



**LAZER KAMERALAR KULLANILARAK BİLGİSAYAR GÖRMESİ İLE ÜÇ BOYUTLU RAY
PROFİLİ ARIZALARININ GERÇEK ZAMANLI TEŞHİSİ**

Yük. Müh. Yunus SANTUR

**Doktora Tezi
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erhan AKIN
NİSAN-2018**

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

**LAZER KAMERALAR KULLANILARAK BİLGİSAYAR GÖRMESİ İLE ÜÇ BOYUTLU
RAY PROFİLİ ARIZALARININ GERÇEK ZAMANLI TEŞHİSİ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Yunus SANTUR

(142129201)

Anabilim Dalı: Bilgisayar Mühendisliği

Programı: Kuramsal Temeller

Danışman: Prof. Dr. Erhan AKIN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 3 Nisan 2018

NİSAN-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER KAMERALAR KULLANILARAK BİLGİSAYAR GÖRMESİ İLE ÜÇ BOYUTLU
RAY PROFİLİ ARIZALARININ GERÇEK ZAMANLI TEŞHİSİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Yunus SANTUR

(142129201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Nisan 2018
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Nisan 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erhan AKIN (F.Ü)



Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İbrahim TÜRKOĞLU (F.Ü)



Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE (F.Ü)



Dr. Öğr. Üyesi Özal YILDIRIM (M.Ü)



Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ (K.G.T.Ü)



NİSAN-2018

ÖNSÖZ

Bu tezde, lazer kamera kullanılarak bilgisayar görmesi ile gerçek zamanlı ray arıza teşhisi algoritmaları geliştirilmiştir. Tez çalışmasının konu ile ilgilenen lisans, yüksek lisans, doktora öğrencilerinin yanı sıra bu konuda çalışmak isteyen akademisyenlere bir rehber olacağını umuyorum. Tez çalışmalarında kullanılan donanım kaynaklarının temin edilmesinde maddi desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna teşekkür ederim.

Tez çalışmaları boyunca bilgisi, vizyonu ve önerileriyle beni yönlendiren, maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen başta danışman hocam, Prof. Dr. Erhan AKIN'a, akademik hayata adım attığım yüksek lisans danışman hocam Doç. Dr. Hayrettin CAN'a, akademik çalışmayı bana öğreten, tüm çalışmalarımda bana sonsuz destek sunan Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE'ye teşekkürü borç bilirim.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve çalışma kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar 114E202 numaralı TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) projesi ile desteklenmiştir.

Yunus SANTUR
ELAZIĞ-2018

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ.....	XV
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVII
KISALTMALAR LİSTESİ	XX
1. GİRİŞ	1
1.1. Bilgisayar Görmesine Dayalı Ray Arıza Teşhisinin Genel Yapısı	3
1.2. Demiryolu Bileşenleri	4
1.3. Ray Hattında Oluşabilecek Arızalar	6
1.4. Literatür Özeti.....	10
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	48
1.6. Tezin Yapısı	49
2. RAY ARIZA TEŞHİSİ.....	53
2.1. Ray Denetim Yöntemleri.....	53
2.2. Lazer Kamera Kullanan Ray Denetim Yöntemleri.....	57
2.3. Ray Ölçümü için Endüstride Geliştirilen Ürünler	59
3. BİLGİSAYAR GÖRMESİNE DAYALI RAY ARIZA TEŞHİS YÖNTEMLERİ..	81

3.1. Görüntülerin Ön İşlemden Geçirilmesi	82
3.1.1.Sayısal Görüntü Üzerinde Gürültü Giderme	83
3.1.2.Görüntü Üzerinde Öz Değer Elde Etme	84
3.2. Rassal Orman Algoritması.....	87
3.3. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	89
3.4. Evrişimsel Yapay Sinir Ağları.....	94
3.5. Ray Hattı Yüzey Arıza Teşhisi İçin Görüntü İşleme Temelli Bir Yaklaşım.....	98
3.6. Ray Hattı Yüzey Arızaları Teşhisi İçin Bilgisayar Görmesi Temelli Bir Yaklaşım	106
3.7. Ray Hatlarında Adaptif Arıza Teşhisi İçin Boru Hattı Mimarisi Kullanan Bir Yaklaşım.....	112
4. LAZER KAMERA KULLANILARAK RAY PROFİLİ ARIZA TEŞHİSİ.....	129
4.1. Üç Boyutlu Ray Arıza Teşhisi Benzetim Çalışması	130
4.2. Lazer Kamera Kullanılarak Üç Boyutlu Görüntü Elde Etme	141
4.3. Lazer Kamera Kullanarak Yanal Ray Arıza Teşhisi	147
4.4. Lazer Kamera Kullanarak Dikey Ray Arıza Teşhisi	157
4.5. Çift Lazer Kameralı Ray Arıza Teşhisi	162
4.6. Saha Testleri	166
4.7. Bölüm Değerlendirmesi ve Sonuçlar.....	169
5. RAY ARIZA TESPİTİNDE BÜYÜK VERİ VE DERİN ÖĞRENME	171
5.1. Ray Analizi Uygulamalarında Büyük Veri Temelli Yaklaşım	172
5.2. Derin Öğrenme Tabanlı Ray Analizi	179

5.3. Lazer Kamera Kullanarak Derin Öğrenme Temelli Ray Arıza Teşhisi.....	181
6. SONUÇLAR.....	194
KAYNAKLAR.....	199
EKLER.....	207
ÖZGEÇMİŞ	209



ÖZET

Ülkemizde ve dünyada demiryolu ulaşımı çok yaygın olarak tercih edilen bir ulaşım yöntemidir. Ray hatlarının fiziksel yapıları, raylı ulaşım aracının ağırlığı ve hızı, demiryolunun kullanım yoğunluğu gibi birçok neden ray hattında aşınma, kırılma, çatlama, bozulma gibi çeşitli arızalara neden olmaktadır. Bu arızaların teşhis edilmesi için hızlı ve verimli şekilde periyodik bakımların yapılması olası maddi ve manevi kayıpların önüne geçecektir.

Bu tez çalışmasında, demiryollarında ray hatları üzerinde oluşan arızaların temassız olarak lazer kameralar kullanılarak gerçek zamanlı şekilde teşhis edilmesi için yöntemler önerilmiştir. Ray hatlarında oluşan milimetrik seviyedeki hataların tespit ve teşhis edilmesi için kullanılan lazer kameralar ile öncelikle rayın üç boyutlu modeli elde edilmekte, daha sonra bu gerçek modelden hataların teşhis edilmesi sağlanmaktadır.

Yöntem geliştirme aşamasında sayısal kamera ve lazer kamera kullanan çalışmalar için giriş verileri üzerinde temel bileşen analizi, tekil değer ayrıştırma, çekirdek temel bileşen analizi, histogram karşılaştırma gibi özellik seçim algoritmaları ile, rassal orman ve evrimsel yapay sinir ağı makine öğrenmesi algoritmaları kullanan yöntemler geliştirilmiştir. Önerilen yöntemlerin doğrulanması için tez kapsamında kurulan deney seti kullanılmış ve gerçek veriler ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Sonuç olarak, bu doktora tezi kapsamında lazer kameralar kullanılarak ray hatlarındaki arızaların teşhisi için geliştirilen yöntemlerin performansı deneysel veriler ve saha çalışmaları ile ortaya konulmuştur. Tez süresince yapılan çalışmalar 114E202 numaralı TUBİTAK 1001 araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer kameralar, Ray hattı modelleme, Arıza teşhisi, Bilgisayar görmesi, Derin öğrenme.

SUMMARY

REAL TIME DIAGNOSIS OF 3D RAIL PROFILE FAULTS WITH COMPUTER VISION USING LASER CAMERAS

Railway transportation in our country and in the world is a very popular transportation method. The physical structures of the rail tracks, the weight and speed of the rail transport, and the intensity of use of the railroad are all the reasons for various failures such as wear, breakage, cracking and deterioration in the rail track. In order to identify these failures, the quick and efficient maintenance of the periodicals will prevent possible financial and moral losses.

In this thesis, methods have been proposed for real-time detection of failures on rail tracks on railways using contactless laser cameras. The laser cameras used to detect and diagnose millimetric level errors on rail tracks first obtain a three-dimensional model of the rail, and then diagnose faults that are actually modeled.

In the development phase of the method, methods using feature selection algorithms such as basic component analysis, singular value decomposition, kernel basic component analysis, histogram comparison, and random forest and convolutional artificial neural network machine learning algorithms have been developed on input data for digital camera and laser camera operations. In order to verify the proposed methods, the experimental set established in the thesis was used and validation studies were carried out with real data.

As a result, the performance of the methods developed for the diagnosis of failures in railway lines using laser cameras in this doctoral thesis is demonstrated by experimental data and field studies. The studies carried out during the thesis were supported with the research project of TUBİTAK 1001 numbered 114E202.

Keywords: Laser cameras, Rail line modelling, Fault diagnosis, Computer vision, Deep learning.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Bilgisayar görmesine dayalı ray arıza teşhisi genel blok diyagramı	3
Şekil 1.2. Demir yolunu oluşturan bileşenler	5
Şekil 1.3. Çift mantarlı, tek mantarlı ve çift oluklu ray profilleri	5
Şekil 1.4. Ray aşınma türü arıza.....	7
Şekil 1.5. Ray kırılma örnekleri	8
Şekil 1.6. Ray oyulma türü arıza.....	8
Şekil 1.7. Ray ondülasyon arızası	9
Şekil 1.8. Ray headcheck arızası.....	10
Şekil 1.9. Lazer algılayıcı ve kamera kullanan ray analizi uygulaması.	12
Şekil 1.10. MLSSistemi blok diyagram.	13
Şekil 1.11. HSR 350x ray ölçüm sistemi.	14
Şekil 1.12. Dikey iz düşümlü ray arıza teşhisi.	15
Şekil 1.13. Lazer tarama muayene sistemi.....	16
Şekil 1.14. Demiryolu altyapı denetimi için lazer kameralı muayene sistemi.....	18
Şekil 1.15. Ray üst yüzeylerinin lazer kameralarla dikey olarak muayene edilmesi.	19
Şekil 1.16. Flatcar ray muayene yaklaşımı.	22
Şekil 1.17. INFOTRANS lazer tarama sistemi.	24
Şekil 1.18. INFOTRANS lynx veri toplama.....	25
Şekil 1.19. Ray hattı çatlak teşhisi için önerilen yöntemi.....	27
Şekil 1.20. Önerilen yaklaşıma ait histogram iyileştirmesi.	27
Şekil 1.21. Önerilen yaklaşımda ikili görüntü elde etme ve ardından gürültü kaldırma.	27
Şekil 1.22. Eşik değer karşılaştırma sonrası elde edilen ray görüntüsü.....	28
Şekil 1.23. Katener yapısı.	29
Şekil 1.24. Katener bakım merdiveni.	29
Şekil 1.25. Kamer sistem bileşenleri.	30
Şekil 1.26. Katener sistemi kullanıcı ara yüzü.	30
Şekil 1.27. Katener sisteme ait saha çalışmaları	31
Şekil 1.28. RGB-D kamera bileşenleri, RGB ve derinlik elde etme.	33

Şekil 1.29. SL ve ToF sensörlerinin karşılaştırması.....	33
Şekil 1.30. Raydaki ray muhafazası	34
Şekil 1.31. Kapalı demiryolu deney kurulumu	35
Şekil 1.32. Demiryolu vagonu üzerindeki Z + F Profiler 9000 Sistem 1.....	36
Şekil 1.33. Platformda monte edilen RIEGL VMX-250 çözümüne dayalı Sistem 2.....	37
Şekil 1.34. Laser-Tec ölçüm sistemi.	39
Şekil 1.35. Ray profili ve palet geometrisi ölçüm cihazları.....	41
Şekil 1.36. 3D-LPS sistem prensibi.....	42
Şekil 1.37. Lazer profillemeye için geliştirilen program ara yüzü.	43
Şekil 1.38. Önerilen çalışma için kullanılan karar ağacı yapısı.	44
Şekil 2.1. Ray hattı kısımları.....	53
Şekil 2.2. Temaslı ray denetimi işlemi.	54
Şekil 2.3. Bilgisayar görmesine dayalı ray denetim işlemi.....	55
Şekil 2.4. Ray muayene yöntemlerinin gruplandırılması	56
Şekil 2.5. Lazer kamera çalışma prensibi	58
Şekil 2.6. Lazer kamera kullanan ray denetim işlemi.....	58
Şekil 2.7. Mermec giriş tabanlı sistem.....	60
Şekil 2.8. Mermec atalet tabanlı sistem	61
Şekil 2.9. Lazer raylı muayene sistemi (LRAIL)	62
Şekil 2.10. Matisa ray muayene sistemi.	63
Şekil 2.11. Kldlabs ölçüm sistemi	64
Şekil 2.12. Kldlabs ORIAN ölçüm sistemi.....	65
Şekil 2.13. Kldlabs taşınabilir sistem	66
Şekil 2.14. TEP taşıyıcı sistemi ve program ara yüzü.	67
Şekil 2.15. Ray ve dönüş profil ölçümü için 3D lazer tarama sistemi: SCORPION.	68
Şekil 2.16. Ray ve dönüş profili ölçümü için 3D lazer tarama sistemi	70
Şekil 2.17. Geçiş kurbağasının örnek ölçümü.....	70
Şekil 2.18. Ray profilinin enine kesiti	71
Şekil 2.19. Lazer TEC	72
Şekil 2.20. Ataletli Ray Geometri Taşıyıcısı	72
Şekil 2.21. DTK Ray ölçüm sistemi.....	73

Şekil 2.22. DTK ölçüm sistemi ve ölçümlere ait video görünüm	74
Şekil 2.23. DTK uygulama görüntüleri ve kullanıcı arayüzü	75
Şekil 2.24. Ray mantar başı aşınma teşhisi	76
Şekil 2.25. Beena Vision ray denetim işlemi uygulama görüntüleri	78
Şekil 2.26. Beena Vision test aracı yandan ve alttan görünümeleri	79
Şekil 3.1. Ray hattından elde edilen görüntü ve görüntüden ray hattını kırpma	82
Şekil 3.2. Rassal orman yapısı	88
Şekil 3.3. Yapay sinir modeli	89
Şekil 3.4. YSA modeli	91
Şekil 3.5. Merkezi işlemci birimi ile Grafik işlemci mimarisi karşılaştırması	95
Şekil 3.6. Evrişimsel yapay sinir ağı blok diagramı	96
Şekil 3.7. Görüntü işleme temelli ray yüzeyi arıza teşhisi için kullanılan deneysel araç	98
Şekil 3.8. Önerilen çalışmada gerçekleştirilen gerçek zamanlı ray yüzey hata teşhisi	99
Şekil 3.9. Önerilen görüntü işleme temelli yaklaşımının çalışma adımları	100
Şekil 3.10. Görüntü noktaları 4 komşuluk ve 8 komşuluk	102
Şekil 3.11. Yerel normalleştirmede farklı pencere boyutları seçmek	103
Şekil 3.12. Önerilen yaklaşım ile kırık ve aşınma türü arıza teşhisi	104
Şekil 3.13. Önerilen yaklaşım ile arıza teşhisi	105
Şekil 3.14. Rassal orman tabanlı ray yüzey arızası teşhisi yaklaşımı blok diyagramı	107
Şekil 3.15. Önerilen yaklaşım doğruluk performansları	110
Şekil 3.16. TBA ve HK yöntemlerinin birleştirilmesi	111
Şekil 3.17. Boru hattı mimarisi kullanan adaptif ray arıza teşhisi yaklaşımı yöntemi blok diyagramı	115
Şekil 3.18. Adaptif bulanıklık tespiti ve durulaştırma aşaması blok diyagramı ve üç boyutlu uzayda Euler açılarının gösterimi	117
Şekil 3.19. Önerilen yaklaşım EYSA diyagramı	121
Şekil 3.20. Deneysel araç, AÖB ve sayısal kamera	123
Şekil 3.21. AÖB tabanlı bulanıklık tespiti	124
Şekil 3.22. Deneysel sonuçlar	126
Şekil 4.1. Üç boyutlu ray arıza teşhisi benzetim çalışması	130
Şekil 4.2. Üç boyutlu ray arıza teşhisi benzetim çalışması blok diyagramı	131

Şekil 4.3. Katı modellemede üç boyutlu modelin üçgenler ile oluşturulması	131
Şekil 4.4. Üç boyutlu katı model ascii dosya içeriği	132
Şekil 4.5. Blender ortamında oluşturulan arıza içeren ve arıza içermeyen ray profilleri	133
Şekil 4.6. Üç boyutlu ray profili bilgilerinin Matlab ortamında okunması	134
Şekil 4.7. Özellik birleştirme adımı.....	136
Şekil 4.8. Benzetim çalışması için oluşturulan arıza içeren ray profilleri	138
Şekil 4.9. Ray profili katı modele gürültü ekleme işlemi	139
Şekil 4.10. Benzetim çalışması sınıflandırma sonuçları	141
Şekil 4.11. Üç boyutlu görüntü elde etme yöntemleri	142
Şekil 4.12. Lazer kamera ile üç boyutlu görüntüleme	143
Şekil 4.13. Lazer üçgenleme yöntemi	144
Şekil 4.14. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera üçgenleme de kullanılan yöntemler	145
Şekil 4.15. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera görüntüleme yöntemleri	147
Şekil 4.16. Lazer kamera temelli ray arıza teşhis yöntemi	148
Şekil 4.17. Lazer kamera verileri üzerinde ön işlem gerçekleştirme	149
Şekil 4.18. Deneysel çalışmalarda kullanılan ray profili	152
Şekil 4.19. Lazer kamera ile elde edilen ray profili veri seti örnekleri	153
Şekil 4.20. Arızalı ve sağlıklı ray profillerinin büyütülmüş hali.....	154
Şekil 4.21. Ray hattından elde edilen birleştirilmiş profil görüntüleri	155
Şekil 4.22. Arızalı ray bölgesi ve üç boyutlu profili	155
Şekil 4.23. Şekil 4.23. Lazer kamera Kullanarak Dikey Arıza Teşhisi.....	158
Şekil 4.24. Lazer kamera kullanarak dikey arıza teşhisi eğitim verisi örnekleri	159
Şekil 4.25. Lazer kamera kullanarak dikey ray arıza teşhisi.....	160
Şekil 4.26. Test aşamasında arıza teşhisi	161
Şekil 4.27. Çift lazer kamera ile ray profili arıza teşhisi	162
Şekil 4.28. Çalışmada kullanılan ray profili ve profilin gri seviye görüntüsü	163
Şekil 4.29. Çift lazer kamera ile gerçekleştirilen ray denetim işlemi.....	165
Şekil 4.30. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen saha testleri	168
Şekil 5.1. Büyük veri ile ray analizi ilişkisi	174
Şekil 5.2. Büyük veri yaşam döngüsü	175
Şekil 5.3. Büyük veri ve ray analizi için önerilen yöntem blok diyagramı	177

Şekil 5.4. Test çalışması sınıflandırma sonuçları.....	178
Şekil 5.5. Lazer kamera kullanan derin öğrenme temelli ray arıza teşhisi	182
Şekil 5.6. Geleneksel Makine Öğrenmesi Yaklaşımı	183
Şekil 5.7. Derin öğrenme yaklaşımı	184
Şekil 5.8. Derin öğrenme için kullanılan ham veri ve ön işlem adımları ile çoğaltılmış veriler	188
Şekil 5.9. Lazer kamera kullanan arıza teşhisi için kullanılan EYSA yapısı.....	189
Şekil 5.10. Çalışmada kullanılan bazı ray profilleri	192



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. Ray denetiminin ilişkin literatür özeti	47
Tablo 2. 1. Ray denetim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	57
Tablo 3. 1. Rassal orman algoritması başlıca avantaj ve dezavantajları.....	87
Tablo 3. 2. İki yöntemin karşılaştırılması.....	106
Tablo 3. 3. Sağlıklı ve arızalı çerçevelerden elde edilen öz değerler.....	108
Tablo 3. 4. Özellik Çıkarım yöntemlerinin çalışma süreleri ve doğruluk performansları	109
Tablo 3. 5. Özellik çıkarım yöntemlerinin performans karşılaştırması	110
Tablo 3. 6. TBA ve HK yöntemlerinin birleştirilmesi	111
Tablo 3. 7. AÖB’te kullanılan algılayıcılar, serbestlik dereceleri ve ölçüm birimleri.....	118
Tablo 3. 8. Euler açıları ve açıklamaları	118
Tablo 3. 9. Karşıtlık Matrisi	122
Tablo 3. 10. Boru Hattı Mimarisi Aşamaları Çalışma Süreleri	124
Tablo 3. 11. Önerilen Yaklaşımın Karşıtlık Matrisi	125
Tablo 4. 1. Benzetim çalışması ile elde edilen doğruluk değerleri.....	140
Tablo 4. 2. Üç boyutlu görüntülemelerde kullanılan ana yöntemler	143
Tablo 4. 3. Ray profili verisi üzerinde elde edilen öz değerler.....	150
Tablo 4. 4. Kullanılan özellik çıkarım yöntemlerinin kıyaslanması	152
Tablo 4. 5. TBA ile elde edilen karşıtlık matrisi	156
Tablo 4. 6. ÇTBA ile elde edilen karşıtlık matrisi.....	156
Tablo 4. 7. TDA ile elde edilen karşıtlık matrisi	157
Tablo 4. 8. HK ile elde edilen karşıtlık matrisi.....	157
Tablo 4. 9. TBA ile elde edilen karşıtlık matrisi	161
Tablo 4. 10. Çift lazer kameralı yanal ray arıza teşhisi karşıtlık matrisi.....	164
Tablo 4. 11. Çift lazer kameralı yanal ray arıza teşhisi çalışma performansı.....	164
Tablo 4. 12. Saha testleri çalışma performansı.....	167
Tablo 5. 1. Ray analizi ve büyük veri ilişkisi	175
Tablo 5. 2. Seçilen eşik değere göre arızalı teşhis sonuçları	178

Tablo 5. 3. Yapay Sinir Ağları ile Derin Öğrenme'nin Karşılaştırılması	180
Tablo 5. 4. Lazer kamera profil verileri ile derin öğrenme tabanlı arıza teşhisinde kullanılan yazılım ve donanım kaynakları	190
Tablo 5. 5. Ham veri setine gerçek sınıf etiketleri.....	190
Tablo 5. 6. Lazer kamera kullanan derin öğrenme tabanlı ray arıza teşhisi karşıtlık matrisi.	191



SEMBOLLER LİSTESİ

f	: YSA aktivasyon fonksiyonu
$f(z_i)$	: Softmax aktivasyon fonksiyonu
F_1	: F skor değeri
h_i	: Ağırlık faktörleri
I_p	: Yoğunluk eşik değeri
I_s	: Gauss yoğunluk fonksiyonu
M_s	: Yoğunluk toplam momenti
P_{COG}	: Ağırlık merkezi modu
$P_L, P_R, P_{Threshold}$	: Lazer çizgi kaynağı sol, sağ kenarı, ortalama değeri
$P_{Threshold}$	: Eşik değer modu
C_i^l	: Konvolüsyon katmanı
P_e	: Eklenmiş vektör
P_{g1}	: Gürültü eklenmiş vektör
P_k	: Ötelenmiş vektör
e_i	: Hata değeri
g_i	: Öz değerler vektörü
$\bar{x}$	: Ortalama
x_{cam}, y_{cam}	: Kamera x, y konumu
x_i, y_i	: Profil x, y konumu
Δ	: Sabit
ACC	: Doğruluk oranı
DPR	: Doğru pozitif oranı
fov	: Kamera görüş açısı
h	: Filtre fonksiyonu
Precision	: Keskinlik
$\sin(a)$	: Kamera ile lazer çizgi kaynağı arasındaki açı

V	: Hız
YPR	: Yanlış pozitif oranı
α	: Sabit
A	: Sabit katsayı
B	: Bulanık görüntü
C	: Kovaryans matrisi
D	: En büyük öz değer
$GINI$	: Gini indexi
I	: Giriş görüntüsü
K	: Bulanıklık çekirdek matrisi
N	: Gürültü
P	: Olasılık değeri
Q, R	: Dördey vektörler
S	: Öz değerler matrisi
V	: Öz değerler vektörü
W	: Ağırlık matrisi
a	: Momentum katsayısı
b	: Bias
cov	: Kovaryans
$f(z)$	: Tekdüze gürültü
g	: Çıkış görüntüsü
n	: Gürültü fonksiyonu
p	: Çekirdek matrisi
p	: Yunuslama açısı
p	: Toplam özellik sayısı
r	: Yuvarlanma açısı
s	: Öteleme miktarı
y	: Sapma açısı
y, y^{t-1}	: Hücre çıkış değeri, Hücrenin bir önceki adımdaki toplamı
z	: Mesafe

δ : Toplam hata
 λ : Öğrenme katsayısı
 μ, σ : Ortalama, Varyans



KISALTMALAR LİSTESİ

3D	: Üç Boyutlu Nokta
AICP	: Adaptif Yinelemeli En Yakın Nokta
AMM	: Ağırlık Merkezi Modu
AÖB	: Ataletsel Ölçüm Birimi
CBI	: Choquet Bulanık İntegral
CCD	: Yüklenme İliştirilmiş Araç
CCS	: Karbon Temas Sensörleri
CMOS	: Tamamlamalı Metal-oksit Transistorlar
ÇTBA	: Çekirdek Tekil Bileşen Analizi
DN	: Doğru Negatif
DÖ	: Derin Öğrenme
DP	: Doğru Pozitif
DPR	: Doğru Pozitif Oranı
EDM	: Eşik Değer Modu
EYSA	: Evrişimsel Yapay Sinir Ağı
FPGA	: Sahada Programlanabilir Kapı Dizileri
GİB	: Grafik İşlem Birimi
GPS	: Konum Bulma Servisi
HK	: Histogram Karşılaştırma
HKT	: Hareketli Kareler Toplamı
ICP	: Yinelemeli En Yakın Nokta
KOHK	: Karekök Ortalama Hata Kareler
LIDAR	: Lazer Tarayıcı
LPS	: Lazer Profil Sistemi
LRAİL	: Lazer Raylı Muayene Sistemi
LYDS	: Lazer Yer Değiştirme Sensörleri
M&R	: Bakım Yenileme
MİB	: Merkezi İşlem Birimi

MLS	: Mobil Lazer Tarama Sistemi
MYM	: Maksimum Yoğunluk Modu
OHK	: Ortalama Hareketli Kareler Toplamı
ORIAN	: Optik Ray Denetimi ve Analiz
RGB	: Kırmızı Yeşil Mavi
RGB-D	: Mesafe Ölçer Kamera
RO	: Rassal Orman
SD	: Serbestlik Derecesi
SL	: Yapılandırılmış Işık Kaynağı
TBA	: Temel Bileşen Analizi
TBRs	: Tutulum ve Baş Referans Sistemi
TDA	: Tedil Değer Ayırıştırma
TEC	: Taşıyıcı Lazer Kamera
TEP	: Taşıyıcı Ray Geometrisi
TM	: Tepe Modu
ToF	: ToF Kamera
TRC	: Ray Ondulasyon Cihazı
XML	: Genişletilebilir İşaretleme Dili
YN	: Yanlış Negatif
YP	: Yanlış Pozitif
YSA	: Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında insanoğlu günlük hayatında birçok endüstriyel ürün kullanmaktadır. Ulaşım, medikal, askeri, eğlence gibi birçok farklı sektörde teknolojiler ürünler yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu ürünler yoğun bir ar-ge, doğrulama ve üretim faaliyetleri sonucu elde edilebilmektedir, aynı zamanda üretim sonrası ürünlerin devamlılığın sağlanabilmesi için yeterli bakım, garanti ve teknik destek sunulması çok önemlidir [2]. Gitgide daha karmaşık hale gelen bu sistemlerde yaşanabilecek aksaklıklar zaman ve maliyet kaybına daha da önemlisi kazalara, yaralanmalara ve hatta ölümlere neden olabilmektedir [3].

Günümüzde kullanılan endüstriyel sistemlerin tamamına yakını birçok algılayıcı içermekte gerçek zamanlı ve/veya çevrimdışı olarak incelenebilmektedir. Sisteme ait tüm parametreler belirli algoritmalar ile incelenerek, olası arızalar teşhis ya da tahmin edilebilir. Literatürde bu konu genel olarak *arıza teşhisi* olarak isimlendirilmektedir [4]. Belirli bir sisteme yönelik arıza teşhisi uygulamalarının gerçekleştirilmesi medikal, mekanik, bilişim, gıda, tekstil gibi birden fazla disiplini bir araya getiren bir yaklaşımdır [5-7].

Günlük hayatta gereksinim duyulan en önemli endüstriyel araçlardan biride ulaşımır. Ulaşım yöntemlerinden bir tanesi olan raylı ulaşım sistemleri hem ülkemizde hem de Dünya genelinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Demiryollarını kullanan bu ulaşım sistemleri hem şehir içi gibi kısa mesafelerde hem de şehirlerarası gibi uzun mesafelerde ulaşım ve yük taşıma gibi amaçlarla kullanılmaktadır.

Raylı ulaşım sistemlerinin en önemli ve kritik bileşenlerinden bir tanesi raylı ulaşım araçlarının üzerinde hareket ettiği demir ray hatlarıdır. Ray hatlarında oluşan tonlarca ağırlık, yoğun kullanım, raylı ulaşım araçlarının sahip oldukları yüksek hız, mevsimsellik ve diğer fiziksel koşullarla birlikte zamanla ray hatlarının ideal yapıları bozulmakta ve çeşitli arızalar oluşabilmektedir. Ray hatlarında oluşabilecek bu arızalar maddi kayıplı ve ölümlü kazalara neden olabilmektedirler, bu nedenle ray hatlarının periyodik olarak denetlenmesi ve bakımlarının yapılması gerekmektedir [11].

Ray hatları geleneksel olarak bir uzman aracılığı ile el ve göz ile kontrol edilerek denetlenmektedir. Bu yöntem oldukça zahmetli, uzun zaman gerektiren, uzman kişinin bilgisi ve yeteneği ile sınırlı subjektif bir yöntemdir; yapısı gereği aynı zamanda düşük doğruluklu ve tehlikelidir [12].

Ray hatlarının denetiminde kullanılan bir diğer yöntem ultrasonik cihazların kullanılmasıdır. Bu yöntemde ray hattına temas ederek ray hatlarının profili çıkarmaya yarayan ultrasonik aygıtlar kullanılmaktadır. Elde edilen verilerin yorumlanması ile ray denetimi yapılmaktadır. Denetim işleminde ray hattına temas eden aygıtlar kullanıldığından *temaslı* olarak adlandırılmaktadır. Temaslı ray denetimi ray hattı üst yüzeyinde oluşan oyulma ve çatlak türü arıza teşhisinde oldukça başarılıdır. Ancak temaslı yapısı gereği ray hatlarında yeni arızalar oluşturabilmekte ya da var olan arızayı daha da kötüleştirebilmektedir [13]. Yöntemin bir diğer dezavantajı ise ray yanal yüzeylerdeki çatlak, aşınma gibi arızaları teşhis edememesidir.

Her iki yöntemin sahip oldukları dezavantajlar nedeni ile ray denetimi günümüzde bilgisayar görmesi ile gerçek zamanlı yapılabilmektedir. Bilgisayar görmesi kullanan ray denetim yöntemlerinde yüksek çözünürlüklü sayısal ya da çizgi kamera, ışık kaynağı, kodlayıcı gibi bileşenler kullanılmaktadır ve bu bileşenler ray hattına temas etmediği için *temassız* olarak adlandırılmaktadır [14]. Temassız olması nedeni ile temaslı yöntemlerde yaşanan yeni arıza oluşturma ya da var olan arızayı arttırma dezavantajlarını gidermektedir. Temaslı yöntemlere olan bir diğer avantajı ise daha yüksek doğruluklu ve hızlı olmasıdır.

Ray hattından elde edilen görüntüler makine öğrenmesi algoritmaları ile yorumlanarak çerçeveler üzerinde teşhis sonucu üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Yöntemin en büyük dezavantajı ise ray hatlarında oluşabilecek yağ, leke ve toz kalıntılarının görüntü işleme algoritmaları tarafından arıza olarak teşhis edilebilmesidir [15-20]. Ray analizi uygulamalarında kullanılan bir diğer temassız yöntem ise üç boyutlu bilgisayar görmesine dayalıdır. Üç boyutlu görüntü elde etmede kullanılan donanım ve algoritma geliştirme daha maliyetli bir işlem olsa da yüksek çalışma hızları ve ölçüm hassasiyetleri nedeni ile ray analizi işlemlerinde avantaj sunmaktadırlar [21-25].

1.1. Bilgisayar Görmesine Dayalı Ray Arıza Teşhisinin Genel Yapısı

Bilgisayar görmesine dayalı temassız ray analizi uygulamalarının en basit blok diyagramı Şekil 1.1’de verilmiştir. Aşağıda sırası ile bu bileşenler ve içerikleri açıklanmıştır.



Şekil 1.1. Bilgisayar görmesine dayalı ray arıza teşhisi genel blok diyagramı

Veri Girişi: Bilgisayar görmesine dayalı ray arıza teşhisinde kullanılacak ana giriş verisini kameralardan alınan veriler oluşturmaktadır. Veri girişi sağlayan kamera türleri;

- CCD /CMOS gibi sayısal kameralar,
- Kinect gibi RGB-D kameralar,
- Çizgi kameralar,
- Üç boyutlu lazer kameralar olabilir.

Ön İşlemler: Ray hattından alınan giriş verilerinin doğrudan kullanılmadan önce bir takım ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bunlar;

- Gürültü temizleme,
- Görüntü iyileştirme,
- Görüntü kırpma gibi işlemlerdir.

Özellik Seçimi: Makine öğrenmesi algoritmalarında görüntü çerçeveleri üzerindeki tüm noktaları giriş verisi olarak kullanmak yerine özellik seçimi yapılarak çalışma hızı performansı iyileştirmesi yapılması hedeflenir. Belli başlı özellik seçim yöntemleri;

- Temel bileşen analizi,
- Doğrusal bileşen analizi,
- Çekirdek temel bileşen analizi,
- Tekil değer ayrıştırma,
- Histogram analizi gibi yöntemlerdir.

Öğrenme: Eğitim aşamasında etiketli veriler üzerinde makine öğrenme algoritmaları çalıştırılarak bir model oluşturulur. Algoritma seçiminde giriş verilerinin büyüklüğü, gerçek zamanlı çalışma performansı, bellek tüketimi gibi kriterler göz önünde bulundurulur. Ray analizi işleminde yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları;

- Rassal orman,
- Yapay sinir ağları,
- Derin öğrenme ağları yaygın olarak kullanılmaktadır.

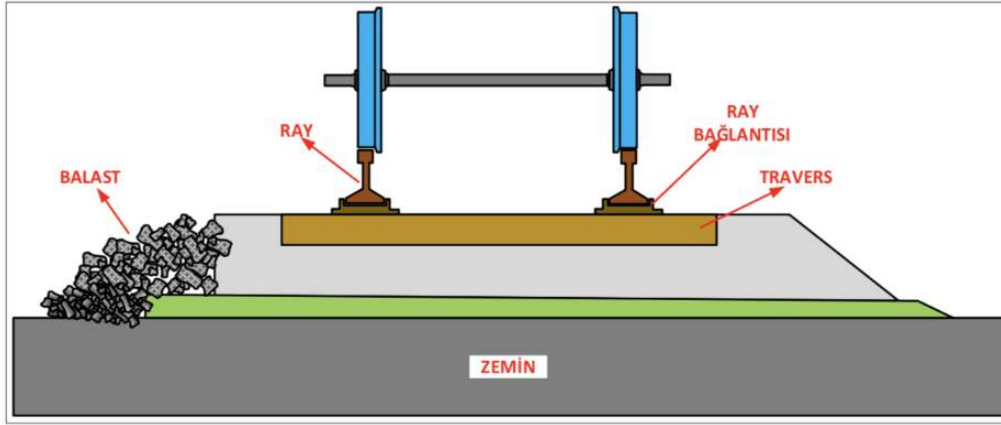
Teşhis: Test aşamasında yeni veri üzerinde sınıflandırma yapılarak sağlıklı, arızalı gibi ait olduğu sınıfın bulunması, ya da olasılıksal arıza olma ihtimali belirleme şeklinde eğitim aşamasında öğrenilen model üzerinde gerçekleştirilen sınıflandırma işlemidir.

Diğer: ray analizi uygulamasında yukarıda sözü edilen temel bileşenlerin haricinde aşağıdaki gibi bazı ek bileşenlere ihtiyaç duyulabilir. Bunlar;

- Ray hatlarında ki ışık dengesizliği ya da yetersizliği için kullanılabilecek ışık kaynağı,
- Ray hatlarındaki titreşimleri ölçen ataletsel ölçüm birimleri,
- Gidilen mesafeyi ölçen kodlayıcı,
- Algoritmaların çalışacağı bir bilgisayar ya da FPGA gibi özel donanımlar,
- Güç kaynağı gibi bileşenlerdir.

