

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİRYOLU ALTYAPI YÖNETİMİNDE GÜVENİLİRLİK,
BULUNABİLİRLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZ
TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI**

DOKTORA TEZİ

Shuhratjon HIDIROV

Enstitü Anabilim Dalı

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı

ULAŞTIRMA

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hakan GÜLER

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU ALTYAPI YÖNETİMİNDE GÜVENİLİRLİK,
BULUNABİLİRLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ANALİZ
TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI

DOKTORA TEZİ

Shuhratjon HIDIROV

Enstitü Anabilim Dalı

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı

ULAŞTIRMA

Bu tez 30.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Hakan GÜLER

Jüri Başkanı



Prof. Dr. Yasar İSLAMOĞLU

Üye

Doç. Dr. Murat ERGÜN

Üye

Doç. Dr. Pelin ALPKÖKİN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İrfan PAMUK

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Shuhratjon HIDIROV

30.05.2019

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimi boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her türlü konuda bilgi ve desteklerini almaktan çekinmediğim, doktora derslerimin başından sonuna kadar tez çalışmalarımın planlamasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikle beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Hakan GÜLER'e ve eğitim sürecinde desteklerini esirgemeyen, tezimi titizlikle inceleyen Dr. Öğr. Üyesi İrfan PAMUK'a teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde bulunan Prof. Dr. Yaşar İSLAMOĞLU'na da tez izleme süresince göstermiş olduğu katkılardan ve yardımlardan dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, Taşkent Demiryolu Mühendisleri Enstitüsü'ne ve yüksek hızlı demiryolu hatlarında ölçümleri gerçekleştiren kuruluşlara katkılarından ve yönlendirmelerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Eğitimim sürecinde göstermiş oldukları anlayış ve fedakarlıklarından dolayı sevgili aileme ve benim her zaman yanımda olan, destekleyen, sabırla bekleyen eşim Yulduzxon OLIMOVA'ya, bana güç ve kuvvet veren çocuklarım Zarina, Aziza ve Muhammaddiyorbek'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

GÜVENİLİRLİK, BULUNABİLİRLİK, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EMNİYET ANALİZLERİ (RAMS)	5
2.1. Demiryollarında RAMS Analizleri	7
2.2. Toplam RAM Analizleri	11
2.3. EN 50126 Standardının İçeriği	13
2.4. RAMS Analizlerinde Dağılım Fonksiyonlarının Kullanılması	20
2.4.1. Üstel dağılım	21
2.4.2. Normal dağılım	22
2.4.3. Weibull dağılım	23
2.5. Demiryollarında RAMS Uygulamaları	25

BÖLÜM 3.

DEMİRYOLU HAT GEOMETRİSİ VE HAT GEOMETRİSİNİN ÖLÇÜMÜ ...	30
--	----

3.1. Hat Geometrisi İle İlgili EN 13848 Avrupa Birliği Standardı	31
3.2. EN 13848-1 Demiryolu Uygulamaları-Hat-Hat Geometrisi Kalitesi- Bölüm 1, Hat Geometrisinin Tanımı	31
3.2.1. Hat geometrisi parametrelerinin tanımı	34
3.3. EN 13848-5 Demiryolu Uygulamaları-Hat-Hat Geometrisi Kalitesi- Bölüm 5, Geometrik Kalitenin Değerlendirilmesi	39
3.4. Hat Geometrisi Parametrelerinin Eşik Değerleri	41
3.5. Demiryolu Hat Geometrisini Ölçümü	45
3.6. Demiryolu Ölçüm Araçları	47
3.6.1. Hat geometrisi ve ray profil kontrolü	48
3.6.2. Katener sistem kablolarının kontrolü	50
3.6.3. Demiryolu hattının video ile kontrolü	51
3.6.4. Demiryolu hat yatağının georadar ile kontrolü	53
3.6.5. Demiryolu hat bileşenlerinin kontrolü	53

BÖLÜM 4.

DEMİRYOLU HATTINA YAPILAN BAKIM VE YENİLEME ÇALIŞMALARI	54
4.1. Demiryollarında Bakım ve Yenileme Modelleri	55
4.2. Demiryollarında Bakım ve Yenileme Çalışmaları	58
4.2.1. Tüm demiryolu hattı yenilenmesi	60
4.2.2. Rayların yenilenmesi	61
4.2.3. Contaların yenilenmesi	61
4.2.4. Travers ve bağlantı malzemelerin yenilenmesi	62
4.2.5. Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi	62
4.2.6. Balast tabakasının yenilenmesi	63
4.2.7. Balast tabakası elemesi	63
4.2.8. Balast tabakası enkesiti düzeltilmesi	64
4.2.9. Travers, bağlantı malzemesi ve balast tabakasının yenilenmesi	65
4.2.10. Buraj	65
4.2.11. Genel kontroller ve küçük bakımlar	66
4.2.12. Ray taşıma ve yağlanması	66

BÖLÜM 5.

ÖZBEKİSTAN DEVLET DEMİRYOLLARI	68
5.1. Özbekistan Devlet Demiryolları (UTY)	70
5.2. Özbekistan Devlet Demiryolları Hattını Oluşturan Altyapı ve Üstyapı Bileşenleri	77
5.2.1. Özbekistan Devlet Demiryolları'nın altyapı ve üstyapı özellikleri	78
5.2.2. Raylar	80
5.2.3. Seletler ve bağlantı malzemeleri	82
5.2.4. Traversler	83
5.2.5. Balast tabakası	85
5.2.6. Alt balast	88
5.2.7. Toprak gövde	88

BÖLÜM 6.

DEMİRYOLU ALTYAPI VE ÜSTYAPI YÖNETİMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN RAM MODELİ	90
6.1. Özbekistan Devlet Demiryolları'nda RAM Modeli Uygulaması	93
6.2. Hat Geometrisi Parametrelerinin RAM Analizleri	94
6.2.1. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik analizleri	95
6.2.2. Hat geometrisi parametrelerinin bulunabilirlik analizleri	98
6.2.3. Hat geometrisi parametrelerinin sürdürülebilirlik analizleri ...	99
6.3. Raylar	99
6.3.1. Rayların güvenilirlik analizleri	100
6.3.2. Rayların bulunabilirlik analizleri	101
6.3.3. Rayların sürdürülebilirlik analizleri	102
6.4. Traversler	102
6.4.1. Traverslerin güvenilirlik analizleri	103
6.4.2. Traverslerin bulunabilirlik analizleri	104
6.4.3. Traverslerin sürdürülebilirlik analizleri	105

6.5. Balast Tabakası	105
6.5.1. Balast tabakasının güvenilirlik analizleri	106
6.5.2. Balast tabakasının bulunabilirlik analizleri	107
6.5.3. Balast tabakasının sürdürülebilirlik analizleri	108
6.6. Özbekistan Devlet Demiryolları'nın Toplam RAM Analizleri	108

BÖLÜM 7.

SONUÇ VE ÖNERİLER	116
-------------------------	-----

KAYNAKLAR	119
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	123
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AK	: Analiz kesimleri
AL	: Uyarı limiti
ALARP	: As low as Reasonably Practicable
BK	: Bakım kesimleri
BY	: Bakım yenileme
CBS	: Coğrafi bilgi sistemleri
CN	: Çin
DE	: Almanya
EN	: Avrupa Birliği Standardı
ERRI	: Avrupa Birliği Demiryolu Araştırma Enstitüsü
EU 28	: Avrupa Birliği Ülkeleri
EYS	: Emniyet yönetim sistemi
FR	: Fransa
GAMAB	: Globalement Au Moins Aussi Ban
GB	: Büyük Britanya
GIN	: Bakım ve Muayene Standartları
GOST	: Rusya Devlet Standartları
HS INS TSI	: Yüksek hızlı demiryolları altyapı karşılıklı işletmecilik şartnamesi
IAL	: Acil müdahale limit
IL	: Müdahale limiti
IN	: Hindistan
JICA	: Japan International Cooperation Agency
JP	: Japonya
KMK	: İnşaat Standartları ve Düzenlemeler

MDBF	: Bozulmalar arası ortalama mesafe
MDT	: Ortalama arıza süresi
MDTF	: Ortalama bozulma mesafesi
MEM	: Minimal Endogenous Mortality
MTBF	: Bozulmalar arası ortalama süre
MTTF	: Ortalama bozulma süresi
MTTR	: Ortalama tamir süresi
O'DSQ	: Özbekistan Devlet İstatistik Kurumu
O'GP	: Özbekistan coğrafi sayfası
RAMS	: Güvenilirlik, bulunabilirlik, sürdürülebilirlik ve emniyet
RS	: Risk skoru
RU	: Rusya Federsyonu
RZD	: Rusya Devlet Demiryolları
SIL	: Bütünleşik emniyet düzeyi
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
THR	: Kabul edilebilir hata oranı
TR	: Türkiye
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
UKR	: Uzun kaynaklı raylar
UTY	: Özbekistan Devlet Demiryolları
UZ	: Özbekistan

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. IEC 61508 standardı kapsam alanı	6
Şekil 2.2. Emniyetle ilgili standartların demiryollarında kullanımı	8
Şekil 2.3. Servis kalitesine etki eden bileşenler	14
Şekil 2.4. Demiryolu RAMS bileşenleri ve aralarındaki ilişki	15
Şekil 2.5. Sistem içinde arızaların etkisi	16
Şekil 2.6. RAMS’a etki eden ana faktörler	16
Şekil 2.7. Demiryolu RAMS’ı etkileyen faktörlerin ayrıntılı analizlerin balık kılıcı diyagramı	17
Şekil 2.8. Sonuç matrisi	19
Şekil 2.9. Üstel dağılım fonksiyonları	21
Şekil 2.10. Normal dağılım fonksiyonları	22
Şekil 2.11. Weibull dağılım fonksiyonları	24
Şekil 3.1. Demiryolu hattının serbestlik dereceleri	30
Şekil 3.2. Üst yüzey	32
Şekil 3.3. Yuvarlanma yüzeyi	32
Şekil 3.4. Hat koordinat sisteminin eksenleri arasındaki ilişki	33
Şekil 3.5. Yeni rayda hat genişliği	34
Şekil 3.6. Aşınmış rayda hat genişliği	34
Şekil 3.7. Düşey geometri (Nivelman)	35
Şekil 3.8. Dever	37
Şekil 3.9. Hattın eksenden sapması	37
Şekil 3.10. Burulma-analiz yöntemi	39
Şekil 3.11. Burulma: Münferit kusurlar “Sıfır-Pik” değerleri (IAL)	44
Şekil 3.12. Demiryolu ölçüm treni	47
Şekil 3.13. Demiryolu hat ölçüm sistemi	48
Şekil 3.14. Portatif ölçüm sistemleri	48

Şekil 3.15. Hat geometrisi ölçümü ve ölçüm grafikleri	49
Şekil 3.16. Hat geometrisi ölçümü ve değerlendirilmesi	49
Şekil 3.17. Ray profilinin kontrolü	50
Şekil 3.18. Ray contaları ve kaynaklarının kontrolü	50
Şekil 3.19. Katener ölçüm sistemi	51
Şekil 3.20. Demiryolunun video kontrolü	51
Şekil 3.21. Balast tabakası enkesitini kontrolü	52
Şekil 3.22. Tünel kontrol sistemleri	52
Şekil 3.23. Demiryolu köprülerinin kontrolü	52
Şekil 3.24. Georadar ile hat yatağının kontrol edilmesi	53
Şekil 3.25. Hat bileşenlerinin kontrolü	53
Şekil 4.1. Demiryolu hattının teorik bozulması ve alınan önlemler	57
Şekil 4.2. Demiryolu hattına yapılan bakım ve yenileme çalışmaları	59
Şekil 4.3. Demiryolu hat yenileme makineleri	61
Şekil 4.4. Rayların yenilenmesi	61
Şekil 4.5. Contaların yenilenmesi	62
Şekil 4.6. Travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi	62
Şekil 4.7. Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi	63
Şekil 4.8. Balast tabakası yenilenmesi	63
Şekil 4.9. Balast tabakası elemesi	64
Şekil 4.10. Balast tabakası enkesitini düzeltilmesi	65
Şekil 4.11. Ray dışında tüm üstyapı bileşenlerinin yenilenmesi	65
Şekil 4.12. Buraj balast tabakasının sıkıştırılması	66
Şekil 4.13. Ray taşlama	67
Şekil 4.14. Rayların yağlanması	67
Şekil 5.1. Özbekistan'ın dünya üzerindeki konumu	69
Şekil 5.2. Özbekistan'daki aylık ortalama sıcaklık ve yağış oranları	70
Şekil 5.3. UTY Demiryolu Ağı	71
Şekil 5.4. Angren ve Pap şehirleri arasındaki demiryolu güzergahı	73
Şekil 5.5. UTY'nin organizasyon şeması	74
Şekil 5.6. Yolcu taşımacılığının yıllara göre değişim oranı	75
Şekil 5.7. Yük taşımacılığının yıllara göre değişim oranı	76

Şekil 5.8. UTY demiryolu hattındaki genişlikler	77
Şekil 5.9. Dolgu ile yapılan balastlı demiryolu tip enkesiti	78
Şekil 5.10. Yarma ile yapılan balastlı demiryolu tip enkesiti	78
Şekil 5.11. Hat genişliği ölçüsü	79
Şekil 5.12. Tek hatlı elektrikli demiryolu hattının gabarisi	79
Şekil 5.13. Ray enkesiti	81
Şekil 5.14. Selet ve uygulaması	82
Şekil 5.15. K-65 tipi bağlantı malzemesi	83
Şekil 5.16. Pandrol Fastclip tipi bağlantı malzemesi	83
Şekil 5.17. BF 70 tipi öngerilmeli beton travers	85
Şekil 5.18. Balast malzemesi olarak kullanılan çeşitli kayaç örnekleri	86
Şekil 5.19. Kızılkum malzemesi üzerine serilen demiryolu hattı	86
Şekil 5.20. Beton traverse sahip tek hatlı demiryolunun şematik enkesiti	87
Şekil 5.21. Beton traverse sahip çift hatlı demiryolunun şematik enkesiti	87
Şekil 6.1. Uygun dağılım fonksiyonun tespit edilmesi	90
Şekil 6.2. Geliştirilen modelin yapısı	92
Şekil 6.3. Taşkent-Semerkant yüksek hızlı demiryolunun koridoru	93
Şekil 6.4. Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı kesimi	94
Şekil 6.5. Hat geometrisi parametreleri için olasılık yoğunluk fonksiyonları	96
Şekil 6.6. Raylar için olasılık yoğunluk fonksiyonu	101
Şekil 6.7. Traversler için olasılık yoğunluk fonksiyonu	103
Şekil 6.8. Balast tabakası için olasılık yoğunluk fonksiyonu	106

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Uluslararası demiryolu istatistikleri	2
Tablo 1.2. Demiryolları uluslararası karşılaştırmalar	3
Tablo 2.1. Tehlike ciddiyet düzeyleri	11
Tablo 2.2. EN 50126 numaralı AB standardı içeriği	14
Tablo 2.3. EN 50126 standardındaki önemli tanımlar	15
Tablo 2.4. RAMS arıza kategorileri	18
Tablo 2.5. Tehlikeli olayların sıklık düzeyleri	18
Tablo 2.6. Kalitatif (Nitel) risk kategorileri	19
Tablo 3.1. 13848-1’de kullanılan simgeler ve kısaltmalar	33
Tablo 3.2. Düşey geometri (Nivelman): Çözünürlük	36
Tablo 3.3. Düşey geometri (Nivelman): Ölçüm belirsizliği	36
Tablo 3.4. Düşey geometri (Nivelman): Ölçüm uzunluğu	36
Tablo 3.5. Eksenden sapma: Çözünürlük	38
Tablo 3.6. Eksenden sapma: Ölçüm belirsizliği	38
Tablo 3.7. Eksenden sapma: Ölçüm uzunluğu	38
Tablo 3.8. Burulma: Ölçüm belirsizliği	39
Tablo 3.9. 13848-5’de kullanılan simgeler ve kısaltmalar	40
Tablo 3.10. Hat genişliği: “Münferit kusurların-İtibari Hat Genişliği” eşik değerleri (IAL)	41
Tablo 3.11. Hat genişliği: 100 m uzunlukta “İtibari-Ortalama” eşik değerler (IAL)	41
Tablo 3.12. Hat genişliği (HS INS TSI): 100 m uzunlukta ortalama eşik değerler (IAL)	42
Tablo 3.13. Hat genişliği: “Münferit kusurların-İtibari Hat Genişliği” eşik değerleri (AL ve IL)	42

Tablo 3.14. Hat genişliği: 100 m uzunlukta “İtibari-Ortalama” eşik değerler (AL ve IL)	42
Tablo 3.15. Nivelman: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerler (IAL)	42
Tablo 3.16. Nivelman: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerler (AL ve IL)	43
Tablo 3.17. Nivelman: Standart sapma eşik değerleri (AL)	43
Tablo 3.18. Eksenden sapma: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerler (IAL)	43
Tablo 3.19. Eksenden sapma: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerler (AL ve IL)	43
Tablo 3.20. Eksenden sapma: Standart sapma eşik değerleri (AL)	44
Tablo 3.21. Burulma: Münferit kusurların “Sıfır-Pik” eşik değerleri (AL ve IL) .	45
Tablo 4.1. Demiryolu hatlarında BY çalışması modelleri	58
Tablo 4.2. BY çalışmaları ve gerekli veriler	60
Tablo 5.1. Özbekistan’daki aylık ortalama sıcaklık ve yağış oranları	69
Tablo 5.2. Demiryolu hattı özellikleri	73
Tablo 5.3. Yıllara göre yolcu taşımacılığı	75
Tablo 5.4. Yıllara göre yük taşımacılığı	76
Tablo 5.5. UTY’de kullanılan önemli demiryolu genişlikleri ve ölçüleri	77
Tablo 5.6. Rayların geometrik ölçümleri	81
Tablo 5.7. UTY hatlarında kullanılan rayların uzunluk ölçüleri	81
Tablo 5.8. BF-70 tipi öngerilmeli beton travers özellikleri	84
Tablo 5.9. Beton traverse sahip tek hatlı demiryolu enkesitine ait değerler	86
Tablo 5.10. Beton traverse sahip çift hatlı demiryolu enkesitine ait değerler	88
Tablo 6.1. Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı kesimlerinin uzunlukları ve AK özellikleri	94
Tablo 6.2. Hat geometrisi parametreleri bozulma oranı eşik değerleri	95
Tablo 6.3. Hat geometrisi parametreleri için dağılım katsayıları	98
Tablo 6.4. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik oranları	98
Tablo 6.5. Hat geometrisi parametrelerinin bulunabilirlik oranları	99
Tablo 6.6. Hat geometrisi parametrelerinin sürdürülebilirlik oranları	99
Tablo 6.7. Raylar için dağılım katsayıları	101

Tablo 6.8. Rayların güvenilirlik oranları	101
Tablo 6.9. Rayların bulunabilirlik oranları	102
Tablo 6.10. Rayların sürdürülebilirlik oranları	102
Tablo 6.11. Traversler için dağılım katsayıları	104
Tablo 6.12. Traverslerin güvenilirlik oranları	104
Tablo 6.13. Traverslerin bulunabilirlik oranları	104
Tablo 6.14. Traverslerin sürdürülebilirlik oranları	105
Tablo 6.15. Balast tabakası için dağılım katsayıları	107
Tablo 6.16. Balast tabakasının güvenilirlik oranları	107
Tablo 6.17. Balast tabakasının bulunabilirlik oranları	107
Tablo 6.18. Balast tabakasının sürdürülebilirlik oranları	108
Tablo 6.19. UTY altyapısı için toplam güvenilirlik oranları	108
Tablo 6.20. Her bir altyapı bileşenlerinin minimum bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları	109
Tablo 6.21. UTY altyapısı için toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları	109
Tablo 6.22. Yapılan RAM analizlerinin özeti	110
Tablo 6.23. Raylar için dağılım katsayıları (Örnek uygulama)	111
Tablo 6.24. Rayların güvenilirlik oranları (Örnek uygulama)	112
Tablo 6.25. UTY altyapısı için toplam güvenilirlik oranları (Örnek uygulama) ...	112
Tablo 6.26. Güvenilirlik oranlarının değerlendirilmesi (Örnek uygulama)	113
Tablo 6.27. Rayların bulunabilirlik oranları (Örnek uygulama)	114
Tablo 6.28. Rayların sürdürülebilirlik oranları (Örnek uygulama)	114
Tablo 6.29. UTY altyapısı için toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları (Örnek uygulama)	115

ÖZET

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve RAM analizleri.

Demiryolu hatlarına yapılan bakım ve yenileme (BY) çalışmaları demiryollarının emniyeti ve verimliliği açısından çok önemlidir. BY modelleri; periyodik, planlı, düzeltici ve duruma dayalı bakım teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Demiryolu organizasyonları bu BY tekniklerinden birini ya da birkaçını seçerek BY çalışmalarını günlük ya da yıllık dönemlerde gerçekleştirirler.

Demiryolu hattının yatayda ve düşeydeki konumuna demiryolu hattı geometrisi denir. Hattın olması gereken geometrik konumdan sapmasına hat geometrisinin bozulması adı verilmektedir. Hat geometrisi başlıca iki grupta incelenir. İlki yatay geometri diğeri ise düşey geometridir. Demiryolu hat geometrisinde meydana gelen bozulmalar düşey geometrinin bozulması ve yatay geometrinin bozulması şeklinde sınıflandırılabilir. Hat geometrisinin bozulması demiryolu hattını oluşturan bileşenlerin (Ray, travers ve balast tabakası) bozulması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Demiryollarında yüksek emniyetli bir demiryolu sistemi sağlamak için Avrupa Birliği 1999 yılında EN 50126 standardını uygulamaya koymuştur. EN 50126 standardı ile demiryollarında yüksek emniyet ve sistem güvencesinin sağlanması amaçlanmıştır. EN 50126 standardı demiryolu sistemlerinde Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS) kavramlarından oluşmaktadır.

Bu çalışmada, demiryolu altyapı yönetimi için RAM analizlerini içeren bir model geliştirilmiştir. Demiryolu hattını oluşturan bileşenler ve hat geometrisi parametreleri geliştirilen modelde kullanılmıştır. Özbekistan yüksek hızlı demiryolu hatları için bir uygulama yapılmıştır. Özbekistan yüksek hızlı demiryolu hatlarından demiryolu ölçüm araçları ile elde edilen demiryolu altyapı bileşenlerine (Hat geometrisi, raylar, traversler ve balast tabakası) ait ölçümler standartlara göre değerlendirilmiştir. Her bir altyapı bileşeninin bozulma derecesiyle ilgili Uyarı Eşiği, Müdahale Eşiği ve Acil Müdahale Eşiği olmak üzere üç eşik değeri belirlenmiştir. Bu çalışmada Taşkent-Semerkant arasındaki yüksek hızlı demiryolu hattının, Taşkent-Sirderya kesimi incelenmiştir. RAM analizleri için yüksek hızlı demiryolu hatları, analiz ve bakım kesimlerine bölünmüştür. Analiz ve bakım kesimlerinden toplanan ölçüm değerleri üzerine RAM analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, Özbekistan yüksek hızlı demiryollarının güvenilirlik, bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik düzeyleri belirlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

RELIABILITY, AVAILABILITY AND MAINTAINABILITY (RAM) ANALYSIS TECHNIQUES FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

SUMMARY

Keywords: Railways, Reliability, Availability, Maintainability and RAM analyses.

Railway track maintenance and renewal (M&R) activities are very important to enable a safe and efficient railway operation. The M&R models of railway tracks can be categorized as periodic, planned, corrective, and condition based techniques. Railway organizations choose one or more of them to realize the maintenance activities in daily or yearly bases.

The vertical and horizontal position of railway track is called as railway track geometry. If there is a deviation from railway track geometry, it is named as railway track geometry deterioration. Railway track geometry is mainly investigated in two groups which are horizontal geometry and vertical geometries. The deterioration of railway track geometry is classified as horizontally and vertically track geometry deteriorations. The deterioration of railway track geometry comes up when the track components (Rails, sleepers and ballast layer) deteriorate.

European Union put into practice an European standard in 1999 known as EN 50126 to prevent these accidents and ensure a high safety rail operation system. EN 50126 standard aims to provide high secure and safe system for railways. The EN 50126 standard consists of the following concepts which are Reliability, Availability, Maintainability, and Safety (RAMS).

In this study, a modal framework is developed for railway infrastructure management including RAM analyses. Railway track components and track geometry parameters were used in this model. The measurements of infrastructure components (Track geometry, rails, sleepers and ballast layer) obtained from the measuring devices were evaluated on the base of the standards. Three threshold values which are Alert Limit, Intervention Limit and Immediate Action Limit were defined for each infrastructure component. A case study was performed for Uzbekistan high-speed railways. In this study, Tashkent and Sirdaryo railway section, which is between Tashkent and Samarkand high-speed railway line, was investigated. The high speed railway section was divided into analysis and maintenance sections for RAM analyses. The RAM analyses were performed by using the data collected from each sections. Consequently, the reliability, availability and maintainability levels of Uzbekistan high-speed railways were obtained and some evaluations were made.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Demiryolunun yaklaşık 500 yıllık bir geçmişi vardır. Önceleri insan ve hayvan gücünden faydalanarak taş ya da ahşaptan yapılmış raylar üzerinde taşıma yapıldı. Demiryolu modern haliyle 1820 yılında İngiltere’de ortaya çıkmıştır. Buhar gücünün kullanılmaya başlaması ve mekanik sistemlerin ortaya çıkmasıyla birlikte günümüz demiryolu sistemine benzer modern demiryolu sisteminin yaklaşık 100 yıllık bir geçmişi vardır. Demiryolları ile ilgili olarak literatürde pek çok tanım bulunmaktadır. Özetle; sabit bir hat üzerinde mekanik güçle hareket ettirilen, çeken ve çekilen araçlardan oluşan, bu araçlar (vagonlar) içinde yolcu ve yük taşımalarını sağlayacak yardımcı tüm tesislerin oluşturduğu sisteme demiryolları denir.

Demiryolları, üretim endüstrisi ile taşımacılık sektörleri arasında bağlantıyı sağlayan, ekonominin sürekli işleyişini temin eden ve bir ülkenin sosyal yaşamına ve ekonomisine pozitif katkı sağlayan önemli bir ulaşım aracıdır. Genellikle demiryolları, ekonomik ve güvenli bir ulaşım sistemi olarak bilinmekte ve bu özellikleri de devamlı geliştirmekte olan bir ulaşım modudur.

Modern anlamda demiryollarında çeken araçlarda başlangıçta enerji kaynağı olarak kömür kullanılması ve buhar gücünden yararlanılması ve daha sonra kömürün yerini daha az maliyetli elektrik enerjisine bırakması demiryollarının ekonomik bir ulaşım sistemi olarak tanınmasını sağlamıştır. Ekonominin yanında ulaşım sistemlerinin emniyetli olması yolcu ve işletme açısından çok önemlidir. Dünya genelinde ulaşım sistemlerinde yaşanan kazaların sebep olduğu maddi ve manevi kayıplar ve felaketin büyüklüğü emniyetin ne derecede önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Demiryolu sektöründeki ortalama hızların ve demiryolları hatlarındaki trafik yoğunluğunun son yıllarda fazla oranda artış göstermesi, yeni ve daha büyük risklerin

ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle trafik yoğunluğunun artmasından dolayı tren seferleri arasındaki sürenin yani takip aralığının azalması demiryollarının emniyet düzeyini olumsuz yönde etkilemiştir.

Demiryolları ve diğer ulaşım türleri karşılaştırılırken; hız, konfor, emniyet, maliyet, ücret, güvenlik, kapasite, sıklık, esneklik, işgal alanı, hızlanma ve yavaşlama ivmeleri, erişebilirlik, ton-km, yolcu-km vb. gibi parametreler dikkate alınır. Bunun yanında ulaşım sistemine yapılan ilk yatırım maliyeti, ömür döngü süresince bakım-yenileme maliyetleri, enerji türü ve çevreye olan etkisi de dikkate alınmaktadır. Özellikle yolcu taşımacılığı açısından hızlı, emniyetli, konforlu ve ekonomik bir ulaşım sistemi olmasıdır.

Sıralanan faktörlerden hangilerinin öncelik olarak alınacağı ülkenin mali ve teknolojik olanaklarına göre değişmektedir. Ülkelerin mali ve teknolojik olanaklarına göre çok büyük değişiklik gösterse de demiryolları sıralanan faktörlerin çoğunda ön plana çıkmaktadır. Demiryolu uluslararası 2017 istatistikleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir (TCDD, 2018; UTY, 2018).

Tablo 1.1. Uluslararası demiryolu istatistikleri

Ülke ve kodu	Ülke yüzölçümü (1,000 km ²)	Nüfus (10 ⁶)	Karayolu uzunluğu (1,000 Km)	Demiryolu anahat uzunluğu (km)		
				Toplam	Elektrikli hat uzunluğu	Elektrikli hat %
Türkiye TR	785	79	67	10,131	3,856	33
Almanya DE	357	82	230	33,380	20,095	60
Fransa FR	633	67	402	28,364	16,097	57
İngiltere GB	244	66	176	31,910	13,029	41
AB EU28	4,460	510	2,049	225,652	122,713	54
ABD	9,629	323	5,106	293,564	...	...
Rusya RU	17,075	144	1,018	85,375	43,621	51
Çin CN	9,597	1,382	4,696	67,092	40,595	61
Hindistan IN	3,287	1,324	3,090	66,030	22,224	34
Japonya JP	378	127	192	19,256	11,699	61
Özbekistan UZ	448	32	184	5,890	1,684	29

Demiryolları ve diğer ulaşım türlerinde trafik sayımı, taşıt-km, ton-km ve yolcu-km atamaları kullanılmaktadır. Trafik sayımı, yol üzerinde seyir eden araçların sayılması işlemidir. Demiryollarında trafik sayımları; Demiryolu Planlaması, Demiryolu Mühendisliği, Demiryolu İşletilmesi, Demiryolu İstatistikleri ve Demiryolu Emniyeti analizlerinde kullanılmaktadır. Taşıt-kilometre, bir motorlu taşıtın bir kilometre

mesafedeki hareketiyle elde edilen trafik ölçü birimidir. Demiryollarında taşıt-km değeri demiryolları üzerindeki taşıt hareketliliğinin ve demiryollarının ne kadar kullanıldığının bir göstergesidir. Ton-kilometre, bir ton yükün bir kilometre mesafeye taşınmasıyla elde edilen trafik ölçü birimidir. Yolcu-kilometre, bir yolcunun bir kilometre mesafeye taşınmasıyla elde edilen trafik ölçü birimidir.

Dünyanın en emniyetli ulaşım sistemi olarak bilinen demiryolu taşımacılığı, dünyanın birçok yerinde faal olarak kullanılmaktadır. Demiryolu taşımacılığı gerek maliyet gerekse dakiklik açısından ve gerekse de güvenilirlik açısından ön plana çıkmaktadır. Ayrıca demiryolları çevreyi en az kirleten taşımacılık türlerinden biri konumundadır. 2016 yılı demiryolları ile ilgili uluslararası karşılaştırmalar Tablo 1.2.'de gösterilmiştir (TCDD, 2018; UTY, 2018).

Tablo 1.2. Demiryolları uluslararası karşılaştırmalar

Ülke ve kodu	Yolcu sayısı, 10 ⁶	Yolcu-km, 10 ⁶	Ton, 10 ³	Ton-km, 10 ⁶
Türkiye TR	89	4.325	25.886	11.661
Almanya DE	2,813	95.465	363.512	116.164
Fransa FR	1,249	90.324	89.107	32.569
İngiltere GB	1,772	68.010	78.549	17.053
EU28	9,664	448.149	1,614.216	419.823
ABD	31	10.492	1,409.000	2,314.693
Rusya RU	1,036	124.461	1,329.010	2,304.758
Çin CN	2,814	1,257.930	3,331.860	2,379.226
Hindistan IN	8,224	1,147.190	1,095.260	681.696
Japonya JP	24.290	427.486	43.210	21.519
Özbekistan UZ	21.591	4.293	67.931	22.939

Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS), Avrupa Birliği içindeki ülkelerin demiryolu organizasyonları ve demiryolu sanayisi için etkili bir şekilde yönetimine uygun bir yaklaşım sürecini sağlama planıdır.

Demiryolu hat bakım ve yenilemesiyle (BY) ilgili maliyetler önemli olup toplam altyapı maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu maliyetleri azaltacak önlemlerin alınması altyapı yönetiminde önemli bir etkinlik sağlayacaktır. Demiryolu hattına yapılacak müdahalelerin ne zaman, nerede ve nasıl olacağı, kaynakların en iyi şekilde tahsis edilmesi ve maliyetlerin en aza indirilmesi konularındaki problemler oldukça karmaşıktır. Çünkü yük altında bulunan aynı ya da farklı hat kesimleri çok farklı şekillerde davranış ortaya koyarlar. Bu sebeple BY çalışmalarıyla ilgili kararlar

teknik ve ekonomik yönden birbirleriyle ilişkilidirler. Hat BY planları; büyük miktarlarda teknik ve ekonomik verilere, kapsamlı hat verilerine ve tüm bunların yanında tecrübelerle dayanır.

Özbekistan Devlet Demiryolları (UTY) milli bir devlet şirketi olarak 07 Kasım 1994 yılında kurulmuştur. Bu sıradaki ağ uzunluğu 3,645 km'dir. Günümüzde işletilen hat uzunluğu 6,826 km'yi aşmaktadır. Taşkent-Semerkant arasında 344 km uzunluğunda yüksek hızlı demiryolu hattı bulunmaktadır. Özbekistan Demiryolları yapımını tamamlamış olduğu maksimum 250 km/sa işletme hızına sahip yüksek hızlı demiryolu hatlarında balastlı demiryolu üstyapısını tercih etmiştir. Diğer demiryolu organizasyonlarında olduğu gibi Özbekistan demiryollarının bakım ve yenileme çalışmalarında da teknik ve ekonomik olarak önemli sorunlar yaşanmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu işletmesine geçilmesiyle birlikte bu sorunlar daha da artmıştır. Yapılan literatür araştırmasında RAM analizlerinin özellikle demiryollarında elektroteknik konularında etkin olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Bu alanlarda RAM tekniklerinin kullanılması demiryollarının performansını artırmıştır. Bu çalışmada Taşkent-Semerkant yüksek hızlı demiryolu hattının, Taşkent-Sirderya kesimleri arasında bakım ve yenileme çalışmalarının performans değerlendirmesi için Güvenilirlik, Bulunabilirlik ve Sürdürülebilirlik olarak ifade edilen RAM analizleri yapılmıştır. Bu amaçla Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında vektörel (dijital) haritası oluşturulmuştur. Vektörel harita üzerinde demiryolu hattı belirli uzunluklarda bakım kesimlerine bölünmüştür. Ardından demiryolu hattının bozulma mekanizması belirlenmiş, her bir hat bileşeninin bozulma derecesini ifade etmek için eşik değer tanımlaması yapılmıştır. Demiryolu ölçüm trenlerinden hat geometrisi değerleri elde edilerek yatay geometri, düşey geometri, burulma, hat genişliği ve dever parametreleri için güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Daha sonra yüksek hızlı demiryolu hattını oluşturan her bir bakım kesiminde bir yıl içinde gerçekleştirilen kontroller, bakım ve yenileme sayıları elde edilmiştir. Kontroller, bakım ve yenileme verileri esas alınarak Bulunabilirlik ve Sürdürülebilirlik analizleri yardımı ile sonuç ve değerlendirmeler yapılmıştır.

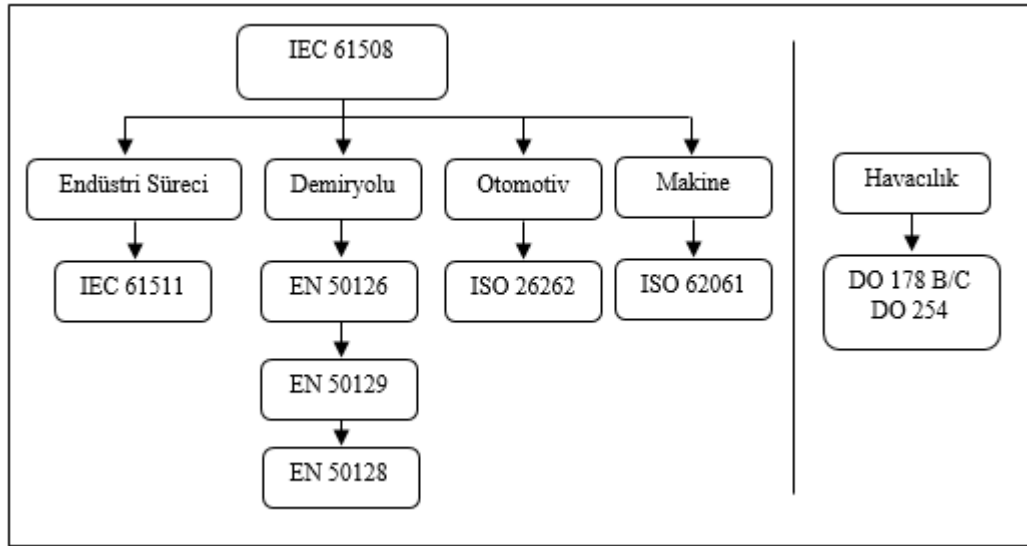
BÖLÜM 2. GÜVENİLİRLİK, BULUNABİLİRLİK, SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE EMNİYET ANALİZLERİ (RAMS)

Mühendisler ve bilim insanları daima güvenilir, sürdürülebilir ve bulunabilir özellikle teknolojik cihazlar ve sistemler geliştirme gayreti içindedirler. Ürünlerin tasarım sürecinde yapılan uzun süreli test çalışmaları ürünlerin en son haline gelmesine önemli katkılar sağlar. Test çalışmaları süreçlerinde kusursuzluk yani risklerin olmama olasılığını beklemek mümkün değildir. Geliştirilen ürün ya da sistemlerin kullanım süreçlerinde ömür döngüsünün yani bozulmasının tahmin edilmesi ve bu tahminlere karşılık olası riskler, problemleri karmaşık bir hale getirmekte ve ömür döngü maliyetlerini artırmaktadır. Geliştirilen sistemlerin tesliminden itibaren ekonomik ömrü, ekonomik ömrü boyunca ömür döngülerinin tahmini, her bir döngü sürecinin süresi ve bunlarla ilgili risk analizlerinin yapılması sistem güvenilirliği açısından çok önemlidir. Sonuç olarak geliştirilen ürün ya da sistemlerin sürdürülebilirliğini sağlamak için uygun analiz teknikleri ve bu analiz tekniklerinin güvenilirliğinin de yüksek düzeyde olması gerekmektedir.

Geliştirilen ürün ve sistemlerin ömür döngü süreçlerindeki analizleriyle ilgili olarak Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS) kavramları geliştirilmiştir. RAMS analiz teknikleri geliştirilen ürün ve sistemlerin ekonomik ömürleri süresince performansının ve emniyet düzeyinin artırılması hedeflenir. RAMS genellikle farklı alanları kapsayacak faaliyetler kümesi olarak tanımlanmaktadır. Sistemin bakım tahmini, bakım ve bulunabilirlik çalışmasına bağlıdır. RAMS'in ana kullanımı bir sistemin ömür döngüsünde, beklenen bozulma oranı veya diğer RAMS analizlerinin bozulma tahmin etme olasılığını elde etmektir. Bu parametreler ömür döngüsü içerisinde, işletmenin durma maliyetleri ve sürdürülebilirlik faaliyetlerinin tahmin edilmesinde de kullanılır. Ürün ve sistemlerin RAMS analizlerinde, zaman ve

mesafe kavramları esasında kullanılan başlıca parametreler; Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik, Bozulma oranı, Bozulmalar Arası Ortalama Süre (MTBF), Ortalama Bozulma Süresi (MTTF), Ortalama Arıza Süresi (MDT), Ortalama Bozulma Mesafesi (MDTF), Bozulmalar Arası Ortalama Mesafe (MDBF) ve Ortalama Tamir Süresi (MTTR).

