100, <https://www.mobility.siemens.com/mobility/>, erişim tarihi 18.01.2018.
- Anonim-3, 2018, Siemens Trainguard 200, <https://www.mobility.siemens.com/mobility/>, erişim tarihi 18.01.2018.
- Anonim-4, 2018, Siemens Trainguard 300, <https://www.mobility.siemens.com/mobility/>, erişim tarihi 18.01.2018.
- Anonim-5, 2018, <http://www.variation.com/da/help/hs123.htm>, erişim tarihi 02.04.2018.
- Ansaldo STS, 2016, The European Railway Traffic Management System ERTMS, 8 s.
- Aydın, T., 2012, Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesinde Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Aydoğan, D., 2008, L-Momentleri Yöntemiyle Çoruh Havzasının Bölgesel Frekans Analizinin Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 19 s.
- Aykanat, G., 2013, Ömür Modeli Olarak Genelleştirilmiş Ters Üstel Dağılım, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, 3 s.
- Babacan, V. K., 2010, Raylı Sistemlerde Sinyalizasyon Tekniğine Giriş, 111-115.
- Bai, W., Sun, Q., Wang, F., Liu, R., An, R., 2018, A segmental evaluation model for determining residual rail service life based on a discrete-state conditional probabilistic method, 1-15.
- Bain, L. J., 1974, Analysis for the linear failure rate life-testing distribution, Technometrics 16(4), 551-559.
- Bain, L. J., Engelhardt, M., 1991, Statistical Analysis of Reliability and Life-Testing Models, 207 s.
- Bartolucci, A. A., Singh, K. P., Bartolucci, A. D., Bae, S., 1999, Applying medical survival data to estimate the three-parameter Weibull distribution by the method of probability-weighted moments, Mathematics and Computers in Simulation 48, 385-392.
- Bennett, S., 1983, Log-logistic regression models for survival data, J R Stat Soc, Ser C 32, 165-171.
- Binay, İ., 2013, Avrupa Tren Kontrol Sisteminin (ETCS) Türkiye'deki Demiryoluna Uygulamasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, 58 s.
- Carolynne, A. K., 2013, Gamma and Related Distributions, University of Nairobi, 5 s.
- Chikr el-Mezouar, Z., 2010, Estimation the Shape, Location and Scale Parameters of the Weibull Distribution, RT&A # 04 (19), Vol.1.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chiriac, G., Nituca, C., Cardasim, M., 2017, Failures Analysis in the 25 kV/50 Hz Railway Substations, International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 407-410.
- Cohen, A. C., Whitten, B. J., Ding, Y., 1984, Modified moment estimation for the three parameter Weibull distribution, Journal of Quality Technology 16, 159-167.
- Cömert, S. V., 2015, Elektronik Kartların Saha Verilerine Dayalı Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 13 s.
- Cömert, S. V., 2015, Elektronik Kartların Saha Verilerine Dayalı Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 53-54.
- Cran, G. W., 1988, Moment estimators for the 3-parameter Weibull distribution, IEEE Transactions on Reliability, vol. 37, No.4., 360-363.
- Curt, R., 2012, Reliability Analyses with Weibull, 14-15.
- Çakır, S., 2011, Tolerance Based Reliability Analysis of An Analog Electric Circuit, Master of Science Thesis, Middle East Technical University, 71-74.
- Demir, A., 2015, Reliability Analysis of Heavy Duty Vehicle Components Based on Long Term Warranty Data, Master of Science Thesis, İstanbul Technical University, 13-14.
- Demircioğlu, M., 2012, Hibrit Enerji Sistemlerinde Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 68 s.
- Demirezer, T., 2009, Türkiye’de Hızlı Tren Projeleri ve Proje Yapıları, TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, Ankara, 3-4.
- Demiryolları Taşımacılığı Derneği Bülteni, 2012, Dünyanın En Uzun Tren Hattı Açıldı, 12s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Diaz, F., 2015, Haramain High Speed Railway Phase 2 Method Statement for Balise, 7 s.

Durmuş, M. S., Yıldırım, U., Eriş, O., Söylemez, M. T., 2011, Raylı Sistem Sinyalizasyon Tasarımı: Ulusal Demiryolu Sinyalizasyonu Projesi, 3 s.

Ekmen Uçev, E. S., 2015, Dünyada ve Türkiye’de Yüksek Hızlı Tren İşletmeciliği, 4-9.

Eschilbeck, R., 2010, UIC ERTMS training programme, 80 s.

European Commission, 2018, High speed train on-board systems, 4 s.

Fisk, P. R., 1961, The graduation of income distributions, *Econometrica*, 29, 171-185.