1.2. Demiryolu Bileşenleri

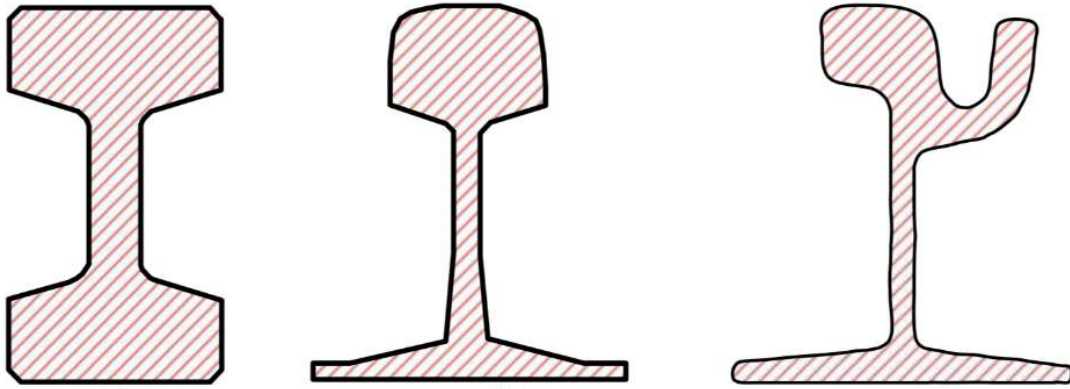
Raylı ulaşım sisteminin bileşenlerinden bir tanesi olan demir yollarını oluşturan bileşenler Şekil 1.2’de verilmiştir. Bu bileşenler ray hattı, ray bağlantı elemanları, ballast ve travers’dir. Demir yolunda; altyapı platformu üzerine oturan, üzerinde trenlerin hareket etmesini sağlayan, trenlerin ağırlığını platforma aktaran ray, travers, balast ve bağlantı malzemelerinin tamamına üstyapı denir. Üstyapı elemanları aşağıda verilmiştir [26]. Aşağıda sırası ile bu bileşenler verilmiştir.



Şekil 1.2. Demir yolunu oluşturan bileşenler

1.2.1. Ray

Demir yolunda; altyapı platformu üzerine oturan, üzerinde trenlerin hareket etmesini sağlayan, trenlerin ağırlığını platforma aktaran ray, travers, balast ve bağlantı malzemelerinin tamamına üstyapı denir. Üstyapı elemanları aşağıda verilmiştir. Şekil 1.3'te ray profili örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.3. Çift mantarlı, tek mantarlı ve çift oluklu ray profilleri

1.2.2. Travers

Raydan gelen kuvvetleri karşılayıp balast tabakasına aktaran, yolun açıklığını koruyan ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, raylara dik yönde belirli aralıklarla döşenmiş donanımlara travers adı verilir. Raylı sistemlerde kullanılan traversler:

- **Ahşap traversler:** Eski imal edilen konvansiyonel hatlarda, konvansiyonel hatlardaki makaslarda ve çelik köprülerde kullanılmaktadır.
- **Demir traversler:** Çelik malzeme ile yapılmış olan traverslerdir. Demir traversler artık kullanılmamaktadır.
- **Beton traversler:** İçinde çelik gergi çubukları bulunan ve betondan yapılan traverslerdir. Diğer traverslere göre ağırlıkları fazla olup yüksek hıza ve dingil basıncına uygun olduğu için raylı sistemlerde kullanımı yaygındır. Çelik köprüler haricinde bütün hatlarda kullanılır.
- **Plastik traversler:** Balastlı ve balastsız raylı sistemlerde, tünel içinde beton tabanda ve metroların açık hatlarında, köprü ve viyadüklerde çelik yuva içinde doğrudan kullanılır.

1.2.3. Ballast

Platformun üzerine döşenen, traverslerin aralarını dolduran ve traverse elastik bir yatak oluşturan, traversler tarafından iletilen tüm kuvvetleri platforma ileten 30-60 mm ebadında kırılmış, keskin köşeli ve keskin kenarlı sert ve sağlam taşlara balast denir.

1.2.4. Diğer

Yukarıda sözü edilen ana bileşenlerin haricinde rayı traverse bağlayan, rayı raya bağlayan civata gibi bağlantı elemanları da bulunmaktadır.

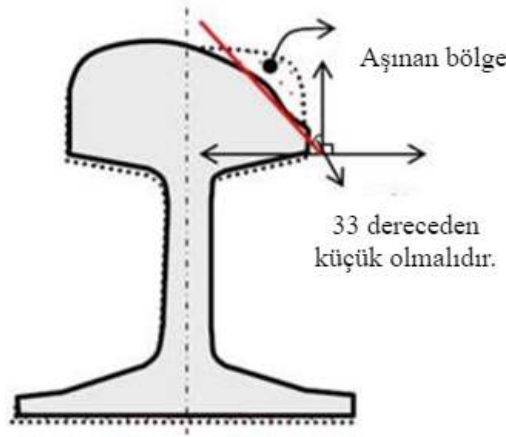
1.3. Ray Hattında Oluşabilecek Arızalar

Bilgisayar görmesine dayalı ray analizi uygulamalarında genel olarak ray hatlarında ki tüm arızaların bulunması hedeflenmektedir.

Bunlar ray hatlarında ki açısal bozulmalarını teşhis etme, travers ve bağlantı elemanlarındaki eksik ya da arızaları teşhis etme gibi alt dallara ayrılarak özelleşmektedir. Tez kapsamında hedeflenen ray aşınmaları, ray kırılmaları, apletlik, ondülasyon ve headcheck türü arızalarının teşhis edilmesidir.

1.3.1. Ray Aşınmaları

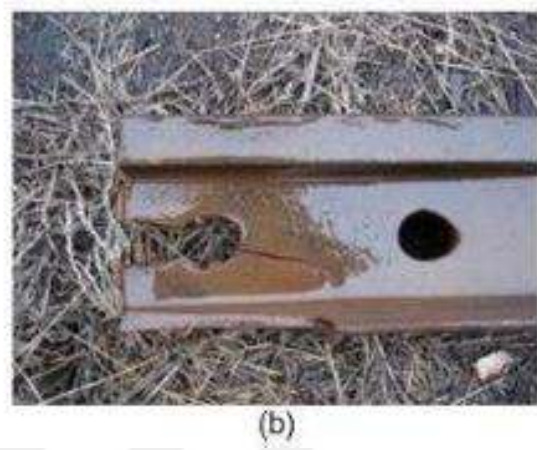
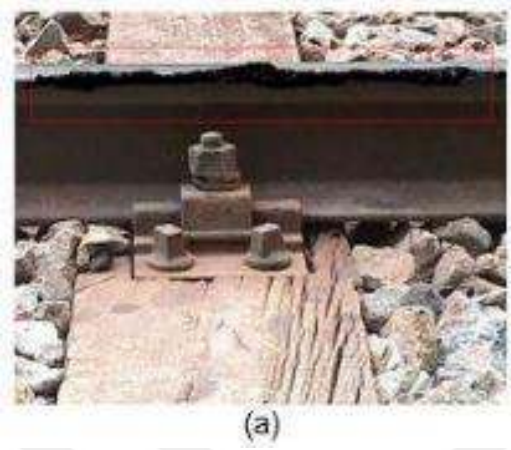
Raylar tekerleklerle temas ettiği yüzeylerinde düşey ve yatay olarak aşınmaktadırlar. Raylarda düşey ve yanal aşınmalar rayın sağlığına etki ederek ulaşım güvenliğini tehdit edeceğinden aşınmaya maruz kalan raylar yılda en az bir kez ray aşınmasını ölçen sistemlerle ölçülerek aşınma teşhis edilmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır [27]. Raylarda aşınmanın, yatay aşınma ile ray eksenine arasındaki açının Şekil 1.4'te görüldüğü gibi 33 dereceden fazla olması durumunda raylar değiştirilmeli veya seyir kısıtlaması konmalıdır.



Şekil 1.4. Ray aşınma türü arıza

1.3.2. Ray Kırılmaları

İki veya daha fazla parçaya ayrılan raylar ile hareket alanında 50 mm' den uzun ve 10 mm' den derin boşluk bulunan raylara kırık ray denmektedir. Şekil 1.5'te ray kırılması gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Ray kırılma örnekleri

1.3.3. Raylarda Oyulma Arızaları

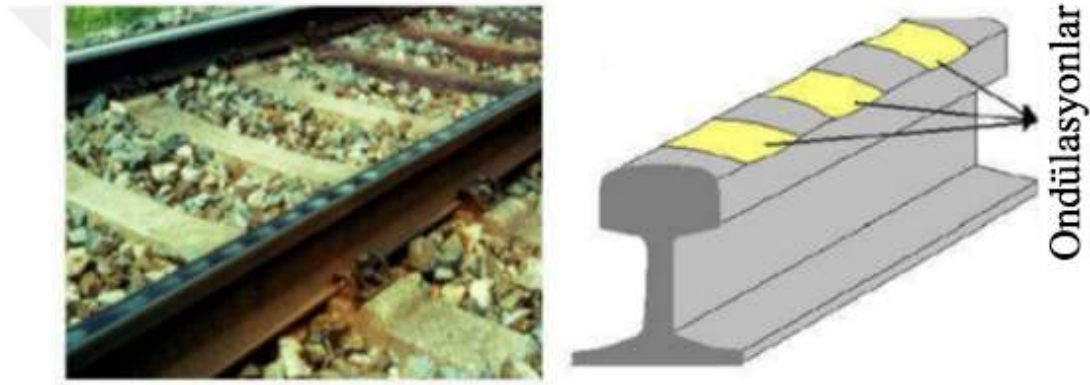
Lokomotiflerin patinaj yapmasıyla ray mantarlarının üst yüzeyinde oluşan oyulmalara apleti denmektedir. Apleti uzunluğu 60 mm’ den, derinliği ise 1 mm’ den az olmalıdır. Bu değerlerin üstündeki oyulmayı içeren raylar değiştirilmelidir. Şekil 1.6’da ray üzerinde oluşan apletilik arızası olan bir görüntü verilmiştir.



Şekil 1.6. Ray oyulma türü arıza

1.3.4. Raylarda Ondülasyon Arızaları

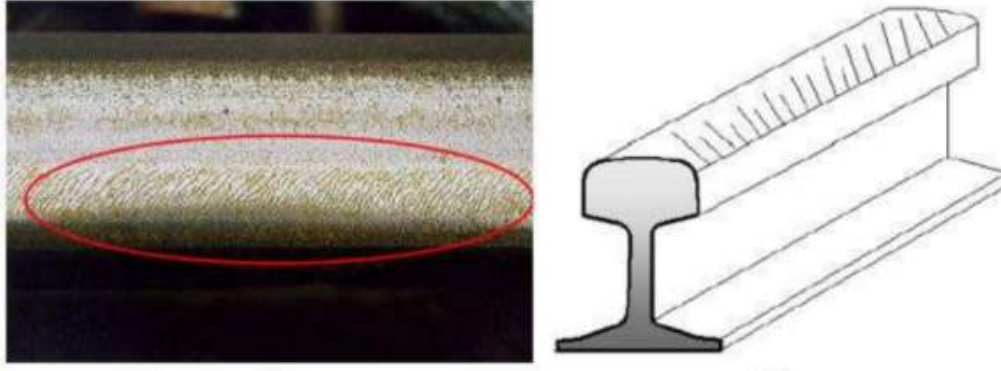
Ray mantarının üst yüzeyinde oluşan farklı ve dalgalı aşınmalara ondülasyon denmektedir. Dalga uzunluğu 300 mm' ye kadar olan ondülasyonlara kısa dalga, 300 mm'den fazla olanlara ise uzun dalga denmektedir. Uzun dalgalar imalat hatalarından meydana gelmektedir. Ondülasyon arızaları Şekil 1.7'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1.7. Ray ondülasyon arızası

1.3.5. Raylarda Headcheck Arızaları

Tekerleğin ilk hareketi esnasında raya yapışması veya kumlamalar gibi nedenlerle ray mantarının yuvarlanma yüzeyinde tırtıklı ve verev şeklinde oluşan kılcal çatlaklara headcheck denmektedir. Ray mantarının yuvarlanma yüzeyindeki ondülasyon ve headcheck arızaları yola uygulanan dinamik yüklerin artmasına ve dolayısıyla rayların deforme olmasına neden olmaktadır. Bu arızaların daha büyük zararlara yol açmamaları için erkenden teşhis edilerek önlem alınması gerekmektedir. Örnek bir görüntüde oluşan headcheck arızası Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8. Ray headcheck arızası

1.4. Literatür Özeti

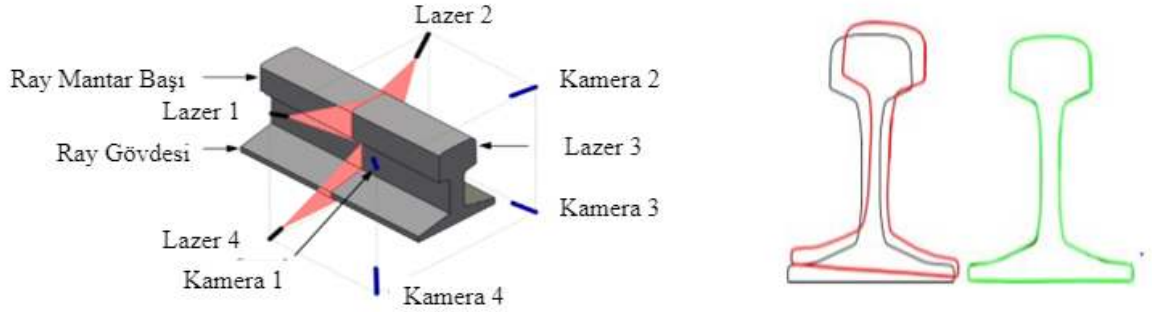
Qi (2013) tarafından doktora tezi olarak sunulan çalışmada Range kameralar kullanılarak dinamik yapılardaki sapsmaların ve bozulmaların ölçümü için yöntemler geliştirilmiştir [28]. Köprü ve diğer yapıları oluşturmak için beton kirişler kullanılır. Yoğun trafik yükü ve yetersiz bakımdan dolayı köprüler gibi diğer yapılarda da her zaman sapsmalar ve bozulmalar meydana gelmektedir. Köprülerin çökmesini engellemek ve güçlendirmek için beton kirişlerdeki sapsmaların tespiti gereklidir. Bu sayede, köprülerin onarımının gerekip gerekmediği hakkında bilgi sahibi olunur ve olabilecek felaketlerin önüne geçilir. Dinamik yapılardaki sapsmayı doğru bir şekilde ölçmek için bir görüntüleme tekniği kullanmak gereklidir. Dijital kameralar, lazer tarayıcılar ve Range kameralar gibi birçok görüntüleme tekniğinin, sapma ölçümleri için doğru ve uygun maliyetli yöntemler olduğu kanıtlanmıştır. Önerilen çalışmada, uçuş süresi Range kameralar ve ışık kodlu Range kameralar gibi farklı kameralarla beton kirişlerin sapsmasını ölçmek için düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta bir görüntüleme tekniği sunulmuştur. Hassas beton ışını sapma ölçümü, kadran göstergeleri, lineer değişken diferansiyel dönüştürücü ve lazer yer değiştirme sensörleri (LYDS'ler) gibi farklı sensörlerle gerçekleştirilebilir. Bu cihazlar nokta odaklı olduğu için tek boyutta ölçüm gerçekleştirebilirler. Bu sebeple iki veya üç boyutlu ölçümler için uygun değildirler. Range kameraları ise lazer yer değiştirme sensörlerin tek boyutlu ölçüm sisteminin aksine üç boyutlu bir koordinatın tüm yüzeydeki noktaların yoğun olduğu bölgeye sağlanmaktadır.

Önerilen çalışmada bahsedilen hedef nesne sürekli olarak aynı yüke ve statik bozulmalara maruz kalmamıştır. Ancak karasal lazer tarayıcılar, sadece statik bozulmalar için kullanılırken fotogrametrik metotlar ise dinamik bozulmalar için de kullanılabilir. Dinamik yapılardaki sapma ve bozulmaların ölçümünü sağlayan Range kameralar, zaman ilkesi veya ışık kodlu prensip ile ölçüm aralığı sağlamaktadır. Range kameralar beton kirişlerin tüm yüzeyine üç boyutlu olarak ölçüm yapabilmektedir. Range kameralar karasal lazer tarayıcılara göre daha küçüktürler bu sebepten dolayı kolay monte edilebilmektedir. Maliyet bakımından ise karasal lazer tarayıcılara göre daha düşük maliyettedir.

Bu nedenle, Range kameraların avantajlarına dayalı olarak, önerilen çalışma, bir laboratuvar da periyodik yüklere maruz kalan bir beton kirişin dinamik sapmasını izlemek için üç boyutlu Range kameraların kullanımına odaklanmakta ve yeni algoritmalar geliştirmektedir.

Molleda (2016) rayların üretimi sırasında ray kalitesinin ölçümü için lazer kameralar kullanan bir yöntem önermiştir [29]. Üretim sürecinde önemli aşamalardan biri standartlara uygun üretim yapmaktır. Ray üretiminin standartlara uygunluğunu doğrulamak amacıyla denetlemek gerekir. Bu sebeple, modern raylı sistemlerin üretim sürecini izlemek ve kontrol etmek için bir dizi yapay görmeye dayalı sistemler ile tasarlamak mümkündür. Yüksek kalitede mevcut standartlara uygun üretim gerçekleştirmeye olanak sağlamak için endüstriyel ortamlarda üç boyutlu görüntüleme ve görselleştirme teknikleri geliştirilmiştir. Bu makalede, rayların üretimi için yapay görmeye dayalı temassız kesit ölçüm sistemi sunulmaktadır. Önerilen yöntemi açıklayan bir şekil aşağıda görülmektedir. Şekil 1.9'da solda görüldüğü gibi rayların enine kesitlerini ölçmek için birçok lazer sensör ve kameralardan alınan bilgiler işlenerek ray kesitindeki hatalar tespit edilmektedir. Bu sistem, enine kesitlerin geometrik özelliklerine dayanarak çeşitli boyutlardaki rayların ölçümlerini sağlar. Ölçülen ray profilinin görüntüsü Şekil 1.9'da sağda verilmiştir. Boyuta bağlı olarak bir denetleme sistemi tasarlamak; ölçüm hacmi, güvenilirlik, doğruluk, tekrarlanabilirlik, çevresel konular, maliyet ve hesaplama hızı gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler sistemin donanım ve yazılım bileşenlerinde belirleyicidir. Bu sistem, diferansiyel geometrik algoritmaya bağlı olarak dört adımlı bir algoritma kullanarak desen çıkarmaktadır. İlk adımda elde edilen çizgiyi iyileştirmek için konvolüsyon işlemi yapılır. İkinci aşamada görüntünün her bir noktası için İkinci türeğe bağlı olarak her bir pikselin çizgi yönünü bulmak amacıyla kuadratik polinomu kullanılır.

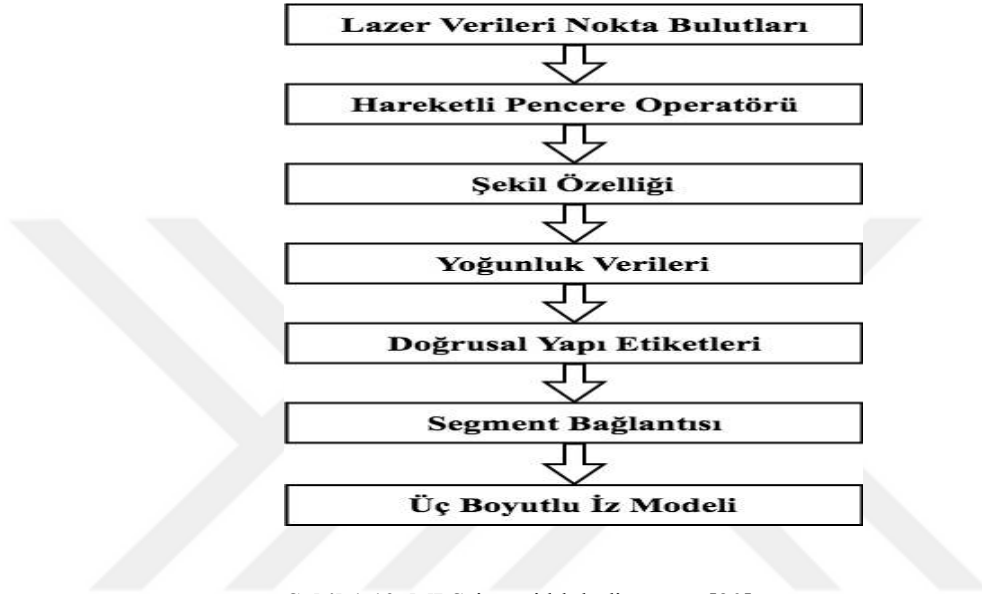
Son aşamada ise tek tek satır noktaları çıkarıldıktan sonra satırlara bağlanılmaktadır. Laboratuvar ve üretim tesislerinde gerçekleştirilen deneyler önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.



Şekil 1.9. Lazer algılayıcı ve kamera kullanan ray analizi uygulaması [29].

Bisheng (2014) mobil lazer tarama noktası bulutlarından üç boyutlu demiryolu izlerinin otomatik çıkarımı için bir yöntem geliştirmiştir [30]. Demiryolu raylarının, demiryolu işletimi, sistem güvenliği, tren hızı optimizasyonu, hareket davranışı ve yolcu konforu gibi çeşitli yönleri üzerinde büyük etkisi vardır. Rayların bakımını sağlamak ve demiryollarındaki bozulma veya güvensiz durumlardan kaçınmak için sık sık ölçüm yapılması gerekmektedir. Önerilen yöntemde demiryolu raylarının hem geometri bilgileri, hem de yoğunluk verileri kullanarak mobil lazer tarama noktası bulutlarında izleri tespit etmek için otomatik bir yöntem sunulmuştur. Demiryollarının hızlı üç boyutlu haritalanmasını sağlayan bir teknoloji olan mobil lazer tarama, geniş alan boyunca ayrıntıları, geçitli kabloların temizlenmesi, doğal engeller, tüneller ve köprüler boyunca ayrıntıları yakalamak için iyi bir araç sağlamaktadır. Önerilen yöntemin algoritma akışı Şekil 1.10'da görüldüğü gibi öncelikle demiryolu yatak alanlarının noktalarını ayıklaması ve daha sonra rayların geometrik şekillere ve rayların yoğunluk verilerine göre tespit edilmesi prensibine dayanmaktadır. Önerilen yöntemde demiryolları izlerini doğru bir şekilde çıkarmak için hem geometrik modelleri hem de yansıtma özellikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemden elde edilen verilerinden izlerin çıkarılmasının fizibilitesi gösterilmektedir.

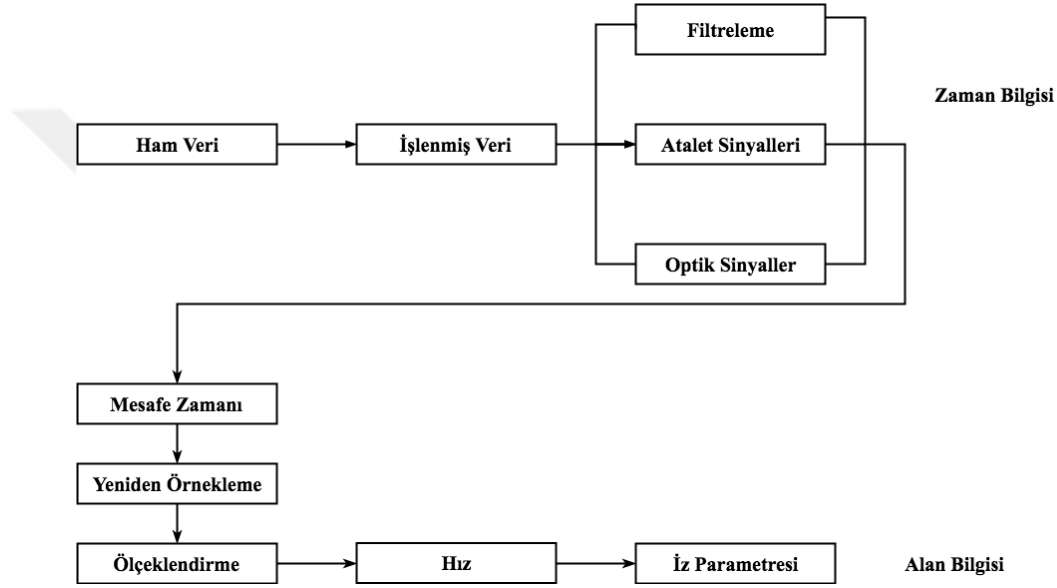
Önerilen yöntem, demiryolu izlerini doğru bir şekilde çıkarmak için hem geometrik modelleri hem de demiryollarının yansıtma özelliklerini kullanırken yoğunluk verileri de kırma taş balastı ve beton traverslerdeki izleri izole etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 1.10. MLSSistemi blok diyagram [30].

Kim (2009) *HSR-350x* adı verilen ray kontrol ölçüm sisteminin parametre özelliklerini kullanarak rayların denetimi için bir yöntem geliştirmiştir [31]. Günümüzde trenler gittikçe hızlanmaktadır. Trenler daha hızlı ilerledikçe, yüksek hızlı trenin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için demiryolunu düzenli olarak denetlemek ve bakımını yapmak gerekir. Yol düzensizlikleri, trenin çalışma davranışını, operatörün sürüşünü ve trenin güvenliğini etkileyebilir. Bu sebepten dolayı demiryolu düzensizliklerinin istenmeyen etkilerini önlemek için, rayın durumunu düzenli olarak denetlemek gerekir. Önerilen ölçüm sistemi lazerler, kameralar ve atalet araçlarından oluşmaktadır. Algılayıcılar, bojinin çerçevesine monte edilir ve birlikte hareket ederler. Ray ölçüm sisteminin blok diyagramı, Şekil 1.11’de verilmiştir. Sistem zaman bilgisi ve alan bilgisinden ayrılmıştır. İlk olarak, algılayıcıdan gelen ham veriler ve takometreden alınan mesafe verisi girilir ve bu veriler dahili senkronizasyon sinyali ile filtrelenir. Daha sonra zaman ayarlı veriler, zaman bilgisinden mesafe bilgisine yeniden örneklenir ve her bir iz parametresi hesaplanır ve çıktılır.

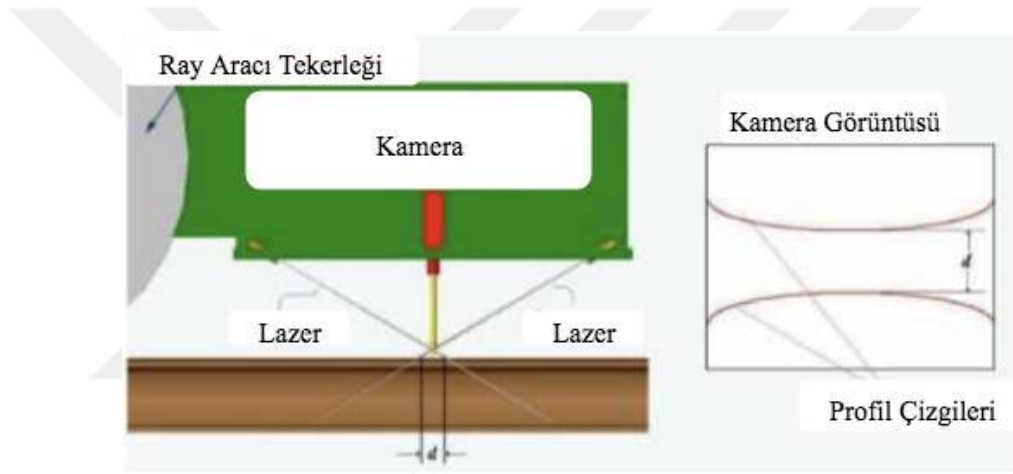
Önerilen yaklaşım yüksek hızlı bir ölçüm sistemi olan HSR-350x'e başarıyla yüklenmiş ve test çalışma sonucunu 300 km/s yüksek hızlı hat üzerinde analiz edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, ray düzensizlik ölçüm sisteminin performanslarını 300 km/s çalışabileceği görülmüştür. Bu ray düzensizlik ölçüm sistemi ticari hat üzerinde test edilmekte ve veriler HSR-350x ile biriktirilmektedir.



Şekil 1.11. HSR 350x ray ölçüm sistemi [31].

Arnold (2006) hareketli bir vagon kullanılarak dikey iz modülünün ölçülmesi için bir yöntem önermiştir [32]. Önerilen sistemin çalışma prensibi yol ve tekerlek / ray temas noktası arasındaki rölatif yer değiştirmenin ölçümlerine dayanmaktadır. Bu görelî yer değiştirmeyi ölçmek için lazer tabanlı bir görüş sistemi kullanılır. Daha sonra iz modülünü tahmin etmek için bir matematiksel model kullanılır. Sistem, iki satır lazeri ve vagon kamyonuna monte edilmiş bir kamera kullanan, temassız bir ölçüm sensörüdür. Şekil 1.12’de kamera görüntüsünden görüldüğü gibi, her bir lazer, ray başının üzerinde bir eğri oluşturur. Eğrinin tam şekli, rayın şekline bağlıdır. Eğriler arasındaki mesafe, görüntüleme yazılımı kullanılarak bulunur. Araç yolda ilerledikçe mesafedeki değişiklik, vagon ve ray arasındaki görelî yer değiştirmede bir değişikliği temsil eder (rayın şekli ve uygulanan yüklerin sabit olduğu varsayılarak). Bu nedenle, kamera ve ray arasındaki mesafe azaldıkça, ölçülen mesafede azalacaktır.

Kamera ve ray arasındaki mesafe arttıkça ölçülen mesafe d artacağından tam tersi de doğrudur. Ölçüm sisteminin çözünürlüğünü ve cihazın genel duyarlılığını arttırmak için iki lazer kullanılır. Bu sistemden elde edilen ölçümler, sistemin bir analitik modeli ve sistemin geometrisi kullanılarak bir iz modülü tahmini olarak haritalanmıştır. Ölçüm sistemi, dikey hat sapmasının gerçek zamanlı ölçümlerini doğrudan gerçekleştirebilir ve dolaylı olarak hareketli bir vagondan ray modülünü izleyebilir. Bu yer değiştirme ve modül veri örnekleri, bu tür bilgilerin bakım döngülerini daha iyi planlamak için kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 1.12. Dikey iz düşümlü ray arıza tespiti [32].

Judek (2016) raylı araçların teşhis muayene sisteminde ölçüm hatalarının analizi için bir yöntem geliştirmiştir [33]. Elektrikli raylı araçların rutin bakım işlemleri, üretim depolarında planlanan mesafe aralığına göre yapılır. Bir demiryolu ağının seçilmiş noktalarında yer alan uzaktan denetim sistemleri, güvenlik ve güvenilirlik açısından hayati önem taşıyan araç parametrelerini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Parametrelerin izlenmesi, çalışan araçlarda, çalışmalarında herhangi bir rahatsızlık olmadan gerçekleştirilir. Ayrıca, demiryolu hatları operatörlerinin kendi şebekelerinde çalışan araçların teknik durumunu anlamalarını sağlar. Uzaktan muayene sistemleri, araç tekerlekleri veya araç akım toplayıcıları üzerinde odaklanmaktadır. Çalışmada lazer tarama kontrol sistemindeki yükseklik ölçüm hatalarının değerlendirilmesi için bir yaklaşım sunulmuştur.

Bir lazer hattı üreticisi ve özel bir kameradan oluşan sistem, demiryolu taşıtlarının pantograflarının karbon temas şeritlerini (CCS) kontrol etmeye adanmıştır. Yükseklik ölçüm çözünürlüğü sistem parametrelerine göre kolayca hesaplanabilirken, ölçüm hatasının belirlenmesi birçok etkiden dolayı zahmetlidir.

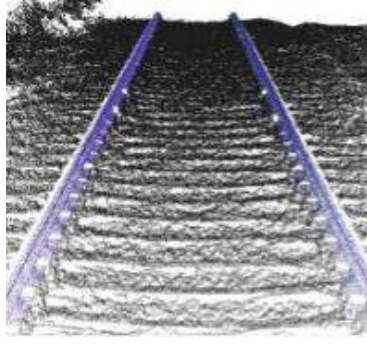
Taranan nesnenin genişlik-yükseklik oranı çok yüksek olduğundan, hata teşhisi için referanslarda uygulanan tipik desenler kullanılamaz. Uzaktan denetleme sistemleri, araç tekerleklerine veya araç akım toplayıcılarına odaklanır. Karbon temas şeritleri, çatlamış veya tırtıklı bir yüzey gibi aşınma ve tehlikeli hasarlar açısından değerlendirilmektedir. CCS arıza teşhisi için bir Lazer Tarama Muayene Sistemi (LSIS) önerilmiştir. Önerilen sistem Şekil 1.13'te verilmiştir. Sistem, CCS yüzeyinin üç boyutlu tarama verilerini elde etmek için özel bir kamera ve bir lazer hattı kullanır. Otomatik CCS için özel bir veri işleme algoritması uygulanmaktadır. Bu sistemde ki belirsizlikler, taranan yüzeye göre kameranın pozisyonuna, taranan nesnenin malzemesinin doğasına, renk, absorbans, pürüzlülük ve lazer ışınının doğrusal olmayan özelliklerine karşılık gelir. Bu, LSIS'nin yaklaşık 10 seviyeli ölçek kullanarak CCS minimal kalınlığını güvenilir bir şekilde tahmin etmesini sağlar. Sonuç olarak, LSIS, CCS aşınmasını değerlendirmek için gereklilikleri yerine getirmektedir.



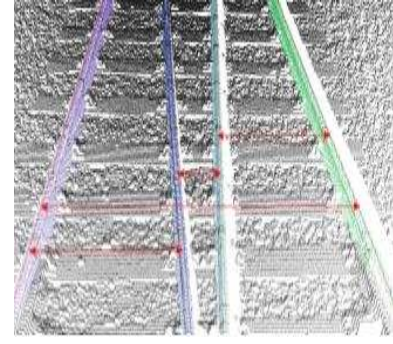
Şekil 1.13. Lazer tarama muayene sistemi [33].

Hackel (2015) demiryolu altyapısının üç boyutlu lazer tarama verisinde izleme ve algılaması için yeni bir yöntem geliştirmiştir [34]. Dünyanın her yerinde, trafik ağının hızını, güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için sürekli olarak demiryolu ağına talepler sürmektedir. Demiryolu işletiminin artan talebini karşılamak için yeni güvenlik sistemleri gerekmektedir. Demiryolu hatlarının güvenli çalışması için ray açıklığının ölçümü çok önemlidir. Hafifçe değişen parçalar ve izin verilen boşluğa uzanan küçük nesneler bile büyük hasara neden olabilir. Ayrıca, operatörler standart boyutlardaki demiryolu taşıtlarının ötesinde büyük boyutlu yüklemelerin açıklığı ihlal etmediğinden emin olmalıdır. Önerilen çalışma, üç boyutlu lazer tarama verilerinde parçaların ve bileşenlerinin saptanması için genel teknikler sunmaktadır. Bu teknikler, destek vektör makineleri gibi özellik tabanlı yöntemleri ve şablon eşleme gibi model tabanlı yöntemleri kullanır. Bu çalışmanın odak noktası raylar, paletler, kapatma rayları ve kurbağalar gibi altyapı elemanları için kullanılan sağlam ve hassas dedektörlerdir. Bu parçalar hem bakım hem de tren ile taşınan lokalizasyon için kullanılabilir. Modern trenle taşınan lokalizasyon sistemleri, trenin dünyadaki küresel konumunu ve trenin ray üzerindeki göreceli konumunu algılayabilen hassas ve güvenilir sensörler gerektirir. Bu nedenle, bu çalışmanın temel amacı, rasgele lazer tarama sistemlerinin ölçüm verilerinde raylar, ray açıklıkları gibi ilgili demiryolu altyapı unsurlarını tespit etmektir. Hatalar hayatları tehlikeye atabileceğinden, çok yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektirir.

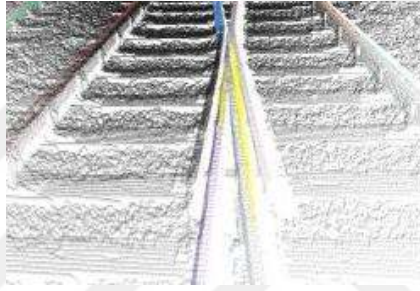
Önerilen sistem, üç boyutlu lazer tarama verilerinde demiryolu altyapı elemanları için yeni bir teşhis sistemidir. Böylelikle, uygun çözünürlük ve mesafe ölçümleri ile dönme açıları sağlayan herhangi bir lazer tarama sisteminden elden edilen veri kullanılabilir. Bu amaçla hem özelliklere hem de şablon eşleştirmesine dayanan rayları tespit eden sağlam bir ray dedektörü geliştirilmiştir. İkinci adımda, tespit edilen raylar, topolojik özellikler kullanılarak izleri tanımlamak için kullanılmıştır. Çıkışların tespiti için kurbağaların yanı sıra kapatma rayları kullanılmaktadır. Kurbağalar geometrik özellikler kullanılarak bir destek vektör makinesi ile tespit edilirken rayların topolojisi kapatma raylarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Önerilen sisteme ait görüntüler Şekil 1.14' te gösterilmektedir.



a) Lazer kamera ile elde edilen nokta bulutları



b) Raylar arasındaki mesafenin karşılaştırılması



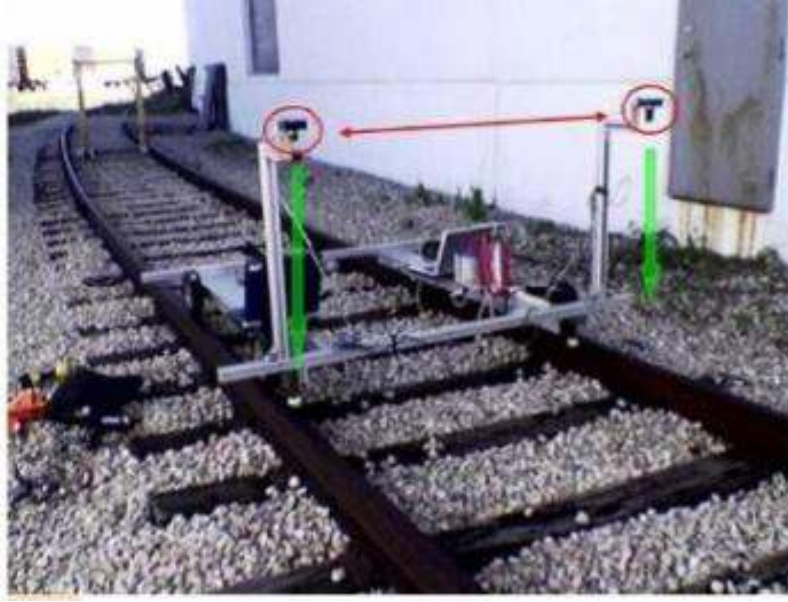
c) Merkezde bir kurbağa, sol ve sağ taraftaki rayları olmak üzere kurbağaların merkezi olarak algılanan noktalar sarı çizgiler ile işaretlenir.