Demiryolu sektörü ile ilgili olan EN 50126 standardı IEC 61508 endüstri alanında kuralları belirleyen uluslararası standardın altında bir standarttır. IEC 61508 kapsam alanı aşağıdaki Şekil 2.1.'de verilmiştir. EN 50126 standardı EN 50129 ve EN 50128 standartlarını da içermektedir. EN 50129, demiryolu sektöründe kullanılan donanımları, EN 50128 ise demiryollarında kullanılan yazılımları kapsamaktadır.



Şekil 2.1. IEC 61508 standardı kapsam alanı (IEC-61508, 1998).

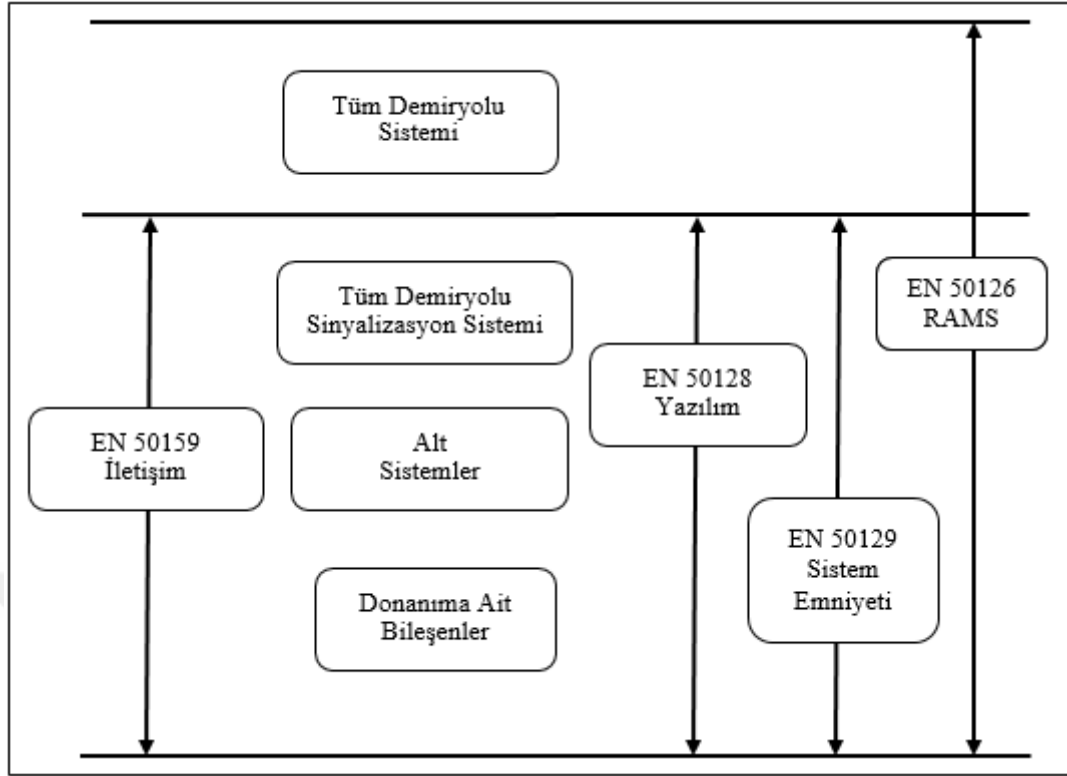
Özbekistan Devlet Demiryolları'nda, Rusya Devlet Demiryolları'nda kullanılan ve EN 50126 standardına benzer GOST 32192 standardı kullanılmaktadır. Bu standart, demiryolu ekipmanlarının güvenilirliği ile ilgili temel kavramları içermektedir. Bu standart; demiryolu altyapı tesisleri, demiryolu araçları ve diğer demiryolu bileşenleri dahil olmak üzere demiryollarındaki tüm ekipmanlar için geçerlidir. Bu standardın belirttiği terimler ve tanımlar, demiryolu taşımacılığı kapsamındaki her türlü dokümantasyon ve literatürde veya demiryolu taşımacılığı ile ilgili tüm faaliyetlerinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (GOST 32192, 2013).

2.1. Demiryollarında RAMS Analizleri

Dünya genelinde demiryolu ulaşımına başta enerji verimliliği, yüksek taşıma kapasitesi ve çevre dostu bir sistem olması gibi pek çok sebeplerden dolayı artan bir talep vardır. Gelişen teknoloji ile birlikte demiryollarında hızlar artmakta ve demiryolları uzun mesafelerde dahi tercih edilen bir sistem haline gelmektedir. Talebe bağlı olarak işletmenin sürekli olarak arttığı demiryolu hatlarında güvenilir ve sürdürülebilir bir işletme gerçekleştirmek için demiryolu emniyet yönetim sistemine ihtiyaç vardır. Avrupa Birliği'nin 2004 yılında yayımladığı direktifle (2004/49/EC), Avrupa Birliği üyesi ülkelerde bulunan demiryolu işletmecilerinin ve demiryolu altyapı yöneticilerinin bir demiryolu Emniyet Yönetim Sistemi'ni (EYS) uygulamaya alması zorunlu hale getirilmiştir (Guler, 2013).

Demiryolu emniyetiyle ilgili ve hayati önem taşıyan yazılım ve donanımlar EN 50128 ve EN 50129 numaralı standartlara göre üretilmelidir. Demiryollarında emniyetle ilgili EN 50126, EN 50128, EN 50129 ve iletişimle ilgili EN 50159 numaralı standartları demiryollarında hangi sistemlerde kullanılacağı Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. EN 50126 standardı genel kavramları içermekte ve tüm demiryolu sistemi içinde kullanılmaktadır (Guler, 2017).

EN 50128 standardı, demiryolu kontrol ve koruma uygulamalarında kullanılan programlanabilir elektronik sistemlerin gelişim sürecindeki prosedür ve teknik gereksinimleri tanımlar. Bu AB standardı, yazılım ve bu yazılımın ilişkili olduğu sistemlerle ilgilidir. EN 50129 standardı ise demiryollarında emniyet amaçlı kullanılan donanımların gelişim sürecindeki prosedür ve teknik gereksinimlerini tanımlar. Demiryollarında emniyetle ilgili tüm alanlarda bu standartlar kullanılmaktadır. Sonuçları ölümle sonuçlanabilecek sistemlerde kullanılacak yazılımların ve donanımların bütünsel emniyet düzeyleri sıfırın üzerindedir. Bütünsel emniyet düzeyi (Safety Integrated Level), SIL olarak bilinmekte ve sistemi oluşturan tüm bileşenlerin güvenilirlik düzeylerinden hesaplanmaktadır (Guler, 2017).



Şekil 2.2. Emniyetle ilgili standartların demiryollarında kullanımı.

Demiryolu ulaşımında güvenli ve emniyetli işletmecilik yolcu ve yük taşımacılığı için çok önemlidir. Bu durum dünyada yaşanan demiryolu kazaları ve kazaların sebep olduğu olumsuz sonuçların etkisi ile açıkça gözükmemektedir. Bu kazaları önlemek ve yüksek emniyetli bir demiryolu sistemi sağlamak için Avrupa Birliği 1999 yılında EN 50126 standardını uygulamaya koymuştur. EN 50126 standardı ile demiryollarında yüksek emniyet ve sistem güvencesinin sağlanması amaçlanmıştır. EN 50126 standardı demiryolu sistemlerinde Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS) kavramlarından oluşmaktadır. Bu standart RAMS analizleri olarak dikkate alınmaktadır ve bu analizler demiryollarında risk analizlerinin yapılmasını ve bu risklerin mümkün olduğu kadar kabul edilebilir bir seviyeye getirilmesini sağlamaktadır (Hidirov ve ark., 2017).

Avrupa Birliği içinde bulunan ülkelerin demiryolu organizasyonları ve demiryolu sanayisi için güvenilirlik, bulunabilirlik, sürdürülebilirlik ve emniyet (RAMS) konularının etkili bir şekilde yönetimine uygun bir yaklaşım sürecini sağlayan EN

50126 numaralı standartta RAMS kavramlarının açıklamaları matematik ifadeleri ile birlikte aşağıda yapılmıştır.

Güvenilirlik (Reliability): Belirli bir zaman aralığında ve belli koşullarda bir ögenin gerekli fonksiyonları yerine getirebilme olasılığıdır. Güvenilirliği bir dağılım fonksiyonu olarak tanımlamak mümkündür. Literatürde çeşitli dağılım fonksiyonları vardır. Örnek olarak bir parametrelili eksponansiyel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu, güvenilirlik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir dağılımdır. Matematiksel olarak, tek parametrelili eksponansiyel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 2.1 ile ifade edilmiştir.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

Burada, $f(t)$: yoğunluk fonksiyonu, λ : ölçek parametresi (bozulma oranı), e : Euler sayısı (2.7183) ve t : zaman.

Tek parametrelili eksponansiyel dağılımın kümülatif yoğunluk fonksiyonu Denklem 2.2 ile ifade edilmiştir ($F(t)$ veya (*cdf*)).

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Elde edilen tek parametrelili eksponansiyel dağılımın güvenilirlik fonksiyonu Denklem 2.3 ile ifade edilmiştir ($R(t)$).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

Bulunabilirlik (Availability): Verilen bir zamanda veya bir zaman aralığında, verilen koşullar altında, gerekli tüm kaynakları sağlanmış olan bir ürünün gereken bir fonksiyonu yerine getirebilmesi için bir konumda bulunabilme yeteneğidir. Bulunabilirlik analizlerinde hattın işletmeye açık ya da kapalı olabileceği süreler belirlenir. Bulunabilirlik analizi Denklem 2.4 ile ifade edilmiştir.

$$A_i = \frac{T_i}{T_i + t_i} \quad (2.4)$$

Burada, i : arıza sebebi, A_i : bulunabilirlik, T_i : toplam zaman (365 gün) ve t_i : hattın işletmeye kapalı olduğu süre (gün/yıl).

Bulunabilirlik; hattın kontrol süresi, kusur belirleme süresi, malzeme temin süresi, düzeltme süresi gibi alt başlıklarla incelenirse toplam hattın bulunabilirliği Denklem 2.5 ile ifade edilmiştir.

$$A = \prod_i^n A_i \quad (2.5)$$

Sürdürülebilirlik (Maintainability): Belirlenen koşullar altında, belirlenen prosedürler ve kaynaklar kullanılarak bakım yapılması koşuluyla, belirli koşullar altında kullanımda olan bir öge için belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilebilecek belirli bir aktif bakım faaliyetinin olasılığıdır. Sürdürülebilirlik analizlerinde hattın istenen kalitede tutulması için belirli bir zaman aralığında gerçekleşebilecek BY faaliyetlerinin olasılığı hesaplanır. Sürdürülebilirlik analizleri değerlendirmesinde çeşitli istatistik programlar kullanılarak dağılımlar elde edilebilir. Sürdürülebilirlik analizlerinde yaygın olarak Poisson dağılımı kullanılmaktadır. Poisson dağılımı Denklem 2.6 ile ifade edilmiştir.

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x \cdot e^{-\lambda t}}{x!} \quad (2.6)$$

Burada, $P(x)$: Verilen periyotta istenen bakım sayısının gerçekleşme olasılığı, e : Euler sayısı (2.7183), λ : istenen aralıktaki gerçekleşen bakım sayısı, t : zaman (gün) ve x : görülme olasılığı istenen bakım sayısı.

Emniyet (Safety): Kabul edilemeyen risklerin zararlarından uzak olmak olarak ifade edilir. Emniyet; gerçekleşen olayların (tehlikelerin) ciddiyet düzeyi, insan ve çevreye etkisi ve işletmeye etkisi gibi kavramlar içinde değerlendirilebilir. Bu kavramlar arasındaki ilişki yani tehlike ciddiyet düzeyleri Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Tehlike ciddiyet düzeyleri

Ciddiyet düzeyi	İnsan ve çevreye etkisi	İşletmeye etkisi
Felaket	Ölümler ve/veya ciddi yaralanmalar ve/veya çevreye ciddi zararlar	Sistemde önemli bir kayıp
Kritik	Tek ölümlü ve/veya ciddi yaralanma ve/veya çevrede dikkate değer zararlar	Ciddi sistem zararı
Sınır	Minör yaralanma ve/veya çevrede dikkate değer bir tehdit	Minör sistem hasarı
Düşük	Olası minör yaralanma	

Emniyet analizlerinde risk analizleri gerçekleştirilir. Özetle, risk düzeyinin belirlenmesinde olayın olma olasılığı ve olayın etki derecesi hesaplamalara dahil edilir. Risk Skoru (RS) değerinin hesaplanması Denklem 2.7 ile ifade edilmiştir.

$$RS = O_i \cdot D \quad (2.7)$$

Burada, RS : Risk skoru, O_i : i . önlemden kazanın olma olasılığı, D : Olayın derecesi (Felaket durumunda 100), i : önlem.

Kaza olma olasılıklarının hesaplanmasında alınan önlemlerin güvenilirlik düzeyleri Denklem 2.8 ile ifade edilmiştir.

$$O_i = 1 - R_i \quad (2.8)$$

Burada, O_i : i . önlemden kazanın olma olasılığı, R_i : i . önlemden güvenilirlik, i : önlem.

2.2. Toplam RAM Analizleri

Güvenilirlik, bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizlerinde, analizi yapılan sistem bir bütün olarak dikkate alınır. Sistemi oluşturan bileşenler arasındaki ilişkinin ayrıntısı ortaya konarak güvenilirlik, bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilir. Sistemi oluşturan bileşenler arasında ilişki özetle seri bağlı, paralel bağlı ve seri-paralel bağlı sistemler olmak üzere üç şekilde sınıflandırılır. Seri bağlı sistemlerde, bileşenlerden birisinde bir sorun meydana gelmesi durumunda tüm sistem durur. Paralel bağlı sistemlerde, bileşenlerden birisinde bir sorun meydana gelmesi

durumunda diğer bileşenler görevi devralmakla sistem çalışmaya devam eder. Ancak tüm bileşenlerde bir sorun meydana gelmesi durumunda tüm sistem durur. Seri-paralel bağlı sistemler ise her iki sistemin kombinasyonundan oluşur. Demiryolu hat geometrisinin bozulması ve demiryolu hattının işletmeye açık olması durumları arasındaki ilişki incelendiğinde, tüm hat geometrisi parametrelerinin belirlenen eşik değerlerinde olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda demiryolu hat geometrisi parametreleri arasında seri bir bağlantı bulunmaktadır.

Seri bağlı sistemlerde toplam güvenilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.9 ile ifade edilmiştir.

$$R_i = \prod_j^n r_{ij} \quad (2.9)$$

Burada, R_i : i 'inci kesimlerin toplam güvenilirliği, r_{ij} : i 'inci kesimlerdeki j 'nci bileşenlerinin güvenilirliği, n : bileşenler sayısı.

Seri bağlı sistemlerde toplam bulunabilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.10 ile ifade edilmiştir.

$$A_i = \prod_j^n a_{ij} \quad (2.10)$$

Burada, A_i : i 'inci kesimlerin toplam bulunabilirliği, a_{ij} : i 'inci kesimlerdeki, j 'nci alt kesimlerinin bulunabilirliği, n : alt kesimlerin sayısı.

Seri bağlı sistemlerde toplam sürdürülebilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.11 ile ifade edilmiştir.

$$M_i = \prod_j^n m_{ij} \quad (2.11)$$

Burada, M_i : i 'inci kesimlerin toplam sürdürülebilirliği, m_{ij} : i 'inci kesimlerdeki, j 'nci alt kesimlerinin sürdürülebilirliği, n : alt kesimlerin sayısı.

Paralel bağı sistemlerde toplam güvenilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.12 ile ifade edilmiştir.

$$R_i = 1 - \prod_j^n (1 - r_{ij}) \quad (2.12)$$

Burada, R_i : i 'inci kesimlerin toplam güvenilirliği, r_{ij} : i 'inci kesimlerdeki j 'nci bileşenlerinin güvenilirliği, n : bileşenler sayısı.

Paralel bağı sistemlerde toplam bulunabilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.13 ile ifade edilmiştir.

$$A_i = 1 - \prod_j^n (1 - a_{ij}) \quad (2.13)$$

Burada, A_i : i 'inci kesimlerin toplam bulunabilirliği, a_{ij} : i 'inci kesimlerdeki, j 'nci bileşenlerin bulunabilirliği, n : bileşenlerin sayısı.

Paralel bağı sistemlerde toplam sürdürülebilirlik oranının hesaplanması Denklem 2.14 ile ifade edilmiştir.

$$M_i = 1 - \prod_j^n (1 - m_{ij}) \quad (2.14)$$

Burada, M_i : i 'inci kesimlerin toplam sürdürülebilirliği, m_{ij} : i 'inci kesimlerdeki, j 'nci alt kesimlerinin sürdürülebilirliği, n : alt kesimlerin sayısı.

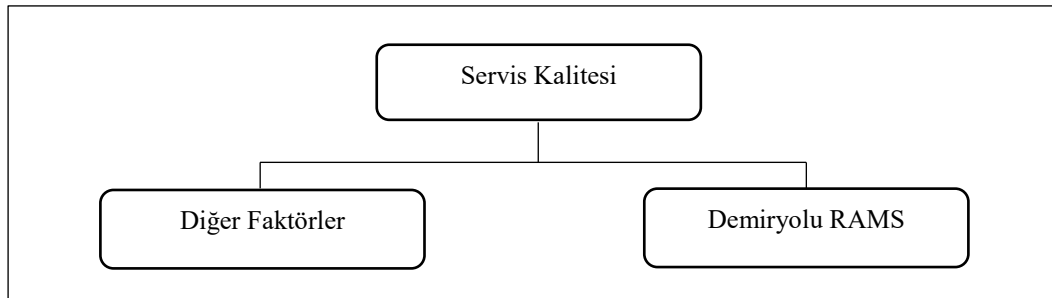
2.3. EN 50126 Standardının İçeriği

Demiryollarında emniyetle ilgili olan EN 50126 standardı altı ana başlık içermektedir. Kapsam ve tanımların yanında risk analizleri, demiryollarında RAMS'ın uygulanabilirliği, yönetimi ve ömür döngüsü üzerine bilgiler içermektedir. EN 50126 numaralı AB standardının içeriği Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. EN 50126 numaralı AB standardı içeriği (BSI, 1999)

Standart içeriği	
Giriş	5 Demiryolu RAMS'nin yönetimi
1 Kapsam	5.1 Genel
2 Yararlanılan standartlar	5.2 Sistem ömür döngüsü
3 Tanımlar	5.3 Bu standardın Uygulaması
4 Demiryolu RAMS	6 RAMS ömür döngüsü
4.1 Giriş	6.1 Aşama 1: Kavram
4.2 Demiryolu RAMS ve hizmet kalitesi	6.2 Aşama 2: Sistem tanımı ve uygulama koşulları
4.3 Demiryolu RAMS'in elemanları	6.3 Aşama 3: Risk analizleri
4.4 Demiryolu RAMS'in etkileyen faktörler	6.4 Aşama 4: Sistem gereksinimleri
4.4.1 Genel	6.5 Aşama 5: RAMS gereksinimlerinin alt sistemlerine dağıtımı
4.4.2 Faktör kategorileri	6.6 Aşama 6: Tasarım ve uygulama
4.4.3 Faktörlerin yönetimi	6.7 Aşama 7: Üretim
4.5 Demiryolu RAMS gereksinimlerini yerine getirmek için araçlar	6.8 Aşama 8: Montaj
4.6 Risk	6.9 Aşama 9: Sistem doğrulanması (Güvenlik kabulü ve devreye alma dahil)
4.6.1 Risk kavramı	6.10 Aşama 10: Sistem kabul
4.6.2 Risk analizleri	6.11 Aşama 11: İşletme ve bakım
4.6.3 Risk değerlendirmesi ve kabul	6.12 Aşama 12: Performans izlemesi
4.7 Emniyet bütünlüğü	6.13 Aşama 13: Modifikasyon ve güçlendirme
4.8 Emniyet tertibatlı kavramı	6.14 Aşama 14: Servisten çıkarma ve yok etme

Demiryollarında RAMS analizlerinin yapılabilmesi ve demiryolu verilerinin uygun bir şekilde toplanabilmesi için uygun ve ortak kavramların kullanılması önemlidir. Bu amaçla EN 50126 standardında önemli kavram ve tanımlar geliştirilmiştir. Bu tanımlar Tablo 2.3.'te verilmiştir. Bir demiryolu sisteminin amacı, belirli bir zaman aralığında demiryolu trafiğini emniyetli bir şekilde sağlamaktır. Demiryollarında RAMS analizleri ile işletmede emniyetin sağlanması mümkündür. Emniyetin sağlanması yanında demiryolunda RAMS uygulamaları yolculara verilen hizmetin kalitesini de artırır. RAMS analizlerinin demiryolu işletmesine yani servis kalitesine etkisi Şekil 2.3.'te gösterilmiştir. Servis kalitesini etkileyen diğer faktörler ise servis sıklığı, servislerin düzenliliği ve bilet ücretleri gibi diğer faktörlerden oluşmaktadır.

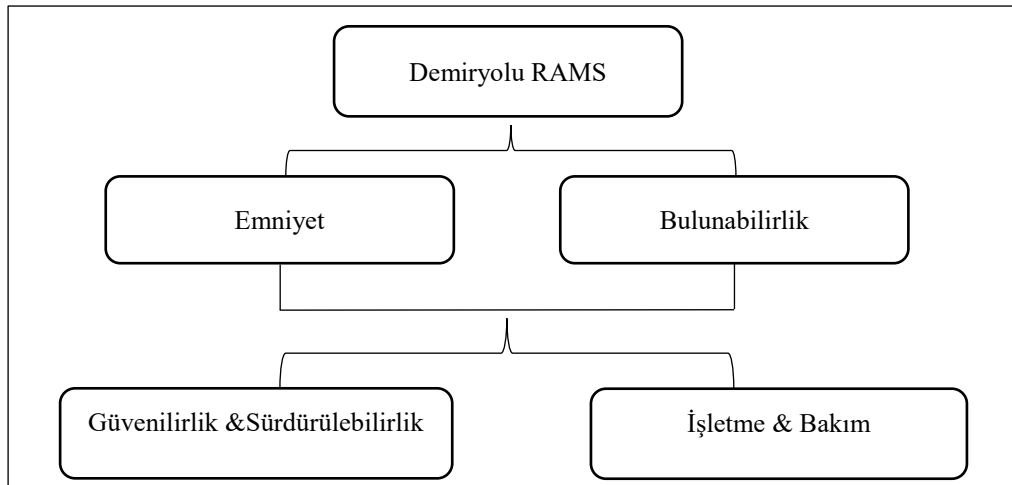


Şekil 2.3. Servis kalitesine etki eden bileşenler.

Tablo 2.3. EN 50126 standardındaki önemli tanımlar (BSI, 1999)

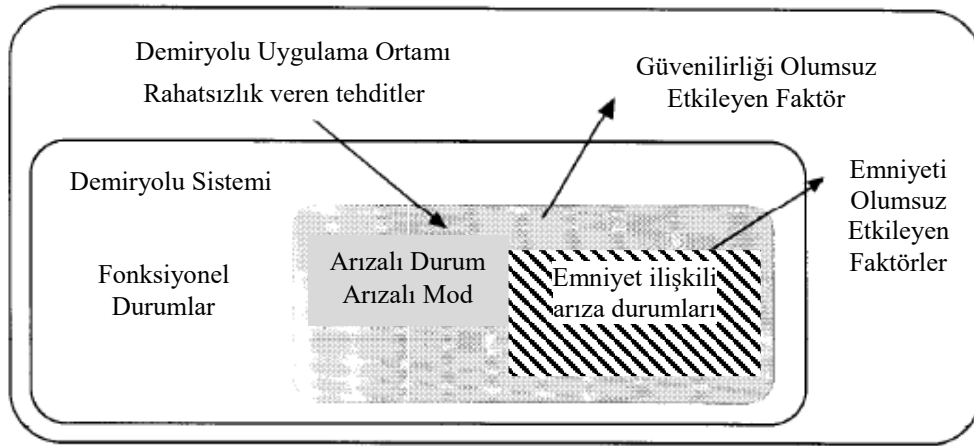
Standart tanımları	
Paylaştırma (Apportionment)	Önleyici bakım (Preventive maintenance)
Değerlendirme (Assessment)	Demiryolu idaresi (Railway authority)
Denetleme (Audit)	Demiryolu endüstrisi (Railway support industry)
Bulunabilirlik (Availability)	RAM programı (RAM programme)
Devreye sokma (Commissioning)	RAMS: Güvenilirlik, Bulunabilirlik,
Ortak nedenli arıza (Common cause failure)	Sürdürülebilirlik ve Emniyet anlamına gelen bir kısaltma.
Uygunluk (Compliance)	Güvenilirlik (Reliability)
Konfigürasyon yönetim (Configuration management)	Güvenilirliği geliştirme (Reliability growth)
Düzeltilici bakım (Corrective maintenance)	Onarım (Repair)
Bağımlı arıza (Dependent failure)	Restorasyon (Restoration)
Bozuk kalma süresi (Down time)	Risk (Risk)
Arıza sebebi (Failure cause)	Emniyet (Safety)
Arıza modu (Failure mode)	Emniyet durumu (Safety case)
Arızanın oranı (Failure rate)	Emniyet bütünlüğü (Safety integrity)
Hata modu (Fault mode)	Emniyet bütünlüğü seviyesi (SIL)
Hata ağaç analizi (Fault tree analysis)	Emniyet planı (Safety plan)
Tehlike (Hazard)	Emniyet düzenleyici idare (Safety regulatory authority)
Tehlike kaydı (Hazard log)	Sistem ömür döngüsü (System lifecycle)
Lojistik destek (Logistic support)	Sistemik arızalar (Systematic failures)
Sürdürülebilirlik (Maintainability)	Tolera edilebilir risk (Tolerable risk)
Bakım (Maintenance)	Geçerlilik (Validation)
Bakım Politikası (Maintenance policy)	Doğrulama (Verification)
Hedef (Mission)	
Görev profili (Mission profile)	

EN 50126’da emniyet ve bulunabilirlik arasındaki ilişkiye de değinilmiştir. Sistemdeki bir zayıflık ya da emniyet ile bulunabilirlik arasındaki ilişkinin iyi yönetilememesi güvenilir bir sistemin gerçekleştirilmesine engel olmaktadır. Şekil 2.4.’te gösterildiği gibi emniyet ve bulunabilirlik analizlerinin iyi yapılması beraberinde güvenilir, sürdürülebilir bir işletme sağladığı gibi bakım çalışmalarının performansını da artırır.

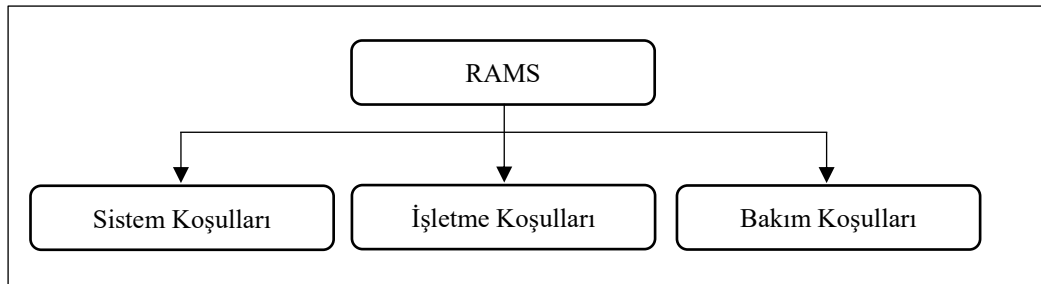


Şekil 2.4. Demiryolu RAMS bileşenleri ve aralarındaki ilişki.

Şekil 2.5.'te demiryollarında bir uygulama ortamında olabilecek olumsuzlukların gösterimi yapılmıştır. Bu uygulama ortamında gri bölge rahatsızlık veren tehditleri, güvenilirliğini olumsuz etkileyen faktörleri ve emniyeti olumsuz etkileyen faktörleri içermektedir. Demiryolu sisteminde olumsuzluğa sebep olacak olan bu gri bölgede sistemle ilgili arızalı durumlar bulunmaktadır ve bu arızalı durumlardan bazıları emniyeti de etkilemektedir. Sonuç olarak demiryolu sisteminin fonksiyonel durumları olumsuz etkilenecek ve arızalardan kaynaklanan durumlardan bazıları demiryolu emniyetini olumsuz etkileyecektir. Özetle Şekil 2.5.'te RAMS analizleri yapılmak istenen demiryolu sisteminde gri ve beyaz bölgelerin önceden öngörülerek risklerin minimize edilmesini ifade etmektedir. EN 50126'da demiryollarında RAMS'ı etkileyen üç temel faktörden bahsedilmektedir. Bu faktörler; sistem koşulları, işletme koşulları ve bakım koşullarıdır. RAMS ile bu faktörler arasındaki ilişki Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Sistem koşulları, demiryollarında kullanılan mevcut yazılımları, donanımları vb. gibi sistemleri içermektedir.



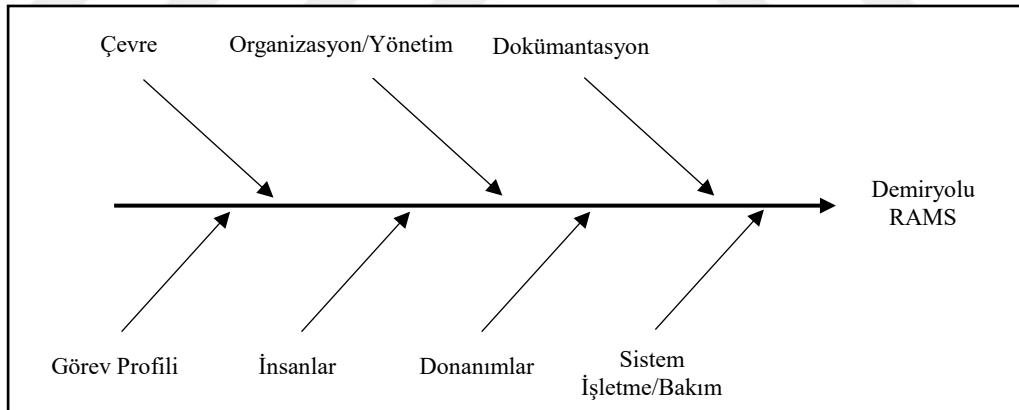
Şekil 2.5. Sistem içinde arızaların etkisi.



Şekil 2.6. RAMS'a etki eden ana faktörler.

Sistem koşulları ana başlığı altında demiryollarında kullanılan sistemlerin tasarım ve üretimden kaynaklanan sorunları, arıza durumları vb. konular incelenir. İşletme koşulları, işletme ve çevresel koşulları içermektedir. İşletme koşulları ana başlığı altında işletmeden ve çevreden kaynaklanan sorun ve arıza durumları incelenir. Bakım koşulları, demiryolu sistemine yapılan BY faaliyetlerini içermektedir. Bakım koşulları ana başlığı altında bakım ve yenilemelerden kaynaklanan sorun ve arıza durumları incelenir.

Demiryollarında iyi bir RAMS yönetimi için üç ana temel faktör altında ayrıntılı bir analiz yapılması gerekir. Ayrıntılı analizlerde istatistik analizlerde yaygın olarak kullanılan Balık Kılçığı Diyagramı kullanılabilir. Balık kılçığı diyagramı bir problem çözme tekniği olup Dr. Kaoru Ishikawa tarafından geliştirilmiştir ve “Ishikawa Diyagramı” olarak da bilinmektedir. Balık kılçığı diyagramı, sebep-sonuç analizlerinde kullanılır ve analiz şekli balık kılçığına benzemektedir (Ishikawa ve ark., 1990). Şekil 2.7.’de demiryollarında RAMS’i etkileyen faktörlerin ayrıntılı analizlerinin yapıldığı balık kılçığı diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Demiryolu RAMS’i etkileyen faktörlerin ayrıntılı analizlerinin balık kılçığı diyagramı.

Demiryollarında RAMS analizlerinde incelenen sistemde çeşitli sebeplerden dolayı kaynaklanan arızalar, düşük, ciddi ve belirgin olmak üzere üç kategoride incelenir. Bu üç kategori içinde meydana gelen arızaların açıklamaları Tablo 2.4.’te verilmiştir.

Tablo 2.4. RAMS arıza kategorileri

Arıza kategorisi	Tanımı
Belirgin (Hareket engelleyici arıza)	-Trenin hareketini engelleyen veya belirlenen zamandan daha uzun bir zaman hizmette gecikmeye sebep ve/veya belirlenmiş olan düzeyden daha fazla maliyet çıkartan arızalardır.
Ciddi (İşletme arızası)	-Sistemin hedeflenen performansına ulaşması için düzeltilmesi gereken arızadır. -Gecikmeye sebep olmayan veya belirli bir arıza için daha fazla maliyet getirmeyen arızadır.
Düşük	-Sistemin belirlenen performansına ulaşmasını engellemeyen arızadır. -Belirgin veya ciddi arıza kriterlerine uymayan arızalardır.

EN 50126 standardı risk analizlerinde kullanılmak üzere demiryollarında tehlikeli olayların görülme sıklıkları ile ilgili olarak altı adet sıklık düzeyi tanımlamıştır. Tablo 2.5.'te verilen kalitatif değerler demiryolu organizasyonu tarafından uygulamanın tipine bağlı olarak sayısal değerlere dönüştürülebilir.

Tablo 2.5. Tehlikeli olayların sıklık düzeyleri

Sıklık düzeyi	Tanımı
Sık	Sıklıkla oluşması muhtemel. Tehlike sürekli olarak deneyimlenecek.
Olası	Birkaç kez oluşacak. Tehlikenin sık sık oluşması beklenebilir.
Ara sıra	Birkaç kez oluşması muhtemel. Tehlikenin birkaç kez oluşması beklenebilir.
Uzak	Sistem ömür döngüsü içerisinde bir zaman oluşması muhtemel. Tehlikenin oluşması mantık çerçevesinde beklenebilir.
Olası değil	Oluşması muhtemel değil ama mümkün. Tehlikenin fevkalade durumda oluşması beklenebilir.
İnanılmaz	Oluşması ihtimal çok az. Tehlikenin oluşmayacağını düşünmek mümkün.

EN 50126 standardı tehlikelerin düzeyi ilgili olarak dört adet ciddiyet düzeyi tanımlamıştır. Tablo 2.1.'de ciddiyet düzeyleri, insan ve çevreye ve demiryolu işletmesine olan etkisi ile birlikte verilmiştir.

Risk değerlendirmesi, tehlikenin gözükme olasılığı ile tehlikenin şiddetinin kombinasyonundan elde edilen risk düzeyi değeri değerlendirilir. Risk kabulü genel

olarak kabul edilen bir prensibi esas almalıdır. Literatürde risklerin kabulüyle ilgili olarak kullanılabilecek bir takım prensipler mevcuttur. Bazı örnekler aşağıdaki gibidir:

- ALARP prensibi İngiltere’de uygulanır (As low as Reasonably Practicable),
- GAMAB prensibi Fransa’da uygulanır (Globalement Au Moins Aussi Ban),
- MEM prensibi Almanya’da uygulanır (Minimal Endogenous Mortality).

EN 50126’da dört adet risk kategorisi belirlemiştir. Tablo 2.6.’da risklerin kalitatif olarak kategorileri ve aynı zamanda her bir kategoriye uygulanacak faaliyet görülmektedir. Bu ilkelerin ve farklı risk kategorilerinin kabul edilebilir olmasını demiryolu organizasyonu belirlemektedir.

Tablo 2.6. Kalitatif (Nitel) risk kategorileri

Risk kategorisi	Her bir kategoriye uygulanacak faaliyet
Kabul edilmez	Elimine edilecektir
İstenmez	Risk azaltma imkansızsa, Demiryolu Otoritesi veya emniyet, Düzenleme Otoritesi’nin onayı ile kabul edilecektir.
Kabul edilebilir	Yeterli kontrol ve demiryolu Otoritesi’nin onayı ile kabul edilebilir.
İhmal edilir	Demiryolu Otoritesi’nin onayı/onayı olmadan kabul edilir.

Sonuç olarak EN 50126 standardında belirtilen risk düzeyleri ile risk kategorileri birleştirildiğinde demiryollarında sistemlerin değerlendirilmesiyle ilgili sonuç matrisi elde edilebilmektedir. Şekil 2.8.’de verilen sonuç matrisi olayların kabul edilebilirlik durumlarını göstermektedir.

Tehlikeli bir olayın görülme frekansı	Risk Düzeyi			
	İstenmez	Kabul Edilmez	Kabul Edilmez	Kabul Edilmez
Sık	İstenmez	Kabul Edilmez	Kabul Edilmez	Kabul Edilmez
Olası	Kabul Edilir	İstenmez	Kabul Edilmez	Kabul Edilmez
Ara Sıra	Kabul Edilir	İstenmez	İstenmez	Kabul Edilmez
Çok Uzak	İhmal Edilir	Kabul Edilir	İstenmez	İstenmez
Olanak Dışı	İhmal Edilir	İhmal Edilir	Kabul Edilir	Kabul Edilir
İmkansız	İhmal Edilir	İhmal Edilir	İhmal Edilir	İhmal Edilir
	Önemsiz	Sınırdı	Kritik	Felaket
	Tehlikeli Sonuçların Ciddiyet Düzeyleri			

Şekil 2.8. Sonuç matrisi

EN 50126 standardında emniyet bütünlüğü kavramından da bahsedilmektedir. Emniyet bütünlüğü, belirli bir zaman aralığında belirtilen tüm koşullar altında bir

sistemin tatmin edici bir düzeyde gereken emniyet fonksiyonlarını yerine getirebilme olasılığıdır. Daha önce de tanımlandığı gibi EN 50128, bir yazılım geliştirmek için gerekli yöntemleri, araçları ve teknikleri tanımlamaktadır. EN 50129, Elektronik demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin kabul ve test süreçlerini tanımlamaktadır. Örneğin, işletme altındaki demiryollarında BY faaliyetleri sırasında emniyetin alınması sırasında kullanılan, EN 50126, EN 50128 ve EN 50129 standartlarına uygun olarak üretilmiş olan uyarı sistemlerinin EN 16704-1 ve EN 16704-2-1 numaralı standartlarında hat uyarı sisteminin bütünleşik emniyet düzeyinin (SIL) en az üç ve kabul edilebilir hata oranının (THR) ise minimum 1.14×10^{-8} 1/sa olması gerektiği belirtilmektedir (BSI, 2016a; Guler, 2017). Bütünleşik emniyet düzeyi (SIL) bir ürünün ya da sistemin çalışması ya da kullanımı sırasında güvenilirliği ile ilgili bir olasılık değeridir. SIL hesaplamaları ürünü ya da sistemi oluşturan bileşenlerin seri ya da paralel bağlı olma durumlarına göre her bir bileşen için ayrı ayrı hesaplanır ve sistemin toplam SIL değeri elde edilir (BSI, 2016b).

2.4. RAMS Analizlerinde Dağılım Fonksiyonlarının Kullanılması

Demiryolu altyapısı hat geometrisi parametreleri ile bileşenlerinin BY faaliyetleri değerlendirilmesi çeşitli istatistik analizlere dayanmaktadır. Demiryolu hattında meydana gelecek olan bozulmalar hattın her bir bileşeninde değişiklik gösterebilir. Bu nedenle BY faaliyetlerinin modellenmesinde bozulmaların tahmin edilmesi oldukça zordur. Bu sebeple demiryolu altyapısına çeşitli istatistik analizler kurularak değerlendirmeler yapılabilir.

İstatistik birçok farklı alanlarda ortaya çıkan soruların ya da sorunları yanıtlamak için yapılan değerlendirmelerde temel unsur olan verileri doğru bir şekilde toplayarak, analiz ederek bazı anlamlı bilgilere ulaşma işlemi istatistik yöntemler veya istatistik olarak tanımlanmaktadır.