Ford Motor Company, 2006, Product Reliability, FTEP.

Fourie, C. J., Zhuwaki, N. T., 2017, A MODELLING FRAMEWORK FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE RELIABILITY ANALYSIS, *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol 28(4), 150-160.

Ghodrati, B., Ahmadi, A., Galar, D., 2017, Reliability Analysis of Switches and Crossings-A Case Study in Swedish Railway, *International Journal of Railway Research*, Vol. 4, No. 1, 25-34.

Gilaberte, A., 2013, Haramain high speed railway Makkah-Madinah, Signalling concept design, 22 s.

Golayoglu, A., 2013, En Küçük Kareler Yöntemi, 1 s.

Gourvish, T., 2010, The High Speed Rail Revolution: History and Prospects, 8-9.

Haykır, Y., 2015, Kalın Tel Antenlerin Moment Metodu İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 59 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hekimoğlu, M., 2016, Işık Üniversitesi, Olasılık Dersi Notları, 16 s.

Holmes, S., 2001, Stanford University, Maximum Likelihood Estimation, 1 s.

Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., 1997, Regional Frequency Analysis, 20-24.

IIT Bombay, 2018, Design for Reliability, 4 s.

Iglesias, R., 2013, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi (2.Etap) Köseköy-Vezirhan (Kesim-1) ve Vezirhan-İnönü (Kesim-2) Sinyal Kurulumu Dökümanı, 3 s.

Introduction to reliability, 2012, Portsmouth Business School, 2-3.

İnceoğlu, F., 2013, Sağkalım Analiz Yöntemleri ve Karaciğer Nakli Verileri ile Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Malatya İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Johnson, N. L., Kotz, S., Balakrishnan, N., 1994, Continuous Univariate Distributions, Volume I, 2nd edition, John Wiley, New York.

Kantam, R. R. L., Rosaiah, K., Rao, G. S., 2001, Acceptance sampling based on life test: log-logistic model, J Appl Stat 28(1), 121-128.

Kantam, R. R. L., Rao, G. S., 2002, Log-logistic distribution: modified maximum likelihood estimation, Guj Stat Rev 29(1&2), 25-36.

Kantam, R. R. L., Rao, G. S., Sriram, B., 2006, An economic reliability test plan: log-logistic distribution, J Appl Stat 33(3), 291-296.

Kaynak, M., 2001, Yeni Demiryolu Çağı Yüksek Hızlı Trenler ve Türkiye, 29 s.

Kılıç, M., 2015, Elsitel ERTMS Eğitim Dökümanı, 2 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Koyun, A., 2014, Bir Raylı Sistem Hattının Elektrik Besleme Sisteminin Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 69-70.

Lundberg, P., 2011, ETCS for Engineers, 173 s.

Mense, O., 2011, ETCS for Engineers, 195-196.

Mısra, K.B., 1992, Reliability Analysis and Prediction, 4 s.

Mısra, K.B., 1992, Reliability Analysis and Prediction, 176 s.

Mielnik, R., Sulowicz, M., Ludwinek, K., Jaskiewicz, M., 2017, The Reliability of Critical Systems in Railway Transport Based on the Track Rail Circuit, Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems, 377-393.

Milli Eğitim Bakanlığı, 2014, Raylı sistemler teknolojisi, tren koruma ve kontrol sistemleri, 36-38.

Minitab, 2018, Uses of the smallest extreme value distribution to model reliability data, <https://support.minitab.com/>, erişim tarihi 11.03.2018.

Moeini, A., Jenap, K., Mohammadi, M., Fouman, M., 2013, Fitting the three-parameter Weibull distribution with Cross Entropy.

Nil, M., 2009, Eviricilerde Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama Devresinin Tasarımı, Gerçekleştirilmesi ve Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 76-78.

Novák, P., Daňhel, M., Blažek, R. B., Kohlík, M., Kubátová, H., 2017, Predicting the Life Expectancy of Railway Fail-Safe Signaling Systems Using Dynamic Models with Censoring, 1 s.