Şekil 1.14. Demiryolu altyapı denetimi için lazer kameralı muayene sistemi [34].

Babenko (2013) demiryolları raylarının bilgisayar görmesine dayalı denetlenmesi için bir yöntem önermiştir [35]. Demiryollarında yaşanan kazaların çoğu ray geometrisi, ray bağlantı elemanlarında kaynaklanan bozukluklardan oluştuğu tespit edilmiştir. Genişleyen demiryolu ray ağının bakımı, zaman ve çaba için büyük bir yatırım gerektirir. Çalışmada verilen istatistiklere göre 1995-2003 yılları arasında ülke çapında (ABD) 45.842 denetleme yapılmış ve 216.100 hata kaydedilmiştir. Sistemin testi için, tren yolu üzerinde kendinden hareket eden bir test aracı geliştirilmiştir.

Tasarlanan test aracı Şekil 1.15'te görülmektedir. İki endüstriyel lazer mesafe tarayıcı, her bir ray üzerinde doğrudan arabaya monte edilir. Tarayıcılar, raya dik olarak yerleştirilir ve bunların birlikte hizalanması ölçülmektedir. Bu tarayıcılar, saniyede 200'den fazla veri üretebilmesine karşın endüstriyel gereksinimlere göre, bu tip sistemler, ray başına en az bir ölçüm üretmelidir.

Ray ölçüsünü bulmak için kullanılan sistemde ölçülen sinyalde (gürültü) belirsizliklere sahip olması kaçınılmazdır. Sistem, her mesafe ölçümü için yaklaşık $\pm 0,5$ inç gürültüye karşılık gelir. Önerilen çalışmada, ray ölçülerinin ölçülmesi için bilgisayarlı görsel yöntemlerini geliştirilmiş ve demiryolu raylarında yapısal hataların güvenilir bir şekilde tanımlanmasını ve lokalizasyonunu sağlamıştır.



Şekil 1.15. Ray üst yüzeylerinin lazer kameralarla dikey olarak muayene edilmesi [35].

[36] numaralı çalışmada, sabit yapı demiryolu transit raylarının periyodik muayenesi ve bakımı için bir standart oluşturması hedeflenmiştir. Çalışma, güvenli ve güvenilir çalışmayı etkileyen bileşenlerin periyodik görsel, elektrik ve mekanik denetimlerini içerir. Bu standart ayrıca, demiryolu geçiş sistemi çalışanları veya periyodik muayene ve bakım görevlerini yerine getiren yükleniciler için gerekli nitelikleri de tanımlar. Bu standart, demiryolu taşıma sistemlerine sahip veya işletme kuruluşları için geçerlidir. Bu standardın amacı, rayların güvenli bir şekilde çalışıp çalışmadığını ve periyodik muayene ve bakım ile tasarlandığından emin olmak, böylece güvenilirliği arttırmak ve tehlike ve arıza riskini azaltmaktır.

Alemi (2017) demiryolu tekerleği arızalarının tespiti için durum izleme yaklaşımları önermiştir [37]. Demiryolu operatörleri ve sahipleri, trenlerin ve altyapıların gerçek zamanlı koşullarını bilmek isterler. Tekerlek gibi kritik bileşenlerin beklenmedik bir şekilde arızalanması normal işlemleri bozar ve en kötü durumlarda deramenasyonu engeller.

Bu nedenle, tekerleklerin hizmet içi izlenmesi son yıllarda pek çok araştırmaya konu olmuştur. Tekerleğin hizmet içi denetimi, araç içi ve yol kenarı ölçümleri olarak kategorize edilebilir. Yerleşik ölçüm, trende sensörleri monte eden yöntemler anlamına gelir.

Sistem sürekli ve kapsamlı veri sunmasına rağmen montaj, uygulama ve bakım açısından doğası gereği karmaşıktır. Diğer yandan, yol kenarı yaklaşımları, raylara ve etrafındaki alanlara sensörler yerleştirilerek tekerlek özelliklerini ölçmeye çalışır. Bu dolaylı ve süresiz ölçümler, tek bir sensörle birden fazla treni ve tekerleği izleyebilirken, tekerlek durumu hakkında sınırlı bilgi verme eğilimindedir. Bu bölümde, araç içi ve yol kenarı ölçümleri için mevcut ölçüm teknikleri gözden geçirilmiştir. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre izleme sistemlerinin periyodik muayenede özel bir rolü vardır. Bu nedenle, doğruluğu arttırmak ve çoklu denetimlerde harcanan zamanı azaltmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, alt yüzey arızalarını izlemek için gelişen yol sistemleri hala gereklidir. Ayrıca, tren hızının, tren ağırlığının ve yol ölçüm verisine yansıyan yüzey arızalarının tipi ve ciddiyetinin etkilerini değerlendirmek için daha fazla benzetim ve ölçüm gerekmektedir.

Zuspan (2013) demiryolu transit takip uygulamaları için Amerika da faaliyet gösteren 34 demiryolu ulaşım acentesinden 29 tanesinin işbirliği ile bir teorik çalışma gerçekleştirmiştir [38]. Çalışmaya göre, gezilerin neredeyse yarısı, transit raylı sistemler ile gerçekleştirilmektedir. Bu gezilerin her biri, faaliyetin doğası gereği, hareket halindeki büyük araçlar nedeniyle doğal riskler arz eder. Bu riskleri en aza indirmek için, her bir kurumun denetim kriterlerini veya standartlarını geliştirmesi ve bunlara uyması gerekir. Genel olarak, her transit acentesinde birkaç katılımcı, raylar, araçlar, istasyonlar, sinyaller, köprüler, vb. kontrol ve bakım için güvenlik standartlarını geliştirir ve uygular. Bu sentez, transit acentelerinin yol arızalarını ve şiddetlerini nasıl değerlendirdiğini ve bu hataların sayısı ve ciddiyetinin izin verilen hız ve güvenlik açısından tren operasyonlarını nasıl etkilediğini belgelemektedir.

Kohut (2012) ray açıklık ölçüm sistemi prototipi amaçlı bir çalışma önermiştir [39]. Demiryolu yapı açıklıklarının ölçülmesi, çeşitli ölçüm sistemleri kullanılarak dünyanın her yerinde gerçekleştirilen pratik bir sorundur. Ölçüm, esas olarak, herhangi bir yapının (ör. bir bina) geçemeyeceği alan sınırlarını göstermeyi amaçlamaktadır. Çalışmada belirli sistemlerin kusurlarını ve avantajlarını ortaya koymakta ve kullanılan ölçüm ekipmanının teknolojik bir özetini sunmaktadır.

Literatürden ve daha önceki testlerden elde edilen deneyimlere dayanarak, Krakov'daki Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde, Polonya'da bir demiryolu açıklığı ölçüm sisteminin inşasına devam edilmesi yönünde bir karar alınmıştır. Sözü edilen üniversitede inşa edilen ray açıklıkları ölçüm sisteminin prototipi üzerinde bir araştırma sunulmaktadır. Bir flatcar ve dijital kameralara takılı lazer tarayıcılar bu sistemin kalbini oluşturur. Sistemin tabanı, verileri sürekli olarak yakalayan tarayıcıları ve dijital görüntüleri veren fotogrametrik kameraları içerir. Açıklık ölçümleri, ölçüm sisteminin tren yolu üzerindeki seyri esnasında statik olarak veya dinamik olarak gerçekleştirilebilir. Bu makalenin yazarları şu anda bir proje yürütmekte ve görevlerinden biri de bu sistemin bir prototipini geliştirmektir. Yazarlar mevcut sistemleri gözden geçirmiş ve daha sonra, incelenen ve test ölçümleri için iki yaklaşım önermişlerdir. Gerçekleştirilen deneylere dayanarak, projenin sonraki aşamalarında test edilmek üzere bir flatcar ve bir prototip önermişlerdir. Sistemin 100 km/s azami hıza sahip bir demiryolu motoru tarafından çekilen, bir flatcar'a kurulmuştur. Test edilen ekipmanın doğası gereği, ölçüm sistemlerinin demiryolu motorunun arka kısmına yerleştirilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Önerilen yaklaşım, aşağıdaki avantajları sunar:

- Standart bir demiryolu rayı kullanmak mümkündür, veri kontrol ve kayıt sistemleri, tarayıcı sistemi, georeferential sistemi ve fotogrametrik sistem, flatcar'a, karşılıklı düzenlemelerinin varyant modlarını uygulayarak kurulabilir.
- Ray izi eksenine göre çapraz olarak yapılan tarama, neredeyse tam 360° profillerde gerçekleştirilebilir (Tarama-fotogrametrik sistemin demiryolu motorundan önce monte edilmesi durumunda, diyagonal tarama 0-180° profillerinde gerçekleştirilir).

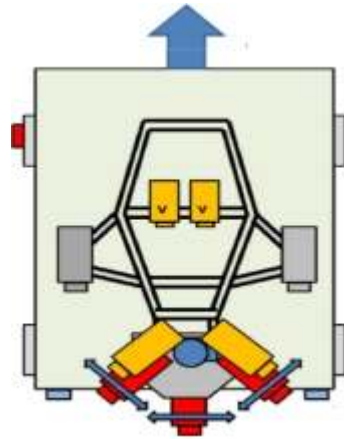
Çeşitli sistemler tarafından sunulan ölçüm doğruluğunu karşılaştırmak için, yazarlar iki bağımsız yöntem kullanarak ayrı ayrı ölçümler gerçekleştirmiştir: Şekil 1.16'a (bir faz tarayıcısına göre): Seyahat yönüne dik bir tarayıcı profili, Şekil 1.16'b (darbe tarayıcılarına göre):iki diyagonal yönde ve fotogrametrik kameralarla entegre edilmiştir.



a) Flatcar'ın tek bir profil tarayıcısına ait şematik diyagramı



b) İki diyagonal tarayıcıya sahip flatcar'ın şematik diyagramı



c) Flatcar ölçüm modeli

Şekil 1.16. Flatcar ray muayene yaklaşımı [39].

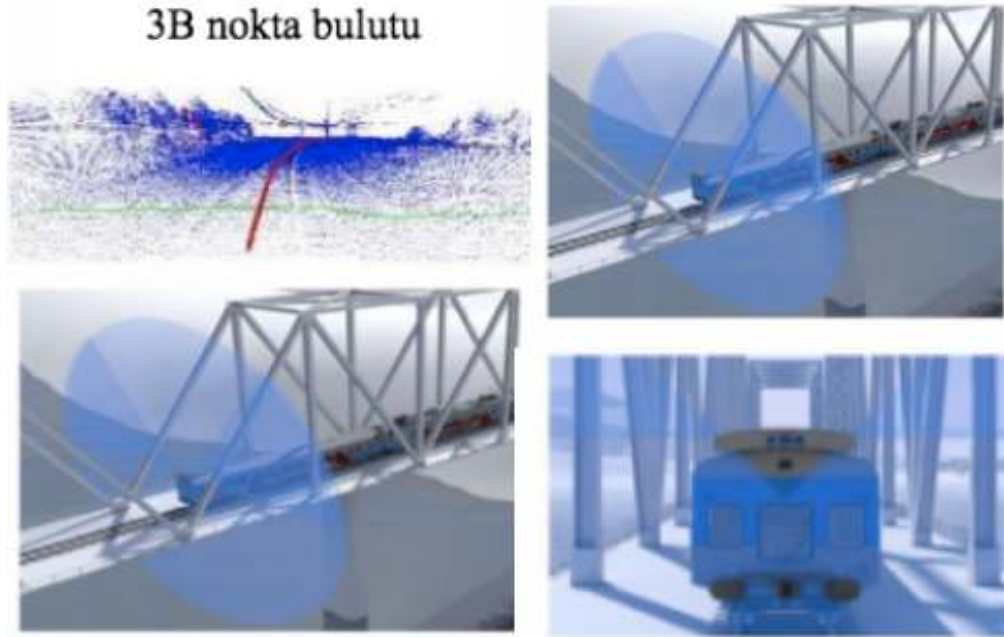
Saha ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ve bir ön kavramın geliştirilmesi, ölçüm sistemi prototip modelinin tanımlanmasına yol açmıştır. Sistemin aşağıdaki birimleri içermesi gerektiği kabul edilmiştir: Bir tarayıcı modülü, bir görüntü modülü, GNSS / AÖB kayıt modülü, ray profil verilerinin hassas bir şekilde kaydedilmesi için bir depolama birimi.

Çalışmanın amacı, Polonya'nın Cracow kentindeki AGH Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nden, demiryolu izinlerini ölçmek için bir flatcar prototipinin inşası projesi kapsamında bir araştırma ve geliştirme ekibinin yaptığı araştırma çalışmalarının sonuçlarını göstermektedir. Projede öncelikle mevcut sistemlerin bir incelemesi yapılmıştır. Ön literatür araştırmasına dayanarak, belirli yöntemlerin dezavantaj ve avantajlarını test etmek için iki farklı ölçüm sistemi seçilmiştir. Veri analizi ve kalitelerinin incelenmesinden sonra, belirli sistemlerin dezavantaj ve avantajlarının gösterilmesini amaçlayan bir özet hazırlanmış ve en iyi çözümün her iki çözümü bir araya getiren bir melez model olacağı sonucuna varılmıştır. Deneyimler, görüntülere bakmanın, emek yoğunluğuna ve boşluk alanına giren nesneleri ihmal etme olasılığına bağlı olarak fotogrametrik teknolojinin en zayıf tarafı olduğunu göstermektedir.

Bakhrakh (2014) lazer tarama sistemleri ile demiryolu güvenliği ve bakım problemlerinin çözümü için bir çalışma önermiştir [40]. Demiryolları, erozyonun veya diğer çevresel değişikliklerin rayları güvensiz hale getirmediklerinden emin olmak için önleyici teşhis değerlendirmeleri gerektirir. Yapı ölçüleri, raylar arasındaki mesafe, ray yatağı stabilitesi ve balast yatağı profili, bir paletin tüm uzunluğu için ölçülmelidir. Böyle bir görev hızlı veri toplama, hızlı analiz ve hızlı yanıt gerektirir. INFOTRANS şirketinin sahibi Alexander Bakhrakh öncelikle demiryolu altyapısı teşhisine yönelik çeşitli yaklaşımları incelemiştir. Bu örneklerde, hangi tarama teknolojisinin demiryollarında bulunan sorunlara en optimum yöntem olduğu ve akıllı tarama yöntemleriyle birlikte stratejik taramaların neden yüksek yoğunluklu nokta bulutları oluşturmak için pahalı tarayıcılara güvenmeden etkili bir teşhis oluşturduğunu göstermektedir. Her demiryolunun belirli sorunları var. Trenler raylardan çıkabilir. Demiryolu hatları çökebilir. En iyi ihtimalle, bu problemler para kayıplarına ve gecikmelere neden olur. Sorunlar elbette ölçülemeyen insan kayıplarına da neden olabilir. Yaygın dört durum, pistlerde sorunlara neden olabilir: parça geometrisinin yanlış bir durumu, ölçü aletlerinin yanlış bir ilişkisi, alt tabakaların kararsızlığı ve balastın kararsızlığı. Yanlış yol geometrisinin belirlenmesi uzun bir süre için otomatikleştirilmiştir ve genellikle çözülmüş bir problem olarak kabul edilir.

Bu sorunları adaptif olarak çözmek için INFOTRANS şirketi lazer taramaya dayalı bir uzaysal tarama sistemi tasarlamıştır. Bu sistem, ERA olarak adlandırılan çok işlevli bir ölçüm sisteminin bir parçasıdır. Bu sistemin çalışması için birkaç temel gereksinime ihtiyaç vardır, Bunlar: Yapı göstergelerinin ihlalinin otomatik olarak tanınması, kararsız alt grupların otomatik olarak tanınması ve dengesiz balast yataklarının otomatik olarak tanınmasıdır.

Tren çarpışmalarının ve gecikmelerin bir nedeni göstergelerle ilgili problemlerdir. Her ülke, bu tür çarpışma sorunlarını önlemek için ana bir açık taslak standardına sahiptir. Parçaların ana hatlara bağlı olduğundan emin olmak için, üç veri noktalarını ölçen ölçüm sistemleri kullanılabilir. Bu ölçümlerin pistin koşu yüzeyi ve dikey merkez çizgisi ile ilişkili olması gerekir.

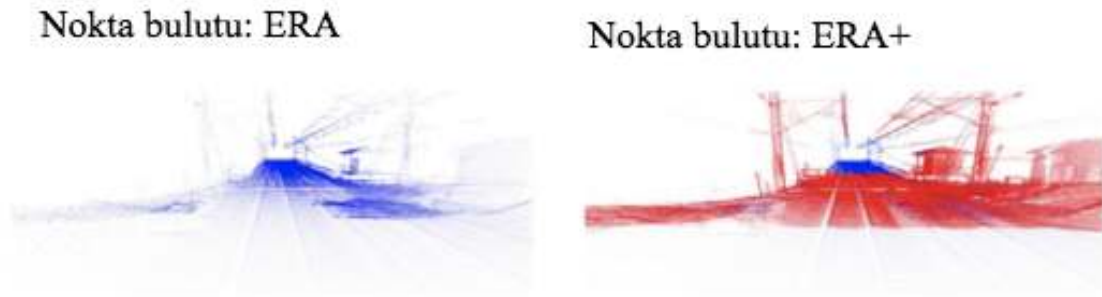


Şekil 1.17. INFOTRANS lazer tarama sistemi [40].

Şekil 1.17’de birkaç örnek noktadan görülebileceği gibi, mutlak koordinat sistemi ile çalışma yüzeyi ve ray merkez çizgisi ile ilgili olan koordinat sistemi arasında bir fark vardır. Bu sistemde, bir şey nokta koordinatlarını alarak ölçü kılavuzlarını ihlal ederse doğrudan tespit edilebilmesi hedeflenmiştir.

Altyapı tanılamadaki diğer önemli bir gereksinim, gösterge kılavuzlarının kritik ihlallerine gerçek zamanlı yanıt vermektir. Bunu başarmak için bitişik ray merkezini ve raylar arasındaki mesafeyi ölçmenin bir yolunu bulmak karmaşık bir yaklaşımdır. Bunu gerçekleştirmek için önerilen algoritma bir model tarama ilkesine sahiptir; tarayıcı belirli açılarda bir merkez noktasından mesafeleri ölçmek üzere ayarlanmıştır. Bu yaklaşımla, bir tren sadece bir tarama sistemini kullanabilir ve sorunu çözmek için bir ataletsel ölçüm birimine gerek duymaz. Bu ray güvenlik parametrelerinin her birine uyum sağlayabilecek bir tarama sistemi nispeten düşük maliyetli olabilir. Tarayıcılar yüksek çözünürlük gerektirmemekle birlikte, Rusya'daki trenlerin yaşadığı zorlu çevre ve sert hava koşulları göz önünde bulundurularak iyi bir korumaya sahip olmaları gerekmektedir.

Demiryollarının lazerle taranmasının temel amacı sadece değerleri ölçmek değil, aynı zamanda operatörleri bilgilendirmek, bakım personeli ve trafik denetleyicilerini bulunan tüm ihlaller hakkında takip etmektir. Dolayısıyla, bir operatörün iş istasyonu kurulmuş ve her bir tarayıcı araca yazılımla bağlanmıştır. Bu şekilde operatör, diğer sistemlerden gelen sinyaller ile ölçülen tüm sinyalleri gerçek zamanlı olarak görebilir. İşlem sonrası süreçte daha fazla bilgi istatistiklerde toplanabilir. Sistemin kalitesini iyileştirmek için yüksek performanslı, yüksek çözünürlüklü bir tarayıcı kullanılmıştır. Bir demiryolu bölümünün verileri, INFOTRANS ERA sistemiyle toplanmış ve yüksek performanslı, yüksek çözünürlüklü bir sistem olan Lynx tarafından toplanan aynı bölümün verileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 1.18).



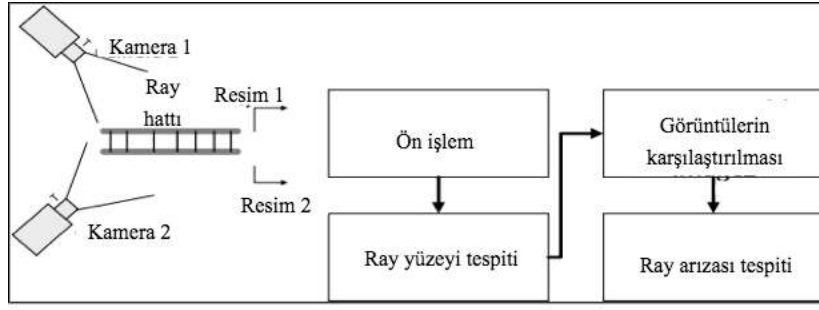
Şekil 1.18. INFOTRANS lynx veri toplama [40].

Yüksek performanslı sistemin üç boyutlu verilere ait nokta bulutları çok fazla ayrıntı içermektedir. Aynı zamanda sistem maliyetini de yaklaşık 10 katına çıkarmaktadır. Tarama teknolojisini demiryolu araçlarına entegre etmek, demiryolu güvenliği ve bakımındaki en tehlikeli sorunların önlenmesine yardımcı olabilir. Dikey bir planlamayı amaçlayan tarayıcılara sahip iyi donanımlı bir araç, demiryolu işçilerini gerçek zamanlı olarak bildirirken engelleri, dengesiz eğimleri ve diğer potansiyel riskleri tespit edebilir ve kaydedebilir.

Rizvi (2017) görüntü işleme teknikleri ile demiryolu hattındaki çatlakların algılanması için bir yaklaşım sunmuştur [41]. Bilgisayar görmesi, demiryolu hat denetiminin manuel yöntemlerine göre birçok potansiyel avantaj sağlayabilir. İnsanlara uygun olmayan işlerde ölçeklenebilir, hızlı ve uygun maliyetli çözümlere izin verdiğinden, bilgisayar görmesine dayalı endüstriyel sistemler sayesinde yapılan denetim, büyük performans seviyeleri elde etmek için kullanılır.

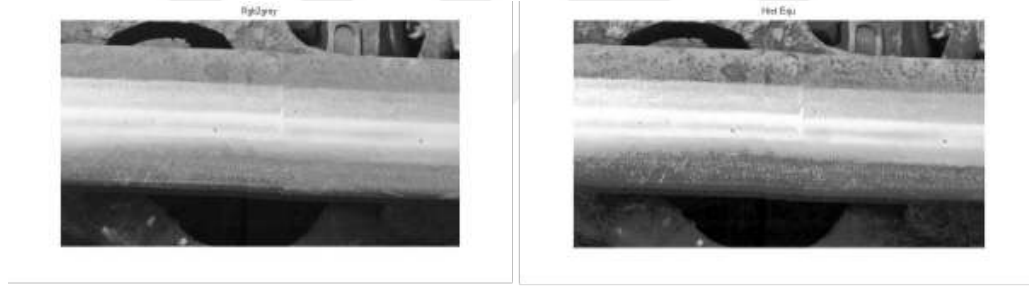
Raylı sistem bileşenleri sistemdeki yorgunluk veya insan denetimlerine özgü öznellikten etkilenmediği için nesnel ve niceliksel olarak denetlenebilir. Önerilen çalışmada bilgisayar görmesi tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Demiryolu hatlarının görüntülerini periyodik olarak çekebilen ve arızalı olmayan ray görüntülerini mevcut veritabanıyla sürekli olarak kıyaslayabilen bir sistem önerilmiştir. Demiryolu üzerinde bir arıza ortaya çıkarsa, sistem arızayı otomatik olarak algılayacak ve herhangi bir kazaya yol açmamak için gerekli önlemleri alacaktır. İstatistiğe göre, demiryolu taşımacılığının kazası esas olarak taşıt arızalarından, yol arızalarından, ray üzerinde görülen engellerden, insan tıkanıklığından, vandalizmden, sinyal sistemleri arızalarından, vb. çeşitli sebeplerden kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın ön işlem adımında ray hattından elde edilen görüntü üzerinde görüntü iyileştirmesi yapılmıştır. İyileştirilmiş ray resmi üzerinde raylarda tespit edilen arızaları tanımak için Gabor filtre kullanılmıştır. Daha sonra raylı yüzeyler Canny kenar dedektörü ve Hough dönüşümü yapılarak yeni bir görüntü elde edilmiştir. Ardından seçilen eşik değere göre görüntü noktaları üzerinde bir nokta eleme operasyonu yapılarak çatlaklar teşhis edilmiştir. İki kameradan çekilen resimlerdeki ray yüzeyleri, ray yüzeyindeki hayal kırıklıklarını tanımak üzere birleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın blok diyagramı Şekil 1.19'da verilmiştir.



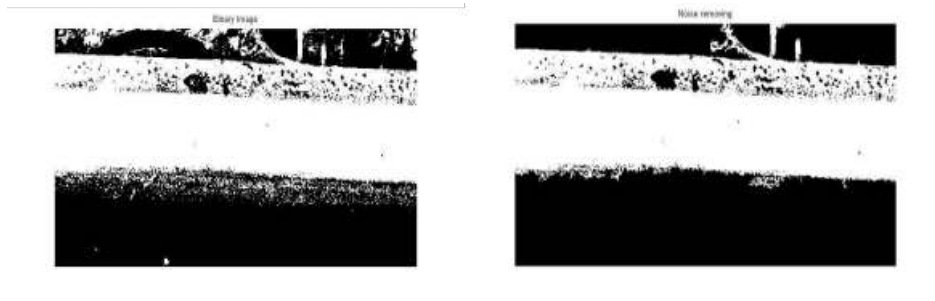
Şekil 1.19. Ray hattı çatlak tespiti için önerilen yöntem [41].

Şekil 1.20 solda gri dönüşümden sonraki sonucu göstermektedir, sağda ise görüntüyü iyileştirmek için histogram iyileştirmesi adımıyla elde edilen görüntüyü göstermektedir.



Şekil 1.20. Önerilen yaklaşıma ait histogram iyileştirmesi [41].

Bir sonraki adım parça resmini ikili forma dönüştürmektir. Şekil 1.21’de solda ikili dönüşüm yapılmış görüntü ve sağda gürültü giderildikten sonra ikili görüntüyü gösterir.



Şekil 1.21. Önerilen yaklaşımda ikili görüntü elde etme ve ardından gürültü kaldırma [41].

Görüntüde mevcut herhangi bir gürültüyü çıkardıktan sonra, tam parça görüntüsünü elde etmek için görüntüde görünen delikler (siyah noktalar) eşik değeri seçimi ile giderilir. Görüntü içindeki nokta komşuluk değerlerine göre segmente edilir ve belirli bir eşik değere dayalı olarak demiryolu yolundaki çatlak Şekil 22.'de olduğu gibi teşhis edilmiş olur.

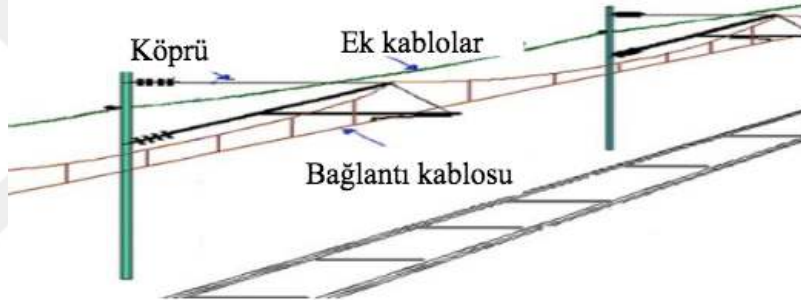


Şekil 1.22. Eşik değeri karşılaştırma sonrası elde edilen ray görüntüsü [41].

Bu çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak demiryolu raylarındaki çatlakları teşhis etmek için bir yöntem sunulmuştur. Metot, otomatik muayene ile palet bölümünün manuel muayenesinin yerine geçmektedir. Parça bölümünün görüntülerini çekmek için parçanın ayrı bölümlerine bir video kamera yerleştirilebilir ve daha sonra iz bölümündeki çatlakları teşhis etmek için önerilen sisteme girilebilir. Bu, çatlakları hemen teşhis etmeye ve herhangi bir yanlışlığın olasılığını azaltmaya yardımcı olacaktır. Sistem otomatik olacağından ve daha az manuel müdahale gerektireceğinden en yüksek verim sağlanabilir.

Wang (2017) yüksek hızlı demiryollarında katener bileşeni için görsel muayene yaklaşımı sunmuştur. Hızla gelişen teknoloji ile makine öğrenmesi ve görsel denetim teknikleri, yüksek hızlı demiryollarına katener incelemesinde uygulanmasını mümkün hale getirmiştir [42]. Görsel denetim sistemleri geliştirilerek yüksek çözünürlüklü görüntüler ile katener bileşenlerinin durumunu kontrol etmek mümkündür. Arızaların otomatik olarak tanınması çok önemlidir çünkü görüntü sayısı tek tek elle kontrol edilmek için çok büyüktür. Katener, trenler için güç sağlayan yüksek hızlı demiryolları boyunca ana altyapılardan biridir. Katener durumunu kontrol etmek için düzenli denetimler yapılmalıdır. Bilgisayar görüşünün hızlı gelişimi ile, muayene işlemlerine makine görmesi ve görsel inceleme teknikleri uygulanmıştır.

Önerilen çalışma veri toplama, eğitim ve test aşamalarından oluşmaktadır. Veri toplama, yapım aşamasında olan tipik bir demiryolu hattında gerçekleştirilmiştir. Bir yerinde veri toplama sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiş ve farklı tipte arızalar önceden farklı katener bileşenleri üzerinde elle yapılmıştır. Son olarak, bir görsel denetim veri tabanı başarıyla oluşturulmuştur. Katener, Şekil 1.23'te gösterilen kontak teli, dirsek, ek tel ve asılı direklerden (tünellerde) oluşur. Büyük ölçüde değişiklik gösteren, farklı katener bölgelerinde çok sayıda bileşen vardır. Veri toplama sistemi, yapım aşamasında demiryolu hatlarında çalıştırılabilen katener bakım merdivenlerine (Şekil 1.24) dayanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 1.23. Katener yapısı [42].



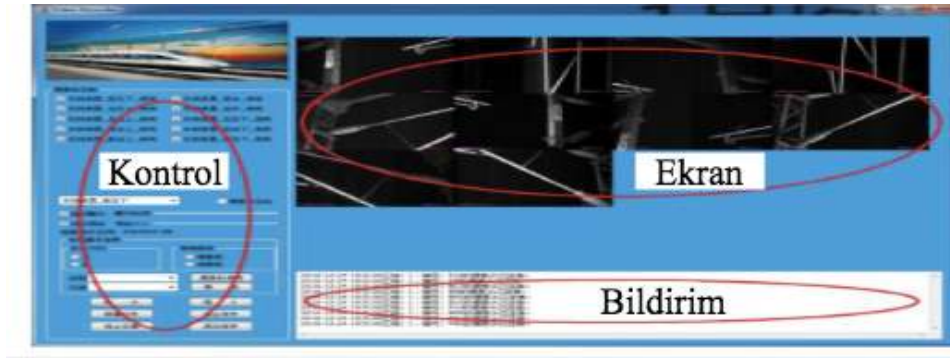
Şekil 1.24. Katener bakım merdiveni [42].

Çalışmada 18 süper yüksek çözünürlüklü kamera, 29 megapiksele kadar görüntü çözünürlüğü ile farklı görünüm yönlerinde katener bileşenlerinin ayrıntılı görüntülerini yakalamak için kullanılır. Şekil 1.25'te katener sistem bileşenleri verilmiştir. Şekil 1.26'da ise kullanıcı arayüzü görülmektedir.

Görüntüler alınırken uygun mesafede iki adet lazer radarı kullanılmaktadır. Kamera ile doğrulama, lazer radarı ile mesafeyi ölçme planlanmıştır. Kamera kontrol ünitesi ve ışık kontrolü vardır. Bunlar güç kaynağı ile desteklenmektedir. Kontrol ünitesinden lazer sinyal işleme sorumludur. Son alınan görüntü veri toplama ve depolama, veri toplama sunucusu tarafından yönetiliyor ayrıca sürekli güç kaynağı sağlamak için güç kaynağı sistemi kullanılmaktadır.



Şekil 1.25. Kamer sistem bileşenleri [42].



Şekil 1.26. Katener sistemi kullanıcı ara yüzü [42].

Veri toplama işlemi, yapım aşamasında olan tipik bir yüksek hızlı trenin seçilmiş bazı bölümlerinde gerçekleştirilmiştir. Düz çizgiler, kıvrımlar, istasyonlar, tüneller dâhil edildi ve veri tabanının bütünlüğünü sağlamak için işlemler hem gündüz hem de gece yapılmıştır. Yüzlerce farklı türde arıza önceden farklı türde katener bileşenlerine manuel olarak elle yapılmıştır. Yüksek çözünürlüklü görüntü verileri, hem gündüz hem de gece boyunca hem arızalı hem de sağlıklı olarak etiketlenmiş ve kaydedilmiştir. Önceden yapılmış arızalar, katener güvenliğini ve kalitesini garanti etmek için eğitim aşamasında kullanılmıştır. Şekil 1.27’de solda el ile hata yapma işlemlerini göstermektedir ve sağda ise veri toplama gösterilmektedir.



a) Katener sistem üzerinde arıza oluşturma



b) Katener sistem eğitim için veri toplama

Şekil 1.27. Katener sisteme ait saha çalışmaları [42]

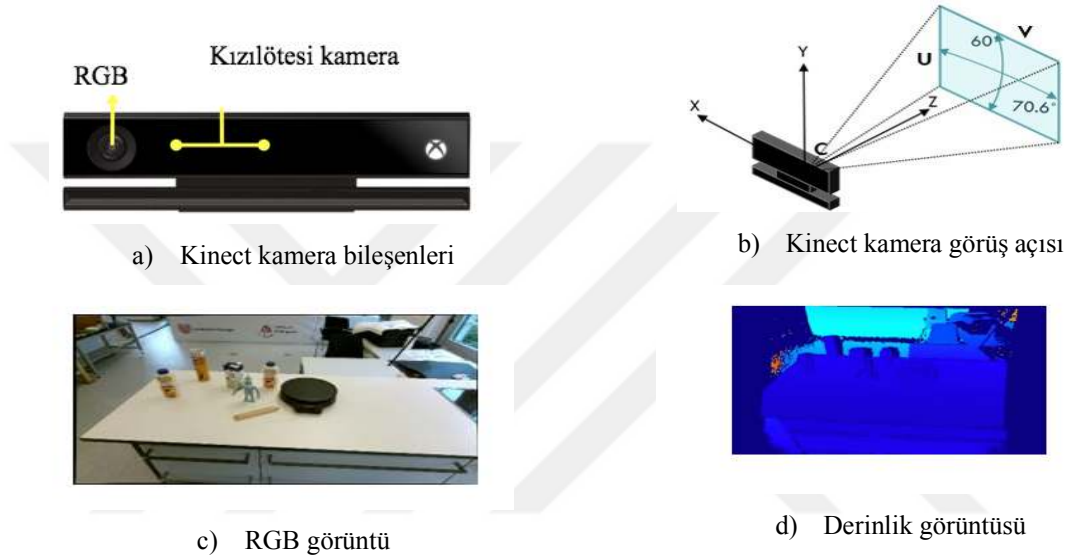
Siddiqui (2015) doktora tezi olarak gerçekleştirilen çalışmada RGB-D profillemeye dayalı yeni bir muayene metodu geliştirilmiştir [43]. Önerilen çalışma bir doktora tezi olarak demiryolu endüstrisi için RGB-D profillemesine dayalı bir inceleme yöntemidir. Bu sistem gözlemlerin renk ve geometrik bilgisini üretmek için RGB-D kameraları kullanmaktadır. Her iki taramanın da aynı gözlemden bilgi içermesi gerekmekte ve her ardışık tarama sonucunda bir harita oluşturulmaktadır. Çift yönlü kayıt olarak bilinen bir teknik kullanılarak, bu ardışık taramalar arasındaki hatalar hata minimizasyonu algoritmaları kullanılarak en aza indirilmektedir. Bu yaklaşım geçmiş haritaları yeni taramalarla kıyaslayarak harita tabanlı bir tanımlama tekniği ortaya koyar. Bunu yaparken de hesaplama süresini azaltmış olur.

Bu yaklaşımın etkinliği demiryolu arızalarını teşhis etmek için birden fazla RGB-D kamera kullanan bir sistem geliştirilerek gösterilmektedir. Demiryolu denetimi demiryolu endüstrisinin ilk yıllarından beri önemli bir konu olmuştur. Demiryolu kazalarının çoğunluğu insan denetimiyle teşhis edilemeyen arızalardan kaynaklanmaktadır. Milimetrik hataların nicel olarak analiz edilmesinde de insan denetimi yetersiz kalmıştır. Düzensiz hava koşulları ve uzun süreli kullanım da rayları yıpratmaktaydı aynı zaman da rayların yakınındaki gelişmiş bitki örtüleri yol için engel teşkil etmektedir. Literatürde bu tür arızaları teşhis etmek için bilgisayar görmesine dayalı muayene yöntemleri geliştirilmiştir. Lazer çizgisi taraması gibi inceleme yöntemleri kullanılarak geometrik varlıkların nicelleştirilmesi sağlanmıştır.