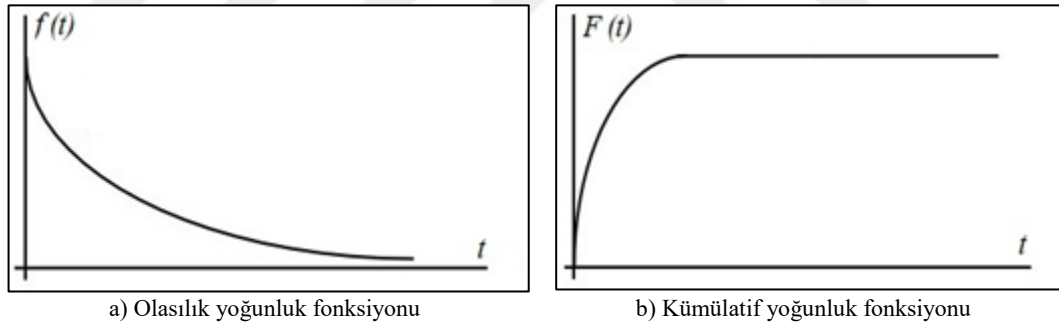
Olasılık kuramına istatistiğin temelidir denilebilir. Herhangi bir olayın nihayetinde ortaya çıkabilecek farklı durumlar belirsizliğinin matematiksel olarak incelenmesi olasılık olarak ifade edilmektedir.

Olasılık dağılımı bir olayın ortaya çıkabilmesi için değerleri ve olasılıkları tanımlar. Matematiksel beklenti cihazın en yakın iki arızası arasındaki ortalama süresidir, matematiksel beklentinin tersi olan büyüklük (dağılım parametresi) ise sorunların yoğunluğudur yani zaman biriminde meydana gelen sorunların sayısıdır.

2.4.1. Üstel dağılım

Çok sayıda bileşene sahip karmaşık sistemlerin ömrü için üstel dağılım iyi bir modeldir. Üstel dağılım sabit hata oranına sahip olduğu için erken ölümlülük periyodu bitimi sonrasında yani yararlı ömür periyodu için iyi bir model oluşturur. Elektrikli ve elektronik sistemler, bilgisayar sistemleri ve otomobil aktarım araçları gibi uygulamalar örnek olarak verilebilir (Guler, 2015).

Üstel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) ve kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Şekil 2.9.'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Üstel dağılım fonksiyonları.

Üstel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 2.15 ile ifade edilmiştir.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

Üstel dağılımın kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 2.16 ile ifade edilmiştir.

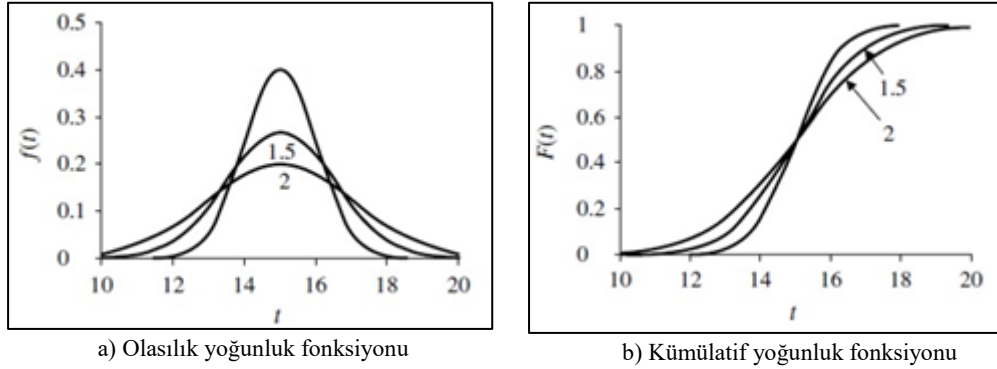
$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

Burada, $f(t)$: yoğunluk fonksiyonu, e : Euler sayısı (2.7183) λ : ölçek parametresi (bozulma oranı) ve t : zaman.

2.4.2. Normal dağılım

Gauss dağılımı olarak da bilinir. Yıpranmaya karşı hata veren cihazların analizi yapılabilir. Sık sık, yıpranmaya bağlı olarak ortaya çıkan hata/arıza dağılımı normal dağılıma yakınsadığında güvenilirliği tahmin etmek veya değerlendirmek için normal dağılım kullanılabilir. Ayrıca imal edilen ürünlerin analizi ve bunların fonksiyonlarını gerçekleştirme yeteneğinin de analizi yapılabilir. Birbirine benzeyen iki parça tam olarak aynı işlevi görmez. Parçalardaki değişiklik, sistemde değişikliğe yol açar. Tasarımda, parça değişkenliği hesaba katılmalıdır. Aksi takdirde farklı kombinasyonlara bağlı olarak sistem kendisinden bekleneni vermeyebilir (Guler, 2015).

Normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) ve kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Şekil 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Normal dağılım fonksiyonları, $\mu=1.5$, $\sigma=1$.

Normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 2.17 ile ifade edilmiştir.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.17)$$

Normal dağılımın kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 2.18 ile ifade edilmiştir.

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dy \quad (2.18)$$

Burada, $\pi=3.1415$, e : Euler sayısı (2.7183), σ : varyans $Var(T)=\sigma^2$, μ : ortalama parametre $E(T)=\mu$, t : bağımsız değişken.

2.4.3. Weibull dağılımı

Üstel dağılımın zamana karşı dayanma modeli olarak yetersiz kalması sebebi sabit risk fonksiyonu olmasından kaynaklanır. Bu nedenle hata/başarısızlık olasılığının zamana bağlı olarak değiştiği daha genel ve esnek bir dağılıma yani Weibull dağılımına gereksinim duyulur.

Basit bir kuvvet fonksiyonundan elde edilen Weibull dağılımı erken ölümlülük, rastgele hatalar/arıza, yıpranma ve serbest hata periyodu gibi hata/arıza niteliklerinin çeşitliliğini modellemek için kullanılır. Ayrıca Weibull dağılımı, güvenilirlik merkezli bakım aktivitelerinde, maliyet etkisini ve bakım periyotlarını hesaplamak için kullanılır (Guler, 2015).

Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 2.19 ile ifade edilmiştir.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot t^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2.19)$$

Weibull dağılımının kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 2.20 ile ifade edilmiştir.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2.20)$$

Weibull dağılımının tehlike fonksiyonu $h(t)$ Denklem 2.21 ile ifade edilmiştir.

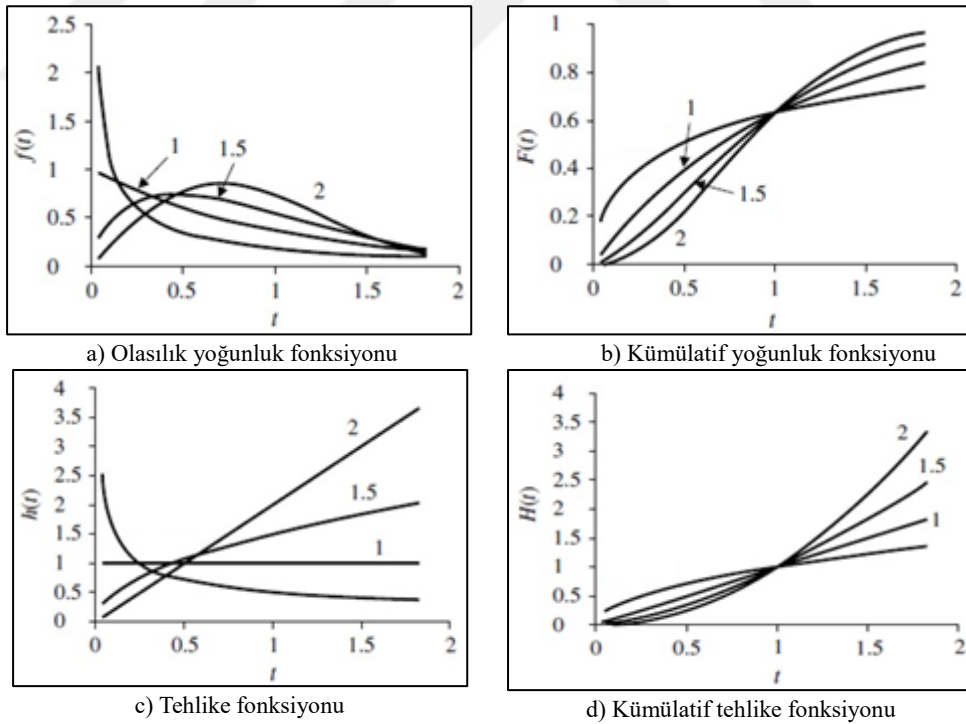
$$h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (2.21)$$

Weibull dağılımının kümülatif tehlike fonksiyonu $H(t)$ Denklem 2.22 ile ifade edilmiştir.

$$H(t) = \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\beta} \quad (2.22)$$

Burada, α : karakteristik ömür, β : ölçek parametre, t : bağımsız değişken.

Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*), kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*), tehlike fonksiyonu ve kümülatif tehlike fonksiyonu Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Weibull dağılım fonksiyonları, $\alpha=1$.

Weibull dağılımının ortalama parametresi $E(T)$ Denklem 2.23 ile ifade edilmiştir.

$$E(T) = \alpha \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (2.23)$$

Weibull dağılımının varyansı $Var(T)$ Denklem 2.24 ile ifade edilmiştir.

$$Var(T) = \alpha^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2 \right] \quad (2.24)$$

Burada, Γ : bir Gamma fonksiyonu Denklem 2.25 ile ifade edilmiştir.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} z^{x-1} \exp(-z) dz \quad (2.25)$$

Weibull dağılımının yüzdesi t_p Denklem 2.26 ile ifade edilmiştir.

$$t_p = \alpha [-\ln(1 - p)]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.26)$$

2.5. Demiryollarında RAMS Uygulamaları

Bu bölümde, demiryolu altyapısının analizleri güvenilirlik, bulunabilirlik, sürdürülebilirlik ve emniyet (RAMS) ve risk uygulaması yöntemlerine ait hazırlanmış bilimsel çalışmalara dair bilgiler verilmektedir.

Rhayma ve ark. (2011) tarafından yayımlanan çalışmada, demiryolu altyapı sisteminin önemli bakım ve yenileme yatırımları gerektiren ve demiryolu hat geometrisinin bozulması ile yaşanan sorunlar ele alınmıştır. Demiryolu hat geometrisi ölçüm cihazları ve elle yapılan ölçüm verileri ile istatistik analizler yaparak optimizasyon yaklaşım değerlendirmesi yapılmıştır.

Macchi ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada, demiryolu altyapı sisteminin bakım ve yenileme yatırımlarının çok önemli olduğu ele alınmıştır. Demiryolu hat geometrisinin güvenilirliği ve bulunabilirliği demiryolu işletmesinde emniyetli olmasını sağladığı değerlendirilmiştir. Ardından demiryolu altyapı parametreleri için istatistik analizler yaparak, güvenilirlik analizleri değerlendirilmesi yapılmıştır.

Caetano ve ark. (2013) yayımladıkları çalışmada, demiryolu hat geometrisi bileşenleri traversler ve balast yatağı için bir optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Geliştirilen modelin Lisbon-Oporto demiryolu hattında bir uygulaması yapılmıştır.

Rhayma ve ark. (2013) yayımladıkları çalışmada, demiryolu altyapı sisteminin önemli bakım ve yenileme yatırımları gerektiren ve demiryolu hat geometrisinin bozulması ile yaşanan sorunlar değerlendirilmiştir. Demiryolu hat geometrisi ölçüm cihazları veri toplamada yaşanan sorunlar ya da yetersiz kalan veriler için bir yaklaşım modeli ele alınmıştır. Bu yaklaşım modelini, güvenilirlik analizlerinde kullanılarak bakım yenileme faaliyetlerinde optimizasyon sağladığı değerlendirilmiştir.

Andrade ve ark. (2013) hazırlamış oldukları çalışmada, demiryolu hat geometrisi bozulmasını bakım ve yenileme planlamasını değerlendirerek, bir model yaklaşımı ele alınmıştır. Demiryolu geometrisinin bozulmasında yatay geometri ve düşey geometri başlıca iki grup olarak incelenmiştir. Demiryolu hat geometrisi bozulmasında sıra düzenli Bayes modeli kullanılmıştır.

Andrade ve ark. (2016) yayımlamış oldukları çalışmada, Portekiz'deki demiryolu hat geometrisi bozulmasını kontrol etmek için farklı bakım ve yenileme istatistik analizleri içeren bir yaklaşım araştırılmıştır. Uluslararası standartlarda belirtilen hat geometrisi parametreleri bozulma oranı eşik değerleri, Portekiz'deki demiryolu hat geometrisi parametreleri ile değerlendirilmiştir.

Cardenas-Gallo ve ark. (2017) hazırladıkları çalışmada, demiryolu hat geometrisi bozulmalarını tahmin etmek için üç farklı bakış açısı ile çözüm yaklaşımı ele alınmıştır. Bu yaklaşım sonuçlarının demiryolu hat geometrisi performansını arttırdığı gösterilmiştir.

Pratico ve ark. (2018) yayımladığı çalışmada, demiryolu hattının performansını arttırmak için, güvenilirlik, bulunabilirlik, sürdürülebilirlik, emniyet (RAMS) ve yaşam döngü maliyeti yaklaşımları ile ayrı ayrı uygulamalarla değerlendirilmiştir.

Fiorillo ve ark. (2018) hazırlamış oldukları çalışmada, aşırı trafik yükü etkisi altındaki köprülerin yapısal güvenilirlik analizleri için paralel geçiş arayüz bilgileri açıklanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları, paralel geçiş arayüz yaklaşımının, Monte Carlo simülasyonu ile karşılaştırıldığında simülasyon sayısını önemli ölçüde azaltıldığı gösterilmiştir.

Peralta ve ark. (2018) hazırlamış oldukları çalışmada, demiryolu hattına yapılan bakım yenileme faaliyetleri demiryolu işletmesi için çok önemli olduğu ele alınmıştır. Çalışmada, hat geometrisi parametrelerinin bozulma sebeplerini hesaba katarak bozulmaları önleyecek bir yaklaşım modeli analizi değerlendirilmiştir.

Zhang ve ark. (2018) yayımlamış oldukları çalışmada, demiryolu hat geometrisi bakım ve yenileme maliyetleri değerlendirmesini ele almıştır. Demiryolu hat geometrisi bileşeni rayların bakım ve yenilemesi için Petri ağları modeli değerlendirilmiştir. Petri ağları modelinin uygulaması bir örnekle gösterilmiştir.

Soleimanmeigouni ve ark. (2018) hazırlamış oldukları çalışmada, demiryolu hattının verimlilik ve performansının artırılması için planlı bakım çalışmaları kapsamında analiz edilmesini değerlendirmiştir.

Min ve ark. (2011) hazırlamış oldukları bir çalışmada, demiryolu güvenilirliği risk değerlendirmesi metotları kullanılmıştır. Çalışmada demiryolu işletme ve bakım analizi için bulanık mantık yaklaşımının nasıl kullanılacağı ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Aguirre ve ark. (2013) yayımladıkları çalışmada, demiryolu kazalarının kantitatif analizi değerlendirmesini hedeflemişlerdir. Raylı sistemlerde kazaların yüksek oranda insan faktörleriyle kaydedildiğini, mühendisler risk değerlendirmesinde güvenilirlik faktörlerini dikkate almalarının sağlamaları ortaya konulmuştur. İnsan hatalarının modellenmesi, insan faktörlerinin niteliksel yönlerinin ölçümü ile ilgili bazı sınırlamalar gösterilmiştir. Önerilen çalışmada insan faktörü ile risk değerlendirilmesinde hata ağacı analizi kullanılarak arıza tespit yöntemi ele alınmıştır.

Jorge ve ark. (2012) yapmış oldukları bir çalışmada, risk uygulamasında fayda-maliyet oranını belirlemek için geosentetik döşenen yollarda hasarı azaltmak için kabul edilebilirlik analizinin nasıl yapılacağı anlatılmıştır. Fayda-maliyet analizlerinde en uygun geosentetik sarılması çözümünü belirlemek için kabul edilebilirlik oranları değerlendirilmiştir. Risk değerlendirilmesinde fayda-maliyet azaltılması, brüt ekonomik kayıplara neden olması gösterilmiştir. Demiryolu altyapı işletmesinde meydana gelmesi beklenen tahmin olasılıkları belirleme analizleri ele alınmıştır.

Qiu ve ark. (2014) yapmış oldukları bir çalışmada, demiryolu sinyalizasyon sistemlerinin bulunabilirlik analizi değerlendirmesi ortaya konulmuştur. Söz konusu demiryolu ulaşımında güvenli ve emniyetli işletmecilik, yolcu ve yük taşımacılığında hizmet kalitesi ele alınmıştır. Çalışmada sinyalizasyon sistemi belirsizliği dikkate alınarak sistemlerinin bulunabilirliğini değerlendirmek için iki yaklaşım önerilmiştir. Sistemlerin tahmini bulunabilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmak için, lineer denklem ve fonksiyonları ve zamanlı simülasyon tercihi ele alınmıştır. Simülasyon kullanılmasının analitik çözüme daha yakın sonuç verdiği gösterilmiştir.

Baker ve ark. (2009) yapmış oldukları bir çalışmada, karayolu ve demiryolu araçlarına çapraz rüzgar etkileri ele alınmıştır. Söz konusu özellikle yüksek hızlı trenlerin aerodinamik katsayılarını belirlemek için deneysel tekniklerle ulaşılmıştır. Rüzgar tüneli testleri için güvenilirlik analiz testleri araştırılmıştır. Araç ile rüzgar arasındaki dinamik etkiler, çapraz rüzgarların devirme risk analizleri ve olasılıkları azaltmak için güvenilirlik simülasyon analizleri yapılmıştır.

Cedergren, (2013) yapmış olduğu bir çalışmada, kaza araştırmalarında uygulanan önerileri ele almıştır. Söz konusu İsveç demiryolu sektörü örnek olarak, teorik çalışmanın temelini sağlayan yaklaşımını değerlendirmiştir. Sistem güvenilirliği arasındaki kesişme noktasında yer alan risk yönetim ve uygulama araştırmalarını ele almıştır. Araştırmanın amacı kaza emniyet soruşturması sonuçları sunmaktır. Böylece demiryolu güvenilirliğinin artırılmasının önemini vurgulamıştır.

Johan, (2002) yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında, demiryolu emniyeti risk ve maliyetleri ele almıştır. Bu doktora çalışmasında demiryollarındaki risklerin belirlenmesi, güvenilirlik analizi, demiryolu emniyetini sağlamak için uygun yöntemler ve demiryolu emniyeti önlemleri güvenilirlik analizleri geliştirmiştir. Çalışmada güvenilirlik analizi ve meydana gelecek risk tahmin tanımlanması bir süreç olduğu açıklanmıştır. Çalışmada risk analizi modelleri sonuçları karşılanmıştır, çeşitli güvenilirlik sonuçları alınmış ve güvenilirlik analizleri değerlendirilmiştir.

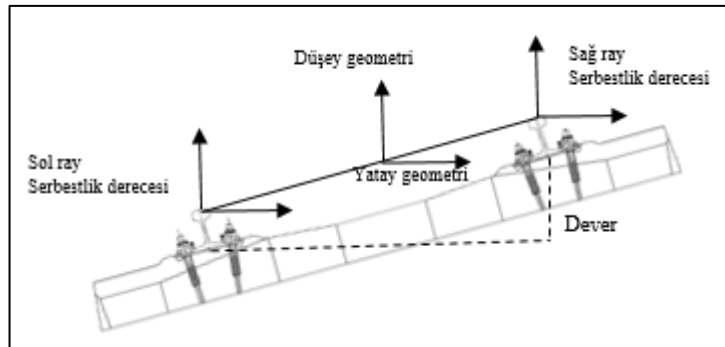
Ambika, (2009) yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında, demiryolu üstyapı RAMS ve yaşam döngü maliyetleri için bakım yenileme destek modellerini ele almıştır. Farklı bakım yenileme parametreleri belirsizliği ve aynı zamanda altyapı yaşam döngü maliyetlerinin istatistiksel olasılıklarla analiz etmiştir. RAMS uygulaması ve belirsizliklerin hesaplanması için bu çalışmada bir yaklaşım geliştirmiştir. Demiryolu altyapısı için RAMS ve yaşam döngü maliyet analizlerinin uygulanabilirliği tartışılmış ve bu etkin bir altyapı bakım yenileme planlaması modelleri gösterilmiştir.

Yakubu, (2015) yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, demiryolu üstyapısı güvenilirlik analizi, altyapının bozulma olasılığı ve bu tür bozulmaların demiryolu hattına etkilediği riskleri ele almıştır. Güney Afrika demiryolu taşımacılığı (PRASA) metro hattı altyapısı bakım yenilemesi ile ilgili araştırmaları incelemiştir. Bu metro hattındaki güvenilirlik ve bulunabilirlik performansını iyileştirme yönünde bir yaklaşım geliştirmiştir.

BÖLÜM 3. DEMİRYOLU HAT GEOMETRİSİ VE HAT GEOMETRİSİNİN ÖLÇÜMÜ

Dünyada geniş bir uygulama alanına sahip olan balastlı demiryolunun hat bileşenleri iki gruba ayrılır. İlk grup üstyapı olarak tasarlanır ve raylardan, bağlantı malzemesinden, traverslerden ve balast tabakasından oluşur. İkinci grup altyapı olarak tasarlanır ve alt balast tabakasından ve toprak gövdeden oluşur.

Demiryolu hattının yatayda ve düşeydeki konumuna demiryolu hattı geometrisi denir. Hattın olması gereken geometrik konumdan sapmasına hat geometrisinin bozulması adı verilmektedir. Hat geometrisi başlıca iki grupta incelenir. İlki yatay geometri diğeri ise düşey geometridir. Demiryolu hat geometrisinde meydana gelen bozulmalar düşey geometrinin bozulması ve yatay geometrinin bozulması şeklinde sınıflandırılabilir. Düşey geometrinin bozulması; burulma, dever ve nivelman bozulmaları olarak kendini gösterir. Yatay geometrinin bozulması ise; hat genişliğinin bozulması ve demiryolu hattının ekseninden sapması olarak kendini gösterir. Her bir rayın yatay ve düşey doğrultuda iki serbestlik derecesi vardır. Bu sebepten dolayı demiryolu hattında meydana gelen bozulmalar her bir ray için değişiklik gösterebilir (Şekil 3.1.) (Guler ve ark., 2011).



Şekil 3.1. Demiryolu hattının serbestlik dereceleri.

Demiryolu hat geometrisi parametrelerinin bozulma derecesiyle ilgili eşik değerler belirlenebilir. Bu eşik değerler temelinde BY faaliyetleri gerçekleştirilebilir. EN 13848 numaralı AB standardında; uyarı limiti, müdahale limiti ve acil müdahale limiti olmak üzere üç adet eşik değer belirlenmiştir (BSI, 2008a; Guler, 2013).

3.1. Hat Geometrisi İle İlgili EN 13848 Avrupa Birliği Standardı

EN 13848-1 standardı, demiryolu hat geometrisi ile ilgilidir. Bu standart beş bölümden oluşmaktadır. EN 13848 “Demiryolu uygulamaları-Hat-Hat geometrisi kalitesi” ana başlığında her bir bölümde içerilen konular aşağıda özetlenmiştir:

- Bölüm 1: Hat geometrisinin tanımı,
- Bölüm 2: Ölçüm sistemleri-Demiryolu kontrol araçları,
- Bölüm 3: Ölçüm sistemleri-Demiryolu yapım ve bakım makinaları,
- Bölüm 4: Ölçüm sistemleri-Elle kumanda edilen ve hafif ağırlıklı cihazlar,
- Bölüm 5: Geometrik kalitenin değerlendirilmesi.

3.2. EN 13848-1 Demiryolu Uygulamaları-Hat-Hat Geometrisi Kalitesi-Bölüm 1, Hat Geometrisinin Tanımı

Avrupa Standardının bu bölümü, çeşitli ölçüm araçlarıyla ölçülen hat geometrisi kalitesini belirleyen parametreleri tanımlamaktadır. Bu ölçüm araçları bu standardın 2., 3. ve 4. bölümlerinde açıklanmıştır. Standart; hat genişliği, nivelman, hattın eksenden saptması, dever ve burulmadan oluşan hat geometrisi parametrelerini kapsamaktadır. Bu standartta her bir parametrenin tanımı ve ölçümü ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır. EN 13848-1 numaralı standartta kullanılan terimler ve tanımların açıklamaları aşağıda sıralanmıştır (BSI, 2008b):

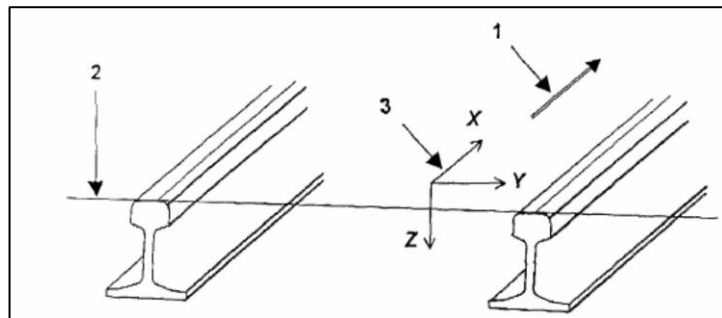
- Hat geometrisi kalitesi: Güvenliği veya sürüş kalitesini etkileyecek olan demiryolu hattının düşey ve yatay düzlemdeki parametrelerinin tasarım değerlerinden saptmasının değerlendirilmesidir.
- İç yüz (gauge face): Yuvarlanmanın gerçekleştiği ray mantarının iç yüzüdür.

- Simgeler ve kısaltmalar (Symbols and abbreviated terms): 13848-1 standardında kullanılan simgeler ve kısaltmalar Tablo 3.1.'de verilmiştir.
- Hat koordinat sisteminin tanımı (Description of the track co-ordinate system).

Tablo 3.1. 13848-1'de kullanılan simgeler ve kısaltmalar (BSI, 2008b)

Simge	Tanım	Birim
G	Hat genişliği	mm
Z_p	Hat genişliğinin ölçüldüğü yuvarlanma yüzeyinin aşağısındaki mesafe	mm
$Z_{p'1}$	Sol rayda, ardışık ölçümlerde düşey yönde üst kot farklarıdır. Nivelmanın ölçümünde kullanılır.	mm
$Z_{p'2}$	Sağ rayda, ardışık ölçümlerde düşey yönde üst kot farklarıdır. Nivelmanın ölçümünde kullanılır.	mm
y_p	P noktası ve bir referans çizgisi arasındaki mesafedir. Hattın ekseninden sapması ölçümünde kullanılır.	mm
P	İç yüz temas noktası	
$D1, D2, D3$	Dalga boyu uzunlukları	m
λ	Dalga boyu	m
V_1	Sıfır çizgisi ile pik değer arasındaki büyüklüktür. Burulma ölçümünde kullanılır	mm/m
V_2	Ortalama değer ile pik değer arasındaki büyüklüktür. Burulma ölçümünde kullanılır	mm/m
ℓ	Burulma ölçüm uzunluğu	m
X, Y, Z	Hat koordinat sisteminin eksenleri	

Hat geometrisinin ölçümünde kullanılan koordinat sistemi tanımları ve şekli Şekil 3.4.'te verilmiştir. Şekil 3.4.'te; 1-yuvarlanma yönü, 2-yuvarlanma yüzeyi, 3-hat koordinat sistemi, X -ekseni: yuvarlanma doğrultusundaki eksen, Y -ekseni: yuvarlanma yüzeyine paralel eksen ve Z -ekseni: yuvarlanma yüzeyine dik eksen.



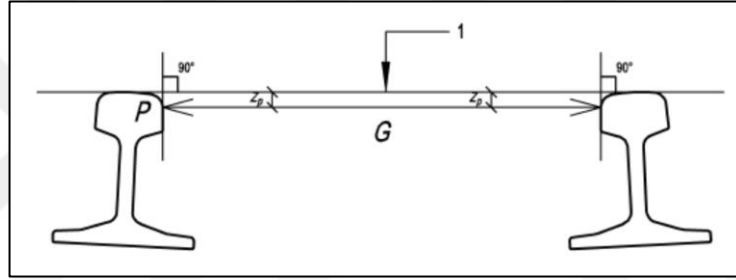
Şekil 3.4. Hat koordinat sisteminin eksenleri arasındaki ilişki (BSI, 2008b).

3.2.1. Hat geometrisi parametrelerinin tanımları

EN 13848-1’de hat geometrisi parametrelerinin tanımları ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu tanımlar aşağıda sıralanmıştır.

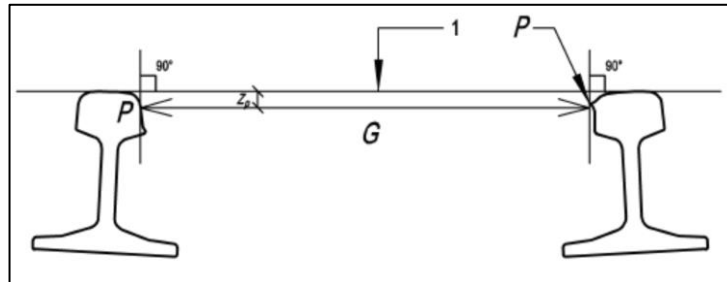
1. Hat Genişliği (Track gauge)

İki komşu rayın yuvarlanma yüzeylerinden Z_p (14 mm) kadar aşağıda, ray içi yüzleri arasındaki G mesafesi hat genişliği olarak tanımlanır. Yeni ve aşınmamış bir ray mantarında, hat genişliğinin ölçümü Şekil 3.5.’te gösterilmektedir. Şekil 3.5.’te; “1” yuvarlanma yüzeyini göstermektedir (BSI, 2008b).



Şekil 3.5. Yeni rayda hat genişliği (BSI, 2008b).

Aşınmış bir ray mantarında, hat genişliğinin ölçümü Şekil 3.6.’da gösterilmektedir. Şekil 3.6.’da; “1” yuvarlanma yüzeyini göstermektedir.



Şekil 3.6. Aşınmış rayda hat genişliği (BSI, 2008b).

Hat genişliğinin ölçümünde temaslı veya temassız ölçüm araçları ya da ölçüm cihazları kullanılabilir. Hat genişliği ölçümünde dalga boyu uzunluğu kullanılmamaktadır.

Ölçüm çözünürlüğü 0.5 mm'den küçük olmalıdır ve ölçüm belirsizliği ise ± 1 mm'dir. Hat genişliği ölçüm aralığı ise -15 mm ile +50 mm arasındadır (BSI, 2008b).

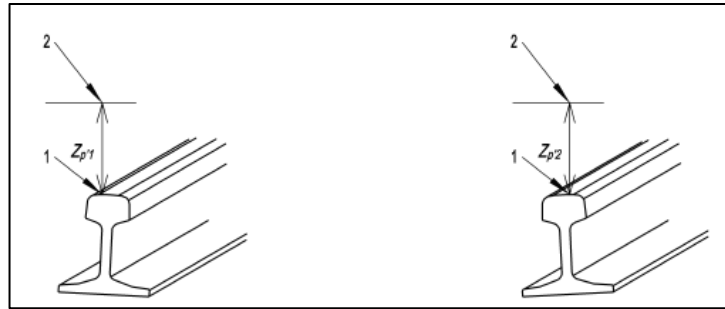
Hat genişliği ölçümünde; tekil kusurlar, itibari değerden (Örnek 1,435 mm) pik değere büyüklükleriyle gösterilir (minimum ve maksimum pik değer).

Hat genişliği ölçümünde aşağıda sıralanan veriler toplanır:

- Belirlenen eşiği aşan tekil kusurların sayısı.
- Ölçülen hat genişliği.
- Ölçülen hat genişliği ile itibari hat genişliği arasındaki fark.
- Belirlenen mesafede ortalama hat genişliği.
- Belirli bir mesafede hat genişliği değişimi.

2. Nivelman

Verilen dalga boyu uzunluklarında, herhangi bir rayın üst yüzünün z eksen yönünde, referans çizgisinden Z_p kadar sapmasına nivelman adı verilmektedir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Düşey geometri (Nivelman). Açıklama, 1-üst yüz, 2-referans çizgisi (BSI, 2008b).

Nivelman ölçümü demiryolu ölçüm araçları ya da ölçüm cihazları ile yapılır. Nivelman ölçümünde dalga boylarında (λ) üç aralık dikkate alınmaktadır (BSI,2008b).

- D1: $3 \text{ m} < \lambda < 25 \text{ m}$.
- D2: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$.

- D3: $70 \text{ m} < \lambda \leq 150 \text{ m}$ (Hızların 250 km/sa 'den büyük olduğu demiryolu hatlarında bu dalga boyu kullanılmaktadır).

Nivelman ölçümünde her bir dalga boyunda dikkate alınacak çözünürlük değerleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Düşey geometri (Nivelman): Çözünürlük (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
Çözünürlük	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5

Nivelman ölçümünde her bir dalga boyu için ölçüm belirsizliği Tablo 3.3.'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Düşey geometri (Nivelman): Ölçüm belirsizliği (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
Belirsizlik	± 1	± 3	± 5

Nivelman ölçümünde her bir dalga boyu için ölçüm uzunluğu Tablo 3.4.'te belirtilmiştir.

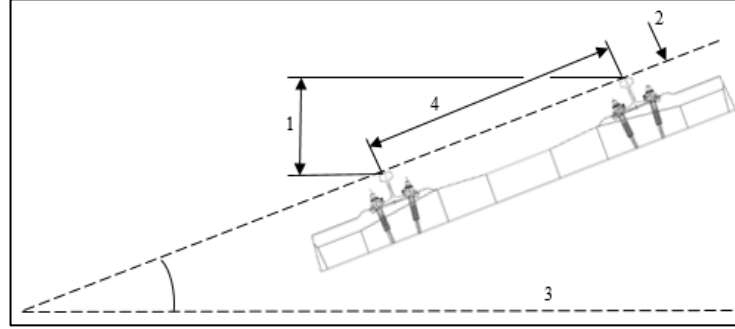
Tablo 3.4. Düşey geometri (Nivelman): Ölçüm uzunluğu (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
Ölçüm uzunluğu	± 50	± 100	± 300

3. Dever

Her iki rayın yuvarlanma yüzeylerinin eksenleri arasındaki yükseklik farkına dever adı verilmektedir. Rayların yuvarlanma yüzeylerinin eksenleri arasındaki mesafe hat açıklığı hipotenüs olarak ifade edilir (Şekil 3.8.). Hipotenüs değerleri; $1,435 \text{ mm}$ itibari hatlarda $1,500 \text{ mm}$, $1,524 \text{ mm}$ itibari hatlarda $1,600 \text{ mm}$, $1,668 \text{ mm}$ itibari hatlarda ise $1,740 \text{ mm}$. Şekil 3.8.'de; 1-dever, 2-yuvarlanma yüzeyi, 3-yatay referans düzlemi, 4-hipotenüs.

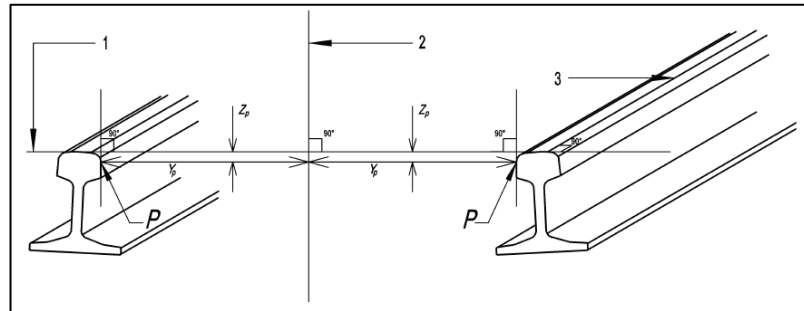
Dever ölçümünde dalga boyu uzunluğu kullanılmamaktadır. Ölçüm çözünürlüğü 0.5 mm'den küçük olmalıdır. Dever ölçüm belirsizliği ± 5 mm'dir. Ardışık deverlerin ölçüm belirsizliği ise ± 1 mm'dir (BSI, 2008b).



Şekil 3.8. Dever.

4. Hattın Ekseninden Sapması

Demiryolu hattının ekseninden sapması; verilen dalga boyu uzunluklarında her iki rayın (P noktalarının) hattın merkezine göre yatayda (y yönünde) yaptığı yer değiştirmedir (y_p sapması). Hattın eksenden sapması her bir ray için ayrı ayrı hesaplanır (Şekil 3.9.). Şekil 3.9.'da; 1-yuvarlanma yüzeyi, 2-referans çizgisi, 3-yuvarlanma tablasının eksen çizgisi.



Şekil 3.9. Hattın eksenden sapması (BSI, 2008b).

Hattın ekseninden sapmasının ölçümü demiryolu ölçüm araçları ya da ölçüm cihazları ile yapılır. Hattın ekseninden sapması ölçümünde dalga boylarında (λ) üç aralık dikkate alınmaktadır (BSI, 2008b).

- D1: $3 \text{ m} < \lambda < 25 \text{ m}$.
- D2: $25 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$.
- D3: $70 \text{ m} < \lambda \leq 200 \text{ m}$ (Hızların 250 km/sa 'den büyük olduğu demiryolu hatlarında bu dalga boyu kullanılmaktadır.).

Hattın ekseninden sapması ölçümünde her bir dalga boyunda dikkate alınacak çözünürlük değerleri Tablo 3.5.'te verilmiştir. Hattın ekseninden sapması ölçümünde her bir dalga boyu için ölçüm belirsizliği Tablo 3.6.'da belirtilmiştir. Hattın ekseninden sapması ölçümünde her bir dalga boyu için ölçüm uzunluğu Tablo 3.7.'de belirtilmiştir.

Tablo 3.5. Eksenden sapma: Çözünürlük (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	D1	D2	D3
Çözünürlük	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5

Tablo 3.6. Eksenden sapma: ölçüm belirsizliği (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	D1	D2	D3
Belirsizlik	± 1.5	± 4	± 10

Tablo 3.7. Eksenden sapma: ölçüm uzunluğu (BSI, 2008b)

Dalga boyu uzunluğu	Boyutlar (mm)		
	D1	D2	D3
Ölçüm uzunluğu	± 50	± 100	± 500

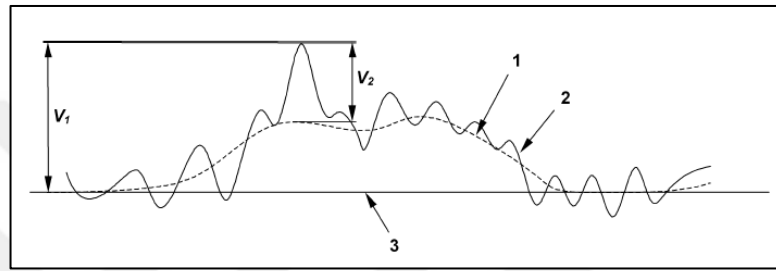
5. Burulma

Belirli bir uzunlukta alınan iki dever arasındaki cebrik farktır. Genellikle iki ölçüm noktası arasındaki bir eğim olarak ifade edilir. Burulma, % veya mm/m olarak ifade edilir. Burulma ölçümü ya eş zamanlı olarak sabit aralıklarda alınabilir; örneğin dingil aralığına eşdeğer bir mesafede, veya ardışık dever ölçümlerinden hesaplanabilir. Burulma ölçümünde dalga boyu uygulanmamaktadır. Ölçüm çözünürlüğü de 0.5 mm 'den küçük olmalıdır. Burulma ölçümünde ölçüm uzunluğu $\pm 15 \text{ mm/m}$ (%) olmalıdır. Burulma ölçümünde ölçüm belirsizliği Tablo 3.8.'de belirtilmiştir (BSI, 2008b).