Nuroğlu, F. M., 2011, Dağıtılmış Üretim İçeren Dağıtım Şebekelerinde Merkezi Koordinasyon Rölesi Tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 83-85.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Oliveira, R. P. B., Loschi, R. H., Freitas, M. A., 2018, Skew-Heavy-Tailed Degradation Models: An Application to Train Wheel Degradation, IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY, VOL. 67, NO. 1, 129-141.
- Omondi, B. A., 2017, Weibull and Log-Normal Distributions in Reliability Analysis Applications, Master of Science Thesis, Anadolu University, 3 s.
- Özer, A., 2007, Normallik Testlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, 14-15.
- Özkılıç, Ö., 2016, GÜVENİLİRLİK Nedir? (Dependability/Reliability) (Reliability Centred Maintenance - RCM), 10 s.
- Öztürk, F., 2012, Ankara Üniversitesi, İstatistik Ders Notları, Momentler Yöntemi, 2 s.
- Öztürk, Z., 1999, Yüksek hızlı demiryollarının gelişimi ve Türkiye'nin durumu. II. Ulaşım ve Trafik Kongresi-Sergisi, 9-10.
- Panja, S. C., Ray, P. K., 2007, Reliability analysis of track circuit of Indian railway signalling system, 1 s.
- Pascale, E., Bouillaut, L., Freneaux, T., Sista, R., Sannino, P., vd., 2018, A Weibull Approach for Enabling Safety-Oriented Decision-Making for Electronic Railway Signaling Systems, 1-15.
- Pham, H., 2006, Reliability Modeling Analysis and Optimization, 114 s.
- Rao, B. S., Nagendram, S., Rosaiah, K., 2013, Exponential-half logistic additive failure rate model, Int J Sci Res 3(5), 1-10.
- Rosaiah, K., Kantam, R. R. L., Prasad, A. R. S., 2007, Confidence intervals in log-logistic model-approximations to ML method, J Indian Stat Assoc 45, 109-122.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

RSSB, 2010, ETCS System Description, 10 s.

Saraçoğlu, H., 2018, Parça Güvenilirliğinden Hareketle Ürün Güvenilirliğinin Belirlenmesi, Analizi ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, 20-27.

Shooman, M. L., 2001, Reliability of Computer Systems and Networks, 399 s.

Siemens, 2014, Trainguard, Full interoperability for rail traffic, 6 s.

Siemens, 2014, Trainguard 100 and 200 on-board equipment, Compact and modular for ETCS Level-1 and Level-2, 1 s.

Signalling Team, 2013, Haramain High Speed Railway Phase 2 Signalling Concept Design, 26 s.

Sirvanci, M., Yang, G., 1984, Estimation of the Weibull parameters under type I censoring, Journal of the American Statistical Association 79, 183-187.

Smail, M., Cenac, M., 2004, Estimating Parameters of Gumbel Distribution Using the Methods of Moments, Probability Weighted Moments and Maximum Likelihood, Revista de Matematica: Teoria y Aplicaciones, 2005, 12(1 & 2), 153-154.

Srivastava, A. K., Kumar, V., 2011, Software reliability data analysis with Marshall-Olkin Extended Weibull model using MCMC method for non-informative.

Stanley, P., 2011, ETCS for Engineers, 51 s.

TCDD, 2009, Demiryolu Sektör Raporu, 5 s.

Thales Group, 2007, Ankara-İstanbul Demiryolu Hattı Rehabilitasyon Projesi Genel Eğitimi: INTERSIG L905 E, 81-83.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tsionas, E. G., 2000, Posterior analysis, prediction and reliability in three-parameter Weibull distributions, Communications in Statistics-Theory and Methods 9, 1435-1449.
- Türkan, A. H., 2011, Sistem Güvenilirlik Analizinde Karma Dağılım Modellerinin Kullanılması, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 7-9.
- UIC, 2018, What is high speed train?, <https://uic.org/>, erişim tarihi 15.01.2018.
- Ulaştırma Bakanlığı, 2014, Projeler ve faaliyetler dökümanı, 151-159.
- Üçkardeş, E., 2010, Nevşehir Bölgesi Elektrik Dağıtım Şebekesinin Güvenilirlik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, 5 s.
- Van De Geer, S. A., 2005, Least Squares Estimation, 1 s.
- Verhulst, P. F., 1838, Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, Corresp Math Phys 10, 113-121.
- Wang, T., Zhao, L., 2017, Modeling and optimization for balise coupling process in high speed railway, 1 s.
- Xu, J., Zhong, Y., Gao, S., 2017, Monte Carlo Simulation Method Used in Reliability Evaluation of Railway Overhead Contact Line, Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation, 619-628.
- Yang, S., Yang, J., Cui, Y., Pei, L., 2017, Study on the EMI Impact over the Safety of Railway Signaling and Case Analysis, 2nd International Conference on System Reliability and Safety, 374-379.
- Yasniy, O., Lapusta, Y., Pyndus, Y., Sorochak, A., Yasniy, V., 2013, Assessment of lifetime of railway axle, International Journal of Fatigue 50, 40-46.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhuwaki, N. T., 2017, Application of reliability analysis for performance assessments in railway infrastructure asset management, Master of Science Thesis, Stellenbosch University, 1-5.