Önerilen tez çalışmasında, RGB-D profillemesine dayanan uygun maliyetli bir muayene yöntemi sunulmaktadır. Her ne kadar literatürde geometrik varlıkları ölçmeye ve renk bilgisini çıkarmaya yarayan yöntemler olsa da ikisini bir arada yapan ucuz bir yöntem bulunmamaktadır. Bu yöntemin hedefleri; Büyük ve küçük değerleri ölçmek için bir harita yöntemi oluşturulması, Birden fazla sensör kullanılarak sistemin geliştirilmesi ve harita tabanlı bir tanımlama yaklaşımı kullanılması, Harita oluşturma yönteminin diğer alanlara uygulanması şeklindedir.

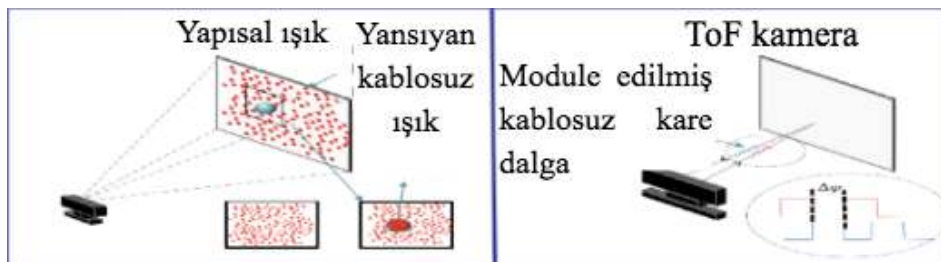
Demiryolu ve yol endüstrisinde kullanılan geçmiş muayene yöntemleri arasında görüntü işlemeye dayalı [44], eddy current [45], ultrasonik [46], birleştirilmiş eddy current ve ultrasonik [47], manyetik [48], bilgisayar görmesi temelli [49] ve lazer çizgi taraması [50] gibi denetim yöntemleri bulunmaktadır. Açıklanan her tekniğin prensipleri ile avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Bilgisayarlı görme yöntemleri gibi yeni ortaya çıkan yöntemler, görüntü işlemeye dayalı arıza teşhis etmeye ve sınıflandırmaya olanak vermektedir. Ancak geometrik bilgiyi üretemez. Lazer çizgi taraması 3 boyutlu veri setlerini görmeyi mümkün kılan ancak RGB renk bilgisini vermeyen bir üçgenleme yöntemini içerir. Optik sensörler kullanan demiryolu profili, üç açıdan incelenebilir: Birden fazla sensör tarafından yakalanacak olan rayın alanı, koordinat çerçevelerini kullanarak her noktanın konumu ve profilin özellikleri. Tüm bu özellikleri yerine getirebilen optik sensör RGB-D kameradır. RGB-D 'nin üç boyutlu yapılandırmasıyla bir ortamın algoritmalar yardımıyla sanal bir üç boyutlu nesne olarak modellenmesini sağlar. Bir RGB-D kamera üç öğeden oluşur: Bir kızılötesi (IR) aydınlatıcı veya projektör, bir IR kamera ve bir renkli (RGB) kamera. RGB kamera renk bilgilerini kaydeder, IR projektör kızılötesi lazer yayarken, IR kamera kızılötesi lazer için bir sensör olarak çalışır.

Tez çalışmasında ele alınan RGB-D kamera, Şekil 1.28 a'da gösterildiği gibi Kinect v2 sensörü olan bir Uçuş Süresi (ToF) kamerasıdır. Şekil 1.28 b'de ise Kinect v2'nin görüş alanı gösterilmektedir. Şekil 1.28 c'de elde edilen RGB renkli görüntü ve Şekil 1.28 d'de derinlik matrisi verilmiştir.



Şekil 1.28. RGB-D kamera bileşenleri, RGB ve derinlik elde etme [43].

Sensör, IR projektörden modüle edilmiş lazer sinyallerinin nesneye ulaşması için geçen süreyi ve daha sonra IR kameraya geri dönmesini ölçer. Bu şekilde, SL (yapılandırılmış ışık yaklaşımı) her bir piksel arasındaki mesafeleri karşılaştırmak yerine her bir piksel için bir derinlik değeri ölçebilir. Hem SL hem de ToF yaklaşımlarının genel görünümü Şekil 1.29'da gösterilmiştir.



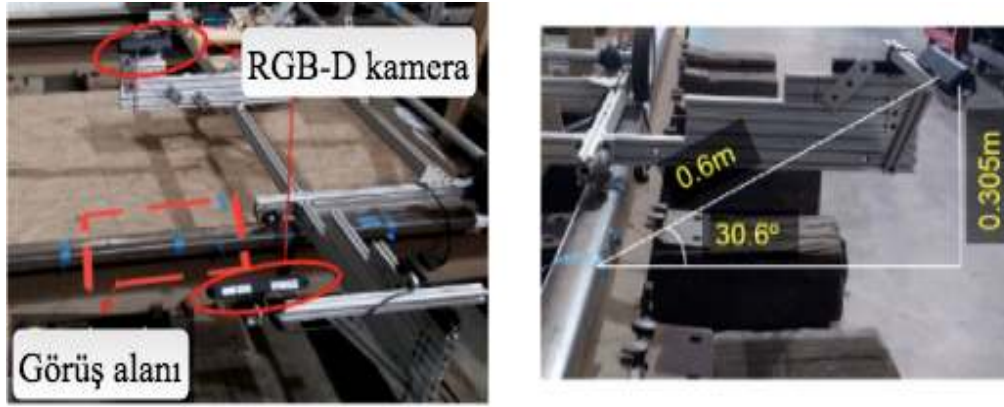
Şekil 1.29. SL ve ToF sensörlerinin karşılaştırması [43].

Harita tabanlı tanımlama yaklaşımı, ucuz bir algoritma yaklaşımı kullanarak yollardaki yükseltilmiş sivri uçları veya yanlış yerleştirilmiş balastı tespit edebilecektir. Belirtildiği üzere, her bir ardışık tarama arasında optimal dönüşüm pozunu hesaplandıktan sonra, taramalar global koordinatlara dönüştürülebilir ve sırasıyla küresel bir sistemde bir harita olarak tanımlanabilir. Böyle bir harita elde edildiğinde, yeni taramalar için referans olarak kullanılabilir. Önceki global harita, yeni taramalarla karşılaştırılmıştır. İki renkli 3D nokta bulutları arasındaki herhangi bir mekânsal değişikliği tespit etmek için aynı şekilde elde edilebilir.

Demiryolu arızalarını tanımlamak için kullanılan harita tabanlı tanımlama yaklaşımı ve ağaç tabanlı bir veri yapısı harita tabanlı algoritmayı, hesaplama açısından verimli hale getirdiği açıklanmıştır. Daha sonra motorlu bir ray profil sistemi bu yaklaşıma göre tasarlanmış ve uygulanmıştır. Rayların kör noktasının taranması söz konusu olduğunda, kameraların yönlendirilmesinin büyük bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş ray profil sistemi Şekil 1.30'da gösterilmiştir. Mobil ray profili oluşturma deneyi için, rayın tüm parçaları olmasa bile önemli olan kameraların oryantasyonu yakalamasıdır. Deney düzeneği Şekil 1.31 a ve Şekil 1.31 b'de gösterilmiştir. Uzun ray profili deneyinden elde edilen sonuçlara göre; İlk olarak, 100 m için RGB-D profilleri yeniden oluşturulmuştur. Saha ve ölçü tarafının görünümünün ve bitki örtüsü gibi rayın yakalanan farklı yönlerini gösterdiği belirtilmiştir. Harita oluşturma belirsizliği ve çift yönlü kayıt hataları üzerinde kantitatif bir analiz gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, rayın çoklu-örgü çözünürlük profilleri, çözünürlük arttırıldığında ya da azaltıldığında korunan ayrıntı miktarını göstermek için yaratıldı. Ağa yakınlaştırıldığında bağların ve balastın daha belirgin olduğu belirlendi. Son olarak, harita tabanlı tanımlama sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 1.30. Raydaki ray muhafazası [43].



Şekil 1.31. Kapalı demiryolu deney kurulumu [43].

Mikrut (2016) demiryolu ray açıklığını ölçmek için bir mobil tarama sistemi araştırması önermiştir [51]. Çalışmada tarama sistemi bileşen cihazlarının özellikleri açıklanmaktadır. Çalışmada açıklık göstergesini ölçmek için Riegl (VMX-250) ve Z + F (Zoller + Fröhlich) çözümleri önerilmiştir. Test edilen sistemlerin avantaj ve dezavantajları kıyaslanmıştır. Araştırmanın bilimsel amacı, mevcut çözümlerin literatürüne ve seçilen sistemlerin test edilmesine dayanarak demiryolu hatlarının yapı açıklıklarının ölçülmesi için bir metodoloji önermektir. Bu hedefe ulaşmak için aşağıdaki adımların tamamlanması gerekiyordu:

- Literatürün gözden geçirilmesi,
- Uygun test sistemlerinin seçimi,
- Ölçüm deneyleri için pist bölümlerinin seçimi,
- Test alanlarının hazırlanması ve ölçümlerin performans analizi.

İlk mobil tarama sistemleri 1990'larda ortaya çıkmıştır. Piyasada mevcut olan tarama cihazları, kara, deniz veya hava ile seyahat eden araçlara monte edilmektedir. Bu tür sistemler, çeşitli sensör tiplerinin yüksek bir entegrasyonuna ve veri ediniminin otomasyonuna sahiptir. Her mobil tarama sistemi veri alıcı sensörler ve navigasyon ekipmanı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. En çok kullanılan sensörler arasında dijital kameralar ve lazer veya radar tarayıcıları bulunur. Ölçüm sistemini içeren sensörlerin göreceli konumu ve yönelimi, INS modülünden gelen sinyallerin birleştirilmesiyle elde edilir.

INS'den gelen değerler harici bir kaynaktan gelen giriş verileriyle ayarlanmalıdır. GPS ile gerekli ayarlamalar yapılır. Ek olarak, sistem odometri, eğim ölçerler ve barometreler gibi başka sensörleri de içerebilir. Tarama sistemleri, şehirlerin 3 boyutlu haritalanması, 3 boyutlu mimari obje modelleri oluşturulması, yol altyapısının deformasyonlarının konumlandırılması ve test edilmesi, yol işaretlerinin otomatik olarak tanınması, boşluk ölçümünün ölçülmesi dâhil olmak üzere demiryolu altyapısının ölçümleri, vb. için kullanılır. Günümüzde üç boyutlu haritalama sistemleri temel olarak üç grup yöntemeye dayanmaktadır, Bunlar:

- Bir lazer telemetre ve bir lazer tarayıcı (LiDAR) aracılığıyla ölçüm bazlı yöntem,
- Fotogrametri, bir görüntü akışı kullanan yöntem,
- Hafif bir lazer tarafından yansıtılan ve hızlı bir dijital kamera tarafından kaydedilen ışık profillerini içeren yöntemdir.

Test ölçümleri için iki sistem seçilmiştir: Seyir yönüne dik olarak iki yönde bir faz tarayıcı profiline dayalı bir sistem (Sistem 1), Entegre kameralarla (Sistem 2), iki ekseninde, parçanın eksenine çapraz ve ileriye doğru uzanan iki darbeli tarayıcıya dayalı bir sistem.

Sistem 1'i kullanmanın amacı, demiryoluna adanmış bir cihaz vasıtasıyla ölçüm teknolojisini doğrulamaktır. Bir kilometre sayacı ile birleştirilmiş bir Z + F PROFILER 9000 profil tarayıcı kullanır. Test ölçümünü gerçekleştirmek için önceden hazırlanmış bir yapı üzerinde bir platform (RES tipi vagon) üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 1.33). Z + F PROFILER 9000, saniyede bir milyon noktadan daha yüksek kayıt hızıyla saniyede 200 profil kaydetmeyi mümkün kılan bir faz tarayıcıdır. Bu parametreler sayesinde, enine kesitler arasında, hatta seyahat platformunun yüksek hızlarında bile çok küçük mesafeler elde etmek mümkündür. Sistem 2 (Şekil 1.32), temel olarak karayolları ve otoyolların mobil ölçümleri için tasarlanan RIEGL VMX-250 çözümüne dayanmaktadır.



Şekil 1.32. Demiryolu vagonu üzerindeki Z + F Profiler 9000 Sistem 1 [51].

Şekil 1.33'te Z + F tarayıcının kurulumu ve platform üzerinde inşaat gösteriliyor ((sol) arkadan görünüm, (sağ) yan görünüm) verilmiştir.



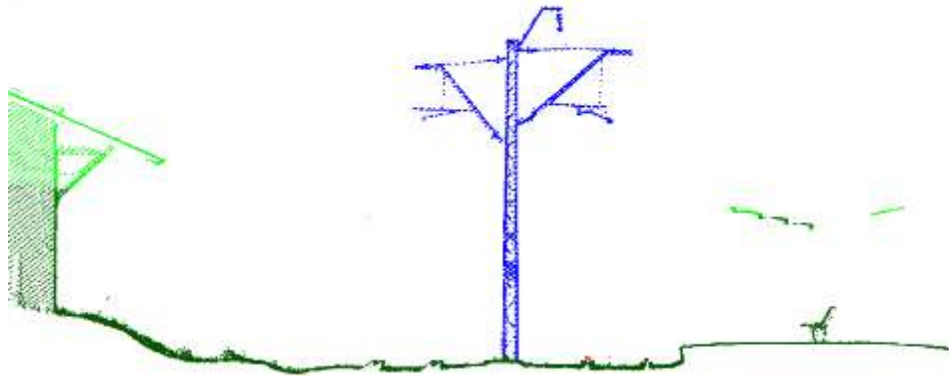
Şekil 1.33. Platformda monte edilen RIEGL VMX-250 çözümüne dayalı Sistem 2 [51].

Test ölçümleri Varşova-Krakov güzergâhının otuz (30) km 'lik bölümünde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra alanlar çeşitli demiryolu altyapısı unsurları, farklı bir geometri izi (düz çizgi, dönüş) ve kurulu jeodezik kontrol ağı sağlayacak şekilde seçilmiştir. Bu, seçilen sistemlerin doğruluğunu test etmek için jeodezik referans ölçümlerinin hazırlanış süresini azaltmayı mümkün kılar. Referans ölçümleri, pistin eksenine dik olarak seçilmiş profiller üzerinde yapılmıştır. Bunun yanı sıra, anket tekniği ile işaretlenen kontrol noktalarının koordinatlarını ölçmek için GPS teknolojisi kullanılmıştır. Ölçümler Graw firması tarafından yapılan bir Laser-Tec palet göstergesi vasıtasıyla gerçekleştirildi.

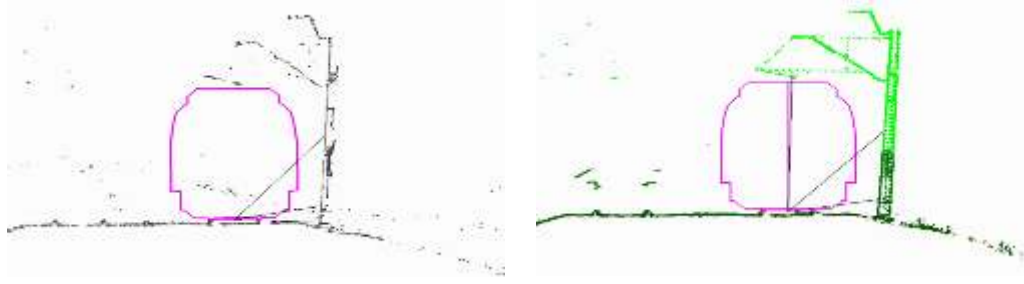
Laser-Tec, semaforlar, tüneller, platformlar ve temas telinin genişliği ve yüksekliği arasındaki boşluk dahil olmak üzere, 10 mm 'den daha büyük bir çaptaki ekipman ve tesisleri ölçmek için tasarlanmıştır. Benzer bir ölçüm doğruluğu, kontrol noktalarının toplam istasyon aracılığıyla ölçülmesiyle sağlandı. Direklerin sinyal verdiği bir GPS referans ölçümü, yaklaşık 1 cm 'lik bir koordinat doğruluğu sağlamıştır. Riegl Sistemi (Sistem 2) ile yapılan ölçüm, daha düşük hız sınırına sahip güzergâh bölümleri hariç, yaklaşık 80 km/s 'lik bir platform hızında gerçekleşmiştir. Z + F Profiler (Sistem 1) aracılığıyla yapılan ölçüm iki kez gerçekleşmiştir. İlk sisteme benzer bir hızda ve yaklaşık 40 km/s 'lik bir hızda gerçekleşmiştir. Ölçümler, rotanın her iki parçasında dönüşümlü olarak gerçekleştirildi ve bu da seyahat koşullarından kaynaklanmıştır.

Test edilen sistemlerle yapılan ölçümlerin sonuçları çeşitli düzenlemelerde nokta bulutları üretir; Sistem 1, rayın eksenine dik düzlemlerde ölçü profillerinin elde edilmesini mümkün kılarken, Sistem 2'den gelen nokta bulutu, rayın ekseninin tanımlanması şartıyla demiryolu göstergesi düzenlemesine dönüştürmek için kullanılabilir. Bu nedenle, Sistem 1'in doğrulanması, aynı düzlemde referans açıklık ölçüleri olan kesitlerin bir karşılaştırmasını içerirken, Sistem 2'nin doğrulanması, ölçü profillerinin belirlenmesi ve test edilen harici doğruluk değerlerinin belirlenmesi işlemlerini içermektedir. Örnek çapraz kesitler Şekil 1.34'te gösterilmiştir.

Bu testlerin amacı, demiryolu hatlarının yapı göstergesini ölçmek için metodoloji olarak lazer taramasının seçiminin doğru olup olmadığı ve test edilen ölçüm sistemlerinin doğruluk gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığı sorusunu cevaplamaktır. Geniş bir literatür taraması temelinde, test için uygun sistemleri seçtik ve test deneylerini gerçekleştirilmiştir. Test edilen sistemlerin başlangıçta belirlenen doğruluk gereksinimlerini karşıladığına (2 cm içinde doğruluk) göre sonuçlandırılabilir. Benimsenen araştırma metodolojisinin doğru olduğu kanıtlandı. Test edilen her sistemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Proje sonucunda demiryolu altyapısı mekânsal verileri veri tabanı geliştirildi. Veri tabanı parametreleri, çeşitli kaynaklardan elde edilen ölçümlerin sonuçlarının alınmasını ve derlenmesini mümkün kılmaktadır.



a) Sistem 2 ile elde edilen Słomniki'deki tren istasyonundan kesit.



- b) Ray ölçüsü ölçümlerinden elde edilen ölçülen demiryolu altyapı elemanları ile açıklık: (sol) arka planda, Z + F Profiler 9000 sisteminden puan bulutu; (sağ) arka planda, RIEGL VMX-250 sisteminden kaynaklanan nokta bulutu

Şekil 1.34. Laser-Tec ölçüm sistemi [51].

Nielsen (2013) yerde titreşim için önemli düzensizliklerin ölçülmesine yönelik yöntemlere genel bir yaklaşım önermiştir [52]. Parça geometrisindeki düzensizlikler toprak kaynaklı titreşim ve kara kaynaklı gürültü için önemli bir kaynaktır. Dolayısıyla, titreşim seviyelerinin kontrol edilmesinin önemli bir yönü, bakım yönetimini kolaylaştırmak için dikey iz (ve ray) düzensizliklerini doğru şekilde ölçen ve izleyen sistemlerin kullanılabilirliğidir. Bu raporda, toprak kaynaklı titreşim ve gürültünün uyarılmasıyla ilgili dalga boyu aralığındaki boşaltılan veya yüklenen yol düzensizliklerini ölçen yöntemler çalışmada incelenmiştir. Farklı sistemlerin ana özellikleri listelenmiş, avantaj ve dezavantajları listelenmiştir. Mevcut sistemlerin çoğunluğu toprak kaynaklı titreşim ve yeryüzü gürültüsü ile ilgili bütün dalga boyu aralığını ölçülememektedir. Örneğin, 80 km/s 'lik bir geleneksel yük treni hızında, ilgili dalga boyları yaklaşık 0.1 m ile yaklaşık 10 m arasındadır. Toprak kaynaklı titreşim ve gürültü için önemli olan dalga boylarında uzunlamasına seviyenin izlenmesini geliştirmek için, 0,5 - 3 aralığında dalga boyları içeren yeni bir dalga boyu bandının (D0, EN standardı 13848 olarak anılacaktır) tanıtılması önerilmektedir. D0 ve D1 bantları 80 km/s hızda (200 km/s 'de 2 - 110 Hz) 0,9 - 44 Hz aralığında uyarım frekanslarına karşılık gelir. Mevcut TRC'nin birçoğu, 0.5 m'ye kadar olan dalga boylarını ölçmek için gerekli olan kapasiteye sahiptir, ancak mevcut standartların karşılanması için genellikle bir filtreleme verileri uygulanmaktadır (dalga boyu 3 m'ye, bazen 1 m'ye kadardır), yani daha kısa dalga boyları çalışmamaktadır. TRC'nin önemli bir faydası, ölçülen uzunlamasına seviyenin, iz geometrisindeki düzensizliklerin katkısı ve iz gerginliğinin birleşimidir.

Daha kısa dalga boylu olan ray düzensizliklerinin hala bir ölçüm arabasıyla veya tercihen Ray Ondülasyonu Analiz Cihazı gibi bir ekipmanla veya ağırlık daha büyük bölümlerini kapsayacak şekilde bir TRC'nin (veya benzeri) taşıyıcısı üzerine monte edilen bir lazer sistemi ile ölçülmesi gerekir. İki farklı ölçüm sisteminden elde edilen düzensizlik spektrumlarının (yüksek ve düşük geometri) başarılı bir şekilde birleştirildiği önceki çalışma tartışılmıştır.

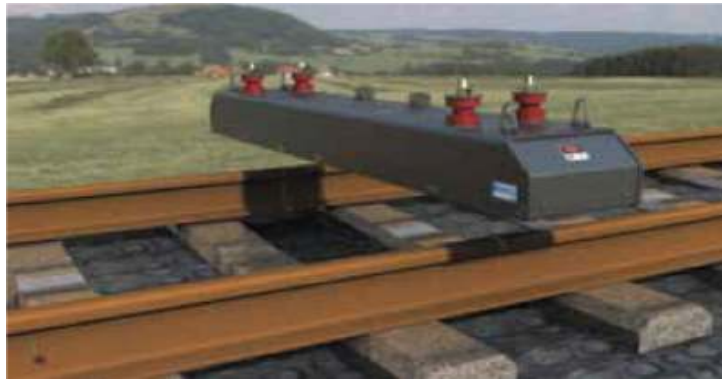
Jovanović (2014) bakım yönetimi için temel olarak demiryolu altyapısı durum izleme ve analizi yapmıştır [53]. Demiryolu altyapısı, demiryolu endüstrisindeki en pahalı kalemdir ve her yıl can alıcı oranlarda bakım ve yenileme (M&R) harcamaları oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu harcamaların azaltılması, demiryolu altyapısı unsurlarının yöntemindeki genel verimliliği önemli ölçüde etkileyecektir. Maliyetleri en aza indirirken, ne zaman, nerede ve nasıl müdahale edileceğinin belirlenmesi ve optimum bir kaynak tahsisine karar verilmesi süreci çok karmaşıktır. İdeal olarak, altyapı davranışının tam olarak anlaşılması, sonuçta davranışlarını tahmin etme yeteneğine yol açacak ve böylelikle trafik aksaklıklarına neden olan çok sayıda başarısızlık olayını önleyecektir. Bu nedenle, demiryolu altyapısı varlıklarının düzgün bir şekilde yönetilmesini sağlamak için aşağıdaki iki şartın yerine getirilmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki altyapı elemanlarının performansını doğru bir şekilde izlemek ve ölçmek için uygun araçlar kurulması gerekliliğidir. İkincisi ise altyapı elemanlarının durumunun değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi için ve sonuç olarak M & R planlaması için ve kaynak tahsisi faaliyetlerinin optimizasyonu için güvenilir yöntemler, araçlar ve araçlar geliştirilmesi gerekliliğidir.

Bu dinamik yükler tüm ray elemanlarının bozulmasına neden olur. Bu nedenle, takip geometrisi tüm palet bileşenleri ve servis ömürleri üzerinde bir etki yaratır. Bu nedenle, yol kalitesinin iyi kontrol altında tutulması, ray işletim gelirlerinin artmasını beraberinde getirmekte ve bu durum, M & R maliyet tasarrufları yoluyla kaza sayısı, trafik kesintileri ve yavaş siparişler (hız azalmaları) oranında azalmalar sağlamaktadır. Atalet prensibine dayanan ölçüm sistemlerinin performansı kesinlikle hıza bağlıdır. Genel olarak, atalet sistemleri genellikle düşük hızlarda ve ölçüm araçlarının (örneğin tren istasyonlarında veya anahtarlarda) hızlı ivmelenme / yavaşlamalarında ölçüm yaparken ya da ölçümlerin ya da gerçekçi olmayan / yanlış ölçümlerin (kusurların) kaybına neden olabilen problemler yaşamaktadır. Dahası, işleme algoritmaları, çok yüksek frekanslar gerektiren bazı karmaşık filtreler, yani kolayca elde edilemeyen çok küçük ve oldukça hassas bir ölçüm adımı içerirler.

Lazerli temassız ölçüm sistemleri bu sınırlamalara maruz kalmazlar ve özel avantajları şunları:

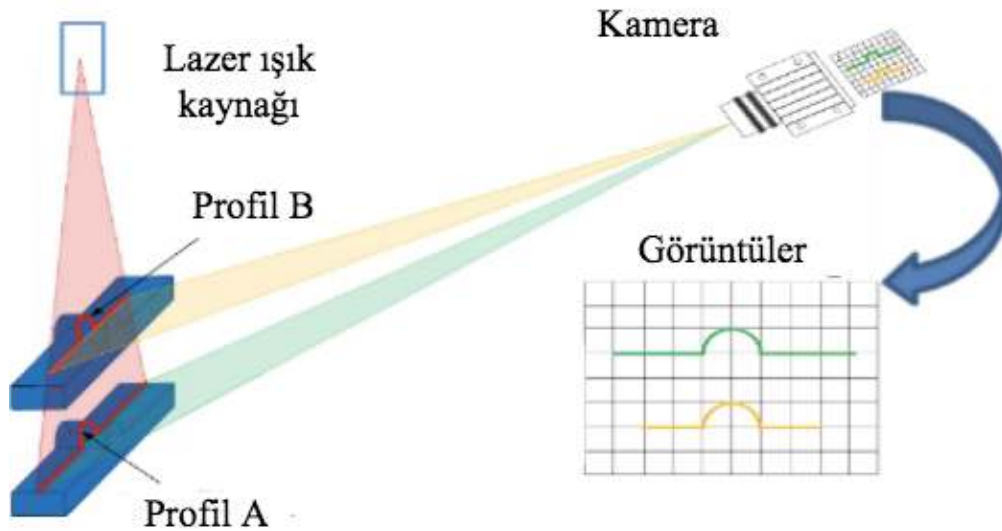
- Çok yüksek hızlarda (hiçbir parça raylarla veya başka nesnelerle temas etmediğinden ve hareketli parça olmadığından),
- Çok düşük hızda (0 km / s'ye kadar), Tüm parametreler aynı hızda, Atalet sistemlerinden farklı olarak, koçun dinamik davranışının (hızlanma / yavaşlama) hızlı değişimlerinin çok meydana getirdiği etkiler veya sonuçlar olmadan,
- Aşınmaya maruz kalan mekanik elemanlar olmaksızın, yani yüksek arızalar arasındaki ortalama sürenin az olduğu durumlarda ölçüm yapabilmektedir.

Dolayısıyla kontak sistemlerinden farklı olarak, sık tekrar kalibrasyona gerek yoktur. Hem demiryolu profili hem de iz geometrisi aynı zamanda ve entegre bir şekilde. Modern palet geometrisi ve ray profili ölçüm sistemleri tamamen entegre olup, ray profili ölçümlerinden hat geometrisi parametrelerinin çıkarılmasına olanak tanır (Şekil 1.35). Sonuçlar demiryolu altyapısı varlıklarının modelleme davranışında çok önemli ilerlemeler sağlayarak, tahmin etmenin önünü açmaktadır. Bu, nihayetinde güvenilir tren tahminleri yapılmasına ve yenilenme kararlarının gerçek demiryoluna bağlı olarak varlığın davranışına ve dolayısıyla altyapı elemanlarının durumunun ve bu davranışın izin verilen sınırları aşabileceği eşiğe dayalı olarak yapılmasına izin verir.



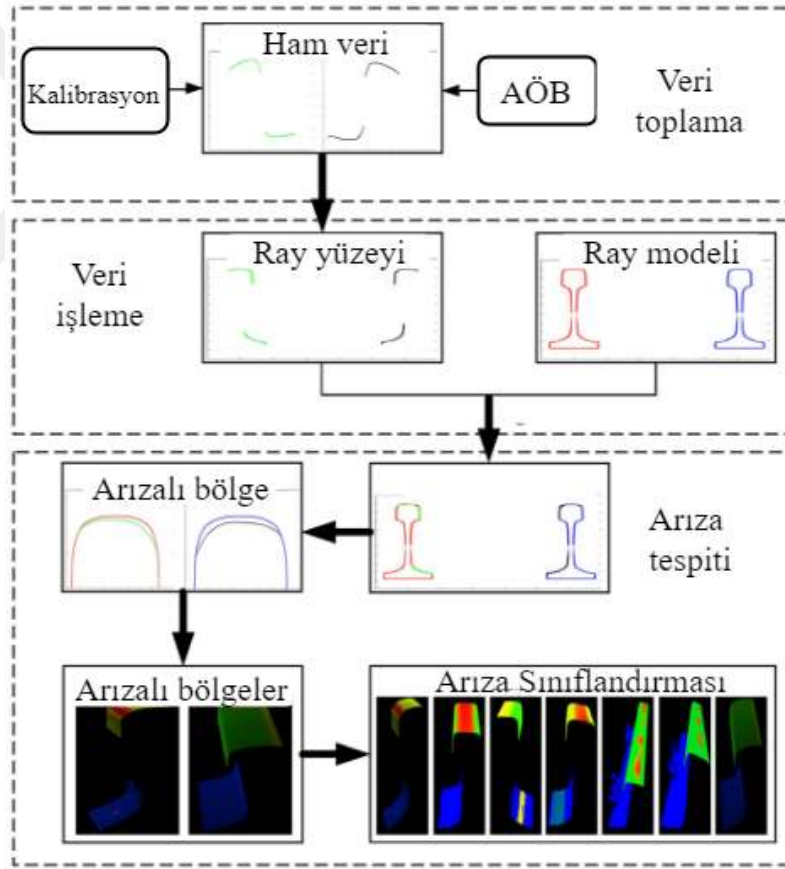
Şekil 1.35. Ray profili ve palet geometrisi ölçüm cihazları [53].

Xiong (2017) ray yüzeyleri için bir üç boyutlu lazer profilleme sistemi ile arıza teşhis sistemi geliştirmiştir [54]. Demiryolu taşımacılığının güvenliği için son 10 yıl içerisinde birçok otomatik ray arıza teşhisi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada ise demiryolu ray arıza teşhisi için 3D lazer profil sistemi (3D-LPS) önerilmiştir. Çalışmada bir lazer tarayıcı entegre kilometre sayacı, AÖB ve konum bilgisi (GPS) verileri toplanarak tasarlanmaya başlanmıştır. Otomatik arıza teşhisi için ilk ölçülen profil ve ray arasındaki sapma miktarı hesaplanarak sapma miktarı uygulanan algoritmalar ile minimize edilmiştir. Çalışmada yüzey arızalarının teşhisi için 3D lazer profilleme sistemi geliştirilmiştir. Yüzey derinliği verileri doğru ve verimli bir şekilde AICP algoritması kullanılarak minimize edilmiştir. 3D yüzey arıza teşhisi ile ilgili temel teknolojiler arasında 3D veri toplama ve 3D nokta bulutu işleme özellikleri bulunmaktadır. 3D yüzey arıza teşhisi için yapılan araştırmalar esas olarak 3D görsel sensörler ve 3D nokta bulutu ile CAD modeli arasındaki veri kaydına yoğunlaşmıştır. Ray yüzeyi arıza teşhisinde ilk adım yüzey noktası bulut verilerinin elde edilmesidir. Hat yapısı optik tarayıcı yüzey arızalarının teşhis edilmesinin birçok yönüne uygulandığından, bu sistem ray yüzey profili edinimi için Keyence LJ-V7000 tipi profilometreyi kullanır. Ölçüm prensibi, Şekil 1.36'da, program ara yüzü ise Şekil 1.37'de gösterilmiştir.



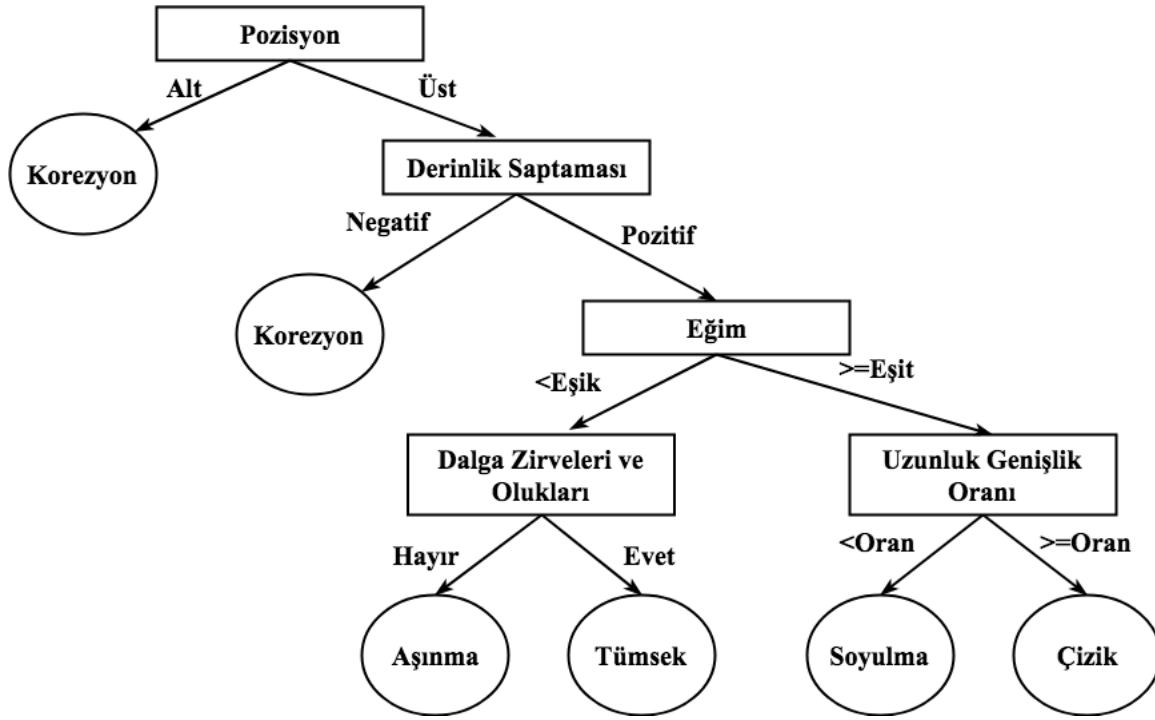
Şekil 1.36. 3D-LPS sistem prensibi [54].

Bu düzende lazer tarayıcılar ray yüzey profilini elde etmek için platformun yan taraflarına monte edilmiştir. Kilometre sayacı tekerlek üzerinde olup, platform verilerini elde etmektedir. AÖB platformun orta kısmına yerleştirilerek, platformun tutum verilerini elde etmiştir. Sensör ile veriler alınıp füzyon işlemleri güç kaynağı destekli bilgisayarlardan kontrolü sağlanmıştır. Önceden kullanılan ICP algoritması bitişik profillerde düzgün çalışmadığından dolayı yanlış eşleşme sorununu çıkarmıştır. Önerilen AICP algoritması kullanılarak kayıtlar milimetrik olarak doğru bir şekilde elde edildi. Arızaları gruplamak ve her bir arızanın özelliklerini çıkarmak için k-aracı algoritması kullanılmıştır.



Şekil 1.37. Lazer profillemeye için geliştirilen program ara yüzü [54].

Deneysel sonuçlar: önerilen algoritmanın demiryolu yüzey profili üzerinde ki arızaları teşhis etme ve arıza bölgesine hızlı ve doğru bir şekilde ulaşmayı amaçlamıştır. Deneyler iç ve dış mekânlarda yapılp minimize edilmiştir. Arıza sınıflandırması için karar ağacının yapısı Şekil 1.38’de verilmiştir.



Şekil 1.38. Önerilen çalışma için kullanılan karar ağacı yapısı [54].

Zhou (2017) numaralı çalışmada Mobil Lazer Sistemi (MLS) ile 3D Nokta Bulutuna Dayalı Demiryolu Tüneli Boşluk İnceleme Yöntemi önermiştir [55]. Demiryolu tüneli açıklığı, trenlerin güvenli bir şekilde işletilmesi ve yük kapasitesinin yükseltilmesi ile doğrudan ilgilidir. Daha fazla demiryolu işletime alındığında ve işletme sürekli olarak daha hızlı hale geldikçe, demiryolu tünel açıklığı denetimi daha hassas ve verimli olmalıdır. Düşük yoğunluk, yavaş hız ve çok sayıda manuel işlem gibi geleneksel tünel temizliği inceleme yöntemlerinde mevcut olan problemler ışığında, bu çalışma, bir MLS ile elde edilen 3D nokta bulutlarına dayanan bir tünel temizleme denetimi yaklaşımı önermektedir. İlk olarak, demiryolu tüneli açıklığı denetimi için dinamik bir koordinat sistemi önerilmiştir.