Tablo 3.8. Burulma: ölçüm belirsizliği (BSI, 2008b)

Ölçüm yöntemi	Ölçüm belirsizliği (mm/m)	
	$\ell \leq 5.5 \text{ m}$	$5.5 \text{ m} < \ell \leq 20 \text{ m}$
Doğrudan ölçüm	$\pm 1/\ell$	$\pm 2/\ell$
Dever farkından ölçüm	$\pm 1.5/\ell$	$\pm 3/\ell$

Burulma ölçümünde tekil yani münferit kusurlar, sıfır çizgisinden pik değere (V_1) ya da ortalama değerden pik değere (V_2) gösterilir (Şekil 3.10.). Şekil 3.10.'da; 1-filtre edilmiş değerler, 2-burulma, 3-sıfır çizgisi.



Şekil 3.10. Burulma-analiz yöntemi (BSI, 2008b).

3.3. EN 13848-5 Demiryolu Uygulamaları–Hat–Hat Geometrisi Kalitesi–Bölüm 5, Geometrik Kalitenin Değerlendirilmesi

Avrupa Standardının bu bölümü, EN 13848-5’de tanımlanan hat geometrisi parametrelerinin kalite düzeyinin belirlenmesi ile ilgilidir. Bu standartta belirtilen eşik değerler Avrupa’da çeşitli demiryolları tarafından uygulanan değerler esas alınarak hazırlanmıştır (BSI, 2008d). EN 13848-5 numaralı standartta kullanılan terimler ve tanımların açıklamaları aşağıda sıralanmıştır (BSI, 2008d):

- İtibari hat genişliği (İtibari hat genişliği): Demiryolları ağlarında kullanılan hat genişliğinin referans değeridir (Örneğin 1,435 mm).
- Tasarım hat genişliği: İtibari hat genişliğinden farklı olabilecek, belli bir hat kesiminde hat genişliğinin tasarım değeridir.
- Simgeler ve kısaltmalar (Symbols and abbreviated terms): 13848-5 standardında kullanılan simgeler ve kısaltmalar Tablo 3.9.’da verilmiştir.

Tablo 3.9. 13848-5’de kullanılan simgeler ve kısaltmalar (BSI, 2008d)

Simge	Tanım	Birim
<i>AL</i>	Uyarı eşiği	mm veya mm/m
<i>IL</i>	Müdahale eşiği	mm veya mm/m
<i>IAL</i>	Acil müdahale eşiği	mm veya mm/m
<i>D1</i>	Dalga boyu <i>D1</i> : $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$	m
<i>D2</i>	Dalga boyu <i>D2</i> : $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$	m
<i>D3</i>	Dalga boyu <i>D3</i> : Düşey eksen için $70\text{ m} < \lambda \leq 150\text{ m}$	m
	Dalga boyu <i>D3</i> : Yatay eksen için $70\text{ m} < \lambda \leq 200\text{ m}$	
<i>HS INS TSI</i>	Karşılıklı işletmecilik kapsamında Yüksek Hızlı Altyapı Teknik Şartnamesi	
ℓ	Burulma ölçüm uzunluğu	m
λ	Dalga boyu	m
<i>N/A</i>	Uygulanamaz	
<i>r</i>	Kurb yarıçapı	m
<i>u</i>	Dever	mm
<i>V</i>	Hız	Km/sa

EN 13848-1’de belirtilen tüm parametreler bu standartta dikkate alınmıştır. Hat geometrisi kalitesinde genel olarak üç gösterge kullanılmaktadır.

- Münferit kusurların ekstrem değerleri,
- Belirli bir uzunlukta standart sapma, örneğin 200 m,
- Ortalama değer.

EN 13848’de üç temel düzey göz önüne alınmaktadır:

- Acil müdahale eşiği (IAL): Aşılması halinde; kusurlar düzeltilinceye kadar, maksimum tren hızını düşürmek veya hattı işletmeye kapatmak şeklinde acil önlemler alınmasını gerektiren değerdir.
- Müdahale eşiği (IL): Aşılması halinde, bir sonraki ölçüme kadar güvenlik eşiğine varmadan düzeltici bakımı gerektiren değeri ifade eder.
- Uyarı eşiği (AL): Aşılması halinde; hat geometrisi koşullarının, düzenli-planlı bakım çalışmaları kapsamında analiz edilmesini ve dikkate alınmasını ifade eden değerdir.

3.4. Hat Geometrisi Parametrelerinin Eşik Değerleri

Bu standart ile verilen eşik değerler tekerlek-ray etkileşimiyle ilgili tecrübelerden ve teorik kabullerden çıkarılmıştır. Eşik değerlerin aşılması durumunda; dray (Raydan çıkma) riskini azaltmak veya diğer tehlikeleri önlemek ve bunları kabul edilebilir bir düzeye getirmek için gerekli BY çalışmalarının yapılması gerekir. Bu standartta verilen müdahale ve uyarı eşikleriyle ilgili değerler zorunlu olmayıp sadece bir rehber niteliğinde önerilmiştir. Bu standartta verilen eşik değerlerden hat genişliği hariç diğer tüm parametrelerin değerleri mutlaklıdır.

1. Hat Genişliği Eşik Değerleri (IAL, AL ve IL)

Aşağıdaki Tablo 3.10., Tablo 3.11., Tablo 3.12., Tablo 3.13. ve Tablo 3.14.'te verilen eşik değerler 1,435 mm, 1,524 mm ve 1,668 mm itibari hat genişliğine sahip hatlar için verilen eşik değerlerdir. Diğer hat genişliklerini kullanan demiryolları bu değerlere göre bir ayarlama yapabilirler. HS INS TSI'de (Yüksek Hızlı Demiryolları Altyapı Karşılıklı İşletmecilik Şartnamesi) hat genişliği referans değeri 1,435 mm'dir.

Tablo 3.10. Hat genişliği: "Münferit kusurların-İtibari Hat Genişliği" eşik değerleri (IAL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	İtibari hat genişliği pik değerleri (mm) IAL		İtibari hat genişliği pik değerleri (mm) HS INS TSI	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
$V \leq 80$	-11	+35	-9	+35
$80 < V \leq 120$	-11	+35	-9	+35
$120 < V \leq 160$	-10	+35	-8	+35
$160 < V \leq 220$	-7	+28	-7	+28
$220 < V \leq 300$	-5	+28	-5	+28

Tablo 3.11. Hat genişliği: 100 m uzunlukta "İtibari-Ortalama" eşik değerler (IAL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	100 m'de itibari hat genişliği-ortalama hat genişliği (mm)	
	Minimum	Maksimum
$V \leq 40$	N/A	+32
$40 < V \leq 80$	-8	+32
$80 < V \leq 120$	-7	+27
$120 < V \leq 160$	-5	+20
$160 < V \leq 230$	-5	+20
$230 < V \leq 300$	-3	+20

Tablo 3.12. Hat genişliği (HS INS TSI): 100 m uzunlukta ortalama eşik değerler (IAL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	100 m uzunlukta ortalama hat genişliğinin minimum değeri (mm) (Aliymanda ve R > 10,000 m kurlarda)
$V \leq 160$	1,430
$160 < V \leq 200$	1,430
$200 < V \leq 230$	1,432
$230 < V \leq 250$	1,433
$250 < V \leq 280$	1,434
$280 < V \leq 300$	1,434
$V > 300$	1,434

Tablo 3.13. Hat genişliği: “Münferit kusurların-İtibari Hat Genişliği” eşik değerleri (AL ve IL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	İtibari hat genişliği-pik değerleri (mm) AL		İtibari hat genişliği-pik değerleri (mm) IL	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
$V \leq 80$	-7	+25	-9	+30
$80 < V \leq 120$	-7	+25	-9	+30
$120 < V \leq 160$	-6	+25	-8	+30
$160 < V \leq 230$	-4	+20	-5	+23
$230 < V \leq 300$	-3	+20	-4	+23

Tablo 3.14. Hat genişliği: 100 m uzunlukta “İtibari-Ortalama” eşik değerler (AL ve IL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	100 m’de itibari hat genişliği-ortalama hat genişliği (mm) AL		100 m’de itibari hat genişliği-ortalama hat genişliği (mm) IL	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
$V \leq 40$	N/A	+25	N/A	+28
$40 < V \leq 80$	-6	+25	-7	+28
$80 < V \leq 120$	-5	+22	-6	+25
$120 < V \leq 160$	-3	+16	-4	+18
$160 < V \leq 230$	-3	+16	-4	+18
$230 < V \leq 300$	-1	+16	-2	+18

2. Nivelman Eşik Değerleri (IAL, AL ve IL)

Hattın düşey yönde bozulmasını ifade eden nivelman değerlerinin eşik değerleri Tablo 3.15., Tablo 3.16. ve Tablo 3.17.’de gösterilmiştir.

Tablo 3.15. Nivelman: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerleri (IAL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Ortalama-pik değer (mm) IAL	
	D1	D2
$V \leq 80$	28	N/A
$80 < V \leq 120$	26	N/A
$120 < V \leq 160$	23	N/A
$160 < V \leq 230$	20	33
$230 < V \leq 300$	16	28

Tablo 3.16. Nivelman: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerleri (AL ve IL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Ortalama-pik değer (mm) AL		Ortalama-pik değer (mm) IL	
	D1	D2	D1	D2
$V \leq 80$	12-18	N/A	17-21	N/A
$80 < V \leq 120$	10-16	N/A	13-19	N/A
$120 < V \leq 160$	8-15	N/A	10-17	N/A
$160 < V \leq 230$	7-12	14-20	9-14	18-23
$230 < V \leq 300$	6-10	12-18	8-12	16-20

Tablo 3.17. Nivelman: Standart sapma eşik değerleri (AL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Standart sapma (mm)
	D1
$V \leq 80$	2.3–3.0
$80 < V \leq 120$	1.8–2.7
$120 < V \leq 160$	1.4–2.4
$160 < V \leq 230$	1.2–1.9
$230 < V \leq 300$	1.0–1.5

3. Dever Eşik Değerleri (IAL, AL ve IL)

Bu standart dever için IAL, IL ve AL eşik değerleri vermemektedir.

4. Hattın Ekseninden Sapması Eşik Değerleri (IAL, AL ve IL)

Hattın ekseninden sapması ile ilgili eşik değerlerler Tablo 3.18., Tablo 3.19. ve Tablo 3.20.’de verilmiştir.

Tablo 3.18. Eksenden sapma: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerleri (IAL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Ortalama-pik değer (mm) IAL	
	D1	D2
$V \leq 80$	22	N/A
$80 < V \leq 120$	17	N/A
$120 < V \leq 160$	14	N/A
$160 < V \leq 230$	12	24
$230 < V \leq 300$	10	20

Tablo 3.19. Eksenden sapma: Münferit kusurların “Ortalama-Pik” eşik değerleri (AL ve IL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Ortalama-pik değer (mm) AL		Ortalama – pik değer (mm) IL	
	D1	D2	D1	D2
$V \leq 80$	12-15	N/A	15-17	N/A
$80 < V \leq 120$	8-11	N/A	11-13	N/A
$120 < V \leq 160$	6-9	N/A	8-10	N/A
$160 < V \leq 230$	5-8	10-15	7-9	14-17
$230 < V \leq 300$	4-7	8-13	6-8	12-14

Tablo 3.20. Eksenden sapma: Standart sapma eşik değerleri (AL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Standart sapma (mm)
	DI
$V \leq 80$	1.5–1.8
$80 < V \leq 120$	1.2–1.5
$120 < V \leq 160$	1.0–1.3
$160 < V \leq 230$	0.8–1.1
$230 < V \leq 300$	0.7–1.0

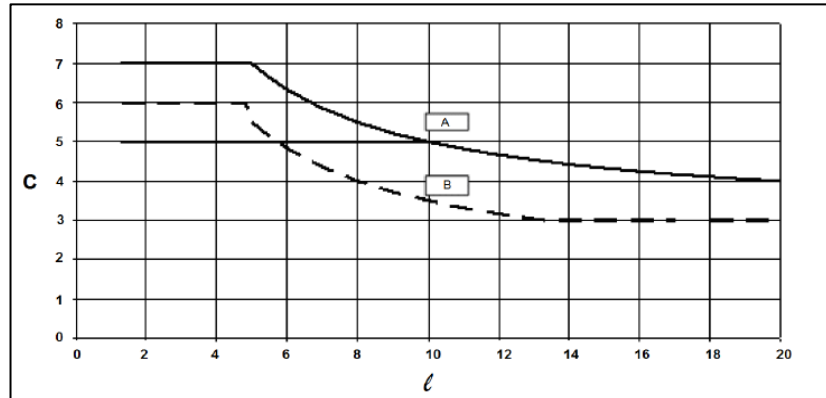
5. Burulma Eşik Değerleri (IAL, AL ve IL)

Demiryollarında burulma değeri ölçüm uzunluğunun fonksiyonudur. Burulma değeri aşağıda verilen Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanır. $V \leq 200$ km/sa hıza göre tasarlanan hatlar için 7 mm/m, $V > 200$ km/sa hıza göre tasarlanan hatlar için 5 mm/m burulma değerleri kullanılır (Şekil 3.11.). Şekil 3.11.’de; ℓ : burulma ölçüm uzunluğu (m), Tablo 3.21.’de C : burulma için IAL değeri (mm/m)

$$1. \text{ Burulma eşiği } = ((20/\ell) + 3) \text{ } u \leq (r-100)/2 \text{ için (Eğri A)} \quad (3.1)$$

$$2. \text{ Burulma eşiği } = ((20/\ell) + 1.5) \text{ } (r-100)/2 < u < (r-50)/1.5 \text{ için (Eğri B)} \quad (3.2)$$

Burada, ℓ : burulma ölçüm uzunluğudur, $1.3 \text{ m} \leq \ell \leq 20 \text{ m}$, u : dever değeridir (mm), r : kurb yarıçapıdır (m).



Şekil 3.11. Burulma: Münferit kusurların “Sıfır-Pik” değerleri (IAL) (BSI, 2008d).

Pratikte demiryolu ağlarının çoğunda burulma üç metre uzunlukta ölçülür. Böylece IL ve AL değerleri sadece bu esas uzunlukta verilir ($\ell = 3 \text{ m}$). Burulma için eşik değerler Tablo 3.21.’de verilmiştir.

Tablo 3.21. Burulma: Münferit kusurların “Sıfır-Pik” eşik değerleri (AL ve IL) (BSI, 2008d)

Hız (km/sa)	Sıfır-pik değer AL (mm/m)	Sıfır-pik değer IL (mm/m)	Sıfır – pik değer IAL (mm/m)
$V \leq 80$	4	5	7
$80 < V \leq 120$	4	5	7
$120 < V \leq 160$	4	5	7
$160 < V \leq 230$	4	5	7
$230 < V \leq 300$	3	4	5

3.5. Demiryolu Hat Geometrisinin Ölçümü

Çok yakın zamana kadar demiryolu hattı, uzman bakım ekipleri tarafından basit aletlerle veya gözlemsel olarak kontrol edilmekteydi. Teknolojik zorluklar; demiryollarına veya demiryolu hattının bakımından sorumlu birimlere, istatistik olarak işlenmiş verilerin kullanılmasına imkan vermiyordu. Büyük miktarlardaki işlenmemiş veriyi, depolamak ve bunu anında kullanmak imkansızdı. Son yıllarda demiryolu organizasyonları yüksek hızlarda gidebilen ve istenilen aralıklarda ölçüm yapan demiryolu kontrol araçları kullanılmaktadırlar. Bu araçlar kontrol aletleriyle donatılmış olup istenilen aralıklarda demiryolu hattındaki bozulmaları tespit edebilmektedirler. Günümüzde CD yazıcıları ve büyük kapasiteli sabit diskleri kullanarak, çok ayrıntılı veriyi kullanmak ve depolamak mümkündür. Yol kontrol araçları ray geometrisindeki bozulmaları tespit ettiği gibi hat geometrisindeki bozulmaları da tespit edebilmektedir (Guler, 2005).

Hat geometrisi kalitesi, demiryolu kontrol sistemleri ve demiryolu kontrol araçlarıyla ilgili standartlar Avrupa Birliği Standardı tarafından belirlenmiştir. Bu komisyona pek çok Avrupa demiryolu organizasyonu ve demiryolu kontrol sistemleri üreten firmalar üyedir. EN 13848-2 standardı, ölçüm sistemleri-demiryolu kontrol araçları ile ilgilidir. Demiryolunda yapılan ölçümlerin ölçüm koşullarıyla ilgili EN 13848-2’de belirtilen hususlar aşağıda sıralanmıştır (BSI, 2008c):

- İşletme araçlarının etkisinin tespit edilebilmesi için, tüm geometrik parametreler yüklenmiş bir hat üzerinden ölçülmelidir. Rayın ölçüm noktasındaki yükleme, 180 kN/mm orta hat rijitliğine sahip ve UIC 60 (60E1)

rayı göz önüne alındığında en az düşey tekerlek yükü 2.5 tona eşdeğer olmalıdır.

- Farklı hızlarda ve her bir yönde yapılan ölçümlerin doğruluğu belli sınırlar içinde olmalıdır. Böyle bir durum yoksa, ölçümlerin geçerli olacağı koşullar ve/veya ölçüm yönü belirlenmelidir.
- Tüm parametreler belirlenen örnek uzunluğunda aynı noktadan ölçülmelidir.
- Tüm parametreler aynı örnek aralığında ölçülmelidir.
- Tüm ölçümlerin konum hassasiyeti ± 10 m içinde olmalıdır.
- Örnek uzunluğu hassasiyeti $\% 1$ içinde olmalıdır.

Demiryolu kontrol araçlarının ölçüm hızına ve ölçüm yönüne bağlı olmadan yaptıkları ölçümlerin tutarlı olması gerekmektedir. Çünkü bu ölçümler hattın kalite kontrolü, bakım planlaması ve güvenliğin bir göstergesi olarak kullanılırlar. Hat geometrisi ölçüm sistemi, demiryolu kontrol aracı üzerine devamlı olarak yerleştirilmiş olan donanımların tamamını içerir. Bu sistemlerden amaçlanan şunlardır:

- Geometrik parametrelerin ölçümü,
- Ölçüm işlemi süresince araç tarafından alınan mesafenin ölçümü,
- Belirtilen eşikleri aşan değerleri ve hattı karakterize eden diğer elemanların hat üzerindeki yerlerinin tam olarak belirlenmesi için bu iki ölçümün ilişkilendirilmesi,
- Kaydedilen bu parametrelerin kağıt veya bilgisayar gibi okunabilir ortamlara aktarılması,
- Ölçülmüş değerlerden yararlanılarak hat geometrisinin diğer parametrelerinin hesaplanması (burulma, eğrilik yarıçapı gibi),
- Hat geometrisi parametrelerini analiz etmek için ölçülmüş değerlerin işlenmesi,
- Kolaylıkla aktarılabilir bir veri tabanı sahip olması ve sonuç analizlerinin kaydedilmesi.

Demiryolu kontrol araçları temassız tipte veya temassız tipte olabilirler. Şayet kiris tipi ölçüm sistemi kullanılıyorsa; ölçüm hızı aralığı, çok düşük hızlarda ve aracın izin verilen en fazla hız sınırına kadar olabilir. Şayet ataletsel tipli ölçüm sistemi

kullanılıyorsa, bazı parametreleri ölçmek için ölçüm için en az bir hız gerekebilir (5 km/sa tavsiye edilen) (BSI, 2008c).

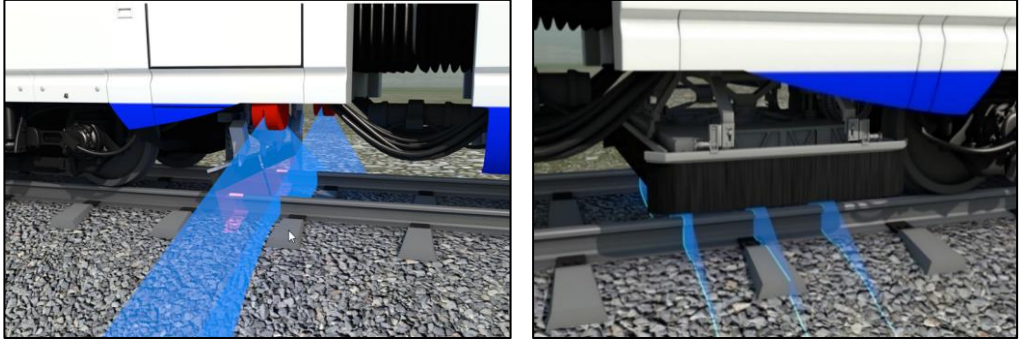
3.6. Demiryolu Ölçüm Araçları

Günümüzde demiryolu hatlarında; hat bileşenleri, hat geometrisi ve sanat yapıları verileri demiryolu araçları ve/veya portatif ölçüm sistemleri ile kontrol edilmekte ve veriler uzmanlar tarafından değerlendirilmektedir. Yüksek teknolojiye sahip ölçüm cihazları ile donatılmış olan ölçüm trenleri bir demiryolu laboratuvarı gibi işlev görmektedir. Demiryolu ölçüm trenleri ayrı bir tren olduğu gibi mevcut yolcu trenleri de ölçüm treni olarak kullanılabilir.

UTY’de de hat geometrisi parametreleri, Rus Infotrans kuruluşu tarafından geliştirilmiş olan ölçüm cihazları ve ölçüm trenleri ile ölçülmektedir ve ölçümler kontrol aracı üzerindeki bilgisayara kaydedilmektedir. Ölçüm sistemleri 25 cm aralıklarda veri toplayabilmektedir. Ölçülen tüm parametrelerin değerleri grafik kağıda çıktısı alınabildiği gibi bilgisayar ortamında da değerlendirilebilmektedir. Şekil 3.12.’de demiryolu ölçüm treni ve Şekil 3.13.’te ölçüm treninin alt kısmına yerleştirilen ve hat parametrelerini ölçen ölçüm sistemi görülmektedir.



Şekil 3.12. Demiryolu ölçüm treni (Infotrans, 2018).



Şekil 3.13. Demiryolu hat ölçüm sistemi (Infotrans, 2018).

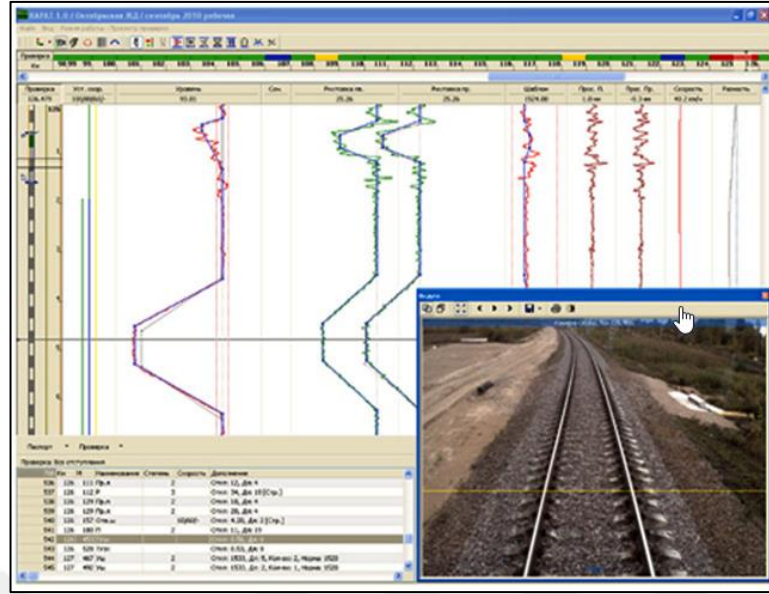
Şekil 3.14.'te, hat geometrisi ölçen portatif bir ölçüm cihazı görülmektedir.



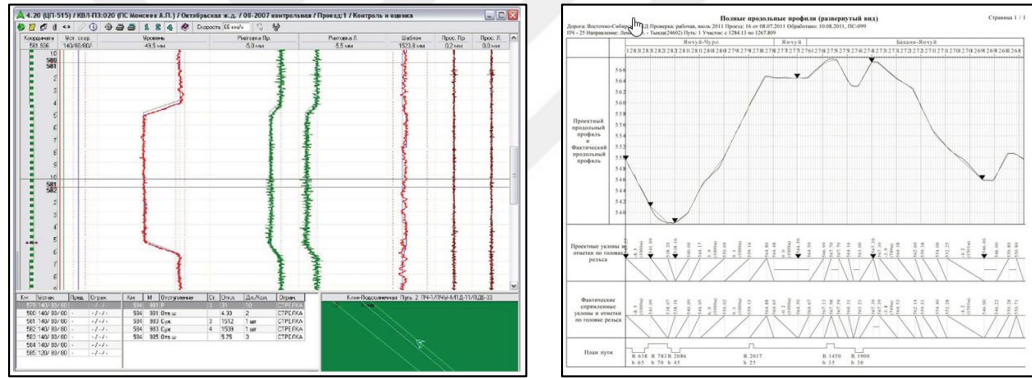
Şekil 3.14. Portatif ölçüm sistemleri (Infotrans, 2018).

3.6.1. Hat geometrisi ve ray profil kontrolü

Rus Infotrans kuruluşu tarafından geliştirilmiş olan ölçüm cihazları ile hat geometrisi ve ray profili kontrolü birlikte yapılmaktadır. Hat geometrisi ölçümünde lazer kameralar kullanılmaktadır. Şekil 3.15. ve Şekil 3.16.'da hat geometrisi parametrelerinin ölçüm grafikleri görülmektedir.

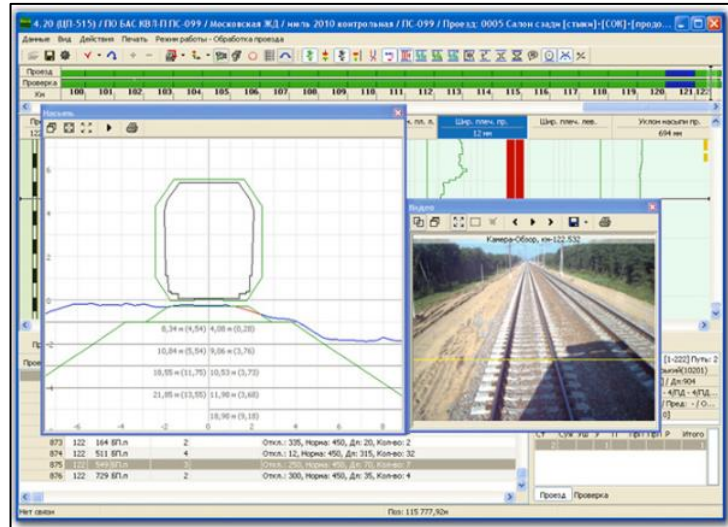


Şekil 3.15. Hat geometrisi ölçümü ve ölçüm grafikleri (Infotrans, 2018).

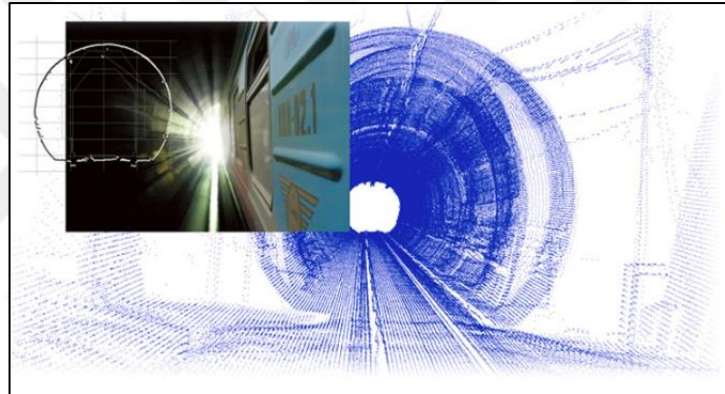


Şekil 3.16. Hat geometrisinin ölçümü ve değerlendirilmesi (Infotrans, 2018).

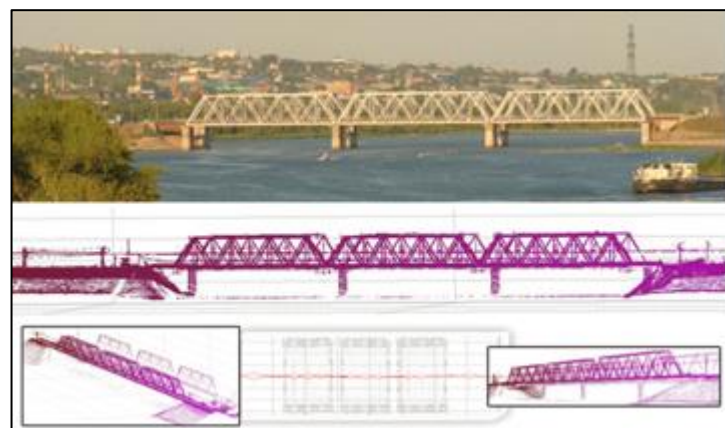
Şekil 3.17.'de sağ ve sol rayda meydana gelen aşınmaları ölçen sistem görülmektedir. Rayların birleşim noktaları olan contalar ve ray kaynakları da ölçüm sistemleri ile ölçülebilmektedir (Şekil 3.18.).



Şekil 3.21. Balast tabakası enkesitini kontrolü (Infotrans, 2018).



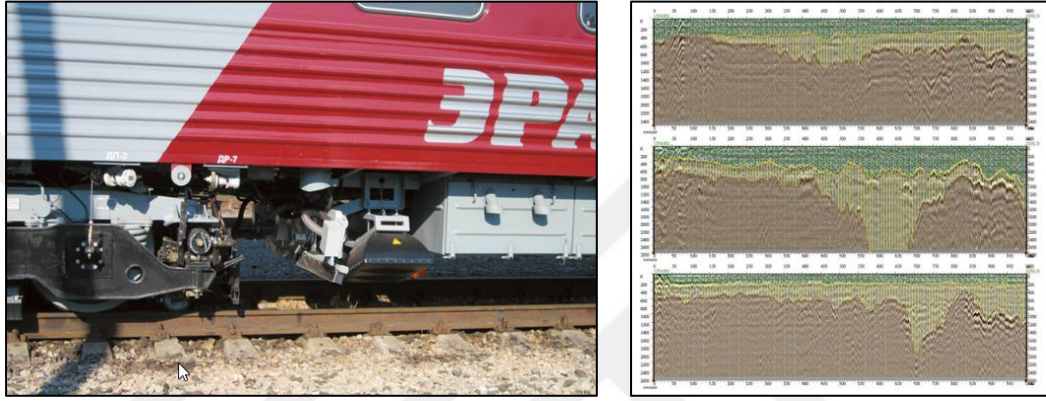
Şekil 3.22. Tünel kontrol sistemleri (Infotrans, 2018).



Şekil 3.23. Demiryolu köprülerinin kontrolü (Infotrans, 2018).

3.6.4. Demiryolu hat yatağının georadar ile kontrolü

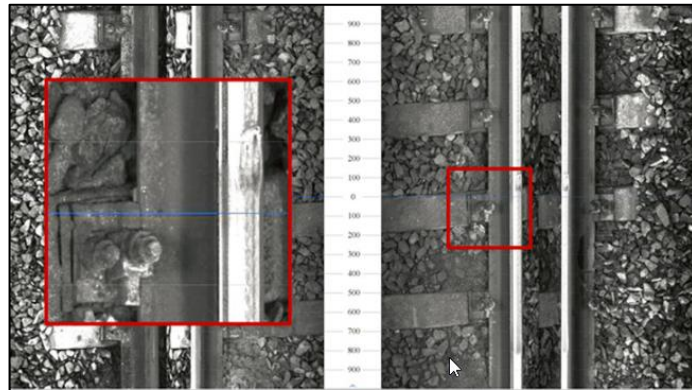
Demiryolu altyapısı ölçüm trenlerine takılan georadarlar ile ölçülebilir. Georadarlar 0-10 m derinliğe kadar hat yatağının durumu hakkında bilgi verebilmektedirler. Şekil 3.24.'te UTY'de kullanılan Infotrans tarafından geliştirilmiş olan georadar sistemi görülmektedir. Georadar ölçüm sisteminden elde edilen görüntülerle sorunlu bölgeler tespit edilebilir ve altyapıya gerekli müdahaleler yapılabilir.



Şekil 3.24. Georadar ile hat yatağının kontrol edilmesi (Infotrans, 2018).

3.6.5. Demiryolu hat bileşenlerinin kontrolü

Rayların yanında traverslerin ve bağlantı sistemlerinin durumunu kontrol eden yüksek çözünürlüklü video kameralar kullanarak ölçümler yapmak mümkündür. Bu ölçüm sistemleri ile kırık raylar, traversler ve yerinden sökülmüş bağlantı malzemeleri kontrol edilebilir (Şekil 3.25.).



Şekil 3.25. Hat bileşenlerinin kontrolü (Infotrans, 2018).

BÖLÜM 4. DEMİRYOLU HATTINA YAPILAN BAKIM VE YENİLEME ÇALIŞMALARI

Demiryolları yük ve yolcu taşımacılığında büyük bir öneme sahiptir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde diğer ulaşım modlarına göre tercih edilen bir ulaşım sistemidir. Demiryolu hatları üzerinde hareket eden yük ve yolcu trenlerinin demiryollarını aşındırıcı etkisi vardır. Tren trafiğinin cinsine, miktarına ve dingil basınçlarının büyüklüğüne bağlı olarak demiryolu hatlarının bozulmaları ve bozulma süreleri farklı olabilmektedir. Demiryolu hatlarında emniyetli ve konforlu bir demiryolu işletmeciliği sağlamak için gerekli bakım ve yenileme (BY) çalışmalarının yapılması gerekmektedir. BY çalışmaları tüm demiryolu organizasyonlarında hemen hemen benzerlik gösterse de, demiryolu organizasyonlarının mevcut imkanlarına göre BY çalışmalarının uygulanma metodolojilerinde farklılıklar olabilmektedir. Demiryolu organizasyonları genelde periyodik bakım, planlı bakım, düzeltici bakım, duruma dayalı bakım gibi yöntemlerden birisini ya da birkaçını uygulamaktadırlar.

Periyodik bakım tekniğinde demiryolu organizasyonları yapmış oldukları araştırmalar sonucu periyodik olarak demiryollarında BY çalışmaları gerçekleştirilir. Bu BY tekniğinde mümkün olduğunca demiryolu bileşenleri ekonomik ömürlerinde kullanılmaya çalışılır ancak değişen çevresel ve işletme şartlarına uyum sağlanmadığı zaman bu BY tekniği ekonomik ve güvenli olmamaktadır.

Düzeltilici bakım tekniğinde demiryolu organizasyonları bir sorun olduğunda demiryolu hattına müdahale ederler. Bu BY tekniği genelde imkanları kısıtlı demiryolu organizasyonları tarafından tercih edilir. Bu BY tekniği en verimsiz BY tekniği olarak bilinse de imkansızlıklardan dolayı uygulanmaktadır. Küçük sorunlar en başta tespit edilemediğinden demiryolu bileşenlerinin bozulma hızı artar ve kısa sürede ömürlerini tüketirler.

Planlı bakım tekniğinde, demiryolu organizasyonları eldeki mevcut ölçüm ve kontrol sistemlerinden yani ölçüm cihazlarından elde ettikleri verileri değerlendirerek BY çalışmalarını planlarlar. Planlı BY çalışmalarında değişen şartlar dikkate alınır ve uygun BY çalışmaları yapılır. Bu sayede hat bileşenleri ekonomik ömürleri süresince kullanılır. Ancak eldeki ölçüm sistemlerinin değişen şartlara uygun olmaması durumunda BY çalışmalarında gereken verim ve performans alınmaz.

Duruma dayalı bakım tekniğinde demiryolu hatları sürekli kontrol altında tutulur ve küçük sorunlar en başta tespit edilir. Bu küçük sorunların büyümesine engel olunur ve gerekli BY çalışmaları yapılır. Duruma dayalı bakım tekniğinde demiryolu organizasyonları ölçüm, kontrol ve değerlendirme çalışmalarına çok önem verirler ve uzman insan kaynaklarını ağırlıklı olarak bu çalışmalarda kullanırlar. Duruma dayalı bakım tekniğinde demiryolu organizasyonlarının yeterli düzeyde teknolojik ölçüm cihazlarına ve değerlendirme yazılımlarına ihtiyaçları vardır. Demiryolu ölçüm ve değerlendirme teknolojilerindeki gelişmelerden dolayı imkan dahilinde demiryolu organizasyonları bu bakım tekniğini tercih etmeye başlamışlardır.

4.1. Demiryollarında Bakım ve Yenileme Modelleri

Demiryolu uzmanları tarafından uygun demiryolu BY tekniklerinin belirlenmesi konusunda yıllardır önemli çalışmalar yapılmaktadır. Uzmanlar, karmaşık bir bozulma mekanizmasına sahip demiryolu hatlarının bozulma mekanizmasını incelemekte ve bu bozulma mekanizmasına uygun BY teknikleri geliştirmektedirler. Demiryolu hatlarının bozulma modelleri özetle sıralanan başlıklar altında kategorize edilmektedir (Guler, 2013):

- Düşey oturmalarından kaynaklı bozulma modelleri,
- Aşınma ve yorulmaya bağlı bozulma modelleri,
- Genel bozulma modelleri,
- Değişen trafik koşullarına bağlı bozulma modelleri,
- Bilgisayar destekli planlama ve bozulma tahmin modelleri.

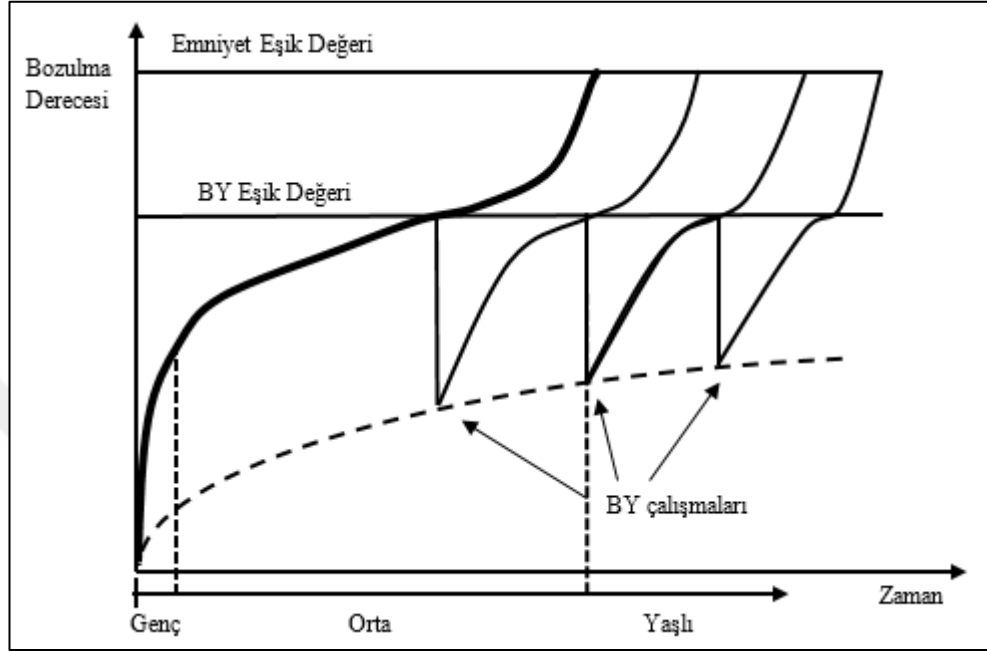
Demiryolu hattının durumu, hattı oluşturan bileşenler ve bunların konumları ile ifade edilir. Hattı oluşturan bileşenler ve hattın durumu, hattın bozulması ve yenilenmesi gibi karmaşık süreçlerde birbirleriyle yakın ilişki içindedirler. Şayet bu elemanlardan birisi kötü durumdaysa, bu diğerinin bozulmasına da sebep olacaktır. Yani hattı oluşturan bileşenler kötü durumdaysa, hattın konumunu istenen düzeyde tutmak mümkün değildir. BY programları oluşturulurken demiryolu hattının yaşı dikkate alınır. Bu sebeple kurulan modelde demiryolu hattı “Genç”, “Orta” ve “Yaşlı” diye yaş dönemlerine ayrılır (Şekil 4.1.). Bu dönemlerin her birinin sürekliliği ve ömrü hattın karakteristiklerine bağlı olarak değişir. Bunun yanında hattın maruz kaldığı yükler, bakım faaliyetlerinin sayısı ve ölçeği bu gruplar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Guler, 2005).

Demiryolu hattına yapılacak BY faaliyetleri ile ilgili temel ilke, demiryolu hattında meydana gelen bozulmaların zaman içinde gözlenmesi ve saptanması esasına dayanır. Şekil 4.1.’de gösterilen kalın siyah eğrisel çizgi, herhangi bir bakım yapılmayan hatta ait kuramsal bozulmayı göstermektedir. Aynı zamanda bu eğri üzerinde hattın üç yaş dönemi tespit edilebilir (Guler, 2005).

“Genç” yaş dönemi olarak ifade edilen ilk kısım, demiryolu hattının ana yenilemesi veya ilk inşasından hemen sonra aniden görülen ve hattın ilk kurulumunun sebep olduğu hızlı bozulmaları karakterize eder. Bu dönemin tahmin edilmesi zor olduğu gibi bir hat kesiminden diğerine önemli derecede farklılık gösterir. Bu sebeple bu dönemin modellendirilmesi oldukça güçtür. Bu dönemin çok kısa olması, ihmal edilen sonuçlarında az olmasını sağlar (Guler, 2005).

“Orta” yaş döneminde yeterince dengeye ulaşan demiryolu hattı lineer bir bozulma gösterir. Demiryolu hatlarının ekonomik ömürleri süresince sıkça görülen bu dönemde modeller kurularak analizler yapılabilir. Bozulma değeri BY Eşik Değeri’ne ulaştığında demiryolu hattına BY çalışmaları yapılır. Bozulmaların Emniyet Eşik Değeri’ni aşmasına asla izin verilmez. (Guler, 2005).

“Yaşlı” dönem ise demiryolu hatlarının ömürlerinin en son bölümünde görülür ve çok hızlı bir bozulmayla karakterize edilir. Bu dönemde bozulma üssel bir şekil gösterir (Guler, 2005).



Şekil 4.1. Demiryolu hattının teorik bozulması ve alınan önlemler (Guler, 2005).

Demiryolu hattında BY faaliyetleri ile ilgili bir model kurulacağı zaman, demiryolu hattının bozulmasının lineer olduğu dönem içindeki ölçülen veriler analiz edilir. Demiryolu hattının bozulma derecesini gösteren bu ölçülmüş değerlerin analiz edilmesiyle bunların dağılımına uygun hesap yöntemleri ve enterpolasyonlarla, demiryolu hattının bozulma davranışı belirlenmeye çalışılır. Demiryolu hattında BY faaliyetleri ile ilgili eşiğin belirlenmesinden sonra, hattın bozulmasını gösteren doğrunun BY eşiğine varacağı zaman (veya yük) hesaplanır. Hattın bozulmasını gösteren doğrunun eşik değerine ulaştığı kesimine uygun BY faaliyeti (örneğin buraj) yapılarak o kesimin kalite artışı gerçekleştirilir (Guler, 2005).

Uygun BY faaliyetleriyle hattın kalitesi artırıldıktan sonra, hattın bozulma süreci tekrar başlar. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla birlikte, zamanla bazı durumlarda değişecektir. Değişenlerden birisi demiryolu hattına yapılan BY faaliyetlerinin performansıdır. Demiryolu hattının yaşlanmasıyla ilgili değişen durumlardan diğeri ise bozulma oranıdır. Bozulma oranları zamanla değişir. Gittikçe BY faaliyetlerinin

tekrarlanma süresi kısaltmaya başlar. Sonunda BY faaliyetlerinin frekansı çok fazla olur. BY faaliyetlerine devam etmek ekonomik ve teknik yönden mantıklı olmaz. Bu sebeple demiryolu hattının yeniden yapılması gerekir (Guler ve ark., 2004; Guler, 2005).

Demiryolu hatlarında BY çalışmalarının verimli ve etkin bir şekilde yapılmasıyla ilgili demiryolu organizasyonları ve araştırmacılar tarafından çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Tablo 4.1.'de gösterilmiştir (Guler, 2013).

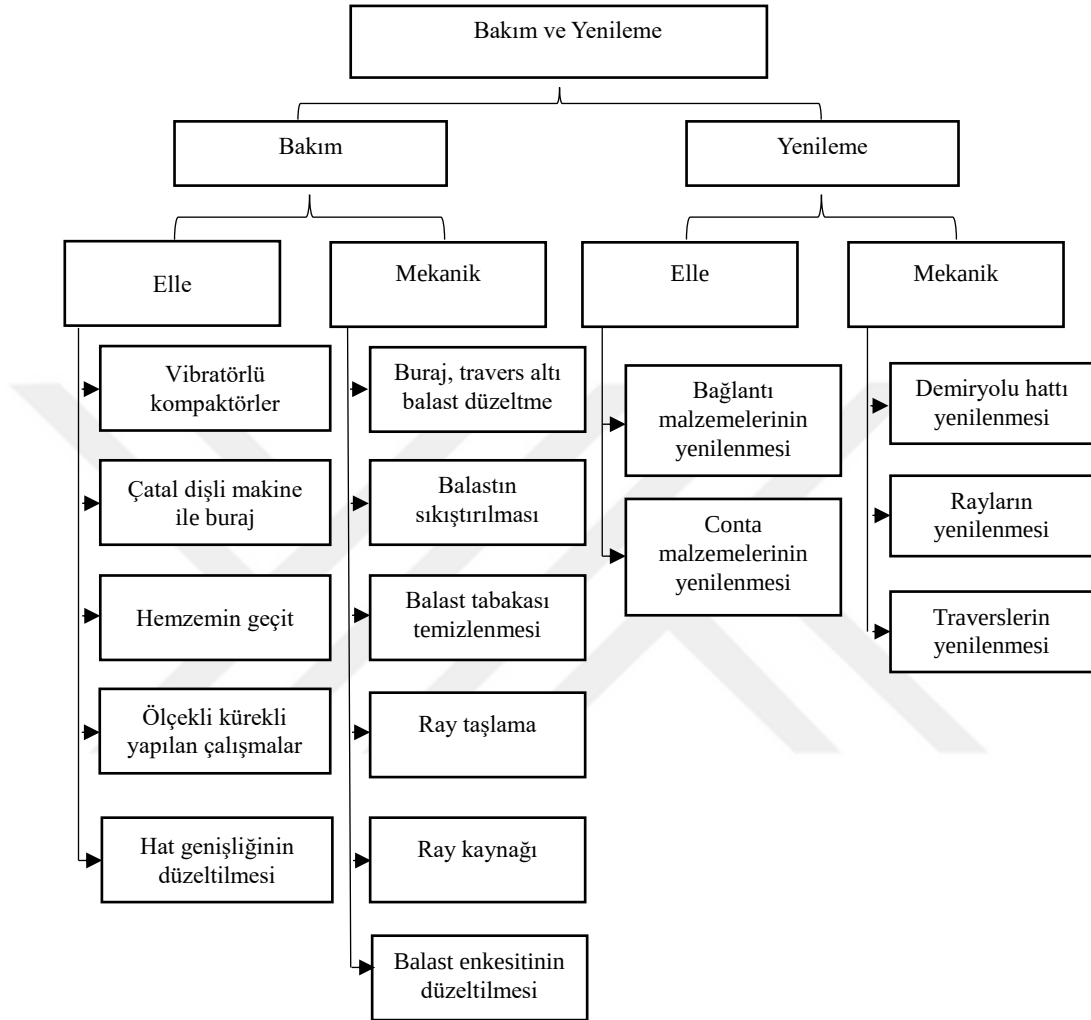
Tablo 4.1. Demiryolu hatlarında BY çalışması modelleri

Modelin Adı	Demiryolu Organizasyonu veya Araştırmacı
Sistem Dinamikleri	Alman Demiryolları (DB)
BY Planlama Destek Sistemi (Mini-MARPAS)	Britanya Demiryolları (BR)
Hat Bakım Sistemi (TMS)	Burlington Kuzey Demiryolları (BN) (Kanada)
Shinkansen Yönetim Bilgi Sistemi (SMIS)	Japon Demiryolları (JR)
Hat Bakım Yönetimi (GEV)	İsviçre Federal Demiryolları (SBB)
Bakım Kesimlerinin Üstyapı Bilgisi ve Kontrolü (BINCO)	Hollanda Demiryolları
Demiryolunun Uzman Sistemlerle Planlaması, Organizasyonu ve Bakımı (REPOMAN)	Kuzey Burlington demiryolları (Amerika)
Genel Bakım Kararları (DONG)	Polonya Devlet Demiryolları (PKP)
Bilgisayar Destekli İş Planlaması (KOMPLAN)	Polonya Devlet Demiryolları (PKP)
Büyük Periyodik Faaliyetler (GOP)	Fransa Demiryolları (SNCF)
Ray Yenilemesi ve Net Şimdiki Değer (RPNPV)	Britanya Demiryolları (BR)
Demiryolu Bakım ve Yenilemesinde Bilgisayar Destekli Sistemler (PATER)	Macaristan Devlet Demiryolları (MAV)
Hat Yönetim Modeli	Broken Hill Proprietary (BHR) Araştırması (Tew and Twindle 1991)
Toplam Yol analizi ve Maliyetlendirme Sistemi (TRACS)	Amerikan Demiryolları Birliği/Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, (AAR/MIT) (Hargrove and Martland 1991)
Demiryolu Bakım Yenileme Sistemi (RAILER)	Amerikan Ordusu İnşaat Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı (Uzarski et al. 1993)
Ray Yönetim Modeli	BHP Araştırma Kurumu / Hong Kong Demiryolu Toplu Taşıma (Keefe and Soeleiman 1994)
Ekonomik Demiryolu Hatları (ECOTRACK)	ERRI Avrupa Birliği Demiryolu Araştırma Enstitüsü (ERRI 1994)
Hat Bakım Veritabanı Sistemi (Micro LABOCS-II)	Japon Demiryolları (Yoshimura et al. 1995)
Mauzin Verilerinin Bilgisayarla İşlenmesi ve Tesviye Bakımı (TIMON)	Fransız Demiryolları (SNCF) (Meier-Hirmer et al. 2006)
Demiryolu Varlık Yönetim Sistemi (RAMSYS)	MerMec (Jovanovic and Guler, 2006)
Demiryolu Hat Bakım ve Yenileme Çalışmalarında Karar Destek Sistemi	Türkiye, Hakan Güler

4.2. Demiryollarında Bakım ve Yenileme Çalışmaları

Demiryolu hattına yapılan bakım ve yenileme (BY) çalışmaları, en az maliyetlerde güvenlik ve kalite standartlarını sağlayan tüm bakım ve yenileme faaliyetlerini içerir.

Şekil 4.2.'de demiryolu hattına yapılan bakım ve yenileme çalışmalarının şematik bir özeti görülmektedir.



Şekil 4.2. Demiryolu hattına yapılan bakım ve yenileme çalışmaları.

Demiryolu hatlarına yapılan BY çalışmaları aşağıda sıralanan başlık altında toplanır:

- Tüm demiryolu hattının yenilenmesi,
- Rayların yenilenmesi,
- Travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi,
- Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi,
- Balast yenileme,
- Balast eleme,

- Travers, bağlantı malzemesi ve balast yenileme,
- Buraj,
- Genel kontroller ve küçük bakımlar,
- Ray taşlama,
- Rayların yağlanması.

Demiryollarına BY çalışmaları yapılırken hattı oluşturan bileşenlerin durumu ile ilgili veriler toplanır. Her bir BY çalışmasında toplanacak ve değerlendirilecek veriler Tablo 4.2.'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2. BY çalışmaları ve gerekli veriler

BY Çalışması	Gerekli veriler
Balast yenileme	Balast tipi, balastın yaşı, buraj verileri, buraj sıklığı, altyapının durumu, kirli balast miktarı, hat geometrisi ölçümleri, düşey geometri bozulması, hattın durumu ile ilgili indeksler, minimum balast kalınlığı ve balast referans değerleri.
Travers, ray ve bağlantı malzemesi yenilemesi	Balast tipi, traversleri yaşı, yükler ve kümülatif yükler, servis indeksi, hat genişliği, değeri, hat genişliğinde daralma, hat genişliğinde açılma, hat genişliği standart sapması, travers ve bağlantı malzemelerinin durumu, kusurlu travers sayısı.
Ray taşlama ve ray yağlama	Hattın sınıfı, yatay yönde bogi ivmesi, yatay yönde tren döşeme ivmesi, kısa dalga boyunda ondülasyon, gürültü düzeyi, kusurlu travers sayısı, tren sayısı, ray kusur sayısı, kurba yarıçapı, kümülatif yükler, Weibull dağılımı parametreleri.
Ray yenileme	Ray özellikleri, rayın yaşı, yükler ve kümülatif yükler, hızlar, kurba yarıçapı, ray kusur sayısı, hat sınıfı, ray hasar sayısı, Weibull dağılımı parametreleri.
Buraj çalışması	Buraj geçmişi, hat ölçümleri, hat geometrisinin analizi, hat geometrisi değerleri, hattın durum indeksleri, hat geometrisinin bozulma oranı, hat geometrisinde kusur sayısı.
Tüm hattın yenilenmesi	Travers ve bağlantı malzemesi yenileme kuralları, balast yenileme kuralları, ray yenileme kuralları, altyapının durumu, maliyet analizleri.
Ray, travers ve bağlantı malzemesi yenileme	Travers ve bağlantı malzemesi yenileme kuralları, ray yenileme kuralları ve maliyet analizleri.
Travers, bağlantı malzemesi ve balast yenileme	Travers ve bağlantı malzemesi yenileme kuralları, balast yenileme kuralları ve maliyet analizleri.
Genel kontroller ve küçük bakımlar	Hat bileşenlerinin durumu ve maliyet analizleri.

4.2.1. Tüm demiryolu hattı yenilenmesi

Tüm demiryolu hattının yenilenmesi çalışmasında demiryolu hattının altyapı ve üstyapısı tamamen yenilenir. Tamamen yenileme kararı mevcut yenileme çalışmalarının ekonomik olmayacağı anlamına gelmektedir. Bu çalışma demiryolu yenileme makineleri ile yapılır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Demiryolu hat yenileme makineleri (RZD, 2018).

4.2.2. Rayların yenilenmesi

Rayların yenilenmesi çalışmasında sadece raylar yenilenir. Demiryollarında ray yenileme çalışmaları genel olarak tüm çerçeve sistemin yenilenmesi şeklinde olur ancak travers ve bağlantı malzemelerinin durumunun iyi olması durumunda sadece raylar yenilenebilir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Rayların yenilenmesi (RZD, 2018).

4.2.3. Contaların yenilenmesi

Demiryolu hatlarındaki kısa rayların (contalı raylar) birleşim noktaları cebire demirleri conta kaçıkları kabul edilmiş toleransları aşınca, conta yenileme çalışması yapılır. İki rayın arasındaki genişleme mesafesi, iklim koşulları ve yolun durumunu değerlendirilerek toleranslar verilebilir (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Contaların yenilenmesi (UTY, 2018).

4.2.4. Travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi

Travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi çalışmasında traversler bağlantı malzemeleri ile birlikte yenilenir. Bağlantı malzemeleri traversler üretilirken fabrikada montajı yapılır ve bu sebeple yenileme çalışmalarında her iki bileşeninde birlikte yenilenir (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi (Transway, 2018).

4.2.5. Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi

Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi çalışması hattın çerçeve sisteminin yenilenmesi olarak tarif edilir. Bu yenileme çalışmasında balast tabakasına dokunulmaz. Bu yenileme çalışması demiryolu organizasyonları tarafından ekonomik olduğu düşünüldüğünden genelde tercih edilir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Ray, travers ve bağlantı malzemelerinin yenilenmesi (UTY, 2018).

4.2.6. Balast tabakası yenilenmesi

Balast tabakası yenileme çalışmasında hattın çerçevesine dokunulmaz sadece balast tabakası kaldırılır ve yerine yeni balast konur. Gerekli durumlarda balast altı malzeme de balast tabakası ile birlikte yenilenir. Balast agregalarının mekanik özellikleri, tren trafiği ve çevresel koşullar balast yenileme çalışması sıklığını etkiler (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Balast tabakası yenilenmesi (Arteks, 2018).

4.2.7. Balast tabakası elemesi

Balast tabakası eleme çalışması bir bakım çalışmasıdır. Balast eleme çalışması balast kirliliğinin ve parçalanmış balast tabakası malzemesinin temizliği için yapılır. Balast tabakası eleme çalışmalarına kirlilik analizleri sonrası karar verilir. Zamanla altyapıdan yükselen toprak taneleri sebebiyle ve balastın parçalanması sonucu balast tabakası yukarıda sıralanan özelliklerini kaybeder. Şayet balastın % 30'unun veya daha

fazla miktarının boyutu 22 mm'den daha küçük olmuşsa ve balast içinde % 40 kirlilik varsa balast temizleme işleminin yapılması gerekmektedir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Balast tabakası elemesi (RZD, 2018).

4.2.8. Balast tabakası enkesiti düzeltilmesi

Balast tabakası enkesiti düzeltilmesi bir bakım çalışmasıdır. Demiryolu hattında meydana gelebilecek burkulma olaylarının önlenmesi açısından balast enkesitinin düzenlenmesi çok önemlidir. Bunun yanında balastın hat boyunca düzensiz olarak dağılması ekonomik açıdan da sakıncalı olmaktadır. Bu sebeple hat bakım çalışmalarında ve özellikle balastın yeni serilmesi durumlarında balastın istenen enkesitinin sağlanması gerekmektedir. Bu işlem düzenli bir şekilde yapılmazsa büyük miktarlarda balast şebeke boyunca düzensiz dağılacaktır. Balast düzenleyicisi balast enkesitini düzenler ve her buraj işleminden sonra kullanılabilir. Balast düzenleyicisi hat üzerinde birkaç geçişle balast enkesitini istenen şekle getirir (Şekil 4.10.) (Esveld, 2001).



Şekil 4.10. Balast tabakasının enkesiti düzenlenmesi (UTY, 2018).

4.2.9. Travers, bağlantı malzemesi ve balast tabakasının yenilenmesi

Travers, bağlantı malzemesi ve balast tabakası yenileme çalışmasında ray dışında tüm üstyapı bileşenleri yenilenir. Gerekli durumlarda alt balast ve toprak gövde yani altyapı da yenilenir (Şekil 4.11.).



Şekil 4.11. Ray dışında tüm üstyapı bileşenlerinin yenilenmesi (RZD, 2018).

4.2.10. Buraj

Buraj çalışması bir bakım çalışmasıdır. Tren trafiği altında altı boşalan traverslerin balast ile doldurulması ve hattın elastikiyet özelliğinin yeniden kazandırılması için yapılır. Buraj çalışması ile nivelman, dever ve eksenden sapmaları düzeltilir. Buraj makinesi, ölçüm sistemi ile yatayda ve düşeyde hattı konumuna getirdikten sonra, traversler altındaki balastı sıkıştırmaya başlar (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Buraj balast tabakasının sıkıştırılması (RZD, 2018).

4.2.11. Genel kontroller ve küçük bakımlar

Genel kontroller ve küçük bakımlar demiryolu hattında yapılan ölçüm, kontrol ve düzeltici küçük bakım ve yenileme çalışmalarını kapsar. Bu çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:

- Tirfonların kontrolü ve sıkılması,
- Travers bulonlarının kontrolü ve sıkılması,
- Bağlantı malzemelerinin kontrolü ve sıkılması,
- Cebireli contaların kontrolü ve ayarlanması,
- Rayların genleşme paylarının kontrolü ve ayarlanması,
- Hat genişliği kontrolü ve düzeltilmesi,
- Travers eksenlerinin düzeltilmesi,
- Ondülasyon ve yuvarlanma yüzeylerindeki diğer bozuklukların taşlanması,
- Rayların aşınmaları kontrolü.

4.2.12. Ray taşlama ve yağlanması

Ray taşlama çalışması bakımların anası olarak ifade edilir. Genelde demiryolu organizasyonları bu çalışmayı her yıl periyodik olarak yaparlar. Bu çalışma ile ray

üst yüzeyindeki ondülasyon giderilir ve raylarda meydana gelmiş küçük çatlaklar büyümeden giderilmiş olur (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Ray taşlama (Infotrans, 2018).

Rayların yağlanması çalışması kurbalarda yapılır. Merkezkaç ya da merkezci kuvvetlerin etkisi ile dış rayda ya da iç rayda aşınmaların önlenmesi için yapılır. Kurbalarda rayların yağlanması aynı zamanda tren tekerleklerinde budenin de aşınmasını önler (Şekil 4.14.).



Şekil 4.14. Rayların yağlanması (Infotrans, 2018).

BÖLÜM 5. ÖZBEKİSTAN DEVLET DEMİRYOLLARI

Özbekistan Cumhuriyeti, Orta Asya'nın merkezinde, bozkırlar, çöller ve dağlar arasında yer almaktadır. Orta Asya'daki büyük ulaşım, ipek yolu ve ticari yolların kesişme noktasındadır. Özbekler (11. ve 12. asırlarda) Karahanlılar devrinde Maveräünnehir ve Harezmi'deki siyasi hakimiyetin Türklerin eline geçmesi ile ortaya çıkmış bir Türk halkıdır. Özbek ismi, Altın Orda Beyi olan Özbek'ten gelmektedir.

Özbek hakimiyeti 16. yüzyılın başlarında Maveräünnehir'de kendi devletini kuran Muhammed Şeybani Han ile başlamıştır. Bu kurulan devletin hakimiyeti 18. yüzyıla kadar sürmüş, yerini aynı bölgede kurulan Hive ve Hokand Hanlıklarına bağlı olan Buhara Hanlığına bırakmıştır. Daha sonra Çarlık Rusya'sı, Hive ve Hokand Hanlıklarının bulunduğu Özbek bölgesine 1867 yılında hakim olmuş ve merkezi Taşkent olan Türkistan valiliğini kurmuştur. Hokand Hanlığının Fergana vadisinde kalan son toprakları da Ruslar tarafından on yıl içerisinde işgal edilmiştir.

01 Kasım 1917 yılında ise Taşkent'e giren Bolşevikler kendi egemenliklerini ilan etmiş ve 1924 yılına gelindiğinde günümüzdeki Özbekistan topraklarını içine alan Özbekistan Sovyet Sosyalist Cumhuriyeti kurulmuştur. 31 Ağustos 1991 yılında Sovyetler Birliği'nin dağılmasının ardından Özbekistan Meclis Başkanlığı kendi bağımsızlığını ilan etmiştir. 01 Eylül tarihi Özbekistan'da bağımsızlık günü olarak kutlanmaktadır (Omorov, 2012).

Özbekistan Cumhuriyeti'nin, topraklarının büyük bölümü çöllerden oluşur. Bu çöllerin çoğu "Kızıl Kum" ve "Mirzaçöl" olarak bilinir. Ülkede bulunan dağlar Tien Shan, Ugam, Pskem ve Çatkal dağlarıdır. Tien Shan dağının zirvesi 4,643 m yükseklikteki Hazret Sultan tepesidir. Sarygamysh Gölü ise deniz seviyesinden 12 m aşağıda bulunmaktadır. Özbekistan'ın komşu olduğu ülkeler; kuzey ile kuzeybatıda

Kazakistan, güney ile güneydoğuda Türkmenistan, güneydoğuda Afganistan, doğuda Tacikistan ve kuzeydoğuda Kırgızistan'dır (Şekil 5.1.).

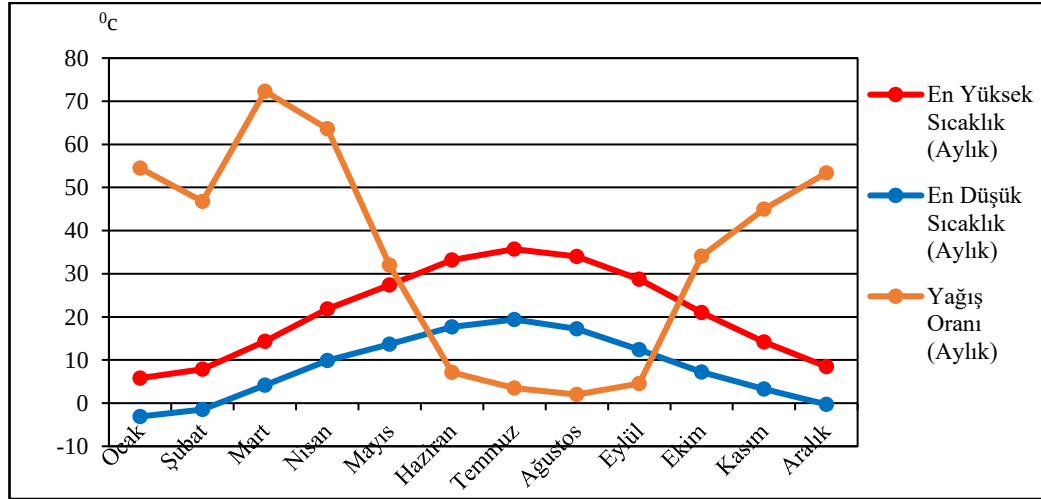


Şekil 5.1. Özbekistan'ın dünya üzerindeki konumu.

Özbekistan, Orta Asya'nın en kalabalık ülkesidir. 32.5 milyon nüfusa sahiptir ve toplam 447,400 km² yüzölçümü bulunmaktadır. Diğer komşu ülkelerde olduğu gibi kış mevsimi soğuk, yaz mevsimi sıcak ve kurak bir iklime sahiptir. Özellikle yaz ayları düşük yağışlıdır (yıllık ortalama yağış miktarı 100-200 mm arasında değişir). Aylık ortalama sıcaklık ve yağış miktarları Tablo 5.1. ve Şekil 5.2.'de verilmiştir. Yaz aylarında günlük ortalama en yüksek sıcaklık 40 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Kış aylarında ise günlük ortalama en düşük sıcaklık -20 °C'nin altına düşer bazı zamanlarda da -40 °C'ye ulaşabilir (JICA, 2013).

Tablo 5.1. Özbekistan'daki aylık ortalama sıcaklık ve yağış oranları (O'GP, 2018; JICA, 2013)

	En yüksek sıcaklık (°C)	En düşük sıcaklık (°C)	Yağış oranı (mm)	Ortalama yağışlı gün sayısı
Ocak	5.8	-3.1	54.5	13.7
Şubat	7.9	-1.5	46.8	12.3
Mart	14.3	4.2	72.3	13.8
Nisan	21.8	9.9	63.6	12.9
Mayıs	27.4	13.7	32	10.2
Haziran	33.2	17.7	7.1	5.1
Temmuz	35.7	19.4	3.5	2.9
Ağustos	34.0	17.2	2.0	1.9
Eylül	28.7	12.4	4.5	3.2
Ekim	21.0	7.2	34.1	8.1
Kasım	14.2	3.3	45	10.2
Aralık	8.5	-0.3	53.4	12.8
Ortalama Yıllık	21.0	8.3	418.8	107.1



Şekil 5.2. Özbekistan'daki aylık ortalama sıcaklık ve yağış oranları.

Özbekistan ekonomik güç olarak dünyada 71. sırada yer almaktadır, ülkede kişi başına düşen milli gelir 2,200 dolardır. Altın rezervi bakımından dünyada 9. sırada, üretiminde ise 10. sırada yer almaktadır. Doğalgaz üretiminde dünyada 20 ülke arasında yer almakta, yıllık ortalama 65 milyar metreküp doğalgaz üretmektedir. Dünyada pamuk üretiminde ise en iyi pamuk üreten ülkeler arasında yer almakta ve yıllık ortalama üç milyon ton pamuk üretilmektedir. Uranyum rezervi bakımından dünyada 10. sırada, üretiminde ise 8. sırada yer almaktadır. (O'GP, 2018).

5.1. Özbekistan Devlet Demiryolları (UTY)

Özbekistan Cumhuriyeti'nde ilk demiryolu hattı 1880 yılında Orenburg-Semerkant şehirleri arasında Rus mühendisler tarafından projelendirilmiş ve 1888 yapımı tamamlanmıştır. Ardından 1899 yılında yapılan Havast-Taşkent şehirleri arasındaki demiryolu hattı, daha sonra Fergana vadisine ve Andican iline ulaşmıştır. Bu hat kesimiyle birlikte Özbekistan demiryolu hat uzunluğu toplamda 2,354 km değerine erişmiştir. Sovyetler döneminde Orta Asya'da bulunan Özbekistan dahil diğer ülkelerin demiryolu hatları birbirine bağlanmıştır (Şekil 5.3.). Elektrifikasyon çalışmalarına 1971 yılında başlanmış olup 1990 yılından itibaren yolcu ve yük taşımacılığında elektrikli lokomotifler devreye girmiştir.



Şekil 5.3. UTY Demiryolu Ağı (UTY, 2018).

UTY milli bir devlet şirketi olarak 07 Kasım 1994 yılında kurulmuştur. Bu dönemde demiryolu ağ uzunluğu toplam 3,645 km'dir (UTY, 2018).

UTY'de altı bölge müdürlüğü bulunmaktadır. Bölge müdürlüklerinin merkezleri; Taşkent (Tashkent), Hokand (Qo'qon), Buhara (Buhoro), Konurat (Qo'ng'iro), Karşı (Qarshi) ve Tirmiz (Termiz) şehirlerindedir.

Orta Asya'daki ilk yüksek hızlı demiryolu hattı çalışması Taşkent-Semerkant arasında 17 Kasım 2009 tarihinde başlatılmıştır. 05 Ocak 2010 yılında İspanya'nın Talgo şirketinden "Afrosiyob" diye isimlendirilmiş iki adet Talgo-250 hızlı tren seti satın alınmıştır. "Afrasiyob" hızlı tren setinde iki adet Pulman (Business), iki adet birinci sınıf, dört adet ekonomi, bir adet yemekli olmak üzere toplam 9 vagon ve iki adet lokomotiften oluşmaktadır. Proje tamamlandığında ilk sefer 08 Ekim 2011 tarihinde Taşkent-Semerkant seferleri ile başlamıştır. Taşkent-Semerkant arasındaki yüksek hızlı demiryolu hattının uzunluğu 344 km'dir. 26 Eylül 2014 tarihli bir hükümet kararı ile Semerkant-Karşı yüksek hızlı demiryolu hattı projesi onaylanmış ve inşasına başlanmıştır. Bu hattaki deneme seferleri (hız 200 km/sa) başarı ile tamamlanmış ve 05 Eylül 2015 tarihinden itibaren Taşkent-Karşı yüksek hızlı tren seferleri başlamıştır. Semerkant-Karşı arasındaki yüksek hızlı demiryolu hattının uzunluğu 156 km'dir. Taşkent-Buhara yüksek hızlı demiryolu hattı çalışması projelendirmiş (26 Mart 2015 yılında), 146 km'lik yeni hat ve mevcut hatların iyileştirilmesiyle toplam 249 km uzunluğuna sahip yüksek hızlı demiryolu hattında 15 Eylül 2016 tarihinden itibaren yüksek hızlı tren seferleri başlatılmıştır. 06 Kasım 2016 tarihinde yine İspanya'nın Talgo şirketinden iki adet Talgo-250 hızlı tren seti satın alınmıştır. 06 Mart 2017 tarihinde "Afrasiyob-3" ardından 23 Nisan 2017 tarihinde "Afrasiyob-4" yüksek hızlı tren setleri UTY'ne getirilmiştir. 10 Temmuz 2017 tarihinde Karşı-Kitap şehirlerini birbirine bağlayan 124 km uzunluğundaki yüksek hızlı demiryolu hattının inşasına başlanmıştır. 30 Eylül 2018 tarihinden itibaren Taşkent ile Kitap (Şehrisebz) şehirleri arasında seferler başarı ile yapılmaktadır. UTY'ye bağlı yüksek hızlı demiryolu hatlarında maksimum hız 250 km/sa'tir (Nurmuxamedov, 2018).

Taşkent bölgesindeki Angren şehri ile Nemengan bölgesindeki Pop şehirlerini birbirine bağlayan demiryolu hattı 2013 yılında projelendirilmiştir. 123.1 km uzunluğundaki yeni bir demiryolu projesi ile Fergana vadisine ulaşılmıştır. Bu projede, 19.1 km uzunluğundaki demiryolu tüneli (2,200 metre rakımda bulunan Kamçık tüneli, ki Orta Asya'daki en uzun tüneldir) bir Çin şirketi ile (China Railways Tunnel Group) birlikte inşa edilmiş ve 22 Haziran 2016 tarihinde hizmete açılmıştır (Şekil 5.4.). Özbekistan'ın doğusundaki Andican, Nemengan ve Fergana bölgelerini ülkenin diğer bölgelerine bağlayan bu projenin, yeni Çin–Orta Asya–Avrupa uluslararası transit demiryolu koridorunun en önemli bağlantı noktası olması hedeflenmiştir.



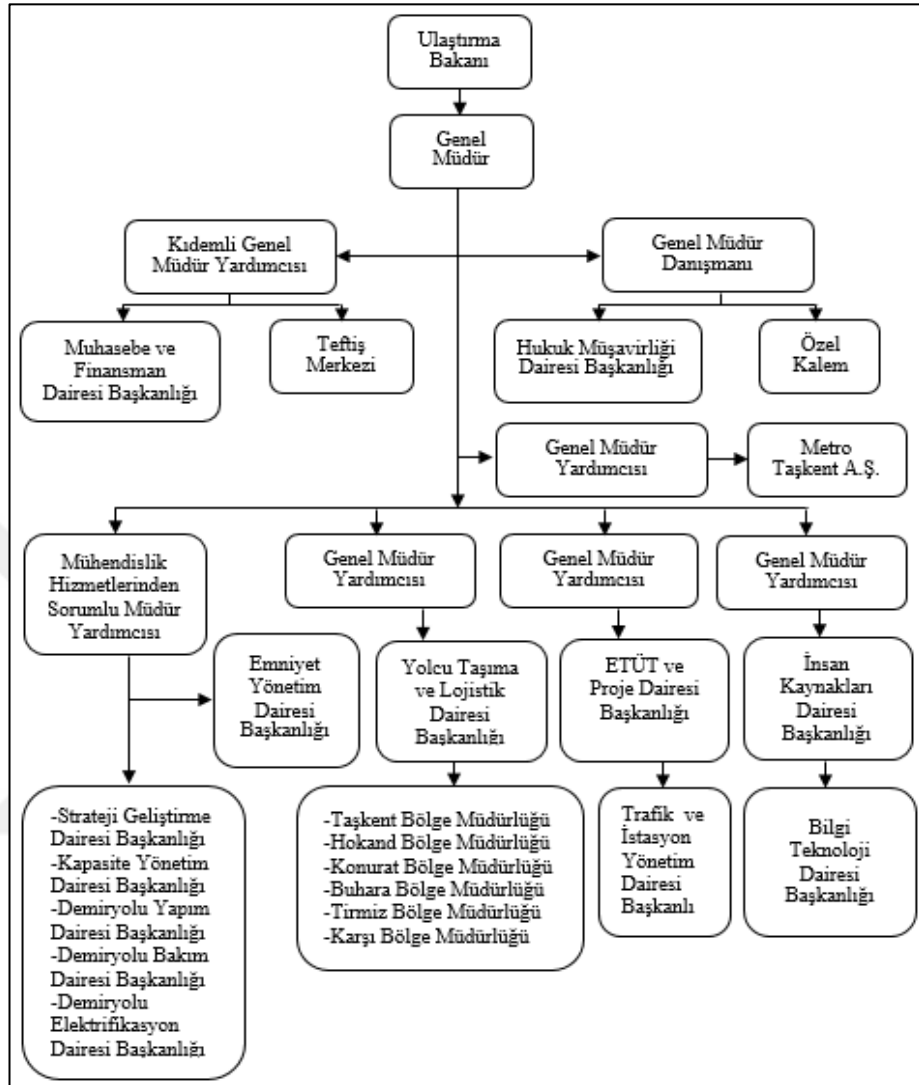
Şekil 5.4. Angren ve Pap şehirleri arasındaki demiryolu güzergahı.

UTY hat özellikleri Tablo 5.2.'de verilmiştir. Özbekistan demiryollarının yaklaşık % 87'si geleneksel, % 13'ü ise yüksek hızlı hatlardan oluşmaktadır. Toplam 6,826 km uzunluğunda demiryollarının yaklaşık % 85'i tek hatlı, % 15'i ise çift hatlıdır. Demiryollarının yaklaşık % 35'i elektrikli ve sinyalli hatlardan oluşmaktadır (UTY, 2018).

Tablo 5.2. Demiryolu hattı özellikleri (UTY, 2018)

Demiryolu hatları	Uzunluğu (km)	Oranı (%)
Geleneksel Demiryolu Hatları	5,955	87
Hızlı Demiryolu hatları	871	13
Toplam	6,826	100

UTY'nin organizasyon şeması Şekil 5.5.'te verilmiştir.



Şekil 5.5. UTY'nin organizasyon şeması (UTY, 2018).

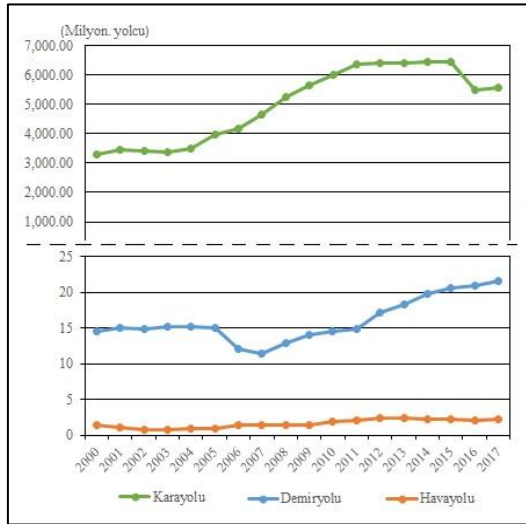
UTY'de belirlenmiş olan görevler; demiryolu ağını ve araçlarını hizmete hazır tutmak, yeni hatlar inşa etmek, demiryolu trafiğini etkin bir şekilde yönetmek, diğer ulaşım sistemleri ile bütünleşmiş, güvenli, konforlu, ekonomik ve çevreye duyarlı bir taşıma hizmeti sunmak olarak tanımlanmıştır.

UTY aynı zamanda demiryolu işletmeciliğinden de sorumludur. Yolcu taşımacılığı dışında, UTY'de gıda, tarım ürünleri, canlı hayvan, maden ürünleri, kimyasal ürünler ve makine-teçhizat vb. yük taşımacılığı yapılmaktadır.

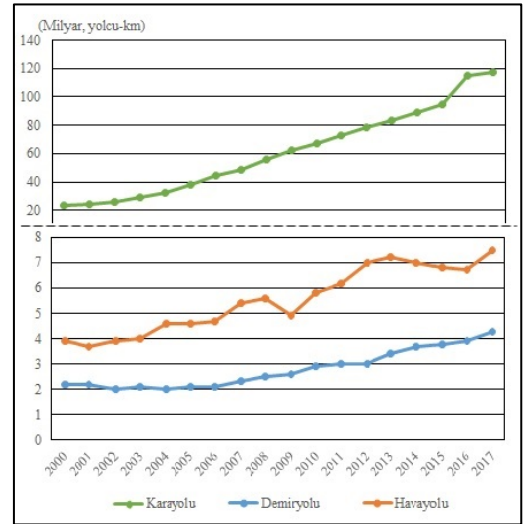
UTY istatistik yıllık raporlarına göre 2016 yılında UTY hatlarında 20.96 milyon yolcu ve 67.60 milyon ton yük taşınmıştır. 2017 yılında ise 21.59 milyon yolcu ve 68.00 milyon ton yük taşınmıştır. 2017 ve 2016 yılları arasında yük taşımacılığında % 0.52, yolcu taşımacılığında ise % 3.0 düzeyinde artış sağlandığı görülmektedir. UTY’de yolcu taşımacılığının yıllara göre değişimi milyon yolcu ve milyar yolcu-kilometre olarak Tablo 5.3.’te ve Şekil 5.6.’da verilmiştir.