Bir dinamik klirens koordinat sistemi kurmak için, parçalanmış nokta bulutundan, 3D doğrusal bağlantıya dayanan bir ray hattı ekstraksiyon algoritması uygulanır. Demiryolu açıklığı kısıtlamalarına bağlı olarak tüm ray segmentlerini sorunsuz bir şekilde bağlamak için bir yöntem ve her iki uçta orta tünel bölümden sırayla kesintisiz bir ray hizalaması oluşturulmaktadır. Son olarak, ray hizalama ve izleme boşluğu koordinat sistemine dayalı olarak, tünel açıklığı incelemesinin gerçekleştirilmesi için tünel kesimi ile izinsiz giriş işlemi için farklı tipte açıklık çerçeveleri getirilmiştir. Tünel boşluğu, sabit bir lokomotifin güvenli çalışması için gerekli alandır. Lokomotiflerin güvenli çalışmasını garanti etmek için tünel açıklığı denetimi çok önemlidir. Bu makalede üç boyutlu lazer tanıtılmıştır. Japonya’da CDD sensörleri monte edilmiş bir kontrol aracı geliştirmiştir. CCD sensör teknolojisi Video sıkıştırma görüntü işleme teknolojisi, video ölçüm ve tünel temizliği ve kusurları gidermede kullanılmıştır. Bu teknoloji ile açıklık denetimi daha hızlı ve doğru bir şekilde yapılmaktadır. 3D lazer teknolojisiyle görüntü işleme ve akıllı robotun geliştirilmesiyle birlikte 3D lazer tarama sistemi 120 km/s hızda yüksek yoğunluklu ve yüksek hassasiyetli lazer noktalarının oluşturulmasına imkân sağlamıştır bu sayede oluşan tünel bulutlarıyla açıklıkların kapatılması daha da kolaylaşmıştır. 3D lazer bulutu ile akıllı analiz ve hesaplama hızlı ve otomatik olarak açıklıkları milimetrik hesaplamalarla teşhis edebilmektedir. Demir yolu açıklığı kısıtlamaları ve kesintisiz bir ray hizalaması ve ray boşluğuna göre koordinat sistemi, izinsiz giriş denemeleri gibi tünel boşluğu denetimini gerçekleştirmek adına bir lazer tarayıcı entegre olan 3D lazer tarama sistemi (MLS) kullanılmıştır. Yüksek hassasiyetli konumlandırma ve navigasyon kusurları gidermede zaman minimize edilmiştir. 3D lazer nokta bulutunun işlenmesi ve analizine dayanarak ray hizalama ve tünel bölümü incelemeleri shuanghekou tüneli ve chengdu-kunming demiryolunda testleri yapılmıştır.

Tez kapsamında incelenen literatür çalışmaları, ray denetimi işleminin hangi amaçla yapıldığı, yöntemin temaslı/temassız oluşu ve kullanılan algoritmalara göre gruplandırılarak Tablo 1.1’de özet halinde verilmiştir. Günümüzde ray denetimi işlemlerinin geliştirilen özel bir cihaz ya da gerçek bir tren üzerinde gerçek zamanlı çalışması beklenmektedir, bu nedenle otomotize olmayan görüntü işlemeye dayalı [41, 44, 84, 95] ray denetim işlemleri son yıllarda tercih edilmemektedir. Ultrasonik, canny edge gibi temaslı yöntemler [46, 47, 59, 62] bilgisayarlı görme ile kıyaslandığında daha yavaş çalışan yöntemlerdir. Oysaki ray hatlarının uzunluğu ve yoğunluğu daha hızlı ve gerçek zamanlı denetim yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır.

Bilgisayar görmesine dayalı yöntemler [18, 29, 94, 95] video ya da görüntü çerçeveleri üzerinde işlem yapmaktadır. Genellikle yüksek doğruluk veren ve gerçek zamanlı çalışabilen yöntemler olmasına rağmen bilgisayar görmesine dayalı algoritmaların birçoğunda yağ, toz lekesi, ray hattında ki yabancı cisimler YN sonuçlar üretebilmektedir. Bu nedenle ray denetimi işleminde lazer üçgenleme gibi üç boyutlu görmeye dayalı yöntemler son yıllarda daha çok kabul görmektedir. Ray denetimi işleminde bir diğer problem verilerin işlenmesi ve uygun bir makine öğrenmesi algoritmasının seçimidir. Bilgisayar görmesine dayalı çoğu uygulamada büyük sayılabilecek veriler üzerinde etkin olan rassal orman algoritması seçildiği görülmüştür [24, 25, 88, 89]. Ancak günümüzde daha çok karmaşıklıkları, hızları, ürettikleri veri hacmi ve çeşitliliği artan giriş aygıtları üzerinde daha performanslı, yüksek doğruluklu denetim işlemi yapabilmek için derin öğrenme tabanlı yöntemler tercih edilmektedir [21, 50, 64, 90-93, 133,134]. Tez çalışmasında gerek teorik yöntem geliştirme ve gerekse de deneysel çalışmalarda seçilen yöntemler bu literatür araştırması sonucunda özenle seçilmiştir.

Tablo 1. 1. Ray denetiminie ilişkin literatür özeti

Arıza Türü	Yöntemin Türü	Kullanılan algoritmalar/yöntemler	Kaynaklar
Ray yüzey hatası teşhisi	Temaslı	Geometrik [13]	[13]
Ray yüzeyi, aşınma ve kırık teşhisi		Ultrasonik [46, 59, 62] Eddy Current [47]	[46, 47, 59, 62]
Ray yüzey hatası teşhisi	Temassız	Morfolojik işlemler [16] Bilgisayar görmesi [94-96]	[16, 94-96]
Ray aşınma teşhisi		Kalman filtresi [14] Üç boyutlu tarama [22]	[14, 22]
Cıvata tespiti		Maksimum benzerlik [15] Üç boyutlu görme [116, 122, 124] Bilgisayar görmesi [133]	[15, 116, 122, 124]
Ray yüzeyi, aşınma ve kırık teşhisi		Bilgisayar görmesi [18] Derin öğrenme [50, 64, 90-93, 133, 134] Rassal orman [24, 25, 88, 89] Üç boyutlu görme [115, 116]	[18, 24, 25, 64, 88-93, 115, 116, 133, 134]
Katener sistemlerde arıza teşhisi		Kapalı döngü içinde donanım [27] Üç boyutlu görme [33]	[27, 33]
Profil Ölçümü		Üretim sırasında bilgisayar görmesi ile [29]	[29]
Ray hattı tespiti ve ölçümü		Üç boyutlu görme [30, 32] Rgb'd görme [43, 65]	[30, 32, 43, 65]
Ray hattı kırık teşhisi		Görüntü işleme	[41, 44, 84, 95]

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu doktora tezinin amacı üç boyutlu lazer kameralar kullanılarak elde edilecek veriler ile ray profillerinin çıkarılması ve üzerindeki hataların teşhis edilmesine yönelik algoritmalarının geliştirilmesi ve gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesidir.

Arıza teşhis ve tespitinin yapılmasında hem gerçek zamanlı çalışma performansını arttırmak için hem de yüksek doğruluk elde etmek için derin öğrenme, gerçek zamanlı çalışabilme hızı elde etmek için boru hattı mimarisi ve paralel programlama kullanılmıştır. Önerilen algoritmaların performansları literatürdeki diğer yöntemler ile karşılaştırılmış ve bu yöntemlerle yakın veya daha iyi sonuçlar alındığı gösterilmiştir. Geliştirilen algoritmalar ile ray arıza teşhisine aşağıdaki katkılar getirilmiştir.

- Görüntü işlemeye dayalı ray arıza teşhisinde yağ ve toz gibi kalıntıların arıza olarak algılandığı Doğru Negatif sonuçlara karşı bağımsızdır.
- Grafik işlem birimi üzerinde paralel programlama ve boru hattı mimarisi yaklaşımı ile gerçek zamanlı gerçekleştirilebilir.
- Ray hatlarında oluşan titreşimler nedeni ile oluşan görüntü netsizliği adaptif olarak giderilebilir, giderilemediği durumlarda bu görüntüler giriş verisi olarak kullanmadan elenebilir.

Bu tezin kapsamı;

- Rayların matematiksel modelinin oluşturularak bilgisayar benzetim çalışması yapılması,
- Ray ölçüm sisteminin bilgisayar benzetim çalışması yapılması,
- Bir rayın sağ ve sol tarafına yerleştirilen iki lazer kamera ile ray hatalarının bulunması için gerekli algoritmaların geliştirilmesi,
- Ölçüm sisteminde gün ışığı ve titreşim gibi etkilerin giderilmesi için gerekli algoritmaların geliştirilmesi,
- Ray hatalarının teşhisi için gerçek zamanlı bir ölçüm sisteminin deneysel olarak geliştirilmesi ve doğrulanması.
- Bir tren üzerinde kullanılabilecek şekilde iki kamera ile ray hatalarının teşhisi için gerekli mimarinin oluşturularak bilgisayar uygulamalarının geliştirilmesi ve doğrulanması çalışmalarını gerçekleştirmektir.

1.6. Tezin Yapısı

Tez giriş bölümü ile birlikte altı bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, ray hatlarında arıza teşhis işlemlerinin temel bileşenleri açıklanmış ve ray arıza teşhisi için geliştirilen endüstriyel ürünler incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, sayısal kamera kullanan bilgisayar görmesine dayalı ray arıza teşhis işlemi için görüntü işleme ve bilgisayar görmesine dayalı iki algoritma önerilmiştir. Görüntü işleme dayalı yöntemde ray üst yüzeylerinde oluşan arızalar için yerel normalizasyon kullanan görüntü işlemeye dayalı bir yöntem sunulmuştur. İkinci algoritmada ray hatlarında titreşimlerden kaynaklı oluşan görüntü netsizliğinin ataletsel ölçüm birimi ile algılandığı ve adaptif görüntü netleştirme yapılan bilgisayar görmesine dayalı bir arıza teşhis yöntemi sunulmuştur. Sunulan yöntem boru hattı mimarisi kullanan, grafik işlemci birimleri üzerinde paralel programlama prensibi ile çalışan gerçek zamanlı arıza teşhisinde kullanılabilecek bir yaklaşımdır. Bu bölüm ile ilgili yapılan akademik yayın çalışmaları aşağıda verilmiştir [87, 95-97].

- “Ray Yüzeylerindeki Hata Kontrolü İçin Yerel Normalizasyon Tabanlı Teşhis Yaklaşımı”, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi (TOK), pp.1010-1014, 10-12 Eylül, Pamukkale, Türkiye, 2015.
- "Random Forest Based Diagnosis Approach for Rail Fault Inspection in Railways", Electrical Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), pp.745-750, Nov 26-28, Bursa, Turkey, 2015.
- “IMU Based Adaptive Blur Removal Approach Using Image Processing for Railway Inspection”, In Systems Signals and Image Processing (IWSSIP), pp.1-4, May 23-25, Bratislava, Slovakia, 2016.
- “An Adaptive Fault Diagnosis Approach Using Pipeline Implementation for Railway Inspection”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 26(2), pp.987-998.

Dördüncü bölümde, üç boyutlu ray arıza teşhisi için bir benzetim çalışması yapılmış, hassas mesafe verilerine dayalı lazer kamera ve evrimsel yapay sinir ağı kullanan bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yaklaşımda lazer kameradan alınan profil verileri giriş verisi olarak kullanılmış, bu veriler üzerinde temel bileşen analizi, çekirdek temel bileşen analizi, doğrusal

bileşen analizi, tekil değer ayrıştırma ve histogram karşılaştırma yöntemleri kullanılarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Ardından etiketli veriler rassal orman makine öğrenmesi yöntemi ile eğitilmiş ve özellik çıkarım yöntemleri ile elde edilen değerler choquet bulanık integral kullanılarak birleştirilmiştir. Bu bölüm ile ilgili yapılan akademik yayın çalışmaları aşağıda verilmiştir [104, 24, 25].

- “Chouquet Fuzzy Integral Based Condition Monitoring and Analysis Approach Using Simulation Framework for Rail Faults”, In Industrial Informatics (INDIN), pp.345-350, July 19-21, Poitiers, France, 2016.
- “Condition Monitoring Approach Using 3d Modelling Of Railway Tracks With Laser Cameras”, In International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT’16), pp.132-135, Sept 1-3, Konya, Turkey.
- “Learning Based Experimental Approach For Condition Monitoring Using Laser Cameras In Railway Tracks”, International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4(Special Issue-1), pp.1-5, 2016.

Beşinci bölümde, ray analizi işlemi ile büyük veri arasındaki ilişkinin incelendiği bir yaklaşım sunulmuş ve lazer kamera kullanan derin öğrenme temelli ray arıza teşhisi yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen yaklaşımda büyük veri temel prensipleri ele alınarak ray analizi işlemleri ile büyük veri arasındaki ilişki incelenmiştir. Derin öğrenme yaklaşımında giriş verisi olarak lazer kamera profil verileri kullanılmış, öğrenme performansını arttırmak amacı ile veri çoğaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Etiketlenen lazer kamera profil verileri evrimsel yapay sinir ağı ile eğitilmiş, programlama için Google tarafından geliştirilen paralel programlama kütüphanesi tensorflow kullanılmıştır. Bu bölüm ile ilgili yapılan akademik yayın çalışmaları aşağıda verilmiştir [132, 134].

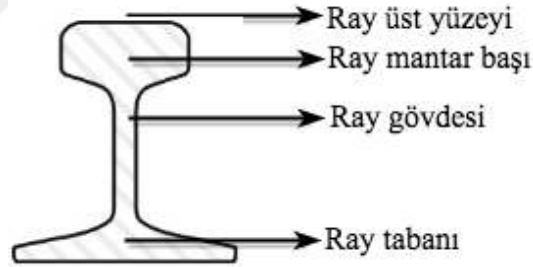
- “Big data framework for rail inspection”, In Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Sept 16-17, Malatya, Turkey, 2017.
- “A new rail inspection method based on deep learning using laser cameras”, In Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Sept 16-17, Malatya, Turkey, 2017.

Altıncı bölümde ise tezde yapılan çalışmalar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

2. RAY ARIZA TEŞHİSİ

Bir ray hattını oluşturan ballast, travers, ray hattı gibi ana bileşenlere önceki bölümde değinilmiştir. Literatürde ray denetimi işlemi genel olarak bu bileşenlerdeki eksiklik ve/veya kusurların bulunması şeklinde yerine getirilen bir süreçtir. Bileşenlere göre ray denetimi sistemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir. Bu tez çalışmasının odak noktasını ise Şekil 2.1’de kısımları verilen ray arıza teşhisi oluşturmaktadır.

- Ayar ölçümü [56]
- Ray profile ölçümü [57]
- Ray arıza teşhisi [58]
- Bağlantı elemanları arıza teşhisi [59]
- Ray ve travers pozisyon belirlenmesi [60]



Şekil 2.1. Ray hattı kısımları

2.1. Ray Denetim Yöntemleri

Ray denetimi uygulamaları yerine getirilişleri bakımından iki ana gruba ayrılabilir. Ray hattının geleneksel olarak denetlenmesi insan emeği ile görsel muayene yapılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem uzman bir kişinin ray hattını el ve gözle muayene etmesi prensibine dayanmaktadır. Yapısı gereği çok yavaş, subjektif, düşük doğruluklu ve aynı zamanda tehlikeli bir yöntemdir. Çok kısa mesafeli ray hatlarında kullanılabilir olsada uzun mesafelerde kullanılması mümkün değildir [61].

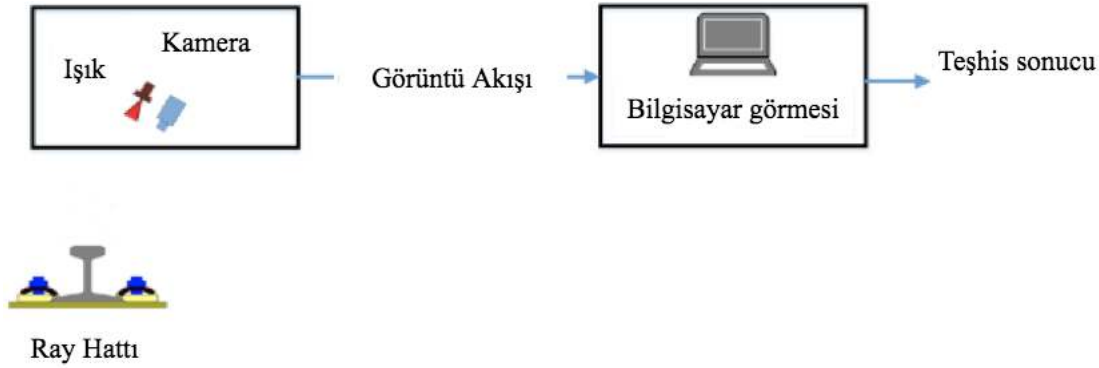
Ray hatlarının denetiminde kullanılan bir diğ er yöntem Şekil 2.2’de verilen mekanik ölçüm prensiplere dayanmaktadır. Bu yöntemde ray hattına temas eden mekanik cihazlardan elde edilen sinyaller bilgisayar tarafından yorumlanarak teşhis sonucu üretilmektedir. Ray yüzeylerinde oluşan hataların bulunmasında başarılıdır ancak 4 mm den daha küçük hatalar bu yöntemde teşhis edilememektedir. Ray hattının gövde kısmında oluşan arızalarda bu yöntemde teşhis edilememektedir. Temaslı yapısından dolayı ray hattında var olan arızanın miktarını arttırma ve/veya yeni arızalar oluŐurma ihtimaline sahiptir. Bu yöntem ray travers tespiti, civata tespiti yada bu bileŐenlerde oluşan eksiklik tespitlerinde kullanılamamaktadır [62].



Şekil 2.2. Temaslı ray denetimi işlemi [62].

Bu dezavantajlardan dolayı günümüzde ray denetimi yaygın olarak temassız yöntemler olarakta bilinen bilgisayar görmesine dayalı yöntemlerle yerine getirilmektedir [63]. Bu yöntemlerde sistemin giriş verilerini yüksek çözünürlüklü sayısal kameralar, çizgi kameralar, lazer kameralar ve çeşitli sensorlerden alınan veriler oluŐurmaktadır. Şekil 2.3’te bilgisayar görmesine dayalı ray denetim işleminin genel yapısı verilmiştir. Bilgisayar görmesine dayalı sistemlerde ışık kaynağı, A  B ve yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılmaktadır.

Bu yöntem ile gerçek zamanlı çalışma hızı ve yüksek doğrulukluk elde edilebilmektedir. Genel olarak eğitim ve test aşamasından oluşmaktadır. Eğitim aşamasında görüntü işleme ve makine öğrenmesi ile sistem eğitilir, test aşamasında ise görüntüler üzerinde teşhis sonucu üretilir. Görmeye dayalı olduğu için ray hattının gövde ve ayak kısmındaki arızaların denetiminde de kullanılabilir. Yöntemin en büyük dezavantajı görüntü işleme algoritmalarının yağ ve kir lekelerini arıza gibi algılayabilme ihtimalidir [64].

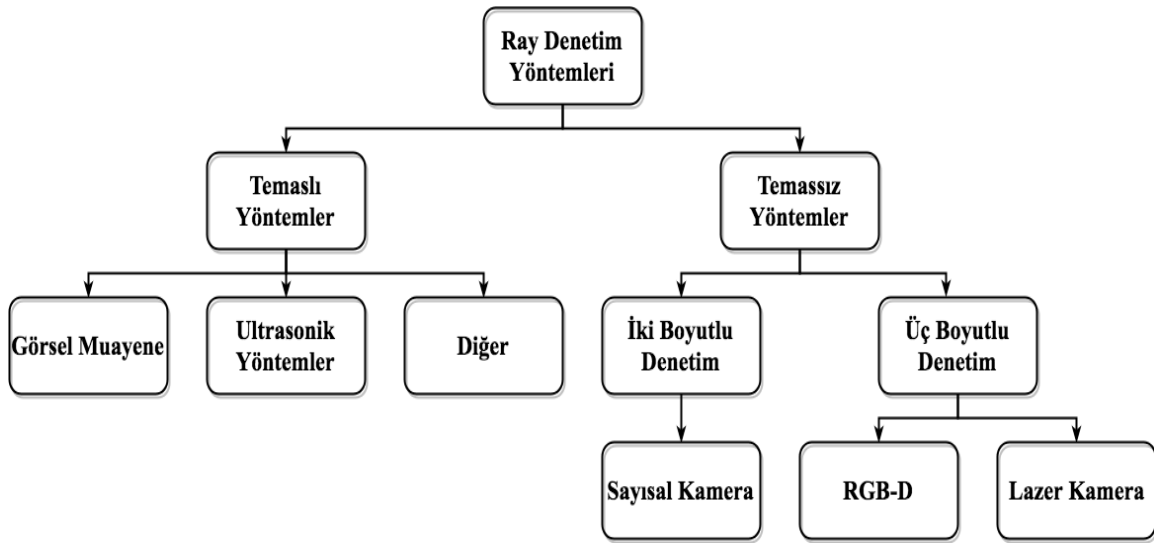


Şekil 2.3. Bilgisayar görmesine dayalı ray denetim işlemi

Bilgisayar görmesine dayalı ray denetim işlemlerini de kendi içinde iki boyutlu bilgisayar görmesi ve üç boyutlu bilgisayar görmesi olarak iki gruba ayırmak mümkündür. İki boyutlu bilgisayar görmesinde CCD/CMOS gibi RGB ya da çizgi kameralar kullanılmaktadır. Üç boyutlu ray analizi uygulamalarında ise RGB-D kameralar yada lazer kameralar kullanılmaktadır.

Üç boyutlu ray denetim yöntemlerden biri olan RGB-D kameralarla gerçekleştirilen ray denetimidir. Bu yöntemde Kinect/Primesense gibi sensörler kullanılarak her noktanın RGB değerinin yanı sıra mesafe bilgisi de elde edilebilmektedir. Bu tür sensörler özellikle oyun konsolu, hareket algılama ve tanıma gibi uygulamalarda başarı ile kullanılabilir. Ray denetimi işleminde rgbd inspection methodunun kullanılması görüntü işlemeye dayalı denetim ile kıyaslandığında yağ ve toz lekelerinden kaynaklı YN durumlar doğruluk oranını düşürebilmektedir. Ancak bu tür sensörler ölçüm hassasiyeti nedeni ile küçük boyutlu arızaları teşhis etmede başarısız olmaktadır [65].

Üç boyutlu ray denetim yöntemlerinden diğeri ise lazer kameraların kullanıldığı ray denetim sistemleridir. Bu yöntemde lazer üçgenleme methodu kullanılarak ray hattının üç boyutlu profili çıkarılmaktadır. Sistemin giriş verilerini hassas mesafe verileri oluşturmaktadır. Görüntü işleme yerine bu hassas mesafeleri kullanıldığı için en yüksek doğruluk oranı ve hassasiyet bu yöntemde elde edilebilmektedir [66]. Şekil 2.4'te ray denetim işlemleri gruplandırılmıştır. Tablo 2.1'de ise ray denetimi işlemlerinde kullanılan yöntemler kıyaslanmıştır.



Şekil 2.4. Ray muayene yöntemlerinin gruplandırılması

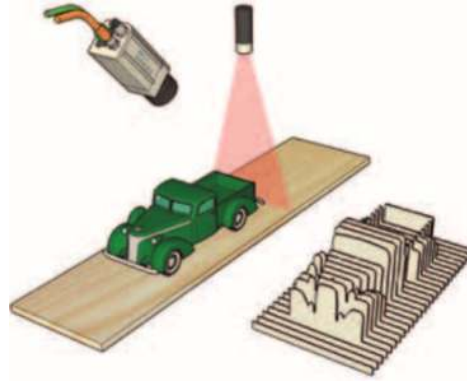
Tablo 2. 1. Ray denetim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Yöntem		Avantajı	Dezavantajı
Temaslı Yöntemler	Mekanik aletler	• Ucuz	• Çok yavaş • Güvensiz • Düşük doğruluk
	Ultrasonik cihazlar	• Hızlı	• Yavaş • Arızayı arttırabilir
Temasız Yöntemler	Kameralar	• Güvenli • Hızlı • Yüksek doğruluklu	• Yüksek maliyet • YN sonuçlar
	Lazer kameralar	• Güvenli • Çok yüksek hızlı • Çok yüksek doğruluklu	• Yüksek maliyet

2.2. Lazer Kamera Kullanan Ray Denetim Yöntemleri

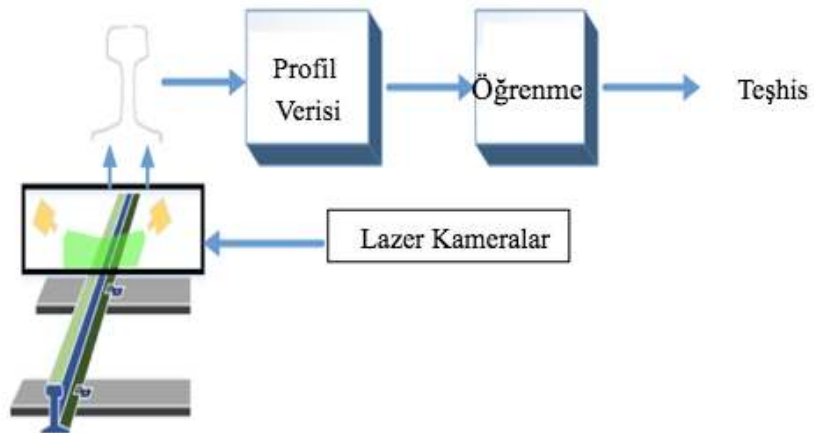
Sayısal kameralardan elde edilen veriler bir x-y düzleminde değeri gri renk düzeyi ya da RGB renk bilgisi içeren iki boyutlu bir matristir. Bu görüntü z düzlemindeki mesafe bilgisini de içerirse üç boyutlu hale gelir. Üç boyutlu görüntü elde edilmesinde *Stereovision*, *ToF* kameralar ve *lazer üçgenleme* yöntemleri kullanılmaktadır.

Üç boyutlu görüntü elde etmede lazer üçgenleme yöntemini kullanan lazer kameralar Şekil 2.5'te ki gibi kalibre edilmiş bir kamera, lazer çizgi kaynağı, ışık kaynağı ve kodlayıcıdan oluşur. Bu bileşenler genellikle tümleşik ürün halindedir. Sistem sürekli fotoğraf çekerek lazer çizgideki profil değişikliğinden faydalanarak nesnenin üç boyutlu profilini çıkarır. Hareketli nesnelerde lazer kameralar ile profil çıkarma işlemi gerçekleştirilirken objenin kontrollü bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir. Nesnenin ne kadar hareket ettiği bir kodlayıcı yardımı ile bulunur.



Şekil 2.5. Lazer kamera çalışma prensibi [114].

Şekil 2.6’da lazer kamera kullanan bir ray denetimi işlemi verilmiştir. Sayısal kamera kullanan ray denetimlerinden farklı olarak giriş verilerini RGB görüntü çerçeveleri değil, lazer kameradan elde edilen üç boyutlu nokta bulutları oluşturmaktadır. Bu veriler kamera ile ray hattı arasındaki hassas mesafe değerleridir. Tipik bir lazer kamera 1mm’den çok daha küçük ölçüm hassasiyetine sahiptir. Lazer kameraların en büyük dezavantajları maliyetlerinin yüksek oluşu ve hassas kalibrasyon yapma gereksinimidir ancak günümüzde üretilen lazer kameralar kompakt aygıtlardır ve kalibre edilmiş kamera ile lazer çizgi kaynağı bütünleşik bir ürün olarak gelmektedir.



Şekil 2.6. Lazer kamera kullanan ray denetim işlemi

2.3. Ray Ölçümü için Endüstride Geliştirilen Ürünler

Lazer kameralar, görüntülü ve temassız olarak ölçüm sistemlerinde kullanılan sistemlerin başında gelir. Yüksek hızı, çoklu tarama özelliği ile nesnelerin üç boyutlu taramasını gerçekleştirebilmektedir. Lazer üçgenleme sistemi ile, bu kameralar nesnenin şekil ve hacmini ölçmek, şekil kusurlarını saptamak ve teşhis etmek ya da kaliteli derecelendirme yapmak için kullanılabilir. 3 boyutlu ölçüm sistemine ek olarak, gri tonlama, parlaklık ve dağılım gibi çok sayıda metal nesne özelliğini de ölçebilir. Bu şekilde, tek bir kamera ile nesnenin çeşitli yönleri hakkında bilgi toplayarak elde edilen sonuçlardan karar verilebilmektedir.

Ray profillerinin 3 boyutlu olarak ölçülmesi, lazer üçgenleme prensibine göre çalışmaktadır. Bu nedenle, 3D şekli ölçmek için, hat üzerinde lazer kaynağı gereklidir. Lazer modülü, lazer hattını nesneye yansıtacak biçimde monte edilir. Çizgiyi farklı bir açıdan görüntüleyen kamera, nesnenin yükseklik profilini izleyen bir eğri görür. Lazer hattı sapmalarını düz bir hayali referans çizgisinden ölçerek, nesnenin yüksekliği hesaplanabilir.

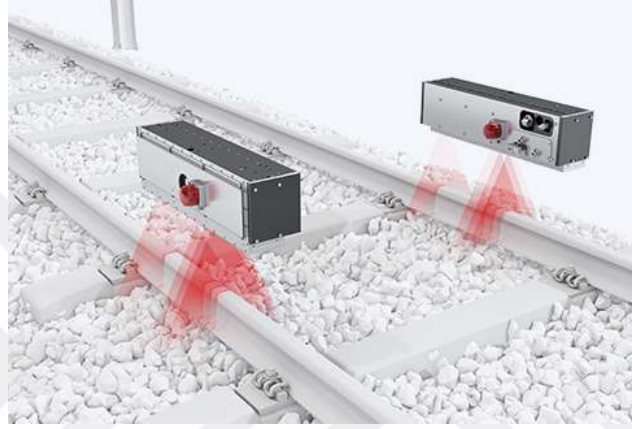
Nesne lazer ışını boyunca hareket ettikçe, nesnenin kontur dilimleri oluşturulur. Bu dilimler toplanarak, nesnenin üst tarafından görüldüğü şekliyle 3D model tamamlanır. Raylı sistemlerde ölçülen bu parametrelere rayın geometrisi (örneğin büküm, hizalanması vb.) ve ray profili dahil edilmektedir. İlerleyen kısımda sırası ile ray ölçümü için geliştirilen endüstriyel ürünler verilmektedir.

2.3.1. Mermec Ray Denetim Sistemi

Mermec firması tarafından geliştirilen Şekil 2.7’de görülen sistem ürün kiriş tabanlı, atalet tabanlı ve taşınabilir sistem olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [67].

Kiriş Tabanlı (Chord Based) sistem, raydaki düzensizlikleri algılamak için zemin titreşiminden faydalanmaktadır. Buna ek olarak ray geometrisi ve sıklığını ölçerek geliştirilen yöntemlere dayanır. V hızındaki bir araç, dalga boyu λ olan, $f = v / \lambda$ frekansında tekerlek / ray düzensizliği olarak uyarım oluşturur. Kısa (10 - 30mm) ve uzun (1000 - 3000 mm) dalgaboyunda ölçülen bu düzensizlikler sistem tarafından algılanabilir. Kameralar ve lazerlerle yüzey yer değiştirmelerini Versine transfer fonksiyonu üzerinden kaydederek ray yüzey profilinin optik ölçümlerini kullanır.

5 mm'ye kadar örnekleme ve 0 ile 160 km / saat arasında değişen hızlarda ölçüm, her türlü hava ve ışık koşulunda yapılabilir. Sistem, dalga boyunu ölçme, depolama ve diyagramları görselleştirme dâhil olmak üzere gerçek zamanlı veri analizi ve son işleme analizi sunar. Son işleme, her dalga boyu için standart sapma gibi gelişmiş hesaplamalar sağlar.



Şekil 2.7. Mermec kiriş tabanlı sistem [67].

Şekil 2.8’de verilen *Atalet-Tabanlı (Inertial-Based)* sistem, ray yüzeyinin durumunu tespit etmek ve ölçmek için, ray yüzey profilinin atalet ölçümleri ve indüktif(manyetik) olarak ölçülen yüzey yer değiştirmeleri kullanır. Ölçüm trenle 320 km/s'ye kadar her iki yönde ve her hava koşulunda da yapılabilir.

Her sistem gerçek zamanlı veri analizi ve son işleme analizi sunar. Gerçek zamanlı fonksiyonlar tüm ondülasyon dalga boylarında veri toplama, depolama ve diyagram görselleştirme içerir. Son işleme adımında ise kaydedilen veriyi görselleştirme ve her dalga boyu için standart sapma hesaplamalarını sağlar.



Şekil 2.8. Mermec atalet tabanlı sistem [67]

Taşınabilir sistem, raylı ondülasyonlu bir ölçüm sistemi olan küçük, kolay bir sistemdir. Ölçüm prensibi, çok yüksek doğrulukta sensörler olan girdap akım dönüştürücüleri vasıtasıyla ray kafasındaki yer değiştirmelerin ölçülmesine dayanmaktadır. PDA arayüz sistemi ile verileri depolama, aktarma ve analiz işlemleri yapılabilir.

2.3.2. Pavemetrics Ray Denetim Sistemi

Lazer Raylı Muayene Sistemi (LRAIL), yüksek çözünürlüklü dijital görüntüleri, rayların ve yatakların 3D profillerini elde etmek için yüksek hızlı kameralar özel optikler ve lazerli çizgi projektörler kullanır. LRAIL sistemi kompakt hafiftir ve düşük güç kullanır LRAIL sensörleri yüksek bir raylı taşıt veya özel bir kontrol aracı üzerine monte edilebilir. LRAIL'in işleme yazılımı, ray bağları ve bağlantı elemanları gibi demiryolu özelliklerini ve beton bağlantılarının çatlaması gibi hataları otomatik olarak algılar. Ölçü genişliği ve hizalama yüksekliği, çapraz hizalama ve çapraz kafa büküm boyu profili ve aşınma da ölçülebilmektedir. Şekil 2.9'da verilen LRAIL, hem gündüz hem de gece boyunca çalıştırılabilir ve 200 km / saate kadar denetim hızlarında herhangi bir demiryolu yüzeyini tarayabilir. Tüm pist ve demiryolu bağı genişliği saniyede 112.000.000 noktalara kadar taranır [68].

Nokta başına dikey çözünürlük 0,1 mm ve yakalanan görüntülerin yatay çözünürlüğü 1 mm'dir. Uzunlamasına mesafe kullanıcı tarafından yapılandırılabilir ve profil başına 1 mm ile 5 mm arasında ayarlanabilir. Çıktı verileri, JPEG formatındaki görüntüler ve XML formatında çıkarılan ray durumu ve geometri verileridir. XML verileri, Demiryolu Yönetim Sistemlerine veya veritabanlarına kolayca aktarılabilir.

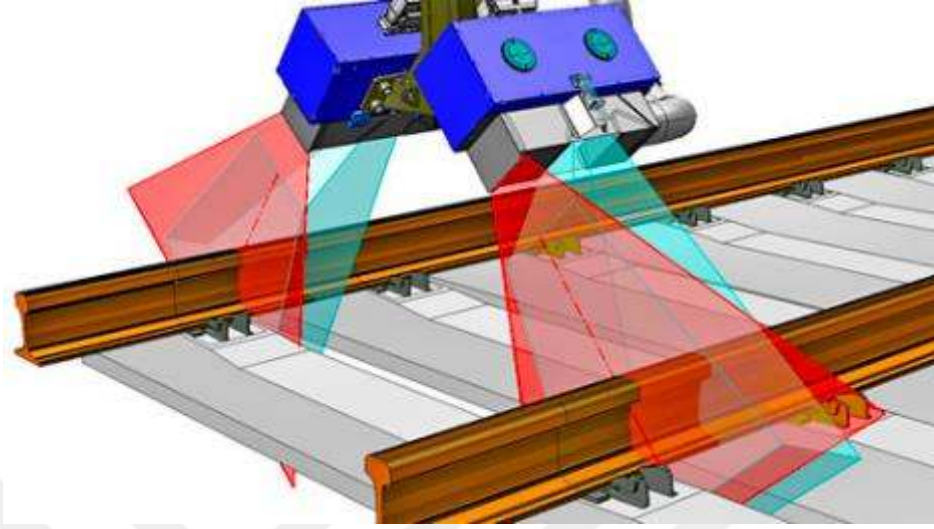


Şekil 2.9. Lazer raylı muayene sistemi (LRAİL) [68].