Tablo 5.3. Yıllara göre yolcu taşımacılığı (JICA, 2013; İnfotrans, 2018)

Yıllar	Yolcu (10 ⁶ , yolcu)			Yolcu (10 ⁹ , yolcu-km)		
	Karayolu	Demiryolu	Havayolu	Karayolu	Demiryolu	Havayolu
2000	3,284.7	14.6	1.5	23.3	2.2	3.9
2001	3,475.9	15.0	1.1	24.3	2.2	3.7
2002	3,419.2	14.9	0.8	25.8	2.0	3.9
2003	3,375.4	15.3	0.8	29.1	2.1	4.0
2004	3,477.3	15.3	0.9	32.4	2.0	4.6
2005	3,962.4	15.1	1.0	38.5	2.1	4.6
2006	4,188.4	12.1	1.4	44.2	2.1	4.7
2007	4,652.4	11.5	1.5	48.4	2.3	5.4
2008	5,264.7	13.0	1.5	55.9	2.5	5.6
2009	5,654.5	14.1	1.5	62.7	2.6	4.9
2010	6,008.7	14.5	1.9	67.2	2.9	5.8
2011	6,377.1	14.9	2.1	72.6	3.0	6.2
2012	6,391.3	17.12	2.5	78.2	3.02	7.0
2013	6,412.8	18.36	2.4	83.3	3.42	7.2
2014	6,437.2	19.85	2.3	88.9	3.67	7.0
2015	6,453.4	20.63	2.2	95.0	3.76	6.8
2016	5,480.8	20.96	2.1	114.9	3.93	6.7
2017	5,565.2	21.59	2.2	117.157	4.29	7.5



a) Milyon, yolcu



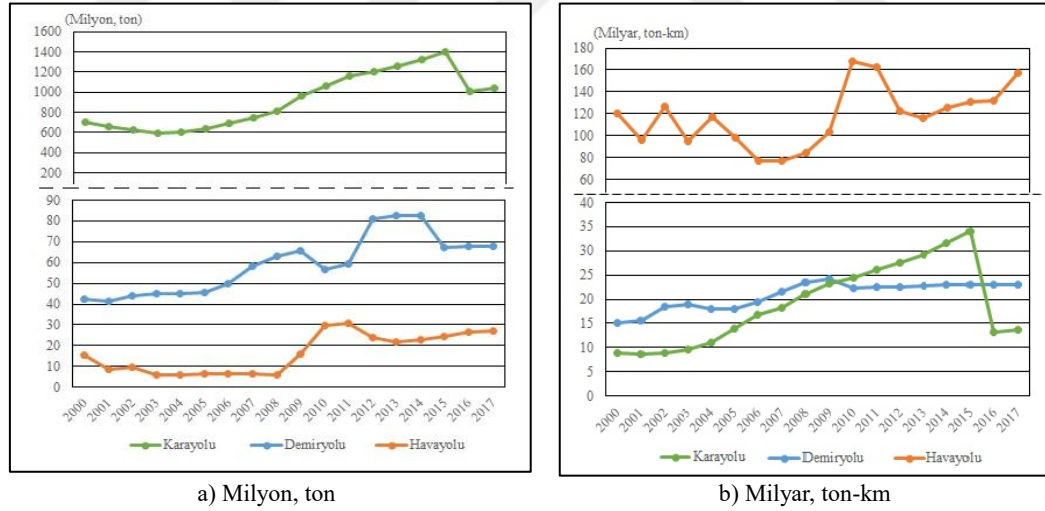
b) Milyar, yolcu-km

Şekil 5.6. Yolcu taşımacılığının yıllara göre değişimi.

UTY’de yük taşımacılığının yıllara göre değişimi milyon ton ve milyar ton-kilometre olarak Tablo 5.4.’te ve Şekil 5.7.’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Yıllara göre yük taşımacılığı (JICA, 2013; İnfotrans, 2018)

Yıllar	Yük (10 ⁶ , ton)			Yük (10 ⁹ , ton-km)		
	Karayolu	Demiryolu	Havayolu	Karayolu	Demiryolu	Havayolu
2000	701.2	42.4	15.2	8.9	15.0	120.1
2001	658.7	41.5	8.7	8.7	15.7	96.4
2002	627.9	44.0	9.5	9.0	18.4	126.4
2003	596.3	45.1	6.0	9.7	18.9	95.3
2004	603.2	45.3	5.7	11.0	18.0	117.3
2005	638.8	45.8	6.2	13.8	18.1	97.8
2006	689.8	50.0	6.6	16.7	19.3	77.1
2007	745.2	58.0	6.7	18.2	21.6	76.7
2008	811.2	62.9	6.0	21.0	23.4	84.0
2009	959.3	65.6	15.9	23.2	24.3	102.9
2010	1,066.1	56.9	29.5	24.5	22.3	168.0
2011	1,156.4	59.2	30.7	26.1	22.5	162.5
2012	1,203.2	80.91	24.0	27.5	22.48	121.9
2013	1,258.3	82.39	22.0	29.2	22.68	116.3
2014	1,327.4	82.82	23.0	31.5	22.91	125.1
2015	1,399.8	67.20	24.6	33.9	22.93	131.1
2016	1,002.8	67.60	26.5	13.3	22.93	132.2
2017	1,040.9	68.0	27.2	13.62	22.94	156.9



Şekil 5.7. Yük taşımacılığının yıllara göre değişimi.

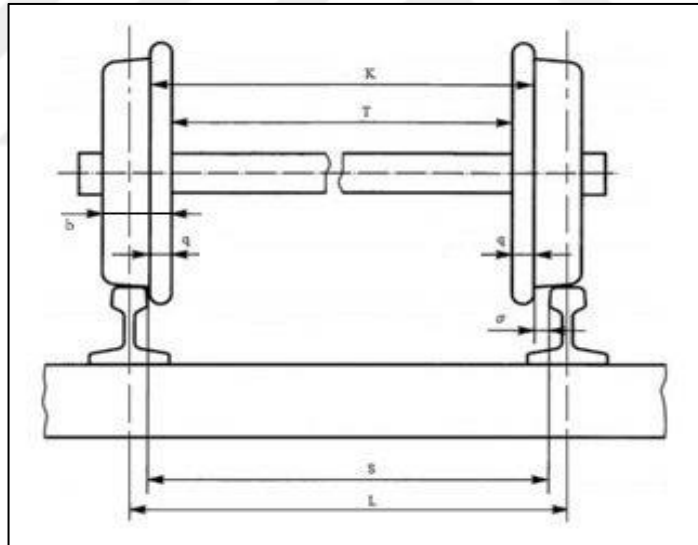
Özbekistan’da karayolu, demiryolu, boru hatları ve havayollarında yolcu ve yük taşımacılığı yapılmaktadır. 2017 yılında karayolları % 88.7, demiryolları % 5.8, boru hatları % 5.498, havayolları ise % 0.02 orana sahiptir (O’DSQ, 2018).

5.2. Özbekistan Devlet Demiryolları Hattını Oluşturan Altyapı ve Üstyapı Bileşenleri

UTY demiryolu hattındaki demiryolu araçlarının aks (dingil) düzeneğinde kullanılan önemli genişlikler Şekil 5.8.'de ve bunlara ait değerler Tablo 5.5.'te verilmiştir. UTY'de kullanılan demiryolu genişlikleri ile ilgili ölçüler Rusya Devlet Demiryolları'nda kullanılan ölçülerle aynıdır.

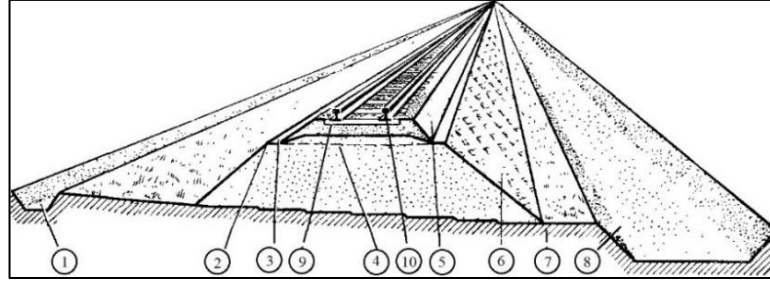
Tablo 5.5. UTY'de kullanılan önemli demiryolu genişlikleri ve ölçüleri (Rasulov ve ark., 2016)

Genişlikler	Simge	Boyut	Birim
İtibari hat genişliği	S	1,520	Mm
İç genişlik	T	1,440	Mm
İtibari hat açıklığı	L	1,600	Mm
Tekerlek genişliği	b	140	Mm
Budenler arası genişlik	K	1,506	Mm
Buden kalınlığı	q	32	Mm
Ray iç yanağı ile buden arasındaki maksimum mesafe	σ	12	Mm



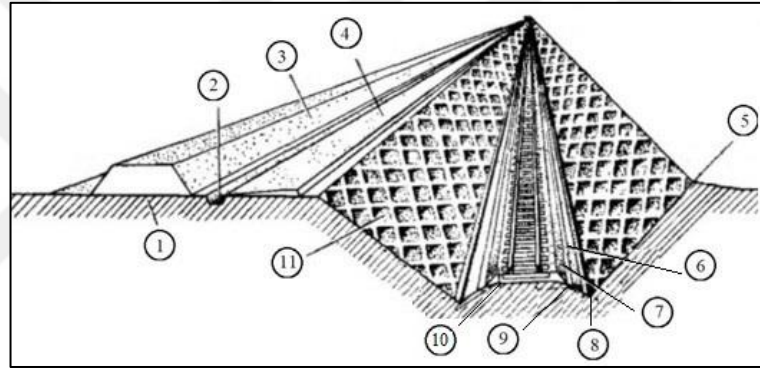
Şekil 5.8. UTY demiryolu hattındaki genişlikler (Rasulov ve ark., 2016).

UTY'deki balastlı demiryolu enkesit tanımlamalarında Rus Demiryolları standartları kullanılmaktadır. Demiryolu tip enkesitleri dolgu ve yarma olmak üzere iki şekilde tanımlanmaktadır. Dolgu ve yarmalarda tip enkesit şekilleri Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da verilmiştir. Demiryolu tip enkesitleri; üstyapı (Ray, travers, bağlantı malzemesi ve balast) ve altyapıdan (Alt balast, dolgu, doğal zemin ve drenaj tesisleri) oluşmaktadır.



Şekil 5.9. Dolgu ile yapılan balastlı demiryolu tip enkesiti (Rasulov ve ark., 2016).

Şekil 5.9.'da; 1-Kenar hendeği, 2-Dolgu şev başı, 3-Dolgu omuz bölgesi, 4-Dolgu platformu, 5-Balast tabakası, 6-Dolgu şevi, 7-Dolgu tabakası ile hendek arasında bırakılan mesafe, 8-Rezerve bölge, 9-Travers, 10-Ray ve bağlantı malzemesi.



Şekil 5.10. Yarma ile yapılan balastlı demiryolu tip enkesiti (Rasulov ve ark., 2016).

Şekil 5.10.'da; 1-Doğal zemin, 2-Hendek, 3-Dolgu şevi, 4-Banket, 5-Yarma şevi başı, 6-Balast şevi, 7-Balast, 8-Yarma hendeği, 9-Platform kenarı, 10-Ana platform, 11-Yarma şevi.

5.2.1. Özbekistan Devlet Demiryolları'nın altyapı ve üstyapı özellikleri

UTY'de demiryolu hat genişliği (Ray üst kotundan 14 mm aşağıda, ray iç yanakları arasındaki mesafe), geniş hat kategorisinde olup 1,520 mm'dir. İki ray eksen arasındaki mesafe yani hat açıklığı ise 1,600 mm'dir. Şekil 5.11.'de çeşitli hat genişliği ölçüleri verilmiştir.

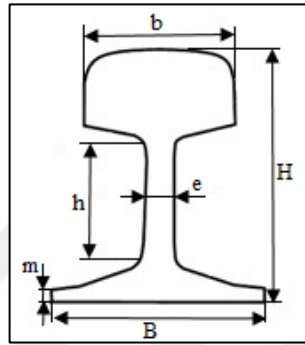
KMK kısaltması, İnşaat Standartları ve Düzenlemeler anlamına gelmektedir. GIN ise Bakım ve Muayene Standartları anlamına gelmektedir.

- KMK 2.05.05-96: Demiryolu ve Karayolu Tünelleri,
- KMK 2.05.03-97: Köprüler ve Borular,
- KMK 2.05.10-97: Demiryollarının ve Karayollarının Altyapı Tasarım Rehberi,
- KMK 2.10.10-97: Demiryolları için Arazi İstimlak Normları,
- KMK 3.06.01-96: Demiryolları. Yapım İşleri Organizasyonu, Yapımı ve Kabulü,
- KMK 3.06.07-96: Köprüler ve Borular. Kabul ve Muayene Kuralları,
- KMK 3.06.05-98: Demiryolu, Karayolu ve Hidrolik Tüneller. Kentiçi demiryolları. İşlerin Yapımı ve Kabulü,
- KMK 3.07.01-96: Nehir Yapıları,
- KMK 2.01.03-96: Deprem Bölgelerinde İnşaat,
- KMK 2.07.01-94: Kentsel Planlama. Kentsel ve Kırsal Yerleşimlerin Planlanması ve Geliştirilmesi,
- KMK 2.01.08-96: Gürültüden Korunma Yapıları,
- KMK 2.02.01-98: Kum Temelli Yapılar,
- KMK 2.03.11-96: Yapıların Korozyondan Korunması,
- KMK 2.05.01-96: 1,520 mm Hat Genişliğine Sahip Demiryolları. Tasarım Standartları,
- KMK 2.01.01-94: Yapı Tasarımında İklimsel, Fiziksel ve Jeolojik Veriler,
- KMK 2.05.10-97: Karayollarında ve Demiryollarında Altyapı ve Yol Tabanı Tasarım Kuralları,
- GIN 07-035-03: Demiryolu Altyapısının Bakım ve Tamirat Rehberi,
- GIN 07-032-03: Demiryolu Bakımı ile İlgili Klavuz.

5.2.2. Raylar

UTY’de, Rusya Devlet Demiryolları ray standardındaki (GOST 18267-82, GOST R 51685-2000) raylar kullanılmaktadır. 2001 yılından itibaren GOST R 51685 – 2000 standardına göre R50, R65, R65K, R75 tipinde raylar kullanılmaktadır (GOST 18267-

82, 1982; GOST R 51685-2000, 2000; Rasulov ve ark., 2016). Diğer uluslararası ray simge tekniklerine uygun olarak “R” harfi rayı, yanındaki rakam ise bir metre uzunluğundaki rayın kütlesini ifade etmektedir. Şekil 5.13.’te tipik bir ray enkesiti, Tablo 5.6.’da ise ray ölçüleri gösterilmiştir. Şekil 5.13.’te, H: ray yüksekliği, h: ray gövdesi yüksekliği, B: ray taban genişliği, b: mantar genişliği, m: ray taban yüksekliği, e: ray gövde genişliği.



Şekil 5.13. Ray enkesiti.

Tablo 5.6. Rayların geometrik ölçümleri (Rasulov ve ark., 2016)

Ray geometrisi elamanları	Simge	Ray tipleri			
		R50 (mm)	R65 (mm)	R65K (mm)	R75 (mm)
Ray yüksekliği	H	152	180	181	192
Ray gövdesi yüksekliği	h	83	105	105	104
Mantar genişliği	b	72	75	75	75
Ray taban genişliği	B	132	150	150	150
Ray gövde genişliği	e	16	18	18	20
Ray taban yüksekliği	m	10.5	11.2	11.2	13.5

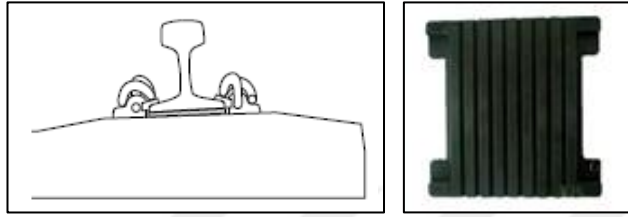
2013 yılındaki verilerde UTY’de yaygın olarak kullanılan rayların tipleri ve uzunluk ölçüleri Tablo 5.7.’de verilmiştir. Yüksek hızlı demiryolu hatlarında R65 tipi raylar tercih edilmektedir. UTY’de ağırlıklı olarak 12.5 ve 25 m uzunluğundaki raylar kullanılmaktadır. Yüksek hızlı demiryolu hatlarında uzun kaynaklı raylar (UKR) kullanılmıştır (Rasulov ve ark., 2016).

Tablo 5.7. UTY demiryolu hatlarında kullanılan rayların uzunluk ölçüleri (JICA, 2013)

Ray tipleri	UTY bağlı bölge müdürlükleri						Toplam uzunluk
	Taşkent	Hokand	Buhara	Konurat	Karşı	Tirmiz	
R75, km	0	5.5	0	0	0	0	5.5
R65, km	990.6	422.8	1,320.4	799	521.2	369.3	4,423.3
R50, km	45.2	102.9	21.9	185.4	0	2.1	357.5

5.2.3. Seletler ve bağlantı malzemeleri

Betonarme traversli bir demiryolu hattında seletler, çelik raylar ve traversler arasına konur (Şekil 5.14.). Seletler, traversleri aşınmadan ve darbeden kaynaklanan hasarlardan korur ve raylarda elektrik izolasyonunu sağlar. Ahşap traversli hatlar seletsiz olabilirler.

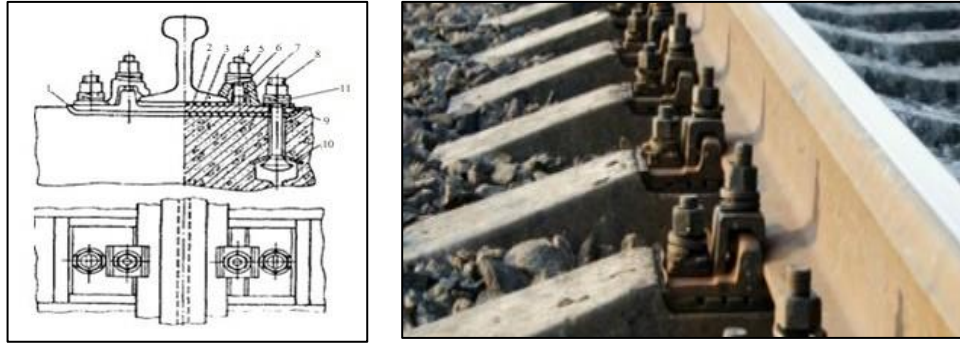


Şekil 5.14. Selet ve uygulaması (Guler, 2014).

Hat dinamiği açısından, seletler önemli bir role sahiptir. Seletler tüm hattın rijitliğini etkilerler. Hat bir tren yüküyle yüklendiği zaman yumuşak seletler rayların daha büyük sehim yapmalarına imkan verir ve tren dingil yükleri daha çok travers üzerine dağıtılır. Aynı zamanda yumuşak seletler yüksek frekanslı titreşimleri sönümler. Yumuşak seletler yüksek frekanslı titreşimlerin traverslere ve daha aşağılara yani balast içine iletimini önler. Diğer tarafta rijit seletler, dingil yüklerini ve yüksek frekanslı yük titreşimlerini tekerlek altındaki traverslere doğrudan iletirler.

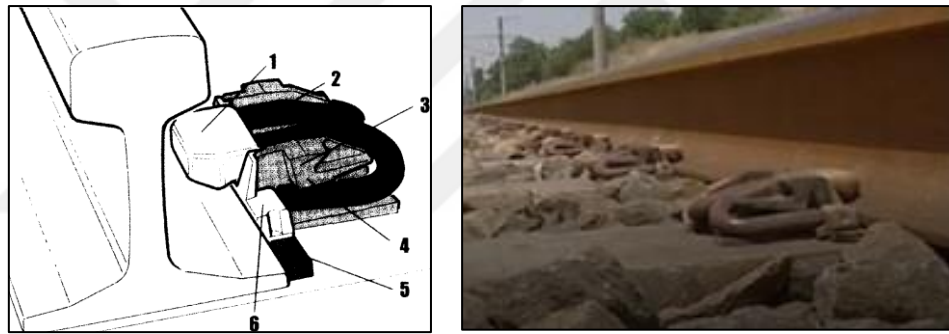
Raylar, ray ve travers arasına konan seletlerle birlikte traverslere bağlanırlar. Raylar, traverslere bağlantı malzemesi ile tutturulur. Bağlantı malzemesinin ray ile temas noktası olan mandallar (krapo) arasında elektrik yalıtımını sağlayan bir başka malzeme bulunur.

UTY’de 2002 yılına kadar en çok kullanılan bağlantı malzemesi doğrudan bağlanan K-65 tipi bağlantı malzemesidir. Şekil 5.15.’te K-65 tipi bağlantı malzemesi gösterilmiştir. Şekil 5.15.’te; 1-Yalıtkan ped, 2-Selet, 3-Ayarlanabilir ped, 4-Bulon, 5-Cıvata, 6-Yaylı rondela, 7-Krapo, 8-Tirfon, 9-Ergo, 10-Dübel, 11- Besleme rondelası.



Şekil 5.15. K-65 tipi bağlantı malzemesi (Rasulov ve ark., 2016).

UTY’de 2004 yılından itibaren K-65 bağlantı malzemesinin yanında Pandrol Fastclip tipi bağlantı malzemesi de kullanılmaya başlamıştır (Şekil 5.16.). Şekil 5.16.’da; 1-Kraponun izolatörü, 2-Krapo, 3-Bağlantı omuzu, 4-Kilitleme yeri, 5-Yan izolatörü, 6-Selet.



Şekil 5.16. Pandrol Fastclip tipi bağlantı malzemesi (Rasulov ve ark., 2016).

5.2.4. Traversler

UTY’nin ilk zamanlarında ahşap ve beton traversler kullanılmıştır, 1990 yılından sonra Rusya Devlet Demiryolları’nda (GOST 10629-88) standardındaki traversler kullanılmaktadır (GOST 10629-88, 1988). 2004 yılından itibaren EN 13230-1 ve EN 13230-2 standartlarına göre Özbekistan iklim koşulları hesaba katıldığında BF 70 tipi öngerilmeli beton traversleri üretilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (BSI, 2002a; BSI, 2002b; Rasulov ve ark., 2016).

Traversler raylara destek sağlar ve hattın hat genişliğini, nivelmanını ve yatay geometrisini korur. Traversler; raylardan gelen yatay ve düşey kuvvetleri balast yatağına iletir. Traversler aynı zamanda iki ray arasında elektrik yalıtımı sağlar.

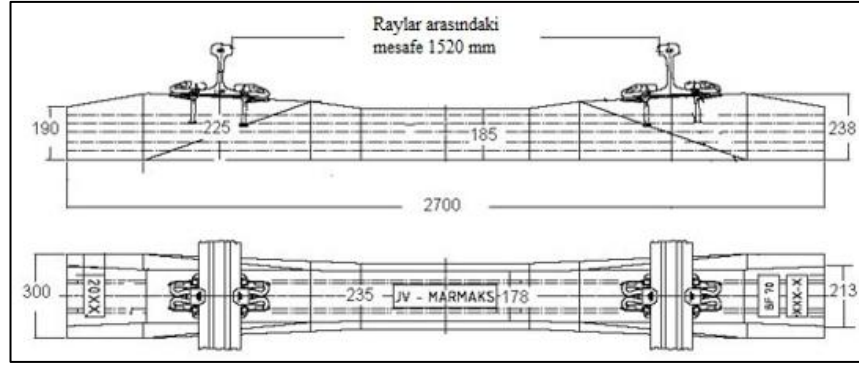
Günümüzde balastlı demiryolu hatları genellikle tek bloklu (yekpare blok travers) betonarme traversler kullanılarak inşa edilirler. Ancak Fransa’da ikiz bloklu betonarme traversler kullanılmaktadır. Ahşap traversler hemen hemen demiryolu hatlarını inşaatının başlangıcından beri kullanılmaktadır. Ahşap fiyatının uygun olduğu ülkelerde ahşap travers kullanımına devam edilmektedir. Bazı durumlarda çelik travers kullanmak daha uygun olmaktadır. Yaygın olarak kullanılan traversler genelde üç çeşittir:

1. Ahşap traversler,
2. Beton traversler (Yekpare bloklu ve ikiz bloklu olmak üzere ikiye ayrılır),
3. Çelik traversler.

BF-70 tipi traverslerin en önemli avantajlarından biri yüksek hızlı demiryolu hatlarında da kullanılmasıdır. UTY hatlarında kullanılan Pandrol Fastclip bağlantı malzemeli BF-70 tipi öngerilmeli beton travers Şekil 5.17.’de gösterilmiştir ve ölçüleri Tablo 5.8.’de verilmiştir.

Tablo 5.8. BF-70 tipi öngerilmeli beton travers özellikleri (Rasulov ve ark., 2016)

Hat geometrisi elemanları	Miktar, Ölçü Birimi
1 km mesafedeki travers sayısı	1,680-1,720 adet
Travers enkesitleri arasındaki mesafe	588 mm
İtibari hat genişliği	1,520 mm
Ray taban genişliği R65, R75, UIC60	150 mm
Travers eğimi (koniklik)	1/20
Travers taban uzunluğu	2,700 mm
Travers taban genişliği	300 mm
Traversin merkez taban genişliği	235 mm
Ray oturma yüzeyi	150 mm
Travers yüksekliği	238 mm
Traversin ray altındaki genişliği	213 mm
Yolcu trenlerinin maksimum hızı	250 km/sa
Yük trenlerinin maksimum hızı	130 km/sa
Dingil basıncı	225 kN
Travers ağırlığı	2.85 kN
Travers bağlantı malzemesi	Pandrol Fastclip, K 65

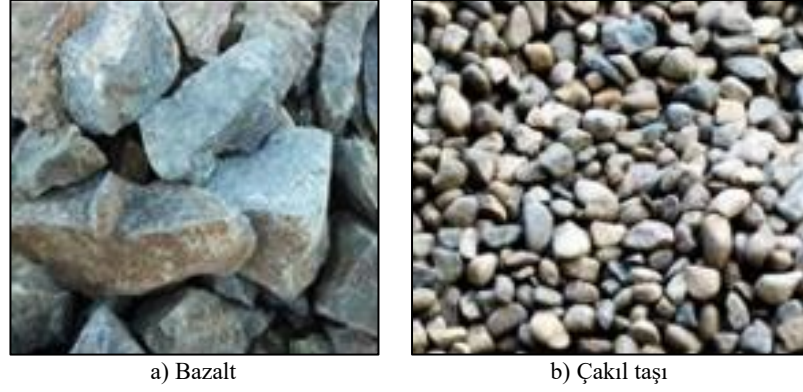


Şekil 5.17. BF 70 tipi öngerilmeli beton travers (Rasulov ve ark., 2016).

5.2.5. Balast tabakası

Demiryolu araçlarından kaynaklanan düşey ve yatay kuvvetlere karşı hattı balast tabakasını korur. İri taşlar demiryolu hattının yatağını (balast yatağı) oluşturmak için kullanılırlar. Raylara bağlanmış olan traversler balast yatağına yerleştirilirler. Hattın yatayda ve düşeyde düzgünlüğünü sağlamak için, balast tabakası traversler etrafında sıkı bir şekilde sıkıştırılır ve burajlanır. Standart balast kalınlığı 300 mm'dir fakat yatay dengeyi sağlamak için balast tabakasının omuzlarında kalınlık 500 mm'ye kadar ulaşır. UTY'de balast tabakası olarak bazalt ve çakıl taşı (Şekil 5.18.) malzemeleri serilmektedir. Balast malzemesinin fonksiyonları:

- Traversten gelen yüklerin daha geniş bir alana dağıtılmasını sağlar.
- Travers-balast ara yüzünde oluşan yüksek gerilmeleri altyapıya kabul edilebilir değerlere düşürerek iletir.
- Tren hızlarından kaynaklanan düşey ve yatay kuvvetlere karşı traverslere direnç sağlar.
- Parçalanmaya, yıpranmaya, bozulmaya, biyokimyasal ve mekanik aşınmaya karşı direnç sağlar.
- Drenaj için yeterli bir geçirgenlik sağlar.



a) Bazalt

b) Çakıl taşı

Şekil 5.18. Balast malzemesi olarak kullanılan çeşitli kayaç örnekleri (UTY, 2018).

Demiryolu hat inşasında yerleşim bölgesi ve iklim koşulları hesaba katıldığında kızkilkum (Qızılqum) malzemesi de kullanılmaktadır (Şekil 5.19.). Demiryolu hatlarında kullanılan balast tabakasının kalınlığı 300-400 mm'dir.

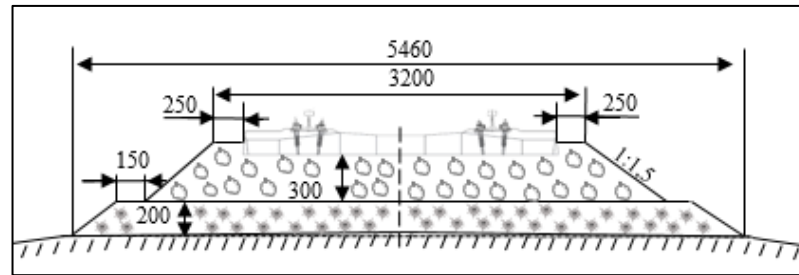


Şekil 5.19. Kızılqum malzemesi üzerine serilen demiryolu hattı (UTY, 2018).

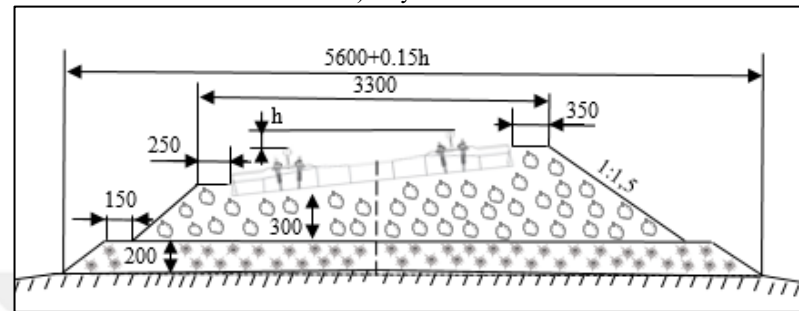
UTY'de kullanılan R65 raylı, beton traverse sahip tek hatlı demiryolu şematik enkesiti Şekil 5.20.'de ve değerleri Tablo 5.9.'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Beton traverse sahip tek hatlı demiryolu enkesitine ait değerler (Rasulov ve ark., 2016)

Üstyapı ve altyapı elemanları	Aliyman	Kurba	Birim
Dever	-	0-150	mm
Balast kalınlığı	300	300	mm
Alt balast kalınlığı	200	200	mm
Alt balastın tabandaki genişliği	5,460	5,560+0.15h	mm
Balastın üst yüzeydeki genişliği	3,200	3,300	mm
Toprak gövde ile travers arasındaki mesafe	1,380	1,440	mm
Omuz genişliği	250	350	mm
Balast şev eğimi	1/1.5	1/1.5	
Balast ile alt balast tabakası arasında bulunan tabandaki yatay mesafe	150	150	mm



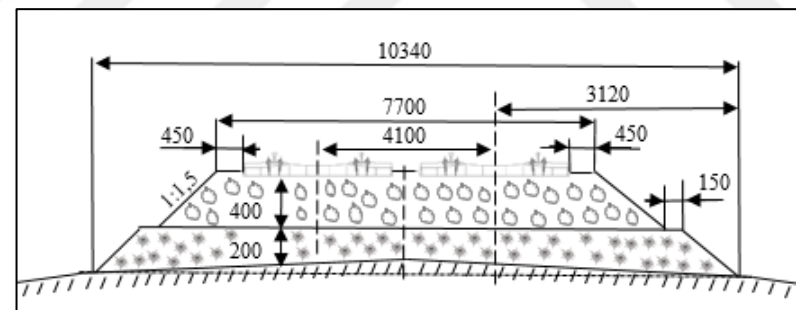
a) Aliymanda



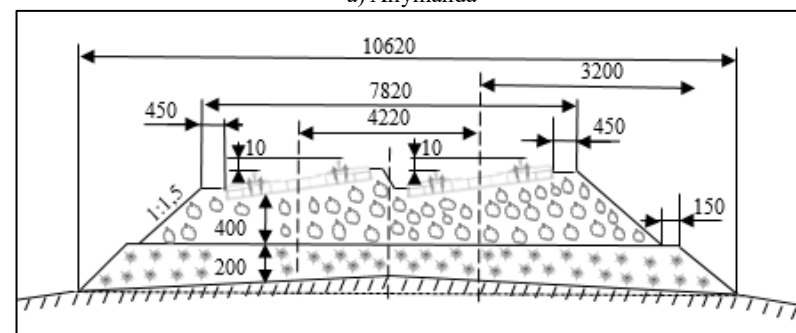
b) Kurbada

Şekil 5.20. Beton traverse sahip tek hatlı demiryolunun şematik enkesiti.

UTY’de kullanılan R65 raylı, beton traverse sahip çift hatlı demiryolu şematik enkesiti Şekil 5.21.’de ve değerleri Tablo 5.10.’da verilmiştir.



a) Aliymanda



b) Kurbada

Şekil 5.21. Beton traverse sahip çift hatlı demiryolunun şematik enkesiti.

Tablo 5.10. Beton traverse sahip çift hatlı demiryolu enkesitine ait değerler (Rasulov ve ark.,2016)

Üstyapı ve altyapı elemanları	Aliyman	Kurba	Birim
Dever	-	0-150	mm
Balast kalınlığı	400	400	mm
Alt balast kalınlığı	200	200	mm
Alt balastın tabandaki genişliği	10,340	10,620	mm
Balastın üst yüzeydeki genişliği	7,700	7,820	mm
Toprak gövde ile travers eksenleri arasındaki mesafe	3,120	3,200	mm
Hat eksenleri arasındaki açıklık	4,100	4,220	mm
Omuz genişliği	450	450	mm
Balast şev eğimi	1/1.5	1/1.5	
Balast ile alt balast tabakası arasında bulunan tabandaki yatay mesafe	150	150	mm

5.2.6. Alt balast

İri daneli, iyi kalitedeki balast tabakası ile doğal zemin arasında bir geçiş tabakası olarak alt balast malzemesi kullanılır. Bu tabaka, balast ve toprak gövdenin karşılıklı penetrasyonunu önler ve don penetrasyonunu azaltır. Gerekli filtre koşullarını sağladığı sürece, herhangi bir kum veya agrega malzemesi alt balast malzemesi olarak kullanılabilir. Genellikle dane boyutu 0.05 mm ile 20 mm arasında olan kum-agrega karışımı gibi pahalı olmayan malzemeler kullanılabilir. Bazı özel durumlarda asfalt betonu, jeosentetikler veya çimento-kireç karışımı gibi daha pahalı malzemeler kullanılabilir. Bu gibi iyileştirme çalışmaları daha çok alttaki toprak gövdenin mukavemetine ve rijitliğine bağlıdır. UTY demiryolu hatlarında 20 cm kalınlığında alt balast malzemesi serilmektedir.

5.2.7. Toprak gövde

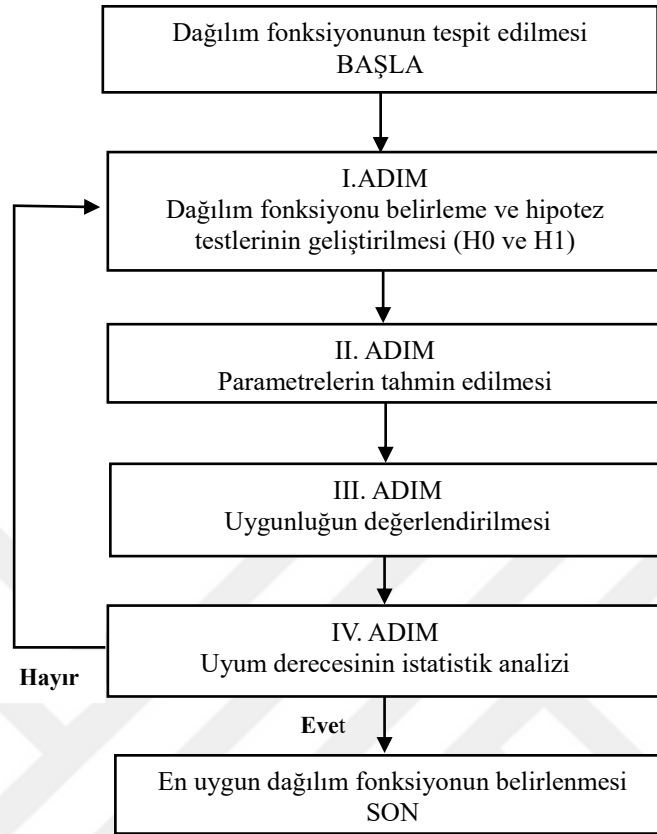
Toprak gövde (veya formasyon), hat yatağı için bir temel vazifesi görececek olan düzleştirilmiş bir zemin veya kaya yüzeyidir. Hat yatağına düzgün bir profil vermek için zemin üzerine bazen ek bir tabaka konur (formasyon tabakası). Balast altı ve balast tabakası bu malzeme üzerine serilir. Hattın yapısında toprak gövde çok önemli bir bileşendir. Toprak gövde, trafik yükleri ve çevresel etkilerle hat bozulmalarına sebep olabilmektedir.

BÖLÜM 6. DEMİRYOLU ALTYAPI VE ÜSTYAPI YÖNETİMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN RAM MODELİ

Bu tez çalışmasında demiryolu altyapı yönetimi için geliştirilen model yapısı çeşitli aşamalardan oluşmaktadır ve RAM analiz tekniklerini içermektedir. Bu amaçla; demiryolu hat geometrisi (hat genişliği, hattın eksenden sapması, burulma, dever ve nivelman) ve her bir hat bileşeni (raylar, traversler ve balast tabakası) bozulmaları için üç eşik değeri belirlenmiştir. Belirlenen bu üç eşik değerine bağlı olarak demiryolu Bakım ve Yenileme (BY) faaliyetlerini gerçekleştirmek mümkündür. Belirlenmiş olan üç eşik değerin açıklamaları aşağıda yapılmıştır:

- Uyarı Limiti (AL): Demiryolu hattında AL eşik değerinin üzerinde bir bozulma olması durumunda hattın durumu analiz edilir ve BY faaliyetleri programa konur.
- Müdahale Limiti (IL): Demiryolu hattında IL eşik değerinin üzerinde bir bozulma olması durumunda düzeltici BY faaliyetleri programa konur ve bir sonraki kontrollerde acil müdahale eşik değerinin aşılması istenir.
- Acil Müdahale Limiti (IAL): Demiryolu hattında IAL eşik değerinin üzerinde bir bozulma olması durumunda trenlerin raydan çıkma riskine karşılık gerekli önlemler alınır ve riskler kabul edilebilir düzeylere getirilir.

Genel olarak ve bu çalışmada da yapıldığı gibi dağılım fonksiyonlarının elde edilmesinde dört aşamalı bir teknik kullanılır. Birinci adımda dağılım fonksiyonları için hipotez testleri kurulur. İkinci adımda parametreler tahmin edilir. Üçüncü adımda uygunluğun değerlendirilmesi yapılır. Dördüncü adımda ise uygunluk testleri yapılır. Uyum derecesinin ortaya konmasında; Chi-Square, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling and Shipiro-Wilk gibi uyum uygunluk testleri kullanılabilir. Bu çalışmada dağılım fonksiyonlarının belirlenmesinde izlenen yöntem Şekil 6.1.'de özetlenmiştir.