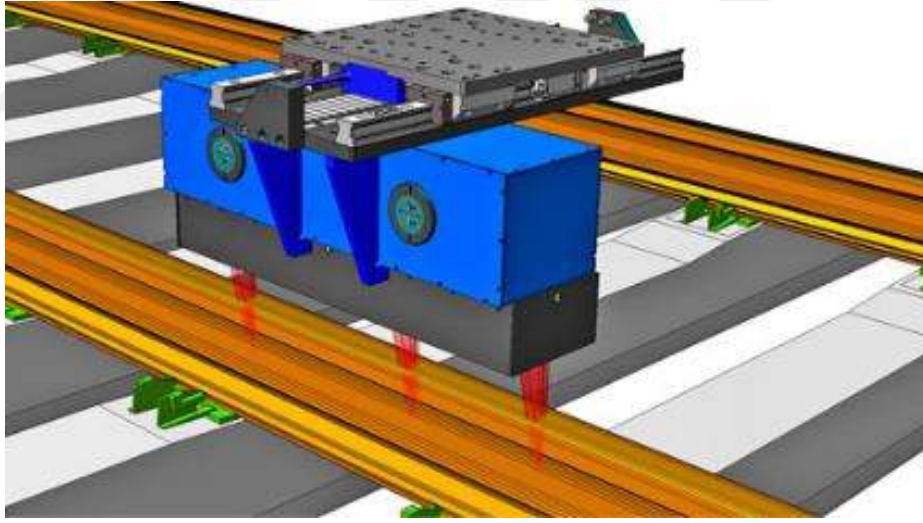
2.3.3. Matisa Ray Denetim Sistemi

Optik sensör teknolojisi, LASER palslarının Şekil 2.10'da ki gibi raya yansıtılması prensibine dayanmaktadır. Cihaza entegre edilmiş bir kamera ve bir sensör, lazer ışını tarafından ölçülen nesne üzerindeki ışık noktasını izler. Ölçülen nesne ile sensör arasındaki mesafe değişirse, ışık noktası izleme açısı da değişecektir. Nesnenin lazere olan uzaklığı, açı fonksiyonları ve nesne ile sensör arasındaki mesafenin yardımıyla hesaplanır. Profil bu şekilde elde edilir ve bir kamera yardımıyla ray geometrisinin parametrelerinin hesaplanması için yararlı veriler üçgenleme ile belirlenir [69].

Lazer projeksiyon sistemleri, her biri kendine özgü karakteristikleri, avantajları ve dezavantajları olan çeşitli şekillerde uygulanabilir. İki MATISA optik sensörü, her biri aynı rayın profilinin bir tarafını ölçen rayın enine profilini belirler. Tam ray profili, ölçülen iki profili üst üste bindirerek elde edilir. Bir dizi lazer sensörüne dayanarak, rayın uzunlamasına profili 3 noktalı ölçüm prensibi kullanılarak belirlenir. Lazer kamera çiftinin yardımıyla kontrol edilen bir kontrol sistemi, lazerleri ray üstünde tutar.



a) Matisa ray muayene sistemi ray yanıl muayene



b) Matisa ray muayene sistemi mantar başı muayenesi

Şekil 2.10. Matisa ray muayene sistemi [69].

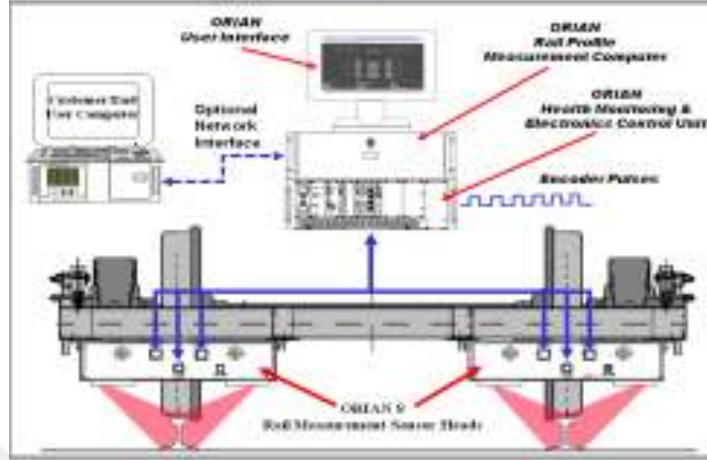
2.3.4. Kldlabs Ölçüm Teknolojileri

Şekil 2.11’de verilen Kldlabs ray profili ve ray aşınması koşullarını değerlendirmek için hem otomatik hem de taşınabilir ölçüm sistemleri sunar. Ray profili çıkışı, varlık optimizasyonu, durum tabanlı bakım, eşdeğer koniklik ve kontak yama çalışmaları dâhil olmak üzere tekerlek ray arayüzü analizi için kullanılır [70].



Şekil 2.11. Kldlabs ölçüm sistemi [70].

KLD Labs’ın otomatik yüksek hızlı raylı ölçüm sistemlerden ORIAN (Optik Ray Denetimi ve Analiz) sınıfı, hareketli araçlarda ray profili ve aşınma durumu hakkında anında geri bildirim sağlamak için en yeni lazer ve görüntüleme teknolojisine sahiptir. Video kameralar, kapsamlı ve doğru ray ölçümleri elde etmek için rayın üst yüzeyine kadar tüm kesitsel ray profilini yakalar.



Şekil 2.12. Kldlabs ORIAN ölçüm sistemi [70].

Şekil 2.12’de verilen ORIAN sensör kafaları bir demiryolu aracının altına monte edilir. Merkezi bilgisayar ve çevre birimleri aracın içine yerleştirilmiştir. Araç rayın üzerinde ilerledikçe, yüksek çözünürlüklü bir video kamera, ray profil merkezini bilgisayar üzerinde işlemek ve saklamak için kaydederken, diğer bir lazer sistemi aydınlatma işlemini başarmaktadır. Bilgisayar daha sonra rayın ne kadar aşındığını ve aynı zamanda pist yapısının genel durumunu gösterir. Bu bilgi bellekte saklanarak, sonrasında veri oynatma ve analizini sağlamak için araçtan dış ortama aktarılabilir. ORIAN ray profili ölçüm sistemlerinin mevcut yetenekleri arasında ray tiplerini belirleme, rayı yüksekliğini ölçme, dikey aşınma, ray genişliğini, yanal aşınma, metal akış-dudağını alanı / göstergesi, ray eğimini, ray ölçüsünü, ray tutamını (ray eğimi) ve bağlantı çubuğunu tanımlamak bulunur.

Şekil 2.13’te verilen portatif ray ölçümü için MiniProf Ray cihazı, rayın kesit profillerini izlemek için kullanımı kolay, hafif ve el tipi bir araçtır. Raylara manyetik olarak tutturulur. Alet birçok farklı ray kesitinde kullanılabilir ve kolayca taşınır. Bu cihazlar veri toplamak için bir dizüstü bilgisayar veya sağlam bir el bilgisayarı ile birlikte kullanılır.



Şekil 2.13. Kldlabs taşınabilir sistem [70].

2.3.5. Graw Ray Denetim Sistemleri

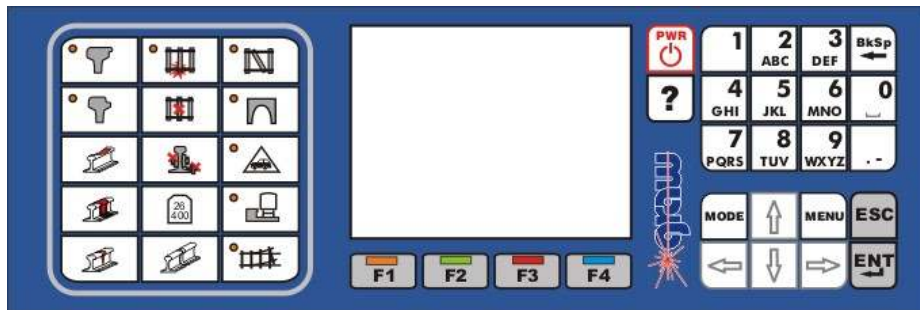
Taşıyıcılı sistem, demiryolu ve tramvay raylı kafa profillerinin yanı sıra ray geometrisini de ölçebilir ve görsel incelemelerin sonuçlarını kaydeder [71-73]. Taşıyıcının kullanımı kolaydır, bir kişi tarafından taşınmasını sağlayan modüler bir tasarıma sahiptir ve 5 dakikadan kısa bir sürede ray üzerinde sabitlenebilir. Taşıyıcı için Lazer Kamera ile Ray Geometrisi (TEP) trolley, TEC trolley üzerindeki tüm fonksiyonlara sahiptir. Ek olarak lazer ölçüm kafası ile donatılmıştır. TEP trolley ölçüm sistemi 0,5 m 'lik bir ölçüm artışı ile ray profillerin ölçülmesi ve kaydedilmesi, ölçümler sırasında profillere genel bakış, $\pm 0,3$ mm 'lik doğrulukla ray profil ölçümü, $\pm 0,3$ mm hassasiyetli raylı aşınma parametrelerinin belirlenmesi ve ray profilinin otomatik olarak değerlendirilmesi işlevlerine sahiptir.

Ray profil ölçümlerinde taşıyıcının iki versiyonu kullanılabilir, TEP 2.1 ve ikincisi TEP 2.2 lazer probu. Taşıyıcı trenlerin geçişine izin vermek için kolaylıkla (yaklaşık 30 kg.) pistten çıkarılabilir. Ölçümler kalibrasyona ve sıfırlama gerektirmeksizin anında devam edebilir. TEC arabası EN 13848-4 standardının gereksinimlerini karşılar. Taşıma arabası tarafından üretilen ölçüm sonuçları, Polonya Demiryolu Hatlarının (PKP PLK) gereksinimleri ile tutarlıdır.

Taşıyıcı renkli arkadan aydınlatmalı ekran ve rahat bir klavye (diğer GRAW ürünleri tipi) ile sağlanır. Ölçüm sonuçları ve izin verilen değerlerin alınması ile ilgili bilgiler gece bile mükemmel şekilde görülebilir. Tipik kusurlar için özel tuşlar vardır; kaynak veya raylarda, eksik civata, vb. çatlakların kaydedilmesini ve vurgulanmasını kolaylaştırır.

Ölçüm kontrollerinin tamamlanmasından sonra sonuçların gözden geçirilmesini kolaylaştıran tramvay kontrol paneli çıkarılabilir. Verilerin bir bilgisayara aktarılması USB bağlantısı üzerinden gerçekleştirilir.

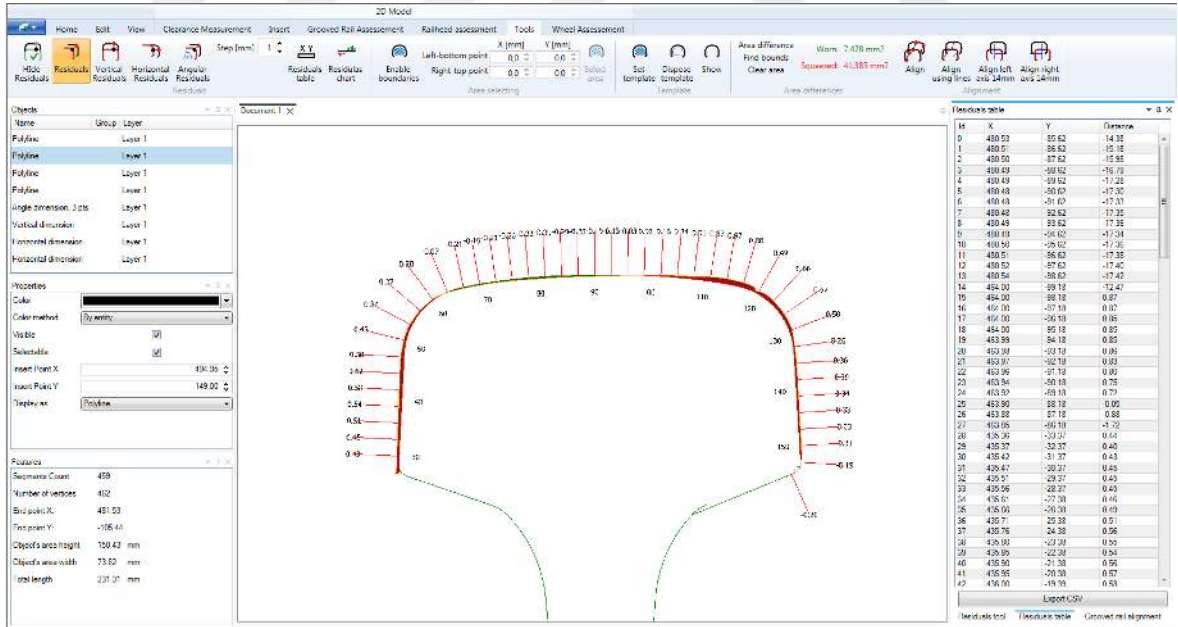
Taşıyıcı GeoTEC sistem yazılımı ölçüm sonuçlarının grafik sunumu ve karşılaştırmasının yanı sıra ölçüm raporlarının basılması veya tipik ray kalite faktörlerinin hesaplanmasını sağlar. Ölçüm sonuçlarında, ray kusur noktaları içeren sekmeli formda da mevcuttur. Ölçüm verileri MS Word, MS Excel ve PDF formatlarında dışa aktarılabilir. Buna ek olarak, yazılım ölçülen profillerin DXF formatında kaydedilmesini, ölçülen profillerin model profillerle karşılaştırılmasını, ray profili ile ilgili raporların otomatik boyutlandırılmasını ve yazdırılmasını sağlar. TEP taşıyıcı sistem Şekil 2.14'te kullanıcı arayüzleri ise Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.14. TEP taşıyıcı sistemi ve program ara yüzü [71-73].



a) Taşıyıcıdan gönderilen PC ölçüm verileri analizi ve raporlama yazılımının ekran görüntüsü



b) Ray Profiline ait ölçüm verileri

Şekil 2.15. Ray ve dönüş profil ölçümü için 3D lazer tarama sistemi: SCORPION [71-73].

Bu lazer ölçüm cihazı, ray ve dönüş profillerinin periyodik ölçümleri için tasarlanmıştır. Cihaz, sert referans tabanı, lazer ölçüm başlığı, incelenen nesnenin şeklini ölçen şasiden ve ölçüm kafasının kontrol edilen nesnenin üzerine otomatik geçişini mümkün kılan çerçeve sisteminden oluşur.

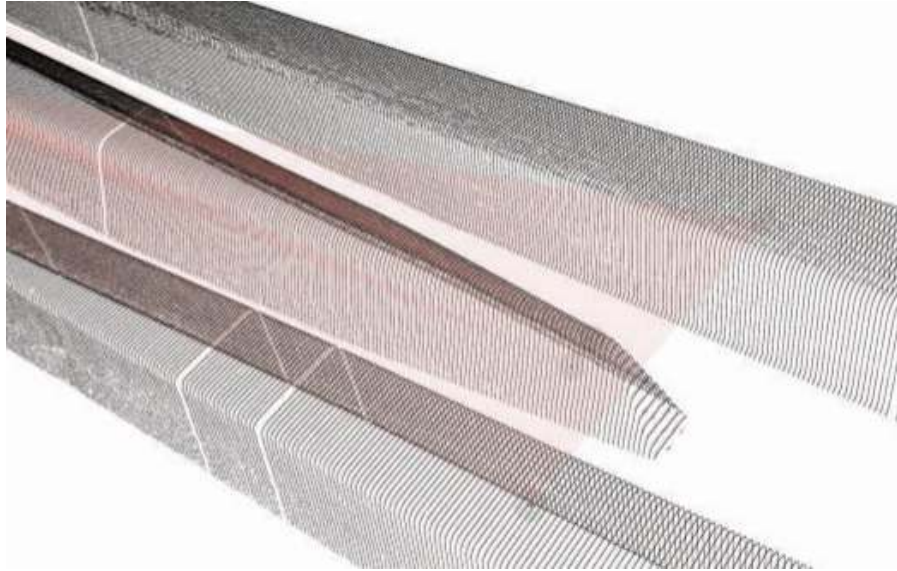
Ölçüm cihazı kontrol edilen raya yerleştirdikten sonra otomatik olarak gerçekleştirilir. Cihaz kontrol ünitesi klavye ve LCD ekrana sahiptir. Ölçüm sonuçları cihazın dâhili belleğine kaydedilir ve USB arabirimi kullanılarak bilgisayara aktarılabilir. Ölçüm sonucunda nesnenin 3 boyutlu modeli, yani ölçülen nesnenin hem yanal hem de enine yönlerde tam olarak temsili elde edilir. Cihaz, aşağıdakileri içeren ölçüm sonuçlarının işlenmesini sağlayan bilgisayar yazılımı ile birlikte teslim edilir: çoklu ölçümlerin tek bir nesnede birleştirilmesi, rastgele seçilen 2D profillerin oluşturulması, uzunlamasına profillerin hesaplanması, ölçüm raporlarının oluşturulması.

Aşağıdaki çizimde 1 mm 'lik ölçüm artışı ile geliştirilen ölçülen geçiş modeli gösterilmektedir. Teslim edilen yazılım, belirli geçiş elemanlarını, örneğin kontrol noktasını, sol ve sağ kanat raylarını tanımayı mümkün kılar. Bu öğelere dayanarak, geçişin matematiksel noktası hesaplanır. Yönü elle tanımlanabilir veya seçilen sanal eksen boyunca belirli bir artış ile enine kesitler dizisi oluşturulabilir.

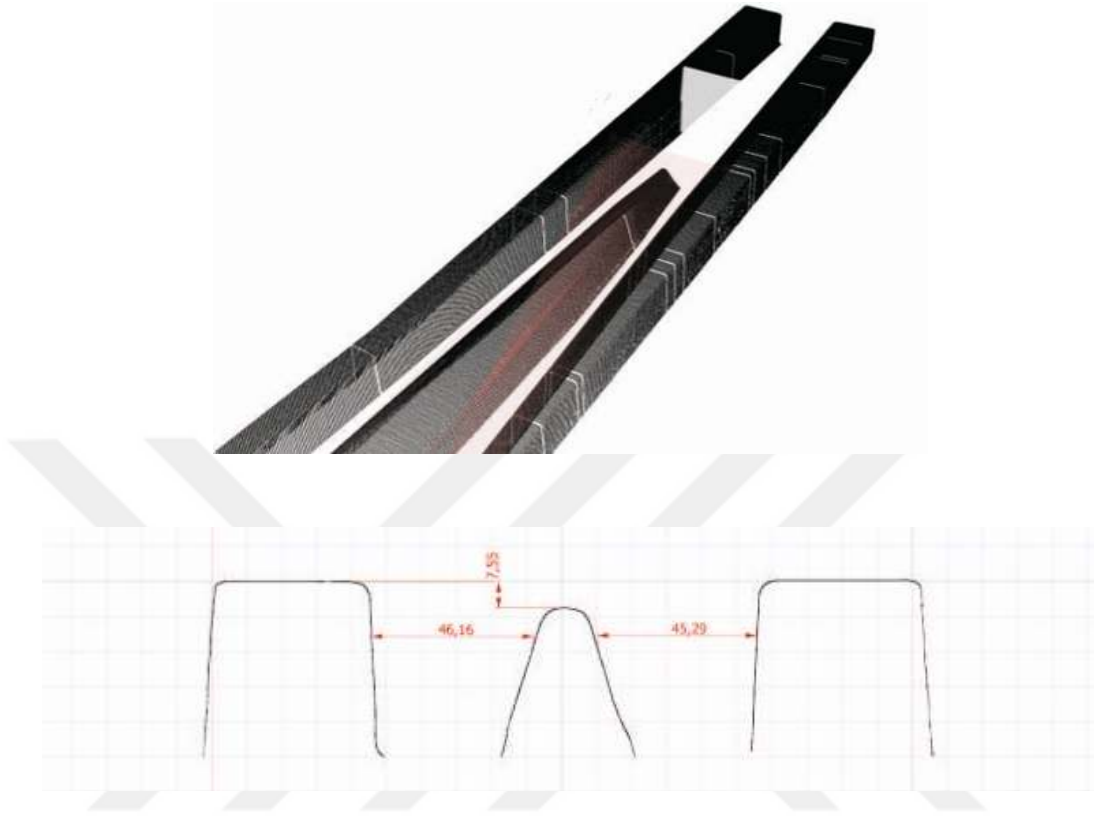
Şekil 2.16'da 3B lazer tarama sistemi ve Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de ray profili kesitlerine örnek verilmiştir. Ölçülen öğelerin uzunlamasına aşınmasını belirlemek için kullanıcı, yazılımın incelenen öğenin şeklini hesapladığı bir bölüm (aşağıdaki mavi çizgi) tanımlayabilir. Bu şekilde, örneğin, dikey veya yatay yönde geçiş noktası aşınmasını teşhis etmek mümkündür. Aşağıdaki çizimde, kurbağa şekli analizinin bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Ray ve dönüş profili ölçümü için 3D lazer tarama sistemi [71-73].



Şekil 2.17. Geçiş kurbağasının örnek ölçümü [71-73].



Şekil 2.18. Ray profilinin enine kesiti [71-73].

2.3.6. Ray ve Dönüş Taşıyıcıları için Eklenti: Lazer TEC

Şekil 2.19’da verilen Lazer TEC taşıyıcı araba, ray açıklığını ve geometrisini ölçtüğü gibi, rayın durumuna ait görsel kontrollerin sonuçlarını da kaydeder. Bir lazer telemetre ile sağlanan eklenti üzerine yerleştirilerek, ışık sinyalleri, tüneller, platformlar, ara boşluk alanları ve temas telinin yüksekliği de dâhil olmak üzere, 10 mm'den fazla boyutlara sahip yapıların ve nesnelerin ölçümlerini mümkün kılar. Genişlik, cant, yatay ve dikey düzensizlik değerleri, kapalı mesafeler ve GPS konumları gibi ölçüm sonuçları cihaz hafızasında gerçek zamanlı olarak kaydedilir. Açıklık ölçümleri, seçilen bir noktada lazer ışınını hedefleyen operatör tarafından gerçekleştirilir. Bir ölçümden sonra, taşıyıcı kontrol paneli ekranı, parça eksenini ile ilgili olarak ölçülen bir noktanın konumunu sunar. İlgili nesnelerin konumları ile birlikte ölçüm sonuçları cihaz hafızasında kaydedilir.



Şekil 2.19. Lazer TEC [71-73].

2.3.7. Ataletli Ray Geometri Taşıyıcısı: ITEC

Şekil 2.20’de verilen ITEC her iki ray ile ilgili olarak iki düzlemde (yatay ve dikey ayetler) düzensizlikler, son teknoloji yarı iletken jiroskoplar ve ivmeölçerlerinden oluşan yenilikçi bir atalet sistemi kullanılarak ölçülür. Yatay ve dikey düzensizlikleri ölçmek için yeni bir yöntem, yüksek tekrarlanabilir ölçüm sonuçlarının elde edilmesini sağlar. Hesaplanan değerler, tel ölçüm cihazı kullanılarak yapılan ölçümlere veya en son ölçüm araçlarıyla yapılan ölçümlere karşılık gelir.



Şekil 2.20. Ataletli Ray Geometri Taşıyıcısı [71-73].

2.3.8. DTK Ray Denetim Sistemi

Şekil 2.21’de verilem DTK sistemi yolcu treni altında monte edilebilir. Aşağıdaki parametreler ölçülebilmektedir; Her rayın derinliği, ray üst yüksekliği, geometrisi, aşınması (ray profili ve kanat açısı), eğri yarıçapı (sürüş yönü), burulma, raylarda tekerleklerin düzgün çalışması, tekerlek ve ray arasındaki şoklar ve GPS koordinatlarının yanı sıra yükseklik rampaları arasındaki konum gösterilebilmektedir. Farklı parametreler altı monitöre kadar görüntülenir. Diğer tüm DTK izleme sistemleri için zaman, hız ve yol işaretleri kaydedilir. Ölçüm verileri ve 4 video senkronize olarak kaydedilir. İlk analiz izleme çalışması sırasında yapılabilir [74].



Şekil 2.21. DTK Ray ölçüm sistemi [74].

Ray ölçüm sistemi parçaları aşağıda sıralanmıştır.

- Lazer ünitesi sol
- Denetleyici
- Jiroskop
- Ek sabitleme
- Şok sensör
- Lazer ünitesi

2.3.9. Açıklık Ölçümü Çalışmaları

Şekil 2.22’de verilen DTK, her türlü ray göstergesine uyarlanabilen el yapımı taşıyıcı kullanır. Bu ölçüm 40 km/s hıza kadar gerçekleştirilebilir (25 mil). Sistem, yolun merkezine 8 metre uzaklıkta bulunan rotadaki çevreyi kaydeder. Bir ölçüm dosyasında birkaç açıklık profilini programlamak ve değerlendirmek mümkündür. Güzergâh profilinin herhangi bir şekilde aşılması durumunda güzergâhın temsilinde kırmızıyla işaretlenecektir. Yazılım ilgili bölümlerin video sekanslarını gösterebilmektedir. Buna ek olarak taşıyıcı rayların düzgün çalışması ve rayların aşınması gibi ilave ölçümler için de kullanılabilir.



Şekil 2.22. DTK ölçüm sistemi ve ölçümlere ait video görünüm [74].

2.3.9.1. Platform Ölçümü

Dtk platformu ölçümü için sistem özellikle engelli erişimli platformların belirli boyutlarını kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır:

- Platform kenarı ile ray arasındaki mesafe (platformun hangi tarafında olduğuna bağlı olarak sol el ya da sağ el).
- Ray ile ilgili olarak platform kenarının yüksekliği.

- Şimdiye kadar toplu taşıma şirketlerinin çalışanları, her 5 metrede bir cetvel ile rastgele kontroller yapmak zorunda kaldılar. DTK sistemi bunun yerine bu değerleri her 5 cm (metre başına 20 veri seti) temassız şekilde ölçer.

- Bu ölçümü gerçekleştirmek için, DTK iki lazer/kamera ünitesini sürgülü bir vagona monte eder ve yan yönlendirme cihazı aracın ön tamponuna sabitlenir.

2.3.9.2. Üçüncü Ray Ölçüm Sistemi

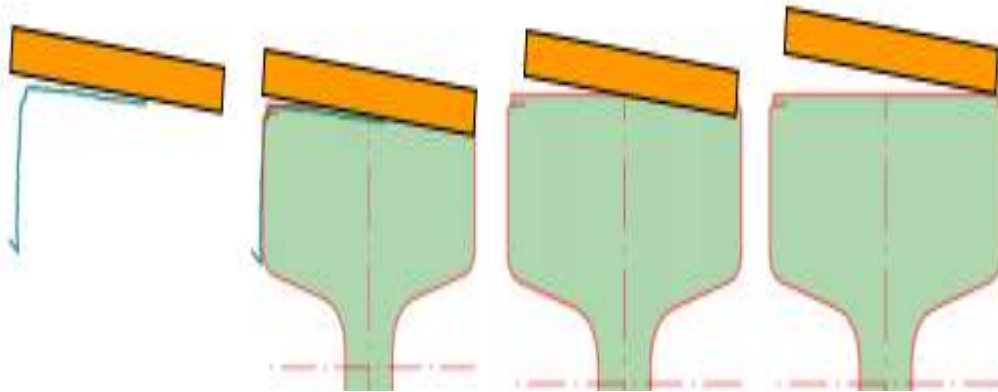
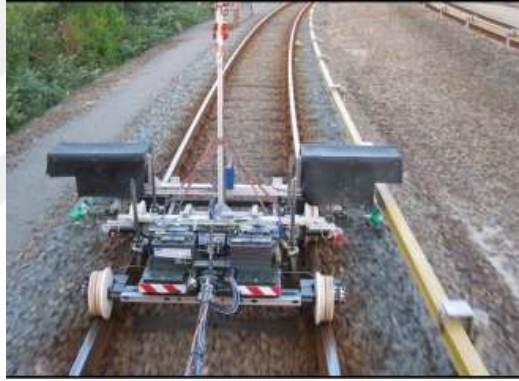
Şekil 2.23'te verilen sistem ile demiryolu üzerindeki akım kolektörünün hızlanması, hareket ve basınç ölçümü, Üçüncü rail rampasında geçerli balata etkisinde olan etkilerin belirlenmesi, İletken parçaların ölçümü yapılabilmektedir.



Şekil 2.23. DTK uygulama görüntüleri ve kullanıcı arayüzü [74].

2.3.10. Üçüncü Ray Aşınma Ölçümü

Şekil 2.24'te verilen iletken rayının konturu bir lazer ünitesi tarafından kaydedilir. Bu şekilde aşınma ve mevcut kolektör ile gerçek temas alanı belirlenebilir. Böylece pozisyondaki değişiklikler veya diğer problemleri bölümler tanınır. Mevcut kolektör kolunun dönme noktasındaki küçük yanal yükseklik değişiklikleri bile aşınma üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Bu akım rayı, başlangıçta rayın dış kenarının tek taraflı aşınmasıyla sonuçlanabildiğinden yükseğe monte edilmiştir. Akım rayı tüm temas alanı boyunca kademeli olarak eğimli bir aşınma kaydedilebilir.



Şekil 2.24. Ray mantar başı aşınma teşhisi [74].

2.3.11. Beena Vision Araç Tabanlı Ray ve Palet Profili Ölçüm Sistemi

TrackView-Profile bir araç tabanlı ray profili ve ray geometri ölçüm sistemidir. Bu sistem, bir kamyon veya bir raylı taşıt üzerine kolayca monte edilebilir. Çoklu kamera ve lazer sistemi, etkili lazer / ray görüntüleme ve profil rekonstrüksiyonu için tasarlanmıştır [75].

Şekil 2.25'te verilen TrackView, aydınlatma için güçlü lazerler kullanır, gündüz ve gece işlemleri sırasında kolayca çalışabilir. Sistem, ray profili verileri ve ray profili parametrelerine ek olarak raylı gösterge sağlar. Ayrıca anlık ray tipi bilgisini verir. Ray profili seçeneği, raydaki bağlantı ve balast durumunu değerlendirmek için lazerle üretilen bir ray profili sağlar. Bu veriler, rayın durumunu elde etmek için SurfView-Rail ürünü tarafından üretilen görüntü verileriyle birleştirilebilir.

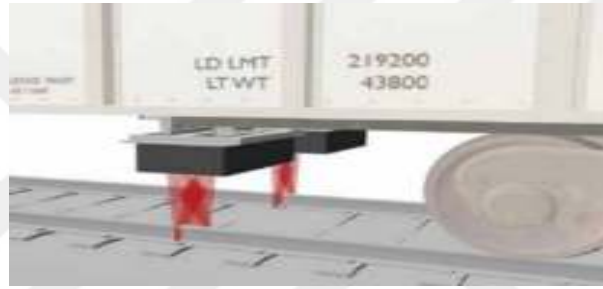
Ölçümler

- Ray profili
- Ray meyili
- Ray yüksekliği
- Kafa yüksekliği
- Ray Ağırlığı
- Kafa zarar yüzdesi
- Aşınma ölçeri
- Dikey Aşınma
- 45 ° Aşınma
- Yüz genişliği ölçeri
- Yüz Açısı Ölçeri
- Araç ölçeri(isteğe bağlı)
- Araç çapraz seviyesi (isteğe bağlı)
- Ray Tipi Tanıma
- Balast Durumu (İsteğe Bağlı)

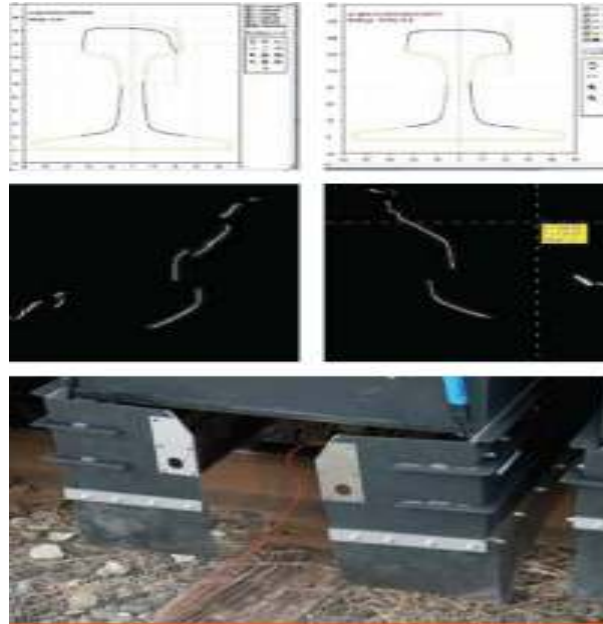
Özellikler

- Gerçek Zamanlı İşleme
- Yüksek Raylı Kamyon veya Raylı Araçta Takılı

- Farklı Çevre Koşullarında İşlem
- İstenen Mesafe de Ray Profili
- Ray Hatalarında Gerçek Zamanlı Rapor ve Alarm
- Tüm donanım ve yazılımlarla birlikte tedarik edilmesi
- Kurulum için Hazır Olarak Teslim
- Profil Ölçüm Hızı 120 km / s'ye kadar
- Yerel veritabanı bir seçenek olarak kullanılabilir.



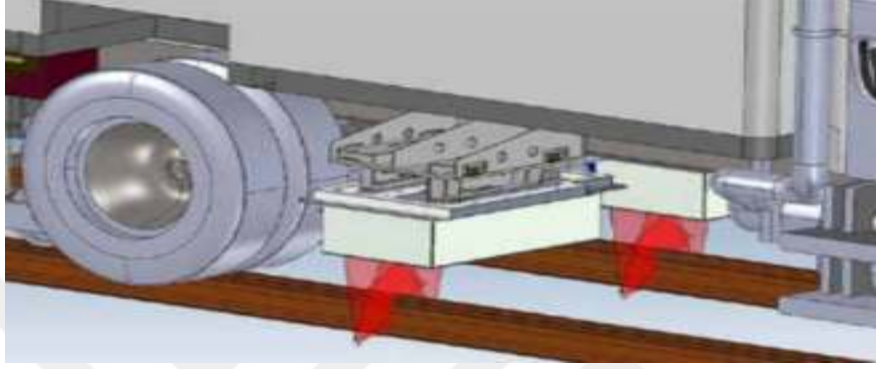
a) Beena Vision ölçüm sistemi



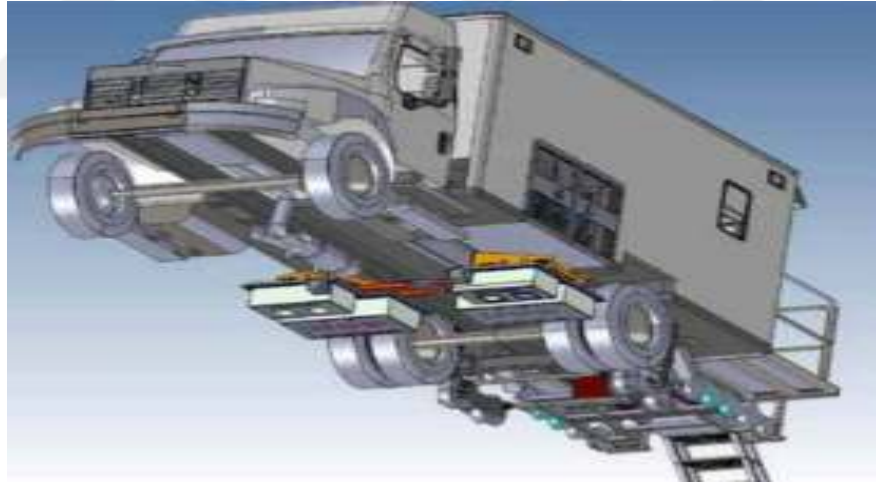
b) Beena Vision ray ölçümü ekran görüntüleri

Şekil 2.25. Beena Vision ray denetim işlemi uygulama görüntüleri [75].

Şekil 2.26’da Beena Vision ray denetim sistemine ait test aracı aşağıdan ve yandan görünümü verilmiştir.



a) Beena Vision test aracı



b) Beena Vision test aracı alttan görünüm

Şekil 2.26. Beena Vision test aracı yandan ve alttan görünümü [75].

3. BİLGİSAYAR GÖRMESİNE DAYALI RAY ARIZA TEŞHİS YÖNTEMLERİ

Ray hatlarının denetiminde yaygın olarak bilgisayarlı görmeye dayalı sayısal kameralar kullanan temassız yöntemler kullanılmaktadır. Denetim işleminin amacı hem farklı arıza türlerinin teşhis edilmesi hem de aynı arızaya ait arıza düzeyinin tespit edilmesidir. Sayısal kamera kullanan ray denetimi işleminde kameralardan alınan sayısal veriler FPGA ya da bilgisayar tarafından işlenerek teşhis sonucu üretilmektedir. Özel bir deney düzeneği ya da test cihazı kullanan bu yaklaşımda ray hattında ışık yetersizliği veya dengesizliği oluşabilmektedir [76]. Bu durumun dezavantaj oluşturmaması için harici bir ışık kaynağı da kullanılır [77]. Arızanın teşhis edilmesi ile birlikte yerinin de hassas bir şekilde teşhis edilmesi ray denetimi açısından son derece önemlidir. Bu amaçla ray denetiminde yukarıda sözü edilen ekipmanlara ek olarak bir kodlayıcı da kullanılabilir.

Sayısal kameraların kullanıldığı ray denetimi eğitim ve test aşaması olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında elde edilen görüntüler giriş verisi olarak kullanılır. Bu veriler makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak çevrimdışı eğitilir, test aşamasında ise eğitim aşamasında kullanılmayan verilerle sistemin doğruluk ve performans analizi yapılır. Gerek eğitim gerek test aşamasında ray hattından elde edilen görüntüler gürültü giderme, alt görüntü çıkarma gibi bir ön işlemten geçirildikten sonra kullanılır. Sayısal görüntüler genel olarak büyük boyutlu oldukları için doğrudan eğitim ve test işleminde kullanılmazlar. Görüntü üzerinde boyut indirgeme ve öz nitelik çıkarma işlemleri yerine getirilerek daha küçük boyutlu veriler üzerinde eğitim ve test işlemleri gerçekleştirilir [78].