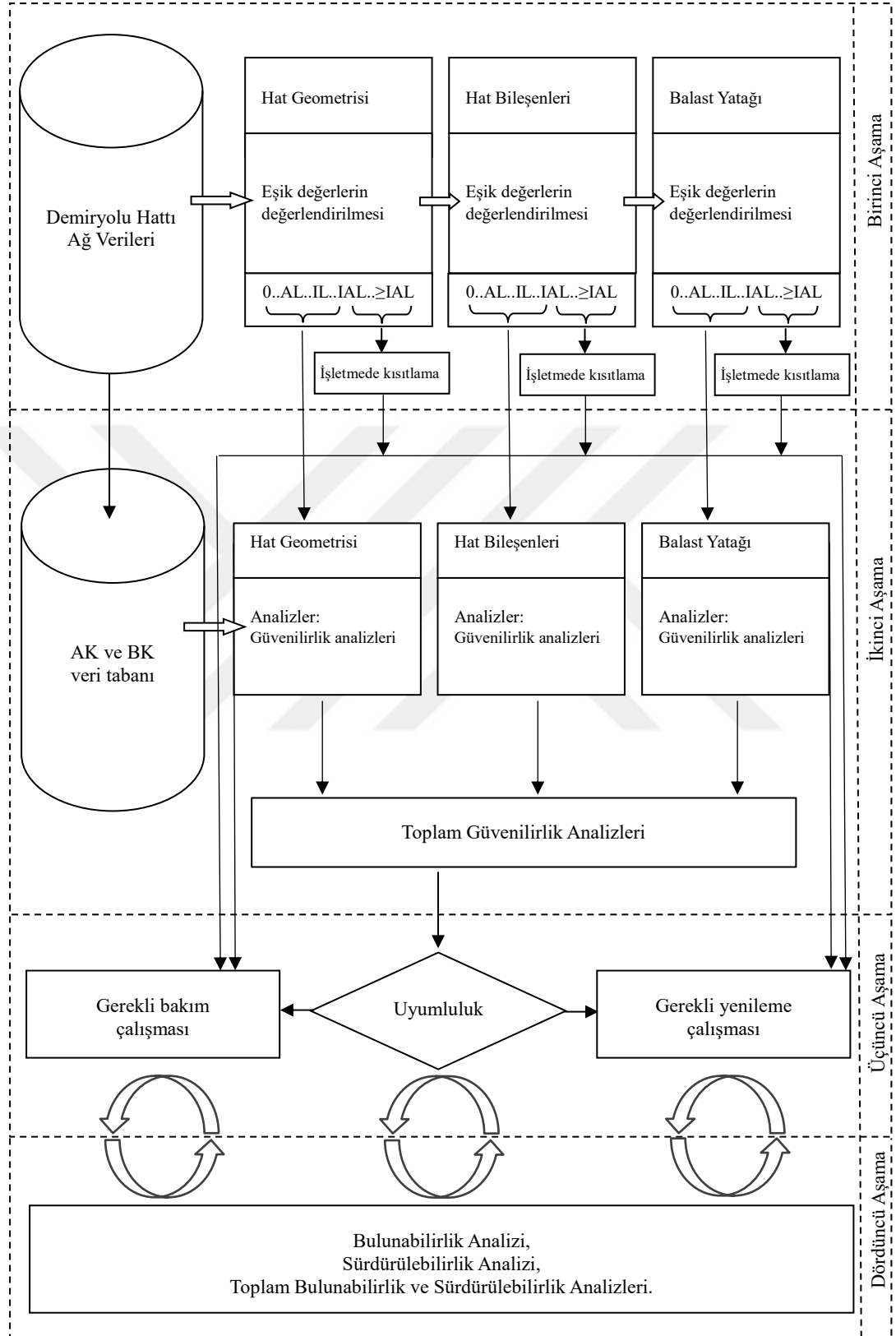
Şekil 6.1. Uygun dağılım fonksiyonunun tespit edilmesi.

Bu çalışmada geliştirilmiş olan model şemasının sistem yapısı Şekil 6.2.’de gösterilmiştir. Bu model şemasında ana amaç, RAM analizlerini aşamalar halinde gerçekleştirmektir. Sonuç olarak geliştiren model RAM analizlerini bir dizi aşamalarda gerçekleştiren bir metodolojiyi içermektedir. Genel olarak demiryolu hat verileri Analiz Kesimleri (AK) olarak isimlendirilen en küçük birim kesimlerinden elde edilir. Diğer tarafta demiryolu ölçüm araçları hat verisini tüm hat boyunca toplarlar ve küçük Bakım Kesimleri (BK) ölçeğinde veriyi depolarlar. Demiryolu altyapı verisi, demiryolu ölçüm trenleri, elle kumanda edilen ölçüm sistemleri ve uzman görüşleri ile toplanır. RAM analizlerine başlamadan önce demiryolu hattında AK ve BK’nin hat özellikleri dikkate alınır.

1. Aşama: Demiryolu hattının minimum verisi kullanılarak analizler yapılır. Demiryolu ağı verisi belirlenen eşik değerler dikkate alınarak basit bir şekilde değerlendirilir. Daha önce açıklandığı gibi hat geometrisi parametreleri ve hattı

oluşturan bileşenler için eşik değerler belirlenmişti. Şayet eşik değerler AL değerinden küçükse hattın BY faaliyetine ihtiyacı yoktur. Hat kesimlerine ikinci aşamada güvenilirlik analizleri yapılır. Şayet hat ölçüm değerleri AL ve IL arasında ise demiryolu hattına güvenilirlik düzeyi esasında düzenli BY faaliyetleri yapılır. Benzer şekilde hat ölçüm değerleri IL ve IAL arasında ise demiryolu hattına güvenilirlik düzeyi esasında düzeltici bakım ve/veya yenileme çalışmaları yapılır. Hat kesimleri, münferit ve toplam güvenilirlik oranlarında ayrıntılı olarak ikinci kısımda analiz edilmeye başlanır.

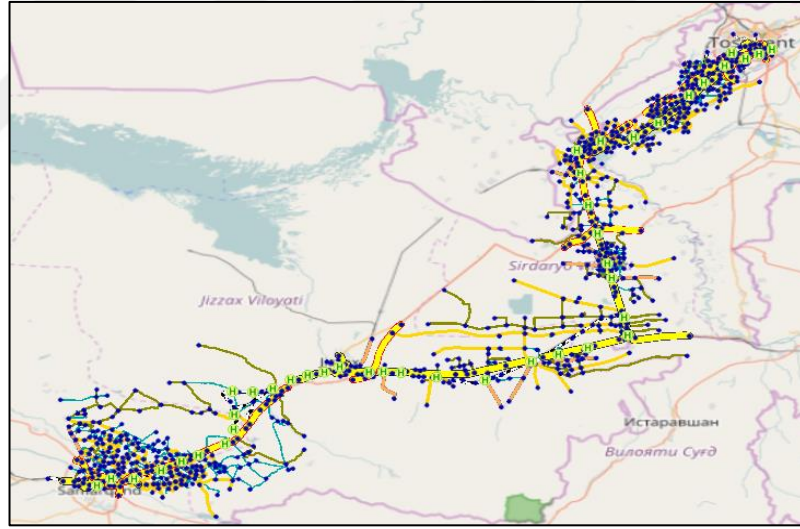
2. Aşama: Geliştirilen modelin ikinci aşamasında ayrıntılı veriler üzerine çalışılır. Bu aşamada demiryolu hattından toplanan veriler istatistiki olarak değerlendirilir ve dağılım fonksiyonları kullanılır. Dağılım fonksiyonları, toplanan verilerin matematiksel bir formatta ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesine imkan verir. Sonuç olarak; hat geometrisi parametreleri, raylar, traversler ve balast tabakası için dağılım fonksiyonları elde edilir. Bu fonksiyonlar güvenilirlik fonksiyonları olarak dikkate alınır. Geliştirilen modelin ikinci aşamasında münferit ve toplam güvenilirlik düzeyleri hesaplanır ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı analizler için modelin üçüncü aşamasına gönderilir.
3. Aşama: Geliştirilen modelin üçüncü aşamasında toplam güvenilirlik analiz sonuçları kullanılır. Gerekli bakım ve/veya yenileme çalışmaları, hat geometrisi ve hat bileşenlerinin toplam güvenilirlik analiz sonuçları esasında yapılır. Bu aşamada bakım ile yenileme arasında uyumluluk analizinde yapılır. Üçüncü ve dördüncü aşamalar birbirleri ile karşılıklı etkileşim halindedir.
4. Aşama: Modelin dördüncü aşaması bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizlerini içerir. Bu aşamada toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları hesaplanır. Münferit ya da toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları BY faaliyetlerine bağlıdır. Şayet BY faaliyetlerinin demiryolu işletmesine bir etkisi olursa (Örneğin tren rötaları, tren hızlarında düşümler vb.), BY faaliyetleri yeniden değerlendirilir ve bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları artırılır.



Şekil 6.2. Geliştirilen modelin yapısı.

6.1. Özbekistan Devlet Demiryollarında RAM Modeli Uygulaması

Bu çalışmada Özbekistan Devlet Demiryolları'nda (UTY) demiryolu altyapı yönetimi için geliştirilen RAM modelinin uygulaması yapılmıştır. Özbekistan'ın Taşkent ve Semerkant şehirleri arasında 344 km uzunluğunda yüksek hızlı demiryolu hattı bulunmaktadır. Geliştirilen RAM modelinin uygulaması için Taşkent-Semerkant arasındaki demiryolu hattının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında vektör haritası oluşturulmuştur (Şekil 6.3.). Oluşturulan vektör haritada analiz ve bakım kesimleri UTY'nin mevcut sistemine uygun olarak işlenmiştir. UTY yapımını tamamlamış olduğu maksimum 250 km/sa işletme hızına sahip yüksek hızlı demiryolu hatlarında balastlı demiryolu hatlarını tercih etmiştir. Taşkent-Semerkant yüksek hızlı demiryolu inşaatı mevcut hatların iyileştirilmesi şeklinde 17 Kasım 2009 yılında başlamış ve 08 Ekim 2011 tarihinde işletmeye açılmıştır.



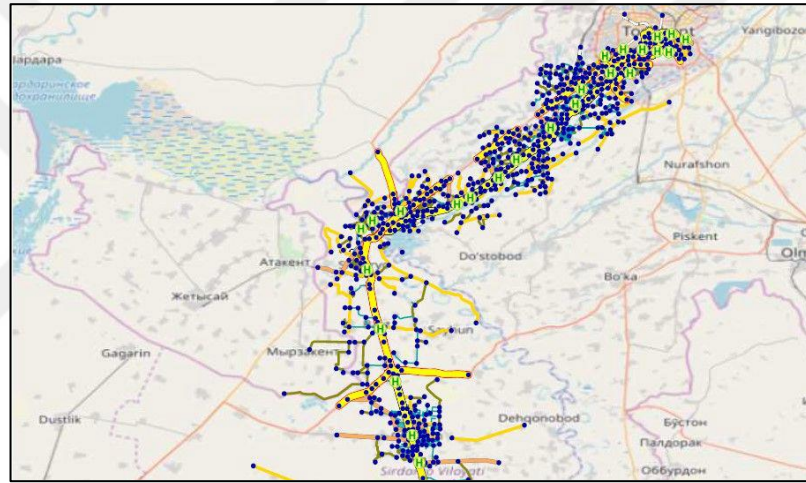
Şekil 6.3. Taşkent-Semerkant yüksek hızlı demiryolu koridoru.

Taşkent-Semerkant arasındaki 344 km uzunluğunda yüksek hızlı demiryolu hattı Sirderya ve Cizzah şehirlerinden de geçmektedir. Bu çalışmada Taşkent-Semerkant arasındaki demiryolu hattının, Taşkent-Sirderya kesimi incelenmiştir (Şekil 6.4.). Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı 112 km uzunluğundadır. CBS ortamında oluşturulan Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı belirli bakım kesimlerine (BK) bölünmüştür. Bu kesimlerin uzunlukları ve analiz kesimleri (AK) özellikleri Tablo 6.1.'de verilmiştir. Bakım kesimleri; Taşkent, Ortayol, Nevruz, Dostluk, Chinoz,

Sirderya, Baht ve Gülistan istasyonları arasında belirlenmiştir. Her bir bakım kesimi de, UTY veri tabanı ve değerlendirme sisteminde uygun olarak 50 metre uzunluğunda analiz kesimlerine bölünmüştür.

Tablo 6.1. Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı kesimlerin uzunlukları ve AK özellikleri

İstasyonlar	Bakım Kesimi (km)	Analiz Kesimi (m)
Taşkent-Ortayol	19	50
Ortayol-Nevruz	17	50
Nevruz-Dostluk	15	50
Dostluk-Chinoz	16	50
Chinoz-Sirderya	18	50
Sirderya-Baht	14	50
Baht-Gülistan	13	50



Şekil 6.4. Taşkent-Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattı kesimi.

6.2. Hat Geometrisi Parametrelerinin RAM Analizleri

UTY'nin yüksek hızlı hatlarının hat geometrisi parametreleri (Hat genişliği, eksenden sapması, burulma, deyer ve nivelman) demiryolu hat geometrisi ölçüm cihazları ile periyodik olarak ölçülmektedir. Sağ ve sol rayın serbestlik dereceleri, hat genişliği, hattın ekseninden sapması ve burulma değerleri hat ölçüm cihazları ile her 25 cm'de bir toplanabilmektedir. Bu çalışmada toplanan hat geometrisi verileri kullanılarak, Tablo 6.1'de verilen her bir hat kesimin RAM analizleri yapılmıştır. Bu amaçla her bir bakım kesiminde, hat geometrisi ölçüm değerleri yanında her bir kesime yapılan BY çalışma sayıları ve süreleri de tespit edilmiştir. UTY'nin hat geometrisi

parametrelerinin eşik değerleri dikkate alınarak, her bir hat geometrisi parametresi için bozulma oranı eşik değerleri tespit edilmiş ve Tablo 6.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Hat geometrisi parametreleri bozulma oranı eşik değerleri

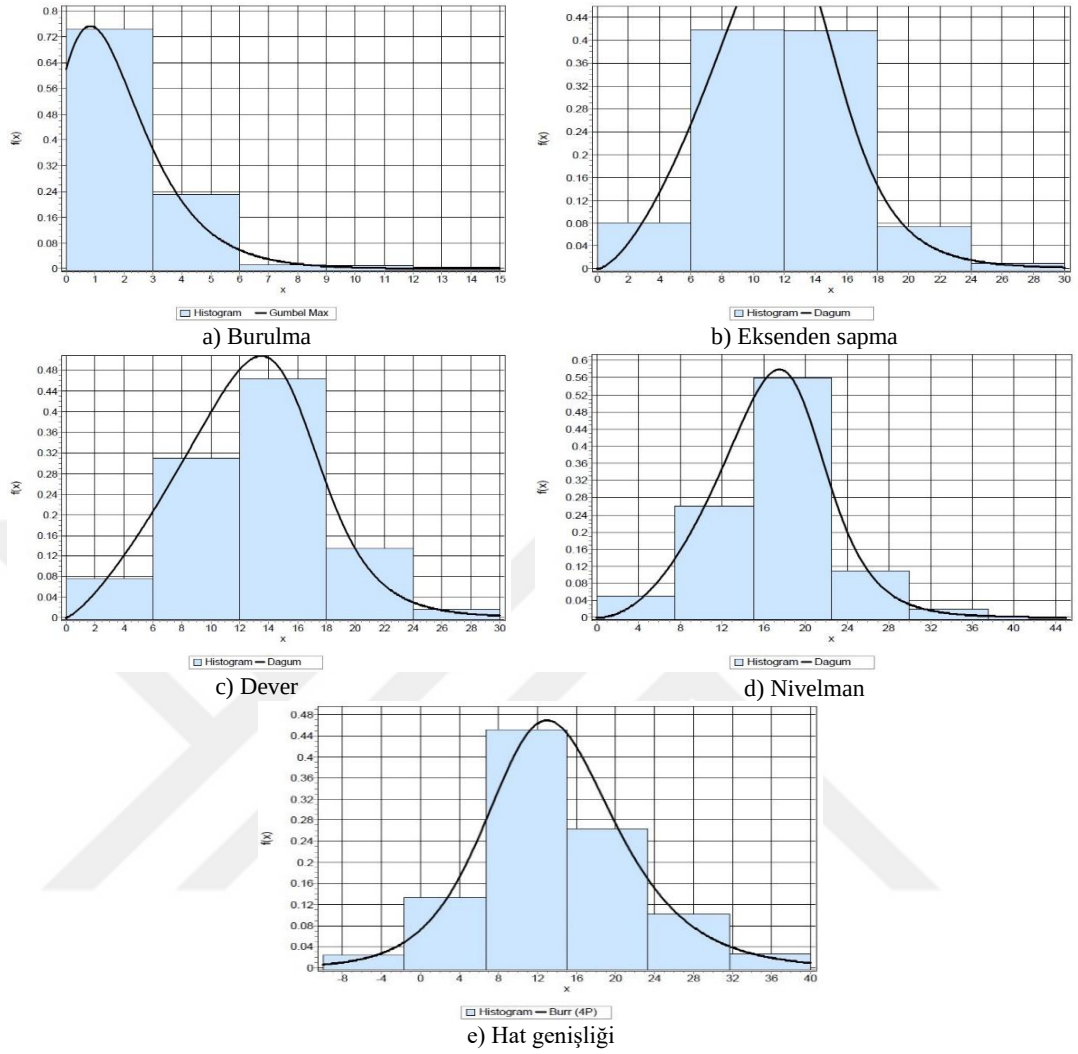
Hat geometrisi parametreleri	Eşik değer limitleri		
	AL (mm)	IL (mm)	IAL (mm)
Hat genişliği	Min: -3, Maks: 20	Min: -4, Maks: 23	Min:-5, Maks: 28
Eksenden sapma	13	14	20
Burulma	3 mm/m	4 mm/m	5 mm/m
Dever	12	16	20
Nivelman	18	20	28

6.2.1. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik analizleri

UTY, yüksek hızlı demiryolu hatlarında her üç ayda bir demiryolu ölçüm aracı ile hat geometrisi parametrelerini ölçmekte ve bu parametreleri kontrol etmektedir. Bu çalışmada 2017 yılında yapılmış olan ölçümler kullanılmıştır. Hat geometrisi parametreleri ve bileşenlerinin, olasılık yoğunluk fonksiyonlarını belirlemek için çeşitli istatistik programlar kullanılmıştır. Dağılım fonksiyonlarının belirlenmesinde daha önce de belirtildiği gibi dört adımlı teknik kullanılmıştır.

Dağılım fonksiyonlarının belirlenmesi ile ilgili yapılan ayrıntılı çalışmada her bir hat kesiminin hemen hemen benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu amaçla Taşkent-Sirderya şehirleri arasında bulunan 112 km uzunluğundaki kesim bir bütün olarak ele alınmış ve tüm hat kesimini temsil eden dağılım fonksiyonları elde edilmiştir.

Dört aşamalı dağılım fonksiyonu belirleme çalışması sonucu; hat genişliği, hattın ekseninden sapması, burulma, dever ve nivelman için olasılık yoğunluk fonksiyonları tespit edilmiştir. Burulma parametresi için Gumbel Max, hat genişliği için dört parametrelili Burr (4P) dağılımları tespit edilmiştir. Hattın ekseninden sapması, dever ve nivelman için ise üç parametrelili Dagum (3P) dağılımı tespit edilmiştir. Bu dağılımların grafik şekilleri Şekil 6.5.'te gösterilmiştir. Gumbel Max, Burr (4P) ve Dagum (3P) dağılımları, Gamma, Weibull, Exponansiyel, Lognormal ve Normal dağılımlar diğer bilinen dağılımlara benzemektedir. Bu dağılımlar istatistiksel kalite kontrol, güvenilirlik mühendisliği ve risk analizi değerlendirmelerinde geniş uygulama alanına sahiptir. Dağılım fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 6.5. Hat geometrisi parametreleri için olasılık yoğunluk fonksiyonları.

Gumbel Max olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 6.1 ile elde edilmiştir.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) \quad (6.1)$$

Burada, x : bağımsız değişken, σ : sürekli ölçek parametresidir ($\sigma > 0$), μ : sürekli konum parametresidir, $x - \infty < x < +\infty$ arasında değişir ve $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$.

Gumbel Max kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 6.2 ile elde edilmiştir.

$$F(x) = \exp(-\exp(-z)) \quad (6.2)$$

Üç parametrelili Dagum olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 6.3 ile elde edilmiştir.

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha k - 1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} \quad (6.3)$$

Burada, x : bağımsız değişkendir, k : sürekli şekil parametresidir ($k > 0$), α : sürekli şekil parametresidir ($\alpha > 0$) ve β : sürekli ölçek parametresidir ($\beta > 0$).

Üç parametrelili Dagum kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 6.4 ile elde edilmiştir.

$$F(x) = \left(1 + \left(\frac{x}{\beta}\right)^{-\alpha}\right)^{-k} \quad (6.4)$$

Dört parametrelili Burr olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 6.5 ile elde edilmiştir.

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} \quad (6.5)$$

Burada, x : bağımsız değişken, k : sürekli şekil parametresi ($k > 0$), α : sürekli şekil parametresi ($\alpha > 0$), β : sürekli ölçek parametresidir ($\beta > 0$) ve γ : sürekli konum parametresi ($\gamma \neq 0$ üç parametrelili Burr dağılımını verir).

Dört parametrelili Burr kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 6.6 ile elde edilmiştir.

$$F(x) = 1 - \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{-k} \quad (6.6)$$

Her bir hat geometrisi parametreleri için elde edilen dağılım fonksiyonlarının katsayıları Tablo 6.3.'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Hat geometrisi parametreleri için dağılım katsayıları

Hat geometrisi parametreleri	Katsayılar					
	k	α	β	γ	σ	μ
Burulma	-	-	-	-	1.5	0.83
Eksenden sapma	0.34	7.6	15.0	-	-	-
Dever	0.27	8.5	17.0	-	-	-
Nivelman	0.34	8.7	21.0	-	-	-
Hat genişliği	0.7	5.8×10^4	2.3×10^5	-2.3×10^5	-	-

Bu çalışmada her bir hat geometrisi parametreleri için elde edilen kümülatif yoğunluk fonksiyonları güvenilirlik fonksiyonları olarak dikkate almak mümkündür. Elde edilen hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik fonksiyonları kullanılarak ve her bir eşik değeri dikkate alınarak, hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik oranları hesaplanmış ve Tablo 6.4.'te verilmiştir. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik oranları istenen sınırlar içinde değilse, hat geometrisine gerekli BY çalışmaları gerçekleştirilir. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik oranları % 94 ile % 97 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.4. Hat geometrisi parametrelerinin güvenilirlik oranları

Hat geometrisi parametreleri	Güvenilirlik %		
	AL	IL	IAL
Hat genişliği	77	86	94
Eksenden sapma	65	73	97
Burulma	80	89	94
Dever	44	76	94
Nivelman	58	73	97

6.2.2. Hat geometrisi parametrelerinin bulunabilirlik analizleri

Bulunabilirlik analizleri değerlendirmesinde her bir bakım kesimlerinde hat geometrisi bozulmalarının kontrol, kusur belirleme, malzeme temin ve düzeltme süreleri dikkate alınarak yıllık ve günlük birimleri cinsinde süreleri tespit edilmiştir (UTY, 2018). Tablo 6.5'de verilmiş olan bulunabilirlik oranları Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde hat geometrisi parametrelerinin bulunabilirlik oranlarının % 93.98 ile % 96.03 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.5. Hat geometrisi parametrelerinin bulunabilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Kontrol (Gün/yıl)	Kusur belirleme süresi (Gün/yıl)	Malzeme temin süresi (Gün/yıl)	Düzeltilme süresi (Gün/yıl)	Bulunabilirlik %
19	15	3	2	3	93.98
17	14	2	2	2	94.74
15	13	1	1	1	95.77
16	14	1	1	2	95.26
18	15	3	2	3	93.98
14	12	1	1	1	96.03
13	12	1	1	1	96.03

6.2.3. Hat geometrisi parametrelerinin sürdürülebilirlik analizleri

Sürdürülebilirlik analizlerinde, her bir bakım kesiminde hat geometrisi parametresinin bozulmalarının düzeltilmesiyle ilgili olarak UTY'nin yıllık BY sayıları belirlenmiş ve günde sıfır BY yapma olasılık değerleri hesaplanmıştır (UTY, 2018). Poisson dağılımı Denklem 2.6 kullanılarak Tablo 6.6.'da verilen sürdürülebilirlik oranları hesaplanmıştır. Hat geometrisi parametrelerinin sürdürülebilirlik oranlarının % 93.12 ile % 95.19 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.6. Hat geometrisi parametrelerinin sürdürülebilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Yıllık BY sayıları	Görülecek BY sayısı (Gün)	Sürdürülebilirlik %
19	26	0	93.12
17	24	0	93.64
15	24	0	93.64
16	22	0	94.15
18	26	0	93.12
14	20	0	94.67
13	18	0	95.19

6.3. Raylar

Genel olarak ray kusurları; ray mantarının aşınması, ray mantarında yanal aşınma, ray profilinin değişimi, hat genişliği ölçüm noktasında aşınma, ray konikliğinin değişimi, raylarda ondülasyon ve eşdeğer koniklik olarak sınıflandırılmaktadır. UIC 712 standardına göre ise rayda görülen kusurlar; hasarlı raylar, çatlak raylar ve kırık raylar olmak üzere üç ana bölümde incelenir (UIC-712, 2002). Bu çalışmada, UTY'deki ray kusurları eşik değerleri belirlenerek RAM analizleri yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda UTY'de ray mantarının yanal aşınması maksimum 18 mm olduğu

belirlenmiştir. UTY ray kusurları verileri esasında yapılan çalışmalarda, demiryolu BY uzmanları tarafından kolaylıkla anlaşılabilir üç eşik değeri tanımlanmış ve açıklamaları aşağıda yapılmıştır (UTY, 2018).

- Raylar kontrol altında tutulur (AL): Ray mantarının yanal aşınması veya eşdeğer koniklik ≥ 5 mm.
- Raylar değiştirilir (IL): Ray mantarının yanal aşınması veya eşdeğer koniklik ≥ 15 mm.
- Hat işletmeye kapatılır ve acilen raylar değiştirilir (IAL): Ray mantarının yanal aşınması veya eşdeğer koniklik ≥ 18 mm.

6.3.1. Rayların güvenilirlik analizleri

Demiryolu ölçüm aracı ve/veya elle kumanda edilen ölçüm cihazları ile toplanan veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde rayların güvenilirlik oranlarını belirlemek için en uygun dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonunun Johnson SB dağılımı olduğu tespit edilmiştir. Raylar için belirlenen Johnson SB olasılık yoğunluk fonksiyonun Şekil 6.6.'da, katsayıları ise Tablo 6.7.'de gösterilmiştir.

Johnson SB olasılık yoğunluk fonksiyonu matematiksel ifadeleri ve sırası aşağıda verilmiştir.

Johnson SB olasılık yoğunluk fonksiyonu (*pdf*) Denklem 6.7 ile verilmiştir.

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi z(1-z)}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right)^2\right) \quad (6.7)$$

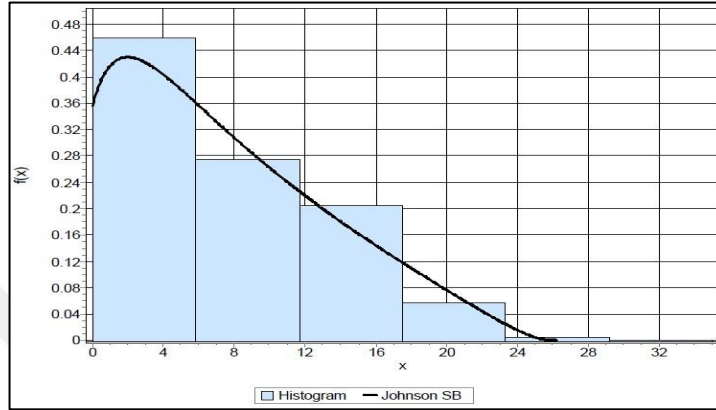
Burada, γ : sürekli şekil parametresi, δ : sürekli şekil parametresi ($\delta > 0$), λ : sürekli ölçek parametresi ($\lambda > 0$), ζ : sürekli konum parametresidir, x : bağımsız değişken

$x \zeta \leq x \leq \zeta + \lambda$ arasında değişir ve $z \equiv \frac{x-\zeta}{\lambda}$.

Johnson SB kümülatif yoğunluk fonksiyonu (*cdf*) Denklem 6.8 ile verilmiştir.

$$F(x) = \Phi\left(\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right) \quad (6.8)$$

Burada, Φ Laplace integralidir.



Şekil 6.6. Raylar için olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Tablo 6.7. Raylar için dağılım katsayıları

Bileşen	Katsayılar			
	γ	δ	λ	ζ
Raylar	0.76	0.86	28.0	-1.8

Bu çalışmada raylar için kümülatif yoğunluk fonksiyonunu güvenilirlik fonksiyonu olarak dikkate almak mümkündür. Elde edilen güvenilirlik fonksiyonu kullanılarak ve raylar için eşik değerler dikkate alınarak rayların güvenilirlik oranlarını hesaplanmış ve Tablo 6.8.'de verilmiştir. Rayların güvenilirlik oranları sınırları içinde değilse, raylara gerekli BY çalışmaları gerçekleştirilir.

Tablo 6.8. Rayların güvenilirlik oranları

Bileşen	Güvenilirlik (%)		
	AL	IL	IAL
Raylar	41	87	94

6.3.2. Rayların bulunabilirlik analizleri

Bulunabilirlik analiz değerlendirmesinde her bir bakım kesimlerinde rayların bozulmalarının kontrol, kusur belirleme, malzeme temin ve düzeltme süreleri dikkate

alınarak yıllık ve günlük birimleri cinsinde süreleri tespit edilmiştir (UTY, 2018). Tablo 6.9.'daki verilmiş olan bulunabilirlik oranları Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde hat bileşeni rayların bulunabilirlik oranları % 92.26 ile % 95.02 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.9. Rayların bulunabilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Kontrol (Gün/yıl)	Kusur belirleme süresi (Gün/yıl)	Malzeme temin süresi (Gün/yıl)	Düzeltilme süresi (Gün/yıl)	Bulunabilirlik %
19	20	4	2	4	92.26
17	18	2	2	2	93.75
15	17	1	1	2	94.51
16	17	2	1	2	94.25
18	19	4	2	3	92.75
14	17	1	1	1	94.77
13	16	1	1	1	95.02

6.3.3. Rayların sürdürülebilirlik analizleri

Sürdürülebilirlik analizlerinde her bir bakım kesiminde rayların bozulmalarının düzeltilmesiyle ilgili olarak UTY'nin yıllık BY sayıları belirlenmiş ve günde sıfır BY yapma olasılık değerleri hesaplanmıştır (UTY, 2018). Poisson dağılımı Denklem 2.6 kullanılarak Tablo 6.10.'da verilen sürdürülebilirlik oranları hesaplanmıştır. Hat bileşeni rayların sürdürülebilirlik oranları % 98.91 ile % 99.18 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.10. Rayların sürdürülebilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Yıllık BY sayıları	Görülebiyecek BY sayısı (Gün)	Sürdürülebilirlik %
19	4	0	98.91
17	4	0	98.91
15	3	0	99.18
16	3	0	99.18
18	4	0	98.91
14	3	0	99.18
13	4	0	98.91

6.4. Traversler

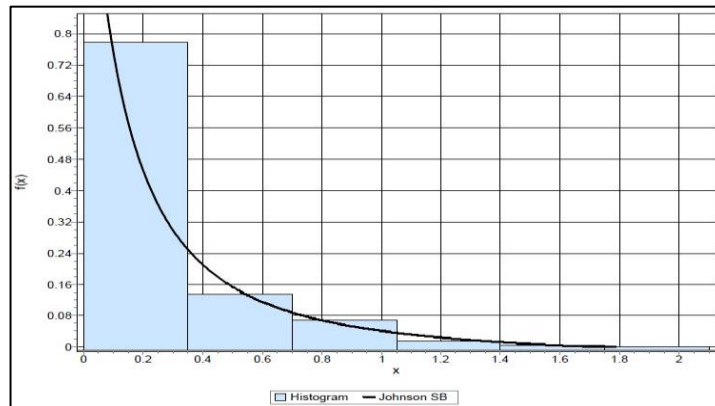
Genel olarak önerilmeli beton traversler için yüzey çatlakları ve kırıklıklar olmak üzere iki türlü kusur belirlemek mümkündür. Ray kusur kodlama sistemine benzer

şekilde travers hasarları da; hasarlı traversler, çatlak traversler ve kırık travers olmak üzere üç ana bölümde incelenir. Bu çalışmada, UTY'deki travers kusurları eşik değerleri belirlenerek RAM analizleri yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda UTY'de travers çatlaklarının eşik değerlerinin 0.05 mm altında, 0.2 mm ile 1.0 mm arasında ve 1.0 mm'den büyük olduğu tespit edilmiştir. UTY travers kusurları verileri esasında yapılan çalışmalarda, demiryolu BY uzmanları tarafından kolaylıkla anlaşılabilen üç eşik değer tanımlanmış ve açıklamaları aşağıda yapılmıştır (UTY, 2018).

- Traversler kontrol altında tutulur (AL): Travers çatlakları ≥ 0.05 mm.
- Traversler değiştirilir (IL): Traversin çatlakları ≥ 0.2 mm.
- Hat işletmeye kapatılır ve acilen traversler değiştirilir (IAL): Travers çatlakları ≥ 1.0 mm.

6.4.1. Traverslerin güvenilirlik analizleri

Demiryolu ölçüm aracı ve/veya elle kumanda edilen ölçüm cihazları ile toplanan veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde traverslerin güvenilirlik oranlarını belirlemek için en uygun dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonunun Johnson SB dağılımı olduğu tespit edilmiştir. Traversler için belirlenen Johnson SB olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 6.7.'de ve dağılım katsayıları Tablo 6.11.'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Traversler için olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Tablo 6.11. Traversler için dağılım katsayıları

Bileşen	Katsayılar			
	γ	δ	λ	ζ
Traversler	1.6	0.71	1.8	-0.04

Bu çalışmada traversler için kümülatif yoğunluk fonksiyonu, güvenilirlik fonksiyonu olarak dikkate almak mümkündür. Elde edilen güvenilirlik fonksiyonunu kullanılarak, traversler için eşik değerleri dikkate alınarak, traverslerin güvenilirlik oranlarını hesaplanmış ve Tablo 6.12.'de verilmiştir. Traverslerin güvenilirlik oranları eşik değerler sınırları içinde değilse, traverslere gerekli BY çalışmaları gerçekleştirilir.

Tablo 6.12. Traverslerin güvenilirlik oranları

Bileşen	Güvenilirlik (%)		
	AL	IL	IAL
Traversler	33	62	97

6.4.2. Traverslerin bulunabilirlik analizleri

Bulunabilirlik analiz değerlendirmesinde her bir bakım kesimlerinde travers bozulmalarının kontrol, kusur belirleme, malzeme temin ve düzeltme süreleri dikkate alınarak yıllık ve günlük birimleri cinsinde süreleri tespit edilmiştir (UTY, 2018). Tablo 6.13.'teki verilmiş olan bulunabilirlik oranları Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde hat bileşeni traverslerin bulunabilirlik oranları % 93.29 ile % 95.02 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.13. Traverslerin bulunabilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Kontrol (Gün/yıl)	Kusur belirleme süresi (Gün/yıl)	Malzeme temin süresi (Gün/yıl)	Düzeltilme süresi (Gün/yıl)	Bulunabilirlik %
19	22	2	1	1	93.29
17	20	2	1	1	93.77
15	18	1	1	1	94.52
16	19	1	1	1	94.28
18	21	2	1	1	93.53
14	17	1	1	1	94.77
13	16	1	1	1	95.02

6.4.3. Traverslerin sürdürülebilirlik analizleri

Sürdürülebilirlik analizlerinde her bir bakım kesiminde hat bileşeni traverslerin bozulmalarını düzeltilmesiyle ilgili olarak UTY'nin yıllık BY sayıları belirlenmiş ve günde sıfır BY yapma olasılık değerleri hesaplanmıştır (UTY, 2018). Poisson dağılımı Denklem 2.6 kullanılarak ve Tablo 6.14.'te verilen sürdürülebilirlik oranları hesaplanmıştır. Hat bileşeni traverslerin sürdürülebilirlik oranları % 98.91 ile % 99.18 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.14. Traverslerin sürdürülebilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Yıllık BY sayıları	Görülebilecek BY sayısı (Gün)	Sürdürülebilirlik %
19	4	0	98.91
17	3	0	99.18
15	3	0	99.18
16	3	0	99.18
18	4	0	98.91
14	3	0	99.18
13	3	0	99.18

6.5. Balast Tabakası

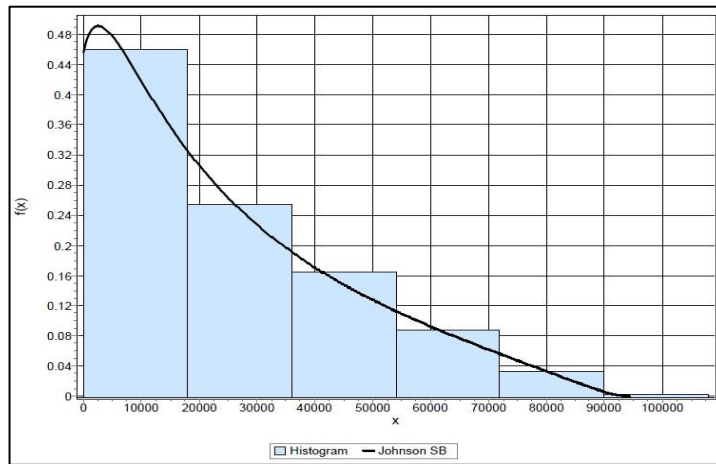
Balast tabakası; hat geometrisi, drenaj ve hat rijitliği gibi konularda önemli bir fonksiyona sahiptir. Hat yatağı balast ve alt balast olmak üzere genelde iki kısımda incelenir. Balast tabakasında yaşanan en önemli problem balast kirliliğidir. Balast kirliliği hattın zaman içinde bozulmasına sebep olur. Balast kirliliğine sebep olan pek çok etmen bulunmaktadır. Balastın kırılması, dışarıdan tozların gelmesi, travers aşınması, alt balasttan ve toprak gövdeden ince malzemelerin gelmesi balast kirliliğine sebep olabilmektedir. Balast tabakasının kirlenmesi balastın taşıma gücünün ve drenaj kapasitesinin azalmasına sebep olur. Aşırı derecede kirlenmiş balast tabakasında şok etkilerin ve gürültünün emilmesi gibi konularda sorunlar yaşanır. Bu sebeple balast tabakasının durumunun düzenli olarak kontrol edilmesi çok önemlidir. Avrupa Birliği Demiryolu Araştırma Enstitüsü'ne (ERRI) göre 22.4 mm elek altında kalan ince malzeme miktarı % 30'dan fazla ise balast temizliği yapılması, % 40'ın üzerine çıkması durumunda ise temizlik kaçınılmaz hale gelmektedir (ERRI D184, 1994). Bu çalışmada temiz ve kirli balast malzemenin kirlilik karakteristikleri ve elastisite

modülleri üzerine bir çalışma yapılmıştır. Yapılan istatistik analizlerde balast tabakası kirliliği ile elastisite modülü arasında yüksek bir korelasyonun olduğu belirlenmiştir. Temiz balastın, 10,000 kPa ve 13,800 kPa arasında değişen bir elastisite modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak balast tabakasının bozulmasıyla ilgili üç eşik değeri belirlenmiştir (UTY, 2018):

- Uyarı limiti (AL): $E \geq 13,800$ kPa.
- Müdahale limiti (IL): $E \geq 40,000$ kPa.
- Acil müdahale limiti (IAL): $E \geq 70,000$ kPa.