Tez çalışmasının bu bölümünde sayısal kameralar kullanılarak yapılan ray denetim işlemi adımları sunulmaktadır. Bu bölümde eğitim ve test aşamasında makine öğrenmesi yöntemi olarak Rassal Orman (RO) kullanılmıştır. Görüntüler üzerinde öz nitelik elde etme amacı ile Temel Bileşen Analizi (TBA) [79], Tekil Değer Ayrıştırma (TDA) [80], Çekirdek Temel Bileşen Analizi (ÇTBA) [81], Doğrusal Bileşen Analizi (DBA) [82] ve Histogram Karşılaştırma (HK) [83] yöntemleri kullanılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Ray arızası belirlemek için bir tanesi görüntü işlemeye diğeri makine öğrenmesine dayalı iki yönetime ait deneysel sonuçlar birlikte verilmiştir.

3.1. Görüntülerin Ön İşlemden Geçirilmesi

Sayısal kameralardan elde edilen görüntülerin makine öğrenmesi algoritmalarınca işlenmeden önce bazı ön işlem adımlarından geçirilmesi gerekmektedir. Görüntü kırpma, gürültü giderme, boyut indirgeme bu adımlardan bazılarıdır [84].

Görüntü kırpma: Deneysel düzenek ya da ölçüm aletine yerleştirilen kameradan alınan görüntü ray hattı ile birlikte travers, ballast ve çevreye ait görüntüleri de içeren daha büyük çerçevedir. Büyük çerçeve ile uğraşmak hem makine öğrenmesi kullanılarak yapılan eğitim işlemi için gereksiz bilgileri içerecek hem de daha büyük bir veri üzerinde uğraşmaktan dolayı gereksinim duyulan bellek ve işlem gücü ihtiyacı artacaktır. Bu nedenle sayısal kameradan alınan görüntü üzerinde kırpma işlemi uygulanarak alt çerçeve elde edilir ve öğrenme işlemi bu çerçeveler üzerinde gerçekleştirilir. Alt çerçeve elde etme işleminde sayısal kameranın ray hattından yüksekliği, çerçeve boyutları bilgisi kullanılarak Denklem 3.1’de ki gibi elde edilebilir. Denklemde (n_1, n_2) başlangıç noktasını (m_1, m_2) ise pencere boyutlarını göstermektedir. Şekil 3.1’de ise ray hattından elde edilen görüntü üzerinde gerçekleştirilen bir kırpma işlemi görünmektedir.

$$y(i, j) = f(n_1 + i, n_2 + j) \quad (3.1)$$

$$i = 0 \dots m_1 - 1, j = 0 \dots m_2 - 1 \quad (3.2)$$



Şekil 3.1. Ray hattından elde edilen görüntü ve görüntüden ray hattını kırpma

3.1.1. Sayısal Görüntü Üzerinde Gürültü Giderme

Sayısal görüntü işleme uygulamalarında hareket, lens ve ışık gibi nedenlerden dolayı oluşan piksel bozulmaları gürültü olarak adlandırılır. Sayısal görüntü üzerinde oluşan gürültü nedeniyle piksel olması gereken gerçek değerini ifade etmez ve görüntüde verim kaybına neden olur. Görüntü üzerinde oluşan gürültü öğrenme algoritmalarının performansını da etkilemiş olur. Gürültü temizleme işlemi gürültünün türüne bağlı olarak uzaysal domain veya frekans domaininde yapılacak işlemlerle yapılabilir [85]. Uzaysal domainde gürültü modeli matematiksel ifadesi Denklem 3.3'te verilmiştir. Bu işlemin frekans alanında ki karşılığı ise Denklem 3.4'te yer almaktadır. Denklem 3.3'te $f(x, y)$ orijinal görüntüyü, $h(x, y)$ filtre fonksiyonunu $n(x, y)$ görüntüye eklenen gürültüyü, $g(x, y)$ ise sonuç görüntüyü simgelemektedir. Benzer şekilde denklem 3.4'te $F(i, j)$ orijinal görüntüyü, $H(i, j)$ Fourier dönüştürme fonksiyonunu $N(i, j)$ gürültüyü, $G(i, j)$ ise elde edilen sonuç görüntüsünü simgelemektedir. Gürültü temizleme matematiksel ifade ile uzaysal domainde $h(x, y)$ ve $n(x, y)$ fonksiyonlarını, frekans domainde ise $H(i, j)$ ve $N(i, j)$ fonksiyonlarını bulmaktır. İlerleyen bölümde en önemli gürültü türleri ve bu gürültülerin hangi domainde temizleneceği ile ilgili açıklamalar verilmiştir.

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (3.3)$$

$$G(i, j) = F(i, j) \cdot H(i, j) + N(i, j) \quad (3.4)$$

Tuz-Biber Gürültü: Sayısal kamera piksel bozukluğu, zamanlama hatası gibi nedenlerle oluşan keskin dağılımlı bir gürültüdür. Gürültü yüksek frekanslı olduğu için alçak geçiren filtre ile bu tür gürültüler temizlenebilir [86].

Gaussian Gürültü: Bu tür gürültü görüntü üzerinde gelişigüzel dalgalanmalara neden olur. Gürültünün Gauss dağılıma sahip olduğu varsayılır, görüntü üzerindeki toplam etkisi 0'dır. Bu prensiple seçilen eşik değere göre görüntü ortalama değere uzak pikseller gürültü olarak kabul edilir [86].

Periyodik Gürültü: Görüntü üzerinde rastgele değil periyodik olarak değişen nesneler var ise periyodik gürültüden söz edilir. Periyodik gürültü uzaysal domainde temizlenemez, frekans domainde gürültü temizlenerek tekrar uzaysal domain dönüşüm gerçekleştirilmelidir [85].

Bulanıklık Giderme: Görüntüleme esnasında sayısal kamerada oluşan anlık hareket ya da titreşim görüntü üzerinde bulanık bir etki oluşturur. Bu tür bulanıklık görüntü netsizliği ya da görüntü üzerinde hareket efekti oluşturur. Bulanıklığın giderilmesi için bulanıklığın ölçüsüne göre filtre fonksiyon uygulanarak konvolusyon işlemine tabi tutulur. Görüntünün netleştirilmesinde elde edilecek başarımlar bu parametrenin seçimine bağlıdır. Yazılım temelli ya da ataletsel ölçüm birimlerinin kullanıldığı donanım destekli yaklaşımlarla bulanıklaşma parametresi tahmin edilerek, netleştirme filtresi uygulanmaktadır [86].

3.1.2. Görüntü Üzerinde Öz Değer Elde Etme

Yüksek çözünürlüklü sayısal kameralardan elde edilen görüntüler büyük miktarda veri içerirler. Örneğin deneysel çalışmalarda kullanılan Mako G032B/C CCD kamera her çerçevede 658×492×14-bit veri içermektedir. Büyük boyutlu verilerle çevrimiçi yöntemlerde daha büyük bellek ve işlem gücüne gereksinim duyarlar. Bu durum gerçek zamanlı sistemler için dezavantaj oluşturmaktadır. Boyut küçültme veya öz nitelik elde çok boyutlu bir veriyi lineer cebir kullanarak daha küçük boyutlu bir vektörle ifade etmek olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle büyük boyutlu bir veriyi minimum kayıpla daha az değişkenle ifade etme yöntemidir. Aşağıda sırası ile deneysel çalışmalarda kullanılan TBA, DBA, ÇBA ve HK öz değer elde etme yöntemler açıklanmıştır.

TBA: Veri seti üzerinde aralarında korelasyon olan değişkenleri lineer dönüşümle aralarında korelasyon olmayan ortogonal değişkenlere dönüştürme prensibine dayanır [79].

1.Adım: Çok boyutlu verinin her boyuttaki ortalaması elde edilir, elde edilen bu ortalama değeri veri setindeki her bir elemandan çıkartılır. Denklem 3.5'te x veri setini, n toplam eleman sayısını, $\bar{x}$ ise ortalama değerini göstermektedir.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad 1 < i < n \quad (3.5)$$

$$x_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 0 \dots n \quad (3.6)$$

2.Adım: Elde edilen veri seti üzerinde kovaryans matrisi çıkartılır. Kovaryans her zaman iki boyut arasında hesaplanır. Bu nedenle çok boyutlu bir veri setinde tüm boyutların ikili ihtimalleri üzerinde kovaryans hesaplanmalıdır. Denklem 3.6’da n veri boyutunu göstermek üzere t toplam kovaryans sayısını vermektedir. Denklem 3.7’de iki değişken arasında kovaryans değerini verilmiştir. Boyutları eşit olmak üzere x ve y vektörlerinde ki her bir elemanın Denklem 3.5’de elde edilen ortalama değerden farklarının çarpımları toplamı, $n-1$ ’e bölünerek kovaryans elde edilir. Kovaryans değeri pozitif ise iki değişken arasında doğrusal bir ilişki vardır, negatif ise doğrusal bir ilişki yoktur, sıfır ise ilişki yoktur. Denklem 3.8’de ise örnek olarak üç boyutlu bir veri seti üzerinde kovaryans matrisinin nasıl elde edildiği gösterilmektedir.

$$t = \frac{n!}{(n-2)! * 2} \quad (3.6)$$

$$cov(x, y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}, i=0 \dots n \quad (3.7)$$

$$C = \begin{pmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

3.Adım: Kovaryans matris’ten öz değer ve vektörleri elde etme işlemidir. Kovaryans matris üzerinde doğrultusu değişmeyen sadece büyüklüğü değişen vektörler, o matrisin öz vektörü olarak kabul edilir. Denklem 3.9 ve Denklem 3.10’da C kovaryans matrisi ile D en büyük öz değeri ve V öz vektörü arasındaki ilişki verilmektedir. Öz değer elde etmede zorunlu olmamakla birlikte tüm değerler Denklem 3.11 kullanılarak $[0,1]$ aralığına normalize edilirse hesaplama karmaşıklığı azalacağından işlem gücü açısından avantaj oluşturacaktır. Elde edilen öz değerlerden ilki veriyi en iyi ifade eden değerdir, makine öğrenmesi algoritmalarında kaç adet öz değer seçileceği iyi belirlenmelidir. Gereğinden az öz değer seçmek sistemin iyi eğitilememesine, çok fazla değer seçmek ise fazla işlem gücü ve bellek tüketimine neden olur.

$$(C - D.E).V = 0 \quad (3.9)$$

$$(C - D.E)^{-1} = 0 \quad (3.10)$$

$$x_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.11)$$

HK: Bu yöntemde veri kümesi ortalama ve standart sapma değerleri öz değer olarak kullanılır. Standart sapma bir veri kümesi üzerinde ki verilerin merkezden ne kadar uzağa yayılım gösterdiğini ifade etmektedir. Veri seti üzerinde ortalama alma işlemi Denklem 3.5’te verilmişti, standart sapma ise Denklem 3.12’de verilen fonksiyon ile bulunmaktadır.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}{n}, i = 0 \dots n \quad (3.12)$$

TDA: TDA işlemine benzer şekilde öz değer bulma işleminde kullanılan bir başka yöntemdir. Öz değer elde etmek için yine matris üzerinde işlem yapılır, TDA’ den farklı olarak kovaryans matris elde edilmesine gerek yoktur, lineer cebir dönüşümleri doğrudan giriş matrisi üzerinde yapıldığı için işlem gücü azalır, dolayısı ile TDA’ den daha hızlı çalışır. TDA matematiksel modeli denklem 3.13’de olduğu gibi bir matrisi çarpanlarına ayırma problemi olarak ele alınabilir. Denklemden A giriş matrisi olmak üzere U $m \times n$ dikgen, V $n \times m$ dikgen, S ise $n \times n$ boyutunda köşegen üzerinde tekil değerleri içeren öz değer matrisidir. Denklem 3.14’te verilen bu öz değer matristen öz değerler vektörü Denklem 3.15’te olduğu gibi basitçe ayrıştırılabilir [80].

$$A = USV^T \quad (3.13)$$

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & s_{nn} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$s_i = \sum S_{ii}, i = 0 \dots n \quad (3.15)$$

ÇTBA: TBA yüksek boyutlu verilerin doğrusal değişkenlerini modellemek için tasarlanmıştır. Ancak verinin içinde doğrusal olmayan alt uzaylarda olabilir. Bu durumda TBA ile elde edilecek öz değerler veriyi doğru ifade edemeyecektir. Bu problemin çözümü için geliştirilen yöntemlerden birisi olan ÇTBA ile TBA kıyaslandığında hesap karmaşıklığı artar ancak doğrusal olmayan problemlerin çözümünde daha etkindir [81].

3.2. Rassal Orman Algoritması

Rassal Orman (RO), hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Geleneksel karar ağaçlarının bir alt dalı olarak kabul edilen RO aşırı öğrenme problemi olmaması, kayıp verilerde iyi sonuç üretmesi, az bellek tüketimi ve işlem gücü gerektirmesi açısından popüler bir makine öğrenmesi yöntemidir [87-89]. 2001 yılında Leo Breiman tarafından geliştirilen RO'da bir sınıflandırıcı yerine birden fazla sınıflandırıcı üretilir, ardından tüm sınıflandırıcılardan alınan oylar ile veriyi sınıflandırma prensibi ile çalışır.

RO geleneksel karar ağaçlarında olduğu gibi en iyi dalı kullanarak her bir düğümü dallara ayırmak yerine, her bir düğümde rastgele olarak seçilen değişkenler arasından en iyisini kullanarak her bir düğümü dallara ayırır. En iyi parametreyi belirlerken genellikle bilgi kazancı kriteri göz önünde bulundurulur. Her bir veri seti orijinal veri setinden yer değiştirmeli olarak üretilir. Sonra rastgele özellik seçimi kullanılarak ağaçlar geliştirilir. RO' da oluşturulan ağaçlar karar ağaçlarında olduğu budanmaz, su sayede RO aşırı öğrenme problemine karşı dayanıklı olur. Tablo 3.1'de RO algoritmasının güçlü ve zayıf yönleri tablo olarak verilmiştir.

Tablo 3. 1. Rassal orman algoritması başlıca avantaj ve dezavantajları

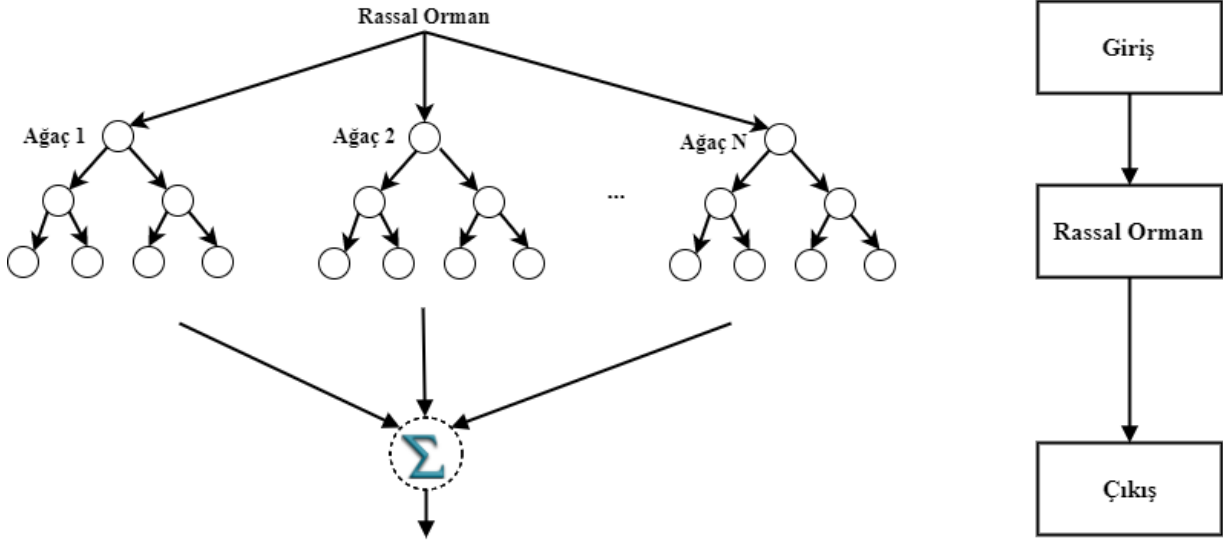
Avantajlar	Dezavantajlar
Hem Regresyon hem de sınıflandırma problemlerinde kullanılabilir.	Regresyon problemlerinde sınıflandırma problemlerinde olduğu kadar başarılı değildir.
Kayıp verilerde etkindir.	Random özelliğinden dolayı model üzerinde tam bir kontrol söz konusu değildir.
Aşırı öğrenme problemine karşı daha dayanıklıdır.	
Büyük veri ve çok değişkenli veriler üzerinde etkindir.	

RO algoritması oluşturulurken giriş olarak ağaç sayısı N ve her bir düğümde kullanılacak değişken sayısı d belirlenir. RO algoritması dört adımlı olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1.Adım:** k -adet örnek eğitim setinden rastgele seçilir (Genellikle eğitim kümesinin $2/3$ 'ü).
- 2.Adım:** k -adet karar ağacı oluşturulur ve her düğüm için d adet özellik rastgele seçilir ($m < M$ olmak üzere, D veri setinde ki toplam özellik sayısını göstermektedir).
- 3.Adım:** İlk iki adım k defa tekrar edilir.
- 4.Adım:** Tüm dallardaki sonuçlar üzerinde oylama yapılır, çoğunlukta olan kazanır.

Şekil 3.2’de tipik bir RO yapısı verilmiştir. Denklem 3.16’da ise RO’da bulunan ağaçlar içinde yapılan oylama işleminin matematiksel formülü verilmiştir.

$$P(c|f) = \sum_i^n P_i(c|f), 0 < i < n \quad (3.16)$$



Şekil 3.2. Rassal orman yapısı

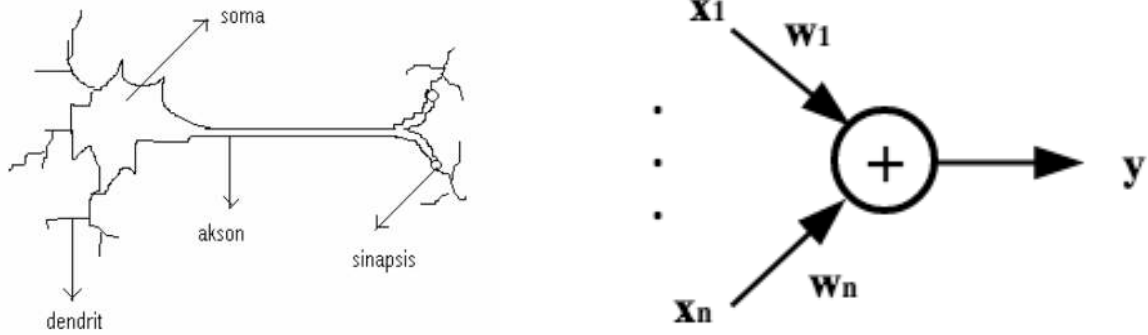
Yukarıda ki sahte koda göre RO algoritması kullanıcıdan veri setinin kendisi haricinde N ağaç sayısı ve m değişken olmak üzere toplam iki giriş almış olur. Genel olarak M toplam değişken sayısının karekökü kadar m değişkeni seçilmesi en optimum sonucu vermektedir.

Eğitim işlemi sonrası, eğitim setinin kalanı (1.Adımdan kalan 1/3'ü) hata teşhisi ve performans için kullanılır. RO' da sınıfların homojenliğini ölçmek için Denklem 3.17'da verilen GINI indeksi kullanılmaktadır [89]. GINI indeks değeri ne kadar düşükse RO sınıfları o kadar homojendir. Denklemden p_j her bir verinin ilgili satırda ki tüm verilerin toplamına bölümünün karesini göstermektedir.

$$GINI = 1 - \sum_{j=1}^n \frac{p_j}{\sum_{i=0}^j p_i} \quad (3.17)$$

3.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Makine öğrenmesi yöntemi olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) 1940'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. YSA'lar başlangıçta doğrusal problemlerin çözümünde kullanılmış ise de 1970'li yıllarda doğrusal olmayan problemlerin çözümüne de başarı ile uygulanmıştır. 1985 yılında ise kontrol, görüntü ve ses tanıma, tahmin ve kestirim, arıza teşhisi ve tıp gibi birçok alanda YSA başarı ile uygulanmıştır [90]. Şekil 3.3'te örnek bir biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir hücresi verilmiştir. Bir yapay sinir hücresi biyolojik sinir hücresini taklit eden bir matematiksel model olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3. Yapay sinir modeli

Şekil 3.3'te verilen basit yapay sinir ağının matematiksel modeli Denklem 3.18'de verilmiştir. Denklem 3.3'te y sistemin çıkış değeri, sistemin giriş değeri x_i ve girişlerin ağırlıkları olan w_i değerlerinin çarpımlarının toplamıdır. Denklem 3.18'de çıkış değeri için verilen toplam fonksiyonunun yanı sıra çarpım, minimum, maksimum, çoğunluk ve kümülatif toplamda kullanılabilmektedir. Bu fonksiyonlar sıra ile Denklem 3.19 – Denklem 3.23'te verilmiştir. Denklem 3.19'da y çıkış değeri sistemin giriş değeri x_i ve girişlerin ağırlıkları olan w_i değerlerinin çarpımlarının çarpımıdır. Denklem 3.20'de y çıkış değeri sistemin giriş değeri x_i ve girişlerin ağırlıkları olan w_i değerlerinin çarpımlarından değeri en büyük olana, Denklem 3.21'de ise minimum olana eşittir.

Denklem 3.22'de y çıkış değeri sistemin giriş değeri x_i ve girişlerin ağırlıkları olan w_i değerlerinin çarpımlarından elde edilen pozitif ve negatiflerden çoğunlukta olana eşittir. Denklem 3.23'te ise hücrenin o anki değeri olan y^t kümülatif olarak hesaplanır, yani hücrenin bir önceki toplamı olan y^{t-1} o anki giriş değerleri x_i ve girişlerin ağırlıkları olan w_i değerlerinin çarpımlarının toplamıyla toplanır.

$$y = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.18)$$

$$y = \prod_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.19)$$

$$y = \max(x_i w_i) \quad (3.20)$$

$$y = \min(x_i w_i) \quad (3.21)$$

$$y = \sum_{i=1}^n \text{Sgn}(x_i w_i) \quad (3.22)$$

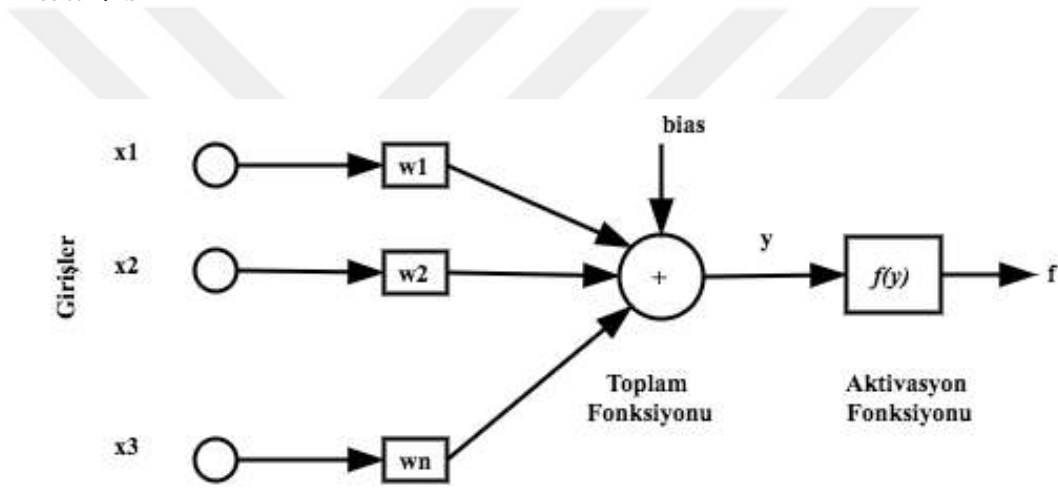
$$y^t = y^{t-1} + \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.23)$$

Şekil 3.4'te bir YSA'nın genel yapısı verilmektedir. YSA ağının eğitiminde amaç ağı en iyi modelleyen W ve b katsayılarının bulunmasıdır. Yukarıdaki denklemler ile kıyaslandığında bir bias değeri toplam fonksiyonuna eklenmektedir. Yukarıdaki toplama fonksiyonları

Denklem 3.24'te olduğu gibi genelleştirilirse, sistemin çıkışı olan y , sistemin x giriş değerleriyle doğrusal hareket etmektedir. Denklem 3.25'te olduğu gibi eklenecek b (bias) değeri x/y doğrusunun ötelenmesini sağlayacak bir katsayıdır. Bias katsayısının bir diğer avantajı sistem giriş x değerlerinin sıfır olması durumunda ortaya çıkar, iterasyon sayısından bağımsız olarak y değeri her zaman sıfıra eşit olacak, dolayısı ile sistem öğrenemeyecektir.

$$y = Wx \quad (3.24)$$

$$y = Wx + b \quad (3.25)$$



Şekil 3.4. YSA modeli

YSA'larda ağ çıkış değeri doğrudan kullanılmak yerine bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilirler. Aktivasyon fonksiyonu ile bir YSA doğrusal olmayan bir probleme de uyarlanabilmektedir. Denklem 3.26 doğrusal aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılır, toplama fonksiyonundan gelen y çıkış değeri A sabit katsayısı ile çarpılarak elde edilir. Denklem 3.27 adım fonksiyonu olarak adlandırılır, eşik değerle kıyaslanan y değerine bağlı olarak 0 ya da 1 olmak üzere iki değerden birisini alabilir. Denklem 3.28 sigmoid olarak adlandırılır, aynı zamanda modeli doğrusal olmayan modele dönüştüren, yaygın olarak kullanılan bir fonksiyondur, toplama fonksiyonundan gelen değeri $\{0, 1\}$ aralığında bir değere dönüştürür. Denklem 3.29 sigmoid fonksiyonunda olduğu gibi sistemi doğrusal olmayan bir modele dönüştürür, toplama fonksiyonundan gelen değeri $\{-1, 1\}$ aralığında bir değere dönüştürür.

Denklem 3.30 özellikle derin öğrenme algoritmalarında kullanılan softmax aktivasyon fonksiyonudur. Softmax doğrusal bir sınıflandırma yerine her bir sınıfa ait benzerlik için olasılık değeri üretir. Böylece çıkış değeri daha yorumlanabilir olmaktadır.

$$f = Ay \quad (3.26)$$

$$f = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } y > \text{Eşik değeri ise} \\ 0, & \text{Eğer } y \leq \text{Eşik değeri ise} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$f = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad (3.28)$$

$$f = \frac{e^y + e^{-y}}{e^y - e^{-y}} \quad (3.29)$$

$$f(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^K e^{z_k}} \quad (3.30)$$

3.3.1. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

Çok katmanlı YSA'lar da öğrenme temel olarak ağı en iyi ifade eden W ağırlık matrisinin ve b değerlerinin bulunmasıdır. Bu değerler eğitimin başlangıcında sabit veya rastgele seçilebilir, ancak başlangıç değerlerinin Gauss dağılımına sahip seçilmesi en optimum yoldur. Ağın öğrenmesi; arzu edilen çıkış ile modelin elde ettiği çıkışların karşılaştırılarak ağırlıkların her bir iterasyonda güncellenmesi prensibine dayanmaktadır. Denklem 3.31'de her bir sinir ağı için arzu edilen çıkış değeri t_i ile ağdan elde edilen çıkış değeri y_i arasındaki fark e_i hata değerini göstermektedir. Çok katmanlı YSA'da ki çıktı katmanında ki toplam hata ise Denklem 3.32'de verildiği gibi her bir sinir hücresi için hesaplanarak toplam hata bulunur. Modelin eğitiminde ki amaç bu hatayı minimize etmektir.

$$e_i = t_i - y_i, 1 < i < n \quad (3.31)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (3.32)$$

Denklem 3.33'te değişim miktarı t anındaki değişim miktarı $\Delta w_{jm}^a(t)$ ($t-1$) anındaki değişim miktarına bağlı olarak bulunur. Denklemde verilen λ ve a sırası ile öğrenme ve momentum katsayılarıdır. Öğrenme katsayısı ağın performansında önemli rol oynamaktadır. Öğrenme katsayısının küçük olması eğitim süresini uzatır, büyük olması ise kısaltır, çok büyük olursa yakınsamayı engeller. Momentum katsayısı ise ağın eğitimi esnasında yerel minimuma takılmasını engeller. Ağırlık değişim değerinin belli bir oranda bir sonraki değişime eklenmesini sağlar ve toplam hata sıfıra daha fazla bir eğilimle yaklaşır. Denklemde δm ise m . çıktı katmanına ait toplam hatadır ve Denklem 3.34'te ki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta w_{jm}^a(t) = \lambda \delta_m y_j^a + A w_{jm}^a(t-1) \quad (3.33)$$

$$\delta m = y_m(1 - y_m)e_m \quad (3.34)$$

Denklem 3.33'te olduğu gibi değişim miktarı hesaplandıktan sonra modelin ağırlıkları w matrisi Denklem 3.35'te olduğu gibi, bias değeri ise Denklem 3.36'da ki gibi güncellenir.

$$w_{jm}^a(t) = w_{jm}^a(t-1) + \Delta w_{jm}^a(t) \quad (3.35)$$

$$b_m(t) = b_m(t-1) + \Delta b_m(t) \quad (3.36)$$

3.3.2. Yapay Sinir Ağlarında Test

YSA eğitim işleminde kullanılmayan yeni bir veri seti ile performansı test edilmelidir. Bu amaçla eğitim zamanı, iterasyon sayısı gibi birçok kriter kullanılabilir ancak en önemli kriter doğruluk tahminidir. Doğruluk tahmini gerçek ile tahmin edilen arasında ki fark olarak tanımlanır. Bu amaçla kullanılacak yaygın üç öngörü doğruluk ölçüleri sırası ile Denklem 3.37 ile Denklem 3.39 arasında verilmiştir. Bunlar sırası ile Hata Kareleri Toplamı (HKT), Ortalama Hata Kareler (OHK) ve Karekök Ortalama Hata Kareler (KOHK) dır. Bir YSA modelinin eğitim işleminin ne zaman bitirileceği hatanın belirlenen eşik değerin altına düşmesidir [91].

$$HKT = \sum_{i=1}^n (e_t)^2 \quad (3.37)$$

$$OHK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (e_t)^2 \quad (3.38)$$

$$KOHK = \sqrt{OHK} \quad (3.39)$$

3.4. Evrişimsel Yapay Sinir Ağları

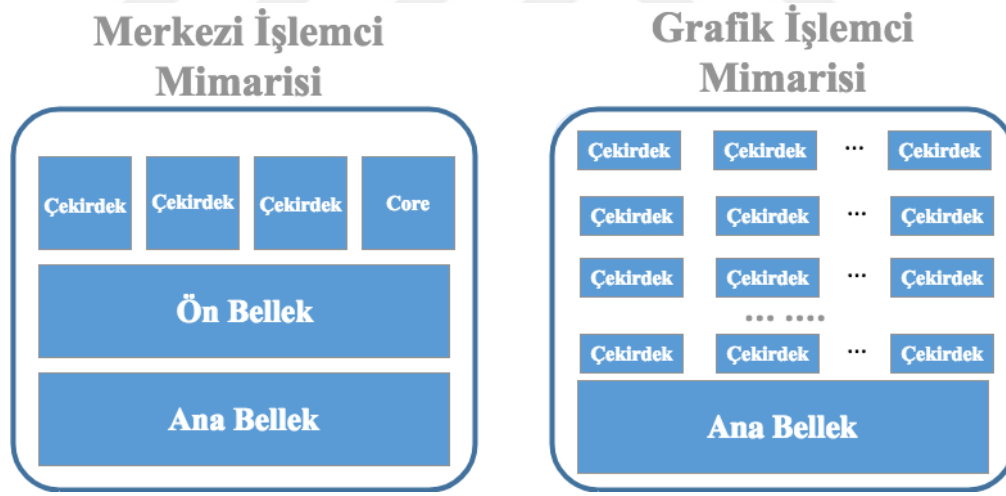
YSA'lar başlangıçta insan öğrenme sistemini en iyi şekilde temsil eden ve 1990'lı yıllara kadar arıza teşhisi, yüz tanıma, medikal görüntü işleme gibi alanlarda yoğun olarak kullanılmıştır. Ancak YSA kullanan uygulamalarda eğitim işleminin yüksek işlem gücü gerektirmesi, eksik öğrenme ve aşırı öğrenme durumlarının yaşanması verini nedeni ile zamanla verimsiz hale gelmişlerdir. Aşırı öğrenme ve eksik öğrenme kavramları aşağıda açıklanmıştır.

- **Aşırı Öğrenme:** YSA modeli eğitim verilerinden öğrenmek yerine aşırı eğitim sonucu modeli ezberler. Bu durumda eğitilen model mevcut veriler üzerinde mükemmel sonuçlar verir, ancak ilk kez göreceği veriler üzerinde beklenen sonuçları veremezler.
- **Eksik Öğrenme:** İtersyon sayısının veya eğitim veri sayısının az olması nedeniyle ağın yeterince öğrenememesi durumudur. Veri sayısı arttırılarak ya da model değiştirilerek çözülebilir.

YSA'ların popüler olduğu yıllarda görüntü işleme, bilgisayarlı görme ile yapılan arıza teşhisi uygulamalarında sınırlı işlem gücü ve bellek kullanımı nedeni ile giriş verisi olarak görüntünün kendisini kullanmak yerine Bölüm 3.3'te anlatılan boyut indirgeme ile elde edilen öz değerler giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Eksik öğrenmenin bir diğer nedeni ise bazı problemlerin çözümünde bu öz değerlerin giriş verisini yeterince temsil edememesi ya da yetersiz kalmasıdır.

YSA'ların zamanla yetersiz kalmasının bir diğer nedeni bilgisayarlı görme uygulamalarında kullanılan verinin büyümesidir. Büyük Veri hem donanım aygıtlarının ürettikleri veri çeşitliliğinin, veri boyutunun ve veri hızının artması olarak özetlenebilmektedir [92].

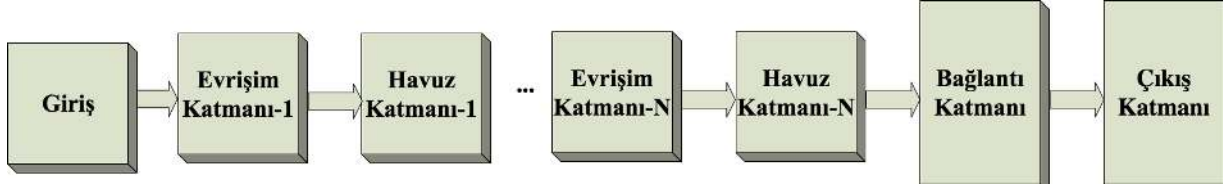
YSA'ların sahip oldukları bu dezavantajlar nedeni ile yerlerini RO gibi diğer makine öğrenmesi algoritmalarına bırakmışlardır. Ancak 2006 yılı sonrası özellikle Dünya genelinde yapılan ImageNet yarışmalarında derin öğrenme temelli YSA'lar ile elde edilen çok yüksek doğruluk oranları dikkatleri tekrar YSA'lar üzerine çekmiştir [90]. Günümüzde gerçek zamanlı nesne tanıma, sınıflandırma, ses ve konuşma tanıma gibi uygulamalarda derin öğrenme yaygın olarak kullanılmaktadır [91]. YSA'ların tekrar popüler olmasındaki bir diğer neden Grafik İşlemci Birimi (GİB) maliyetlerinin günümüzde oldukça uygun hale gelmesidir. GİB'ler Merkezi İşlem Birimi (MİB) programlama ile kıyaslandığında daha fazla çekirdek sayısına sahiptirler ve 30-100 kata kadar hız artışı sağlamaktadır [92]. Bu yapıları nedeni ile paralel programlamaya da çok uygundurlar. Örneğin Intel i5 serisi 6.nesil MİB'ler 4 çekirdekli mimari ile üretilirken, Nvidia Geforce 930Mx 384 çekirdeğe sahiptir. Şekil 3.5'te MİB ile GİB mimarisi görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.5. Merkezi işlemci birimi ile Grafik işlemci mimarisi karşılaştırması

Ray denetim işleminde derin öğrenme temelli yaklaşım (Faghih-Roohi, 2016) tarafından kullanılarak doğruluk oranı diğer öğrenme algoritmaları ile karşılaştırılmış, en yüksek doğruluk oranı Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) ile elde edilmiştir [93]. Çizgi kameranın kullanıldığı çalışmada ayrıca on farklı tipte civata tespiti ve bu civataların tip sınıflandırılması içinde yine ESA kullanılmıştır [93].

Faghih-Roohi tarafından gerçekleştirilen çalışmada ray yüzeyi hatalarının tespiti için video kameradan elde edilen çerçeveler üzerinde ESA ile sınıflandırma yapılarak %92 doğru sınıflandırma oranı elde edilmiştir [93].



Şekil 3.6. Evrimsel yapay sinir ağı blok diagramı

Şekil 3.6’da ESA modelinin genel blok diagramı ve çalışma adımları verilmiştir. Bu adımlar sırası ile giriş verisini alma, giriş verisi üzerinde alt-örnek oluşturma (evrişim) ve oluşturulan alt-örnekler üzerinde havuz (özellik seçimi) yapma işlemlerini kapsamaktadır. Öğrenme ağında istenildiği kadar özyinelemeli olarak evrişim ve havuz ara katmanları çoğaltılabilir. Son adımda tüm ağdaki tüm sinir hücrelerinin bağlandığı bağlantı katmanı ve sınıflandırıcı sayısı kadar çıkış hücresi bulunmaktadır [91].