6.5.1. Balast tabakasının güvenilirlik analizleri

Balast malzemesinin laboratuvarlara toplanan elastisite modülü değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde balast tabakasının güvenilirlik oranlarını belirlemek için en uygun dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonunun Johnson SB dağılımı olduğu tespit edilmiştir. Balast tabakası için belirlenen Johnson SB olasılık yoğunluk fonksiyonun Şekil 6.8.'de ve katsayıları ise Tablo 6.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Balast tabakası için olasılık yoğunluk fonksiyonu.

Tablo 6.15. Balast tabakası için dağılım katsayıları

Bileşen	Katsayılar			
	γ	δ	λ	ζ
Balast tabakası	0.93	0.77	9.8×10^4	-3.8×10^3

Bu çalışmada balast tabakası için kümülatif yoğunluk fonksiyonunu güvenilirlik fonksiyonu olarak dikkate almak mümkündür. Elde edilen güvenilirlik fonksiyonları kullanılarak ve balast tabakası için eşik değerleri dikkate alınarak balast tabakasının güvenilirlik oranlarını hesaplanmış ve Tablo 6.16.'da verilmiştir. Balast tabakası güvenilirlik oranları eşik değerler sınırları içinde değilse, balast tabakasına gerekli BY çalışmaları gerçekleştirilir.

Tablo 6.16. Balast tabakasının güvenilirlik oranları

Bileşen	Güvenilirlik (%)		
	AL	IL	IAL
Balast tabakası	40	78	96

6.5.2. Balast tabakasının bulunabilirlik analizleri

Bulunabilirlik analiz değerlendirmesinde her bir bakım kesimlerinde balast tabakası bozulmalarının kontrol, kusur belirleme, malzeme temin ve düzeltme süreleri dikkate alınarak yıllık ve günlük birimleri cinsinde süreleri tespit edilmiştir (UTY, 2018). Tablo 6.17.'deki verilmiş olan bulunabilirlik oranları Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde hat bileşeni balast tabakasının bulunabilirlik oranları % 94.48 ile % 96.03 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.17. Balast tabakasının bulunabilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Kontrol (Gün/yıl)	Kusur belirleme süresi (Gün/yıl)	Malzeme temin süresi (Gün/yıl)	Düzeltilme süresi (Gün/yıl)	Bulunabilirlik %
19	14	3	2	2	94.48
17	13	2	2	2	94.99
15	12	1	1	2	95.76
16	13	2	2	2	94.99
18	14	3	2	2	94.48
14	12	1	1	1	96.03
13	12	1	1	1	96.03

6.5.3. Balast tabakasının sürdürülebilirlik analizleri

Sürdürülebilirlik analizlerinde her bir bakım kesiminde balast tabakası bozulmalarının düzeltilmesiyle ilgili olarak UTY'nin yıllık BY sayıları belirlenmiş ve günde sıfır BY yapma olasılık değerleri hesaplanmıştır (UTY, 2018). Poisson dağılımı Denklem 2.6 kullanılarak Tablo 6.18.'de verilen sürdürülebilirlik oranları hesaplanmıştır. Hat bileşeni balast tabakası sürdürülebilirlik oranlarının % 99.18 ile % 99.45 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.18. Balast tabakasının sürdürülebilirlik oranları

Kesim uzunluğu (Km)	Yıllık BY sayıları	Görülebiyecek BY sayısı (Gün)	Sürdürülebilirlik %
19	3	0	99.18
17	3	0	99.18
15	2	0	99.45
16	2	0	99.45
18	3	0	99.18
14	2	0	99.45
13	2	0	99.45

6.6. Özbekistan Devlet Demiryolları'nın Toplam RAM Analizleri

UTY'nin toplam güvenilirlik oranları Denklem 2.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Demiryolu hatlarında, hat geometrisi parametreleri ve hat bileşenleri (raylar, traversler ve balast tabakası) arasında seri bağlı sistem konfigürasyonu vardır. Seri bağlı sistemlerde, bileşenlerin her birisinin aynı anda çalışması zorunludur. Seri bağlı sistemi oluşturan bileşenlerin eşik değerleri IL ve IAL dikkate alınarak toplam güvenilirlik oranları Denklem 2.9 ile hesaplanmış ve Tablo 6.19.'da verilmiştir.

Tablo 6.19. UTY altyapısı için toplam güvenilirlik oranları

RAM bileşenleri	Altyapı bileşenleri								Toplam
	Hat genişliği	Burulma	Dever	Eksenden sapma	Nivelman	Raylar	Traversler	Balast tabakası	
Güvenilirlik (IL)	0.86	0.89	0.76	0.73	0.73	0.87	0.62	0.78	0.13
Güvenilirlik (IAL)	0.94	0.94	0.94	0.97	0.97	0.94	0.97	0.96	0.68

Benzer şekilde, UTY sistem altyapısını oluşturan bileşenlerin bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları Denklem 2.10. ve Denklem 2.11. kullanılarak hesaplanmıştır.

Her bir altyapı bileşenlerinin minimum bulunabilirlik, sürdürülebilirlik oranları belirlenmiş ve Tablo 6.20.'de verilmiştir.

Tablo 6.20. Her bir altyapı bileşenlerinin minimum bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları

RAM bileşenleri	Hat kesimleri						
	1	2	3	4	5	6	7
Bulunabilirlik	0.9226	0.9375	0.9451	0.9425	0.9275	0.9477	0.9502
Sürdürülebilirlik	0.9312	0.9364	0.9364	0.9415	0.9312	0.9467	0.9519

Yedi alt kesim de seri bağlı sistem konfigürasyonuna sahiptir çünkü tüm hat kesiminin işletmeye açık olması için her bir bakım kesiminin bulunabilir ve sürdürülebilir olması gerekmektedir. Seri bağlı sistemini oluşturan bileşenlerin toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranlarının eşik değerler IL ve IAL dikkate alınarak Denklem 2.10 ve Denklem 2.11 ile hesaplanmış ve Tablo 6.21.'de verilmiştir.

Tablo 6.21. UTY altyapısı için toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları

RAM bileşenleri	Analiz kesimleri							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Bulunabilirlik	0.9226	0.9375	0.9451	0.9425	0.9275	0.9477	0.9502	0.64
Sürdürülebilirlik	0.9312	0.9364	0.9364	0.9415	0.9312	0.9467	0.9519	0.65

Yapılan RAM analizlerinin özeti Tablo 6.22.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.22. Yapılan RAM analizlerinin özeti

Aşamalar	İşlem Adımları
1. Aşama	Adımlar: 1. Demiryolu altyapı bileşenlerinin ölçüm verileri ölçüm araçlarından temin edilir. 2. Altyapı bileşenlerinin eşik değerleri belirlenir. Örnek (Eksenden Sapma) $AL_{maks} = 13$ mm, $IL_{maks} = 14$ mm ve $IAL_{maks} = 20$ mm, 3. Ölçüm değerleri IAL_{maks} değerinden büyükse demiryolu hattı işletmeye kapatılır, hızlar düşürülür ve üçüncü aşamaya geçilerek acil olarak demiryolu hattına gerekli BY çalışmaları yapılır. 4. Ölçüm değerleri $0-IAL_{maks}$ değerleri arasındaysa ikinci aşamaya geçilerek güvenilirlik analizleri yapılır.
2. Aşama	Adımlar: 1. Demiryolu hattı analiz ve bakım kesimlerine bölünür. Örnek: Analiz kesim uzunluğu 50 m, bakım kesim uzunlukları 13- 19 km arasında toplam yedi bakım kesimi. 2. Her bir altyapı bileşeninin, $0-IAL_{maks}$ arasında olan ölçüm değerleri güvenilirlik analizleri için toparlanır. 3. Uygun dağılım fonksiyonlarının belirlenmesi için dört aşamalı teknik kullanılır (Şekil 6.1.). 4. Uygun dağılım fonksiyonu elde edilir (Bu çalışmada tüm bakım kesimleri için aynı dağılım fonksiyonları elde edilmiştir). Örnek (Eksenden Sapma): En uygun dağılım fonksiyonu Dagum (3P) dağılım fonksiyonu olarak tespit edilmiştir. 5. Elde edilen dağılım fonksiyonunun kümülatif yoğunluk fonksiyonu elde edilir. 6. Elde edilen kümülatif yoğunluk fonksiyonu, verilere bağlı olarak güvenilirlik fonksiyonu olarak kabul edilebilir (Bu çalışmada kümülatif yoğunluk fonksiyonu güvenilirlik fonksiyonu olarak kabul edilmiştir.) 7. Her bir altyapı bileşeninin eşik değerleri elde edilen güvenilirlik fonksiyonlarında kullanılarak güvenilirlik değerleri hesaplanır. Örnek (Eksenden Sapma): Güvenilirlik (AL): % 65, Güvenilirlik (IL): % 73 ve Güvenilirlik (IAL): % 97. 8. Altyapı bileşenlerinin bağlantı durumları (Seri, Paralel ve Seri-Paralel) dikkate alınarak toplam güvenilirlik değeri hesaplanır (Bu çalışmada seri bağlantı durumu dikkate alınmıştır). Örnek (Altyapı Bileşenleri): Güvenilirlik (IL): % 13 ve Güvenilirlik (IAL): % 68. 9. Her bir altyapı bileşenine ait güvenilirlik değerleri ve toplam güvenilirlik değeri değerlendirilmek üzere üçüncü aşamaya geçilir.
3. Aşama	Adımlar: 1. Her bir altyapı bileşenine ait güvenilirlik değerleri ve toplam güvenilirlik değeri dikkate alınarak demiryolu hattına gerekli BY çalışmaları yapılır; BY sayıları, BY teknikleri ve altyapı bileşenlerinin eşik değerleri gözden geçirilir. Örnek (Eksenden Sapma): Güvenilirlik (AL): % 65 (Uygun/Uygun Değil), Güvenilirlik (IL): % 73 (Uygun/Uygun Değil) ve Güvenilirlik (IAL): % 97 (Uygun/Uygun Değil). Örnek (Altyapı Bileşenleri): Güvenilirlik (IL): % 13 (Uygun/Uygun Değil) ve Güvenilirlik (IAL): % 68 (Uygun/Uygun Değil). 2. Uygun olmayan güvenilirlik değerleri iyileştirilir. Örnek: Eşik değerler değiştirilir ve/veya BY sayıları artırılır ve/veya BY teknikleri iyileştirilir. 3. Yapılan iyileştirme çalışmalarının değerlendirilmesi için dördüncü aşamaya geçilir.
4. Aşama	Adımlar: 1. İyileştirme çalışmaları sürecinde yapılan BY faaliyetlerinin değerlendirilmesi için her bir altyapı bileşeninin ve sistemin bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranlarının hesaplanması yapılır. 2. Yapılacak iyileştirme çalışmaları; Kontrol, Kusur Belirleme Süresi, Malzeme Temin Süresi, Düzeltme Süresi ve yıllık BY sayısı olmak üzere beş ana başlıkta incelenir. Örnek (Birinci bakım kesimi hat geometrisi): Kontrol süresi: 15 gün/yıl, Kusur belirleme süresi: 3 gün/yıl, Malzeme temin süresi: 2 gün/yıl, Düzeltme süresi: 3 gün/yıl ve BY sayısı: 26 BY/yıl. 3. Her bir altyapı bileşeninin bulunabilirlik değerleri hesaplanır. Örnek (Hat geometrisi): Bakım kesimlerinde % 93.98 ile % 96.03 arasında değişen bulunabilirlik değerleri. 4. Her bir altyapı bileşeninin sürdürülebilirlik değerleri hesaplanır. Örnek (Hat geometrisi): Bakım kesimlerinde % 93.12 ile % 95.19 arasında değişen sürdürülebilirlik değerleri. 5. Minimum bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları alınarak tüm hat kesimini temsil eden toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları hesaplanır. Örnek: Toplam Bulunabilirlik: % 64 ve Toplam Sürdürülebilirlik: % 65. 6. Toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik değerlerinin uygunluk değerlendirilmesi yapılır. Örnek: Toplam Bulunabilirlik: % 64 (Uygun/Uygun Değil) ve Toplam Sürdürülebilirlik: % 65 (Uygun/Uygun Değil). 7. Uygun olmayan bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik değerleri iyileştirilir. Örnek: Kontrol, kusur belirleme süresi, malzeme temin süresi, düzeltme süresi ve yıllık BY sayıları gözden geçirilir ve iyileştirmeler yapılır. 8. Yapılan iyileştirme çalışmalarının değerlendirilmesi için üçüncü ve dördüncü aşamalarda analizler yapılır. Örnek: İyileştirme yapılan kontrol, kusur belirleme süresi, malzeme temin süresi, düzeltme süresi ve yıllık BY sayıları (Uygun/Uygun Değil).

Bir demiryolu hat bileşeni olarak raylar için yapılan RAM analizi örnek bir uygulama olarak aşağıda sunulmuştur.

1. Aşama

Demiryolu BY uzmanları ile birlikte gerçekleştirilen çalışmada rayların aşınmasıyla ilgili eşik değerler; $AL_{maks}=5$ mm, $IL_{maks}=15$ mm ve $IAL_{maks}=18$ mm olarak belirlenmiştir. Demiryolu ölçüm araçları ve/veya elle kumanda edilen ölçüm cihazları ile toplanan ray verileri analiz edilmiştir. Ölçüm değerleri, IAL_{maks} değerinden büyükse demiryolu hattı işletmeye kapatılır, hızlar düşürülür ve geliştirilen modelde üçüncü aşamaya geçilerek acil olarak raylara gerekli BY çalışmaları yapılır. Ölçüm değerleri $0-IAL_{maks}$ değerleri arasındaysa ikinci aşamaya geçilerek rayların güvenilirlik analizleri yapılır.

2. Aşama

Analiz ve bakım kesimleri ayrıntısında toplanan ray ölçüm değerlerinin istatistik analizleri yapılır. Bu çalışmada, 0 ve IAL_{maks} değerleri arasında bulunan ray aşınma verileri üzerine yapılan analizlerde tüm hat kesimleri için ray kusurlarının Johnson SB dağılımına uygun olduğu tespit edilmiştir. Johnson SB dağılımına ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu Denklem 6.9 ile ifade edilmiş ve katsayıları Tablo 6.23.'te verilmiştir.

$$F(x) = \Phi\left(\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right) \quad (6.9)$$

Tablo 6.23. Raylar için dağılım katsayıları (Örnek uygulama)

Bileşen	Katsayılar			
	γ	δ	λ	ζ
Raylar	0.76	0.86	28.0	-1.8

Johnson SB dağılımına ait kümülatif yoğunluk fonksiyonu güvenilirlik fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Rayların aşınmasıyla ilgili kabul edilen eşik değerler; $AL_{maks}=5$ mm, $IL_{maks}=15$ mm ve $IAL_{maks}=18$ mm olarak alınarak her bir eşik değer

için rayların güvenilirlik oranları hesaplanmıştır. $AL_{maks}=5$ mm için yapılan örnek Denklem 6.10 ve Denklem 6.11 ile hesaplanmış ve rayların güvenilirlik oranları ise her bir eşik değeri için Tablo 6.24.'te verilmiştir.

$$z \equiv \frac{5 - (-1.8)}{28} = 0.243 \quad (6.10)$$

$$F(5) = \Phi \left(0.76 + 0.86 \times \ln \left(\frac{0.243}{1 - 0.243} \right) \right) = 41 \quad (6.11)$$

Tablo 6.24. Rayların güvenilirlik oranları (Örnek uygulama)

Bileşen	Güvenilirlik (%)		
	AL	IL	IAL
Raylar	41	87	94

Diğer hat bileşenlerinin güvenilirlik oranları raylara benzer şekilde hesaplanmıştır. Tüm hat bileşenlerinin güvenilirlik oranları hesaplandıktan sonra toplam güvenilirlik oranı hesaplanmıştır. Toplam güvenilirlik oranı Denklem 6.12 ile hesaplanmış ve Tablo 6.25.'de verilmiştir.

$$R = 0.94 \times 0.94 \times 0.94 \times 0.97 \times 0.97 \times 0.94 \times 0.97 \times 0.96 = 0.68 \quad (6.12)$$

Tablo 6.25. UTY altyapısı için toplam güvenilirlik oranları (Örnek uygulama)

RAM bileşenleri	Hat genişliği	Altyapı bileşenleri							Toplam
		Burulma	Dever	Eksenden sapma	Nivelman	Raylar	Traversler	Balast tabakası	
Güvenilirlik (IAL)	0.94	0.94	0.94	0.97	0.97	0.94	0.97	0.96	0.68

Rayların ve demiryolu hattının toplam güvenilirlik oranları istenen ya da kabul edilen sınırlar içinde değilse, geliştirilen modelde üçüncü aşamaya geçilir; raylara ve demiryolu hattına gerekli BY çalışmaları yapılır. Güvenilirlik oranları kabul edilen sınırlar içinde ise yine üçüncü ve ardından dördüncü aşamaya geçilerek bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri yapılır.

3. Aşama

Bu aşamada, rayların ve diğer altyapı bileşenlerinin güvenilirlik oranları değerlendirilerek demiryolu hattına gerekli BY çalışmalarının yapılıp yapılmayacağına karar verilir. Değerlendirme çalışmalarında; BY sayıları, BY teknikleri ve altyapı bileşenlerinin eşik değerleri gözden geçirilir. Uygunluk değerlendirilmesinin yapılmasıyla ilgili örnek bir çalışma Tablo 6.26.'da verilmiştir. Güvenilirlik değerlerinin uygun olması durumunda dördüncü aşamaya geçilerek bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri yapılır. Güvenilirlik değerlerinin uygun olmaması durumunda gerekli BY çalışmaları yapılır ve yapılan BY çalışmalarının değerlendirilmesi için yine dördüncü aşamaya geçilerek bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilir.

Tablo 6.26. Güvenilirlik oranlarının değerlendirilmesi (Örnek uygulama)

Hat bileşenleri	Eşik değerler		
	AL (%)	IL (%)	IAL (%)
Raylar	41	87	94
	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Traversler	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Balast tabakası	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Hat genişliği	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Burulma	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Dever	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Eksenden sapma	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
Nivelman	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)
	0.5	13	68
Toplam	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)	(Uygun/Uygun değil)

4. Aşama

Rayların bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizleri için her bir bakım kesiminde rayların; kontrol, kusur belirleme, malzeme temini, düzeltme süreleri ve yıllık BY sayıları belirlenir. Birinci kesimdeki rayların bulunabilirlik oranları Denklem 6.13, Denklem 6.14, Denklem 6.15, Denklem 6.16 ve Denklem 6.17 ile hesaplanmış ve Tablo 6.27.'de verilmiştir.

$$A_1^1 = \frac{365}{365+20} = 0.9480 \quad (6.13)$$

$$A_2^1 = \frac{365}{365+4} = 0.9891 \quad (6.14)$$

$$A_3^1 = \frac{365}{365+2} = 0.9945 \quad (6.15)$$

$$A_4^1 = \frac{365}{365+4} = 0.9891 \quad (6.16)$$

$$A_o^1 = 0.9480 \times 0.9891 \times 0.9945 \times 0.9891 = 0.9226 \quad (6.17)$$

Tablo 6.27. Rayların bulunabilirlik oranları (Örnek uygulama)

Kesim uzunluğu (Km)	Kontrol (Gün/yıl)	Kusur belirleme süresi (Gün/yıl)	Malzeme temin süresi (Gün/yıl)	Düzeltilme süresi (Gün/yıl)	Bulunabilirlik %
19	20	4	2	4	92.26

Birinci kesimdeki rayların sürdürülebilirlik oranları Denklem 6.18 ve Denklem 6.19 ile hesaplanmış ve Tablo 6.28.'de verilmiştir.

$$\lambda = \frac{4}{365} = 0.011 \quad (6.18)$$

$$P(0) = \frac{100 \times (0.011)^0 \times \text{EXP}(-0.011)}{0!} = 0.9891 \quad (6.19)$$

Tablo 6.28. Rayların sürdürülebilirlik oranları (Örnek uygulama)

Kesim uzunluğu (Km)	Yıllık BY sayıları	Görülebiyecek BY sayısı (Gün)	Sürdürülebilirlik %
19	4	0	98.91

Benzer şekilde diğer altyapı bileşenlerinin her birisi için bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları hesaplanır. Demiryolu hattı seri bağlı bir sistem olduğu için her bir hat kesiminin bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranlarının minimum değerleri alınarak toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları hesaplanır. Güvenilirlik analizlerinde olduğu gibi bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranlarının uygun olmaması durumunda üçüncü aşamaya geçilerek bakım ve yenileme çalışmalarının değerlendirilmesi yapılır. BY çalışmalarında gerekli iyileştirmeler yapıldıktan sonra bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları yeniden hesaplanır (Tablo 6.29.). Kabul

edilebilir oranlar elde edildiğinde analizler sonlandırılır (U: Uygun, UD: Uygun Değil).

Tablo 6.29. UTY altyapısı için toplam bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik oranları (Örnek uygulama)

RAM bileşenleri	Analiz kesimleri							Toplam
	1	2	3	4	5	6	7	
Bulunabilirlik	0.9226 (U/UD)	0.9375 (U/UD)	0.9451 (U/UD)	0.9425 (U/UD)	0.9275 (U/UD)	0.9477 (U/UD)	0.9502 (U/UD)	0.64 (U/UD)
Sürdürülebilirlik	0.9312 (U/UD)	0.9364 (U/UD)	0.9364 (U/UD)	0.9415 (U/UD)	0.9312 (U/UD)	0.9467 (U/UD)	0.9519 (U/UD)	0.65 (U/UD)

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özbekistan demiryolları özellikle planlı ve düzeltici BY seçeneklerini tercih etmektedir. Demiryolu hatlarında her yıl düzenli olarak balast eleme, ray taşıma ve buraj çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaların yanında, hat geometrisi ölçüm sonuçları, tren ivmelenmeleri, laboratuvar testleri ve görsel inceleme sonuçları esasında demiryolu hatlarına düzeltici BY çalışmaları yapılmaktadır. Yenileme çalışmaları, hat bileşenleri ömrünü tamamen tükettiği zaman gerçekleştirilmektedir. Özbekistan demiryollarının ana amacı hat bileşenlerinin eşik değerlerde kalmasını sağlamak ve kazaları önlemektir. Bu çalışmada demiryolu altyapı yönetimi için RAM analizlerini içeren dört aşamalı bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde demiryolu altyapı parametreleri her bir aşamada değerlendirilmekte ve BY çalışmalarının performans değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Geliştirilen modelin uygulaması, Özbekistanın Taşkent ve Sirderya ana istasyonları arasında bulunan yüksek hızlı demiryolu hattının BY çalışmalarının performans değerlendirmesine yapılmıştır. Yapılan uygulama çalışmasında demiryolu altyapı yönetimi için önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Demiryolu altyapı bileşenleri, hat geometrisi ve hat bileşenleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Her bir altyapı bileşeninin ve sistemin yani tüm hat kesiminin değerlendirilmesi için demiryollarında yapılan ölçümlerden elde edilen veriler kullanılmıştır. Her bir altyapı bileşeninin değerlendirilmesi üç eşik değer dikkate alınmıştır. Altyapı bileşenlerinin ölçüm değerlerinin maksimum eşik değerden (IAL_{maks}) büyük olması durumunda demiryolu hattı işletmeye kapatılmalı ya da hızlar düşürülmeli ve acil olarak demiryolu hattına gerekli BY çalışmaları yapılmalıdır.

Hat geometrisi ve hat bileşenlerinin güvenilirlik analizlerinde, demiryolu hattında yapılan ölçümler kullanılarak her bir bileşenin olasılık yoğunluk fonksiyonları elde

edilmiştir. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının tespit edilmesinde $0-IAL_{maks}$ arasındaki değerler kullanılmıştır. Elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak ve her bileşenin eşik değerleri dikkate alınarak güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Müdahale (IL) ve Acil Müdahale (IAL) eşik değerleri için yapılan güvenilirlik analizlerinde münferit olarak altyapı bileşenlerinin güvenilirlik düzeyleri % 62 ile % 89 arasında değişiklik gösterirken, sistemin toplam güvenilirliği IL ve IAL eşik değerleri için % 13 ile % 68 arasında olduğu hesaplanmıştır. Bu analizin anlamı, altyapı bileşenlerinin herhangi bir parametresinde bir problem olduğu zaman demiryolu hattında gerçekleşen işletmeye müdahale edilmesi gerekir. Geliştirilen modelin aşamalarının Şekil 6.2.'de gösterildiği gibi güvenilirlik düzeylerini istenen değerlere getirmek için demiryolu organizasyonlarının eşik değerlerinde bir güncelleme yapmaları ya da demiryolu BY çalışmalarında yeni stratejiler geliştirmek durumundadırlar. Yapılacak bu güncelleme ve yeniliklerde mutlak suretle demiryolu işletmesinin özellikleri ve hızlar dikkate alınmalıdır. Güvenilirlik analizlerinin istenen düzeylerde olmaması durumunda hatta BY çalışması yapılması gerekmektedir. BY çalışmaları demiryolu hattı işletmesine bir müdahale demektir. Bu sebeple demiryolu hattının bulunabilirlik ve sürdürülebilirlik analizlerinin yapılması ve gereken iyileştirmelerin yapılması gerekir.

Taşkent ve Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattının bulunabilirlik analizlerinde hattın ölçümü, kusur belirleme, malzeme temini ve düzeltme periyotları her bir BY çalışması için yılda kaç gün olacağı tespit edilmiştir. Bulunabilirlik analiz formülleri kullanılarak her bir BY çalışmasından dolayı her bir hat bakım kesiminin bulunabilirlik oranları hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde hat bakım kesimlerinin münferit bulunabilirlik düzeyleri % 92 ile % 95 arasında hesaplanırken tüm hat kesiminin bulunabilirlik düzeyi % 64 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı demiryolu hattında yapılan ölçüm, kusur saptama, malzeme temini ve düzeltme sürelerinde bir iyileştirme yapılması ve/veya hat bakım kesimlerinin uzatılarak belirtilen sürelerin azaltılması gerekmektedir. Geliştirilen modelin gösterildiği Şekil 6.2. incelendiğinde demiryolu organizasyonları hattın veri toplama, değerlendirme, lojistik ve BY faaliyetlerinde iyileştirmeler yaparak demiryolu hatlarının bulunabilirlik düzeyini artırabilirler.

Taşkent ve Sirderya yüksek hızlı demiryolu hattının sürdürülebilirlik analizlerinde, her bir hat bakım kesimine yılda yapılan BY çalışmalarının sayısı gün olarak tespit edilmiştir. Sürdürülebilirlik analizi formülleri kullanılarak her bir hat kesiminin sürdürülebilirlik oranları tespit edilmiştir. Münferit olarak hat bakım kesimlerinin sürdürülebilirlik oranları % 93 ile % 95 arasında hesaplanırken hattın toplam sürdürülebilirlik oranı % 65 olarak hesaplanmıştır. Sürdürülebilirlik oranları BY çalışmaları ile demiryolu hattına yapılan müdahale sayısına bağlıdır. Geliştirilen modelin gösterildiği Şekil 6.2. incelendiğinde, demiryolu organizasyonları yıllık BY çalışmalarını yıl bazında yakından takip edebilir ve bakım, yenileme ya da her ikisinin yapılmasına ya da hattın tamamen yenilenmesine karar vererek sürdürülebilirlik oranlarını artırabilirler.

Sonuç olarak demiryolu organizasyonları RAM parametrelerini kullanarak ve RAM analizleri yaparak demiryolu altyapı yönetiminde kullanabilirler. Yapılan RAM analizleri demiryolu hatlarına yapılacak planlı, duruma dayalı ve önleyici bakım çalışmalarına önemli katkılar sağlayabilir. Ayrıca demiryolu organizasyonları RAM analiz sonuçlarını kullanarak her bir hat bileşeninin eşik değerleri, ölçümleri ve değerlendirme teknikleri, BY çeşitleri, BY teknolojileri ve malzeme tedarik süreleri gibi konularında iyileştirmeler yapabilirler.

KAYNAKLAR

- Aguirre, F., Sallak, M., Schon, W., Belmonte, F. 2013. Application of evidential networks in quantitative analysis of railway accidents. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part-O Journal of Risk and Reliability, 227(4), 368-384.
- Ambika, P. P. 2009. Maintenance Decision Support Models for Railway Infrastructure using RAMS & LCC Analyses. Lulea University of Technology, Division of Operating and Maintenance Engineering, Doctoral thesis, Lulea, Sweden.
- Andrade, A. R., Teixeira, P. F. 2013. Statistical modelling of railway track geometry degradation using hierarchical Bayesian models. Reliability Engineering and System Safety, 142, 169-183.
- Andrade, A. R., Teixeira, P. F. 2016. Exploring Different Alert Limit Strategies in the Maintenance of Railway Track Geometry. Journal of Transportation Engineering, 142(9), 04016037.
- Arteks, <http://www.arteks-metall.ru.>, Erişim Tarihi: 14.12.2018.
- Baker, C., Cheli, F., Orellano, A., Paradot, N., Proppe, C., Rocchi, D. 2009. Cross-wind effects on road and rail vehicles. Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 47(8), 983-1022.
- British Standards Institution (BSI). 1999. Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Basic requirements and generic process. BS EN 50126-1, London, U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2002a. Concrete sleepers and bars for use on railway tracks Part 1: General requirements. BS EN 13230-1, London, U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2002b. Concrete sleepers and bars for use on railway tracks Part 1: Sleepers monoblock prestressed. BS EN 13230-2, London, U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2008a. Railway applications. Track. Track geometry quality. Characterisation of track geometry. BS EN 13848, London, U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2008b. Railway applications. Track. Track geometry quality. Characterisation of track geometry. BS EN 13848-1, London, U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2008c. Railway applications. Track. Track geometry quality-Part 2: Measuring systems-Track recording vehicles. BS EN 13848-2, London U.K.

- British Standards Institution (BSI). 2008d. Railway Applications-Track-Track geometry quality-Part 5: Geometric quality levels-Plain line, switches and crossings. BS EN 13848-5, London U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2016a. Railway applications. Track. Safety protection on the track during work. Railway risks and common principles for protection of fixed and mobile work sites. BS EN 16704-1, London U.K.
- British Standards Institution (BSI). 2016b. Railway applications. Track. Safety protection on the track during work-Part 2-1: Common solutions and technologies. Technical requirements for Track Warning Systems (TWS). BS EN 16704-2-1, London U.K.
- Caetano, L. F., Teixeira, P. F. 2013. Availability Approach to Optimizing Railway Track Renewal Operation, *Journal of Transportation Engineering*, 139(9), 941-948.
- Cardenas-Gallo, I., Sarmiento, C. A., Morales, G. A., Bolivar, M. A., Akhavan-Tabatabaei, R. 2017. An ensemble classifier to predict track geometry degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 161, 53-60.
- Cedergren, A. 2013. Implementing recommendations from accident investigations: A case study of inter-organizational challenges. *Accident Analysis and Prevention*, 53, 133-141.
- Esveld, C. 2001. *Modern Railway Track*, 2nd edition, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands.
- European Rail Research Institute (ERRI). 1994. Unified Assessment Criteria for Ballast Quality and Methods for Assessing the Ballast Condition in the Track, Determining the Criteria for Ballast Durability using Triaxial Tests, Specialist Committee D 187, Utrecht, The Netherlands.
- Fiorillo, G., Ghons, M. 2018. MPI Parallel Monte Carlo Framework for the Reliability Analysis of Highway Bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(2), 04017087.
- Guler, H., Evren, G., Jovanovic, S. 2004. Application of Geographic Information Systems for Railway Track Maintenance and Renewal Management. 10th World Conference on Transport Research, Istanbul, Turkey.
- Guler, H. 2005. Demiryolu hat geometrisi bozulmasının bilgi sistemler destekli modellenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalı, Doktora Tezi. İstanbul, Türkiye.
- Guler, H., Jovanovic, S., Evren, G. 2011. Modelling railway track geometry deterioration. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 164(2), 65-75.
- Guler, H. 2013. A Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(3), 292-306.
- Guler, H. 2014. Demiryolu Mühendisliği Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya İMO Yayınları, Sakarya, Türkiye.

- Guler, H. 2015. Güvenilirlik analizleri. Sunum notları, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.
- Guler, H. 2017. Demiryollarında Emniyet. Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 496(4), 22-30.
- Hidirov, S., Guler, H. 2017. Demiryolu Altyapısında Güvenilirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS). 5. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Bakü, Azerbaycan.
- Infotrans, <http://www.infotrans-logistic.ru.>, Erişim Tarihi:18.10.2018.
- International Electrotechnical Commission (IEC). 1998. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety Related systems. IEC 61508, Geneva, Switzerland.
- International Union of Railways (UIC). 2002. UIC 712: Rail defects. 4th Ed., UIC, Paris, France.
- Interstate Council for Standardization (ICS). 1982. Through hardening in oil of rails R50, R65 and R75 types, for wide-gauge railways. Specifications, GOST 18267-82, Moscow, Russia.
- Interstate Council for Standardization (ICS). 1988. Prestressed reinforced concrete sleepers for 1520 mm gauge railways. Specifications, GOST 10629-88, Moscow, Russia.
- Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ICS). 2000. Railway rails. General specifications, GOST R 51685-2000, Moscow, Russia.
- Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification (ICS). 2013. Dependability in railway mechanics. General concepts. Terms and definitions, Standartinform, GOST 32192, Moscow, Russia.
- Ishikawa, K., Loftus J. H. 1990. Introduction to quality control. 3A Corporation, Tokyo, Japan.
- Japan International Cooperation Agency. 2013. Data Collection Survey on Railway Electrification in the Republic of Uzbekistan. Final Report, Japan Transportation Consultants, JICA, 1-209.
- Johan, B. 2002. Railway safety. KTH, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure and Planning, Doctoral thesis, Stockholm, Sweden.
- Jorge, P., Francisco, G., Jesus, G., Juan, A., Ignacio, D. 2012. Application of risk, cost–benefit and acceptability analyses to identify the most appropriate geosynthetic solution to mitigate sinkhole damage on roads. Engineering Geology, 145-146, 65-77.
- Macchi, M., Garetti, M., Centrone, D., Fumagalli, L., Pavirani, G. P. 2012. Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis. Reliability Engineering and System Safety, 104, 71-83.
- Min, A., Yao, C., Chris J. B. 2011. A fuzzy reasoning and fuzzy-analytical hierarchy process based approach to the process of railway risk information: A railway risk management system. Information Sciences, 181(18), 3946-3966.

- Nurmuxamedov, S. I. 2018. Yuqori tezlikdagi Afrosiyob elektropoyezdi xavfsiz harakatlanishini tadbqiq qilish va tadbirlar ishlab chiqish. Elektrotexnik komplekslar va tizimlar yo'nalishi, Toshkent Temir Yo'l Muxandislari Instituti, Toshkent, O'zbekiston.
- O'zbekiston Geografiya Portali, <http://www.geografiya.uz>., Erişim Tarihi: 05.12.2018.
- O'zbekiston Davlat Statistika Qo'mitasi, [www/stat.uz](http://www.stat.uz)., Erişim Tarihi: 16.10.2018.
- Omorov, T. 2012. Türkistan'daki Özbek Hanlığının Kısaca Tarihi ve Özbek Boyları. TÜBAV Bilim Dergisi, 5(2), 7-18.
- Özbekistan Devlet Demiryolları, <http://www.uzrailway.uz>., Erişim Tarihi: 28.12.2018.
- Peralta, D., Bergmeir, C., Krone, M., Galende, M., Menendez, M., Sainz-Palmero, G. I., Bertrans, C. M., Klawonn, F., Betinez, J. M. 2018. Multiobjective Optimization for Railway Maintenance Plans. Journal of Computing in Civil Engineering, 32(3), 04018014.
- Pratico, F. G., Giunta, M. 2018. Proposal of a Key Performance indicator for railway track based on LCC and RAMS analyses. Journal of Construction Engineering and Management, 144(2), 04017104.
- Qiu, S., Sallak, M. Schon, W., Cherfi-Boulanger, Z. 2014. Availability assessment of railway signalling systems with uncertainty analysis using Statecharts. Simulation Modelling Practice and Theory, 47, 1-18.
- Rasulov, A. F., Ovchinnikov, A. N., Kuznesov, I. I. 2016. Temir yo'l izi. Toshkent Temir Yo'l Muxandislari Instituti, Toshkent, O'zbekiston.
- Rhayma, N., Bressollette, P. H., Breul, P., Fogli, M., Saussine, G. 2011. A probabilistic approach for estimating the behavior of railway tracks. Engineering Structures, 33(7), 2120-2133.
- Rhayma, N., Bressollette, P. H., Breul, P., Fogli, M., Saussine, G. 2013. Reliability analysis of maintenance operations for railway tracks. Reliability Engineering and System Safety, 114(1), 12-25.
- Russian Railways, <http://www.rzd.ru>., Erişim Tarihi: 23.11.2018.
- Soleimanmeigouni, I., Xiao, X., Ahmadi, A., Xie, M., Nissen, A. Kumar, U. 2018. Modelling the evolution of ballasted railway track geometry by a two-level piecewise model. Structure and Infrastructure Engineering, 14(1), 33-45.
- Transway, <https://transway-ug.ru>., Erişim Tarihi: 14.12.2018.
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), <http://www.tcdd.com.tr>., Erişim Tarihi: 28.12.2018.
- Yakubu, M. J. 2015. Reliability improvement of railway infrastructure. Stellenbosch University, Faculty of Engineering, Master thesis, Stellenbosch, South Africa.
- Zhang, D., Hu, H., Roberts, C. 2018. Rail maintenance analysis using Petri nets. Structure and Infrastructure Engineering, 13(6), 783-793.

ÖZGEÇMİŞ

Shuhratjon HIDIROV; 1980 yılında Özbekistan Cumhuriyeti, Nemengan şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Nemengan'da tamamladı. Nemengan Mühendislik-Ekonomi Enstitüsü Lisesi'nden 1998 yılında mezun oldu. Nemengan Mühendislik-Pedagoji Enstitüsü, Ulaştırma Fakültesi, Ulaşım Araçları Bakımı ve Tamiri Bölümü'nde 1998 yılında başladığı Lisans eğitimini 2002 yılında tamamladı. Nemengan Mühendislik Pedagoji Enstitüsü Elektik-Elektronik Fakültesi'nde 2002-2003 yılları arasında Mühendis olarak çalıştı. Nemengan Mühendislik-Pedagoji Enstitüsü, Ulaştırma Fakültesi, Ulaşım Araçları Bakımı ve Tamiri Bölümü'nde 2003 yılında başladığı Yüksek Lisans eğitimini 2005 yılında tamamladı. Nemengan Mühendislik-Pedagoji Enstitüsü Ulaştırma Fakültesi Ulaşım Araçları Bakımı ve Tamiri Bölümü'nde 2005-2012 yılları arasında öğretim görevlisi olarak çalıştı. Çin Halk Cumhuriyeti, Southwest Jiaotong Üniversitesi, Ulaştırma Fakültesi, Demiryolu ve Yol Mühendisliği Bölümü'nde ulaştırma uzmanlık alanı üzerine 2009-2010 yılları arasında sertifikalı eğitim kurslarına katıldı. Türkiye Bursları sınavını kazanarak; Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Ana Bilim Dalı'nda 2012 yılında Doktora eğitimine başladı. Almanya'nın Karlsruhe şehrinde Ulaştırma Mühendisliği uzmanlık alanı üzerine 2014 yılında sertifikalı eğitimlere katıldı. Danışman öğretim üyesi Doç. Dr. Hakan GÜLER'in yürütücülüğünü yapmış olduğu çeşitli Ar-Ge projelerinde kendini geliştirmek amacıyla çalışmalar yapmıştır. Shuhratjon HIDIROV evli ve üç çocuk babasıdır.