Evrişim Katmanı: Bu aşamada giriş verisi üzerinde Denklem 3.40’ta gösterildiği gibi daha küçük bir çekirdek matris seçilerek konvolüsyon işlemi uygulanmaktadır. Giriş matrisi üzerinde satır ve sütunlar boyunca gezdirilen bu çekirdek matris sonrası giriş verisinden n adet alt veri matrisi oluşturulmuş olur. Bu işlem ESA sınıflandırma başarısı açısından büyük önem arz etmektedir. Saha uygulamalarında sınıflandırıcının başarısını arttırmak için giriş verisine gürültü ekleme, simetri alma, döndürme gibi ön-işlemler de uygulanarak veri kümesi genişletilir. Eğitim işlemine bu ön adımları eklemek sözü edilen gürültülü, simetrik, döndürülmüş verisinde tanınmasını sağlamaktadır. Denklem 3.40’ta f giriş verisi k seçilen $m \times n$ boyutunda kernel matrisi olmak üzere bu konvolüsyon sonrası i adet C ile ifade edilen alt örnek elde edilmektedir.

$$C_{ij}^l = \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^{m-1} w_{ab} f_{(i+a)(j+b)}^{l-1} \quad (3.40)$$

Havuz Katmanı: Elde edilen alt-örnekler üzerinde $m \times n$ boyutunda ikinci bir kernel matris ile tekrar konvolüsyon işlemi uygulanır ancak bu defa alt-örnek elde etmek yerine çekirdek matris içinde ki verilerden ağdaki hücrelerin eğitiminde kullanılacak ve alt-örneği ifade eden özellikler seçilir. Bu aşamada çekirdek boyutu minimum 2×2 boyutunda olmaktadır. Özellik olarak matris içindeki minimum, maksimum ya da ortalama değer seçilebilir. Denklem 3.41’de verilen C_i bir önceki adımda elde edilen alt-örnek olmak üzere bu alt-örnekler üzerinde seçilen $m \times n$ boyutundaki p kernel matrisi gezdirilerek her bir pencereden Denklem 3.42’de olduğu gibi özellik değerler elde edilir. Geleneksel YSA’ lar üzerinde veri girişi olarak kullanılacak görüntü üzerinde Bölüm 3.3’te anlatılan boyut küçültme/öz-değer elde etme işlemi kullanılmaktadır. Ancak ESA modelleri üzerinde giriş verisi üzerinde verinin anlamını düşürmemek için boyut küçültme/öz-değer elde etme kullanılmaz. Hatta tam aksine modelin iyi eğitilebilmesi için gürültü ekleme gibi ön-işlemler ile veri genişletilir.

$$P_{vec} = \sum_i C_i * p \quad (3.41)$$

$$\sum_1^n P_{vec} = \left\{ \begin{matrix} \min \\ \max \\ \text{mean} \end{matrix} \right\} \sum_i C_i \quad (3.42)$$

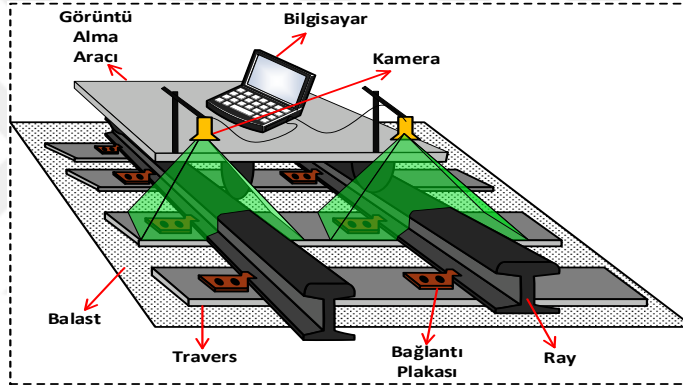
Bağlantı Katmanı: Bu katman çıkış katmanından bir önceki katmandır. ESA modelinde yukarıda verilen evirişim ve havuz katmanları öz-yinelemeli olarak tekrar edilebilir. Seçilecek katman sayısı ağıın eğitiminde aşırı öğrenme ve eksik öğrenme oluşturmayacak şekilde belirlenmelidir. Bu amaçla Bölüm 3.5.2’de verilen model performans testleri kullanılabilir.

Relu: Relu EYSA ile birlikte kullanılmaya başlanan Bölüm 3.3’te verilen aktivasyon fonksiyonlarından bir tanesidir. YSA ile kullanılan sigmoid gibi aktivasyon fonksiyonları negatif değerlerde içerdiğinden eğitim süresini uzatmaktadır. Relu ise negatif değerlerde 0, pozitif değerlerde kendi değerini veren bir fonksiyondur doğrultulmuş lineer bir fonksiyondur. EYSA ağlarında aktivasyon fonksiyonu olarak Relu kullanılması durumunda eğitim süresinin altı kat hızlandığı görülmüştür [91].

Çıkış Katmanı: ESA modelinde elde edilmek istenen sınıf sayısı kadar hücre bulunan ağdaki son katmandır. Genellikle çıkış değerleri yüzdelik tahmini ifade eden $\{0-1\}$ aralığına normalize edilmiş değerler olmaktadır.

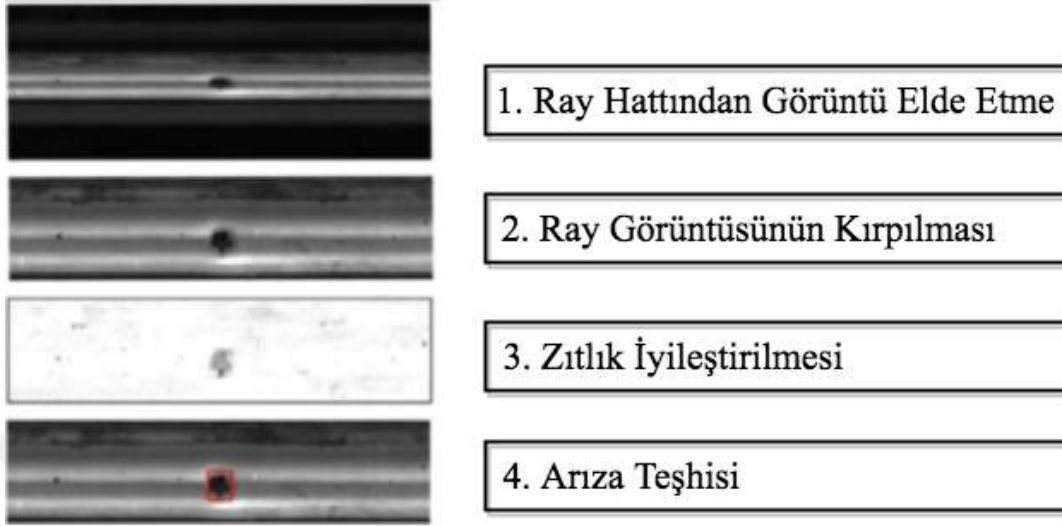
3.5. Ray Hattı Yüzey Arıza Teşhisi İçin Görüntü İşleme Temelli Bir Yaklaşım

Tezin bu bölümünde ray hattı yüzeylerinde oluşan oyulma, aşınma, kırık türü arızalar için sayısal kamera kullanan, görüntü işleme temelli bir yaklaşım sunulmuştur. Sunulan yöntem Q. Le ve S. Ren tarafından sunulan *Ayrık Ray Yüzeyi Hatalarının Teşhisi İçin Gerçek Zamanlı Analiz* başlıklı çalışmalarını temel alan bir yöntemdir [94]. Sunulan çalışmada olduğu gibi, bilgisayar görmesine dayalı ray hattı arıza teşhisi uygulamalarında Şekil 3.7’de ki gibi sayısal kamera, bilgisayar ve bu ekipmanları taşıyacak bir deney aracı gerekmektedir.



Şekil 3.7. Görüntü işleme temelli ray yüzeyi arıza teşhisi için kullanılan deney aracı

Li (2012) tarafından sunulan çalışma Şekil 3.8’de verilen dört ana adımda çalışmaktadır. Bu adımlar aşağıda sırası ile açıklanmıştır [94].



Şekil 3.8. Önerilen çalışmada gerçekleştirilen gerçek zamanlı ray yüzey hata tespiti [94]

1.Adım: Bu adımda sayısal kamera ile ray hattından görüntü alınmaktadır.

2.Adım: Bu adımda ray hattından alınan görüntü, ray hattını içerecek şekilde kırpılmaktadır: Görüntüde arıza tespiti yapılabilmesi için sayısal kameranın ray hattından yüksekliği ve görüntü çerçeve boyutu bilgileri kullanılarak Bölüm 3.1’de anlatılan ve Denklem 3.1’de verilen eşitlik kullanılarak görüntü kırpılmıştır.

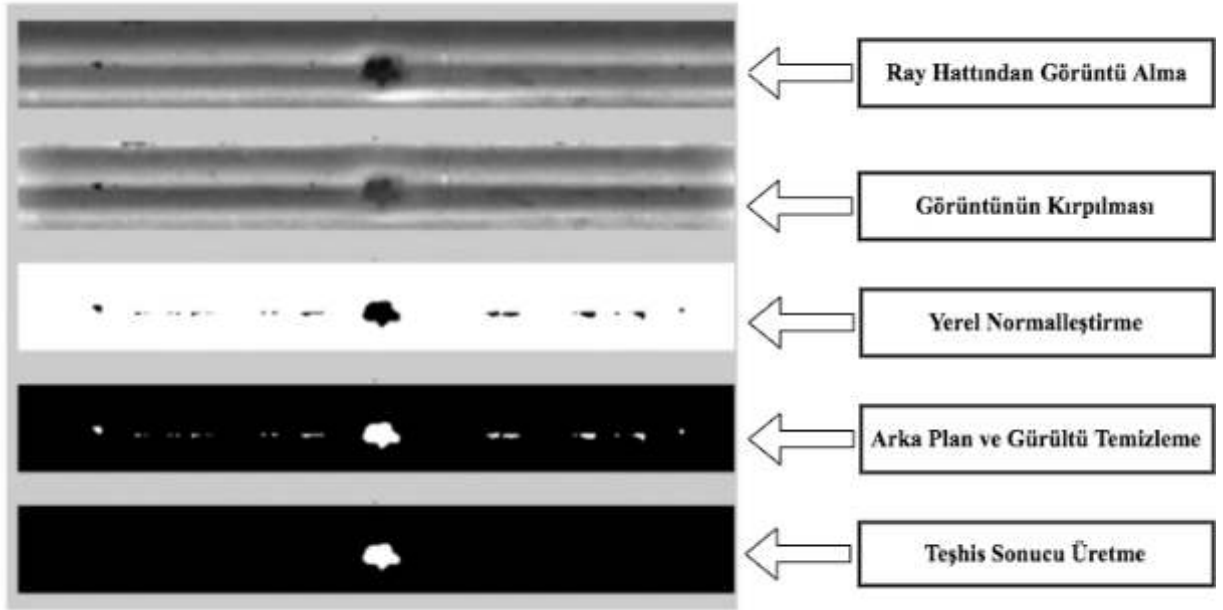
3.Adım: Elde edilen çerçeve üzerinde zıtlık iyileştirmesi yapılmıştır: Zıtlık iyileştirmesi, arızalı bölge ile görüntü arka plan ayrımının daha belirgin hale getirilmesi için tüm görüntü üzerinde değil, yerel normalleştirme kullanılarak görüntünün daha küçük bölgeleri üzerinde yapılmıştır. Bu amaçla görüntü $w \times h$ boyutunda hayali pencerelere bölünerek, her penceredeki görüntü noktaları pencerenin ortalama ve varyans değerleri kullanılarak normalize edilmiştir.

4.Adım: Arıza teşhis edilmiştir: Bu adımda elde edilen görüntü arızalı bölge, arka plan ve gürültü olmak üzere üç tür bilgi içermektedir. Görüntü üzerindeki arka plan tekdüze dağılıma sahip yüksek yoğunluklu, arızalı bölge düşük yoğunluklu ve gürültü ise rassal dağılıma sahiptir. Arızalı alanın tespiti için enine ve boyuna izdüşüm kesişimlerinde eşik değerini aşan düşük yoğunluklu bölge kare alan içine alınarak arıza tespiti yapılmıştır.

Atıf yapılan çalışmada 1200×512 çözünürlükte 600 adet görüntü kullanılmıştır [94]. Bu görüntülerin 300 tanesi arıza içermemekte, 300 tanesi ise en az bir tane 314 mm^2 ’den küçük tip-1 olarak adlandırılan ve 314 mm^2 ’den büyük tip-2 olarak adlandırılan arıza içeren görüntülerdir.

Performans analizi zıtlık matrisi oluşturularak yapılmış 93% doğruluk değeri ve 216 km/s gerçek zamanlı çalışma hızı elde edilmiştir. Çalışmanın sözü edilen avantajların yanı sıra sadece yüzey hatalarını teşhis edebilmektedir. Çalışmanın bir diğer dezavantajı ise ray hattında oluşan yağ ve toz kalıntılarının da arıza gibi algılanabilmesidir. Ayrıca kırık, aşınma, kılcal çatlak türü ray arızaları bulunamamaktadır.

Atıf yapılan çalışmaya önerilen yeni yaklaşımın blok diyagramı ise Şekil 3.9’da verilmiştir [95]. Önerilen yöntem görüntü işleme temelli çalışmaktadır ve atıf yapılan çalışmaya benzer dört aşamalı bir algoritma içermektedir. Her iki yöntemde sunulan ilk üç adım ortaktır, yerel normalleştirme için en yüksek deneysel başarımlar 15×15 alt pencere boyutu ile elde edilmiştir. Dördüncü adım ise üç alt adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar sırası ile görüntüye ikili dönüşüm uygulanması, arka plan ve gürültülerin silinmesi, son adım ise gürültülü bölgenin elde edilmesidir.



Şekil 3.9. Önerilen görüntü işleme temelli yaklaşımının çalışma adımları

Yerel normalleştirme Denklem 3.43'te olduğu gibi pencere üzerindeki her bir nokta pencere ortalama değeri ve varyansı kullanılarak normalleştirilmektedir. Denklem 3.40'da $f(x, y)$ görüntü penceresini, μ pencerenin ortalama değerini, σ pencerenin varyans değerini ifade etmektedir. Pencere içindeki tüm (x, y) noktaları normalleştirildikten sonra $g(x, y)$ ile ifade edilen yeni pencere elde edilmektedir.

$$g(x, y) = \frac{f(x, y) - \mu}{\sigma} \quad (3.43)$$

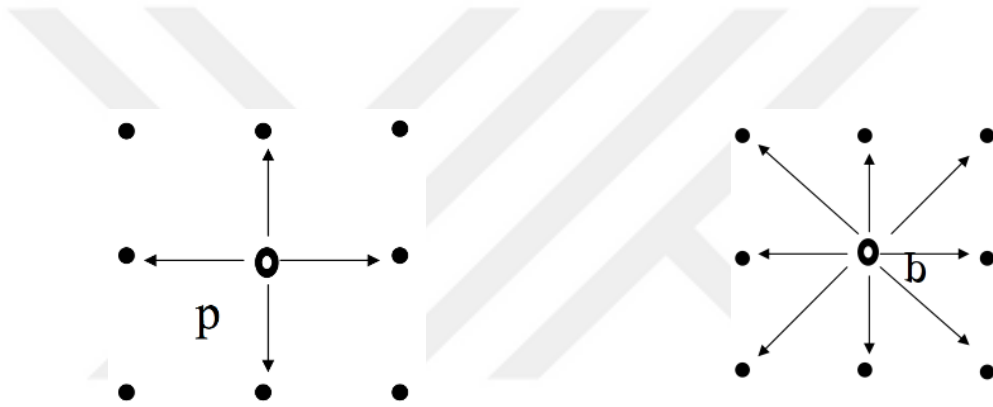
Bu işlem sonrası arıza içeren görüntüdeki arızalı bölge ile arka plan ayrımı daha belirgin hale gelmektedir. Bu adımda arka planın görüntüden silinmesi için Denklem 3.44'ta verildiği gibi elle seçilen bir eşik değere göre gri resim ikili resme dönüştürülerek yüksek yoğunluklu ve tekdüze dağılıma sahip arka plan görüntüden kaldırılmaktadır.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } g(x, y) \geq \text{eşik değeri ise} \\ 0, & \text{eğer } g(x, y) < \text{eşik değeri ise} \end{cases} \quad (3.44)$$

Son işlem ise gürültüleri temizlemektir, Şekil 3.9'da teşhis sonucu üretilmesinden bir önceki adımda arızalı bölge ile birlikte gürültü içeren alanlarda görülmektedir. Arızalı teşhis sonucunun üretilmesi için gürültülü bölgenin büyüklüğü önemlidir. Görüntüde bölgenin büyüklüğünün hesaplanması için Şekil 3.10'da verilen komşuluk değerlerine bakılması gerekmektedir, nokta ve komşulukları aynı değerde ise aynı bölgeye dahil olarak değerlendirilirler ancak değerleri farklı ise aynı bölgeye dahil değildir. Alan büyüklüğü hesaplanırken komşu görüntülerinde komşuluk değerlerine öz-yinelemeli olarak bakılarak alan hesaplanmaktadır. Denklem 3.40'da yapılan işleme benzer bir eşik değeri karşılaştırması tekrar burada da yapılarak büyüklüğü eşik değerden küçük alanlar görüntüden kaldırılmaktadır. Buradaki eşik değeri beyaz görüntülerin siyah görüntülere oranı 0.15 değerinin altındaysa gürültü olarak kabul edilmiş ve görüntüden silinmiştir. Son adımda, eğer beyaz görüntülerin siyah görüntülere oranı 0.15 değerinden daha büyük bir alan ise arıza teşhis sonucu üretilerek, arızalı bölge çıkarılmış ve arızalı bölgenin alan büyüklüğü hesaplanmıştır. Görüntü üzerinde arızalı noktaların sayısı kullanılarak mm² cinsinden arıza büyüklüğünü hesaplamakta mümkün olmaktadır.

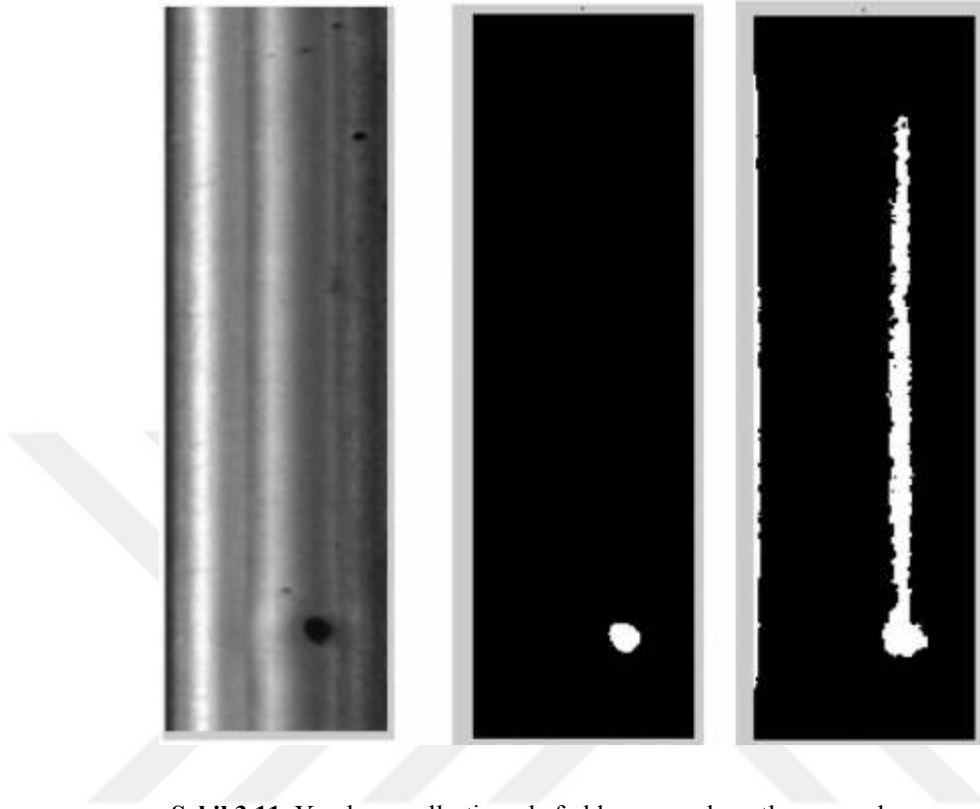
Denklem 3.45’de t arızalı bölgede ki noktaların toplamı, $m \times n$ görüntünün en ve boyundaki toplam nokta sayısı, $h \times l$ ise görüntünün mm cinsinden gerçek büyüklüğüdür, k değeri ise arızalı bölgenin toplam büyüklüğünü ifade etmektedir. Ray analizi uygulamalarında arıza teşhisi kadar, arızanın büyüklüğünün dolayısı ile risk derecesinin bilinmesi bakım kararının alınmasında önemli bir kriterdir.

$$k = \frac{t}{(mn)}(hl) \quad (3.45)$$



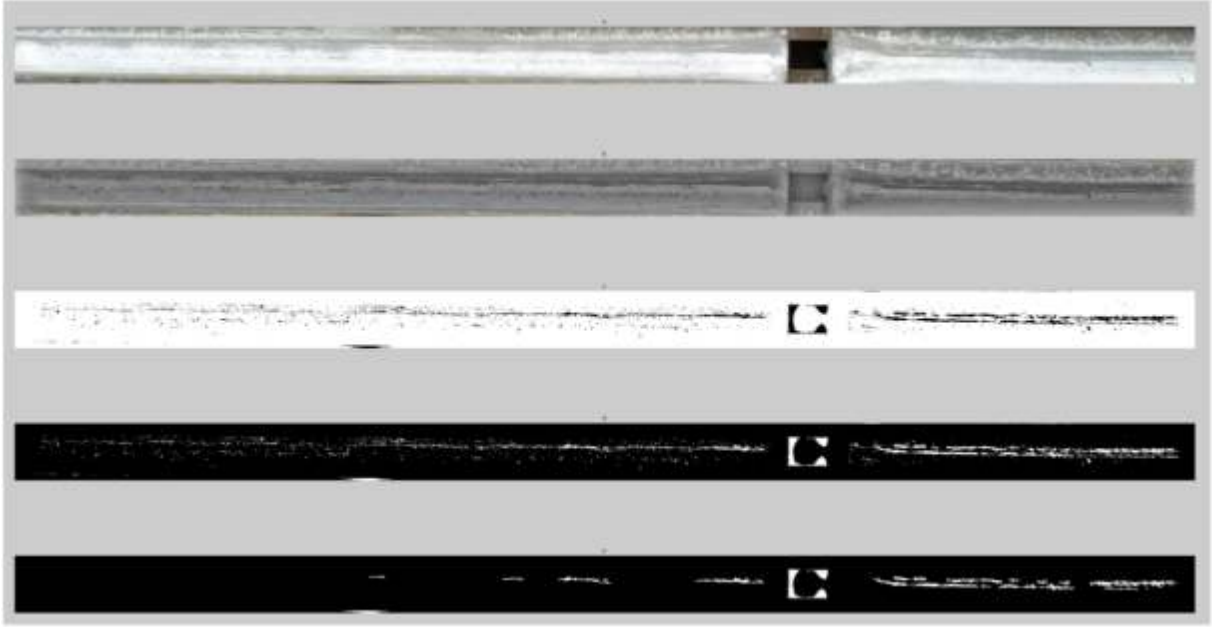
Şekil 3.10. Görüntü noktaları 4 komşuluk ve 8 komşuluk.

Şekil 3.11’de farklı pencere boyutları seçilerek önerilen yaklaşım test edilmiştir. Görselde sırası ile önce giriş verisi, pencere boyutları 15x15 seçilerek elde edilen sonuç ve son olarak pencere boyutları 30x30 seçilerek elde edilen sonuç yan yana verilmektedir. Önerilen yaklaşımda yerel normalleştirme adımında seçilen pencere boyutları, ikili dönüşüm ve gürültü kaldırmada seçilen eşik değerler yöntemin başarımını doğrudan etkilemektedir.



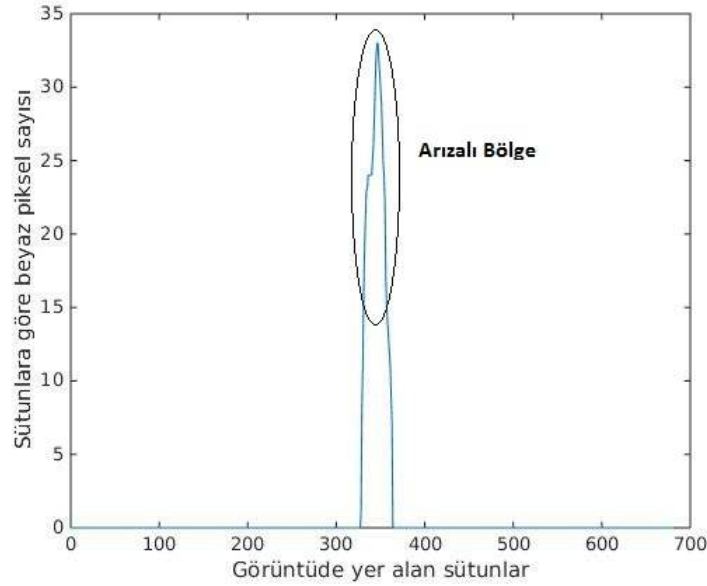
Şekil 3.11. Yerel normalleştirmede farklı pencere boyutları seçmek

Şekil 3.12'de ise aşınma ve kırık türü ray arızasına sahip bir başka ray görüntüsüne ilişkin deneysel çalışma sonucu verilmiştir. Önerilen yaklaşımın aşınma ve kırık türü arızaları da teşhis ettiği gözlenmiştir ancak önerilen yöntem görüntü işleme temelli bir yaklaşımdır ve farklı arıza türüne bağlı olarak adaptif şekilde sınıflandırma yapamamaktadır. Seçilen eşik değerlere göre sonuç üretmekte arıza mevcut olup olmadığı ve arızanın büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir ancak arızanın türü hakkında bilgi vermemektedir.



Şekil 3.12. Önerilen yaklaşım ile kırık ve aşınma türü arıza teşhisi

Önerilen yaklaşım ile ray yüzeyinde oluşan arızalı bölge sunulan deneysel çalışmalarla görsel olarak verilmiştir. Yerel normalleştirme, ikili dönüşüm ve açma işlemleri sonucu görüntüden gürültü ve arka plan kaldırılarak arızalı bölge görülebilmektedir. Sistemin Şekil 3.13'te olduğu gibi arızalı sonucunu üretmesi için son adımda, beyaz piksellerin sayısının toplam piksel sayısına bölümü ile ortaya çıkan değerın seçilen eşik değerdan yüksek olması ile mümkün olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda görüntüdeki beyaz piksel sayısı toplam piksel sayısının 0.15% veya daha üstünde bir orana sahip ise arıza mevcuttur sonucu üretilmektedir. Önerilen yöntem ile birlikte 0.15% değeri ölçüm hassasiyeti olarak kabul edilebilir. Önerilen yöntemin gürültüye duyarlı olması, yüksek hızda çalışabilmesi, ray yüzeylerinde oluşan arızaları ve arızanın fiziksel büyüklüğünü etkin bir şekilde teşhis edebilmesi gibi avantajlarla birlikte sadece görüntü işlemeye dayalı bir yöntem olması nedeni ile ray yüzeylerinde zamanla birikebilecek yağ ve toz kalıntılarını da arıza olarak algılama ihtimaline sahiptir. Bu durum ise yöntemin en büyük dezavantajı olmaktadır.



Şekil 3.13. Önerilen yaklaşım ile arıza tespiti

Önerilen yaklaşım ve orijinal çalışmanın kıyaslaması Tablo 3.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her iki yöntemde görüntü işleme yaklaşımını temel aldığı için ray yüzeylerinde oluşabilecek yağ ve toz kalıntılarını da ray arızası olarak algılayabilmektedir.

Atıf yapılan çalışma ile önerilen yaklaşım ray hattından görüntü alma, görüntüden ray hattını kırpma adımlarını içermektedir. Son adımda atıf yapılan çalışmada yatay ve dikey izdüşüm histogram karşılaştırması kullanılarak arızalı bölge bulunmuştur. Önerilen çalışmada ise son adımda eşik değere göre ikili dönüşüm yapılarak önce arka plan silinmiş, ardından nokta komşuluk değerleri ile ilişkilerine göre birleştirilmiştir, bu adımda yine ikinci bir eşik değerle bu bölgelerin arızalı olduğu varsayılmış eşik değerden daha küçük olan alanlar ise gürültü olarak kabul edilerek silinmiştir. Sunulan yaklaşım son adımında daha çok matematiksel işlem kullanılmasından dolayı atıf yapılan çalışmadan daha yavaş çalışmaktadır. Sayısal çizgi kamera kullanılan atıf yapılan çalışmada saniyede 500’e kadar görüntü üzerinde sonuç üretilebilmektedir, sunulan çalışmada ise saniyede 40 görüntü üzerinde teşhis sonucu üretilebilmektedir. En önemli farklardan bir tanesi sunulan çalışmanın adaptif olması, önerilen yaklaşımın ise tamamen görüntü işleme yaklaşımına sahip olmasıdır.

Sistemin başarısı da pencere boyutu ve eşik değerlerin optimum seçimine bağlıdır. Son olarak atıf yapılan çalışma da sadece teşhis sonucu üretilebilmekte ancak sunulan çalışmada arızanın geometrik şeklide çıkarılabilmekte ve arızalı alan büyüklüğü de hesaplanabilmektedir. Bu durum ray analizi sonrası ray bakım kararı alınması açısından son derece önemlidir.

Tablo 3. 2. İki yöntemin karşılaştırılması

Atıf Yapılan Yöntem [94]	Önerilen Yaklaşım [95]
Adaptiftir.	Adaptif değildir.
Sadece oyulma türü arızaları bulabilir.	Geniş yüzeyli aşınma ve kırık türü arızaları da bulabilir.
Saniyede 50 çerçeve için sonuç üretebilir.	Saniyede 40 çerçeveye kadar sonuç üretebilir.
Sadece arıza teşhisi yapabilir.	Arıza teşhisi ile birlikte arızalı alanın büyüklüğü hesaplanabilir.

3.6. Ray Hattı Yüzey Arızaları Teşhisi İçin Bilgisayar Görmesi Temelli Bir Yaklaşım

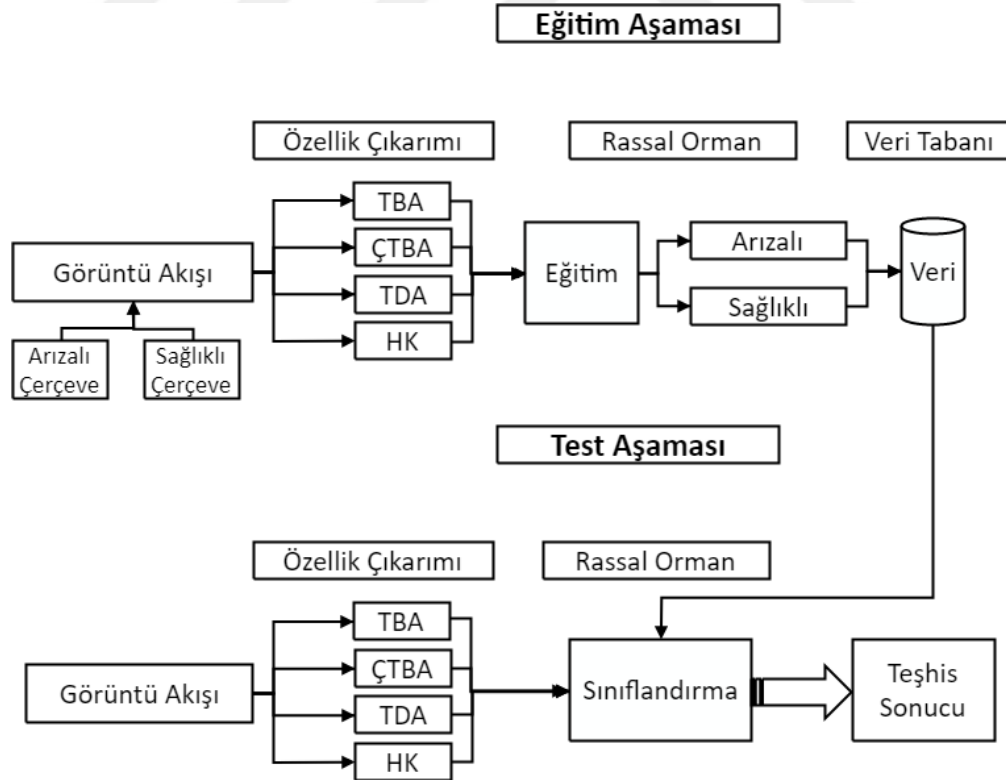
Tezin bu bölümünde demiryolu ray hatları üzerinde oluşabilecek arıza durumlarının teşhisi için bilgisayar görmesi temelli bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem ile ray yüzeylerinde oluşabilecek oyulma türü arızalar ile civata ve travers gibi eksik bağlantı elemanlarının tespit edilmesi hedeflenmiştir. Önerilen yaklaşım eğitim ve test olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır [87].

Eğitim aşamasında arızasız ray hattı görüntüsünü içeren video görüntü akışından gelen her çerçeveden Bölüm 3.3'te anlatılan TBA, ÇTBA, TDA ve HK özellik çıkarım yöntemleri kullanılarak öz değerler elde edilmiştir. Elde edilen veri kümesi eğitim algoritmasında kullanılmak üzere arızasız olarak etiketlenerek veri tabanına kaydedilmiştir. Daha sonra aynı görüntü üzerinde sanal arıza oluşturularak arıza içeren video akışından her çerçeveden yine özellik çıkarım yöntemleri kullanılarak öz değerler elde edilmiş ve bu veri kümesi de eğitim algoritmasında kullanılmak üzere arızalı olarak etiketlenerek veri tabanına kaydedilmiştir.

Elde edilen bu iki sınıfa ait veriler Bölüm 3.4’te anlatılan RO algoritması ile eğitime tabi tutularak karar ormanı oluşturulmuştur.

Test aşamasında ise sistemde daha önce kullanılmayan hem arıza içeren hem de hiç arıza içermeyen çerçeveleri içeren bir video görüntü kullanılmıştır. Test aşamasında video akışından elde edilen çerçeveler üzerinde öz değer elde etme işlemi tekrar yapılarak elde edilen değer karar ormanı içinde karşılaştırılarak en yakın olduğu sınıf tespit edilerek çerçevede arıza bulunup bulunmadığı sonucu üretilmektedir.

Önerilen yöntemde 250x480 boyutunda çerçeveler içeren video görüntüler kullanılmıştır. Sanal arıza oluşturulurken görüntünün farklı yerlerinde ve farklı büyüklüklerde olacak şekilde dört farklı senaryo gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolar üzerinde doğruluk performansı ve gerçek zamanlı çalışma süreleri ölçülerek yöntemler karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 3.14’te verilmiştir. Yöntemin aşamaları aşağıda anlatılmıştır.



Şekil 3.14. Rassal orman tabanlı ray yüzey arızası teşhisi yaklaşımı blok diyagramı

3.6.1. Eğitim aşaması

Bu aşamada ray hattından gelen video görüntüden 250x480 boyutunda çerçeveler elde edilmektedir. Eğitim ve test için bu çerçeveler giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Eğitim aşamasında çerçeveler üzerinde toplam büyüklüğün 0.2% ile 0.5%'sini geçmeyecek şekilde rassal yerlerde, rassal büyüklüklerde sanal bozukluk oluşturulmuştur. Sanal arıza oluşturulan çerçeveler “arızalı”, diğerleri “sağlıklı” olarak etiketlenmiştir. Ardından bu çerçeveler üzerinde daha düşük boyutlu öz değerler eğitim işleminde kullanılmıştır. TBA, ÇTBA ve TDA yöntemleri için Denklem 3.14’te verilen diyagonal öz değer matris üzerindeki en anlamlı 3 öz değer seçilmiştir. HK yöntemi için ise ortalama ve sapma değer olmak üzere 2 öz değer kullanılmıştır. RO algoritması için ağaç sayısı 10 seçilmiştir.

3.6.2. Test Aşaması

Bu aşamada eğitim aşamasında kullanılmayan eşit oranda arızalı ve sağlıklı çerçeve içeren video akışı kullanılmıştır. test işleminde doğruluk performansının grafiksel olarak kolay yorumlanabilmesi için ilk %50’lik kısmı sağlıklı, ikinci %50’lik kısmı arızalı çerçeveleri içermektedir. İlk senaryoda görüntüler üzerinde 0.2% boyutunda sanal arıza oluşturularak doğruluk performansı ölçülmüştür. HK yönteminden elde edilen değerler normalize edilmeden kullanılmıştır. Tablo 3.3’te örnek olarak tek bir çerçeveden TBA, ÇTBA, TDA ve HK yöntemleri ile elde edilen değerler ve RO sınıflandırma sonucu verilmiştir. Sınıflandırma etiketinde kullanılan “1” doğru sınıflandırmayı, “0” yanlış sınıflandırmayı göstermektedir.

Tablo 3. 3. Sağlıklı ve arızalı çerçevelerden elde edilen öz değerler

	TBA	ÇTBA	TDA	HK
Özellik	0.07	-0.4	0.001	468
Değerleri	0.01	-0.07	-0.001	357
	-0.0087	-0.1	-0.005	
RO Sınıflandırma	1	1	0	1

Tablo 3.4’te ise tek bir çerçeve için TBA, ÇTBA, TDA ve HK yöntemleri ile elde edilen çalışma süresi ve sınıflandırma doğrulukları verilmiştir. En yüksek doğruluk oranı TBA yöntemi ile en hızlı çalışma süresi TDA ile elde edilmiştir. Sağlıklı çerçevelerin sınıflandırılmasında en yüksek doğruluk TBA ile arızalı çerçevelerin sınıflandırılmasında ise HK ile elde edilmiştir.

Tablo 3. 4. Özellik Çıkarım yöntemlerinin çalışma süreleri ve doğruluk performansları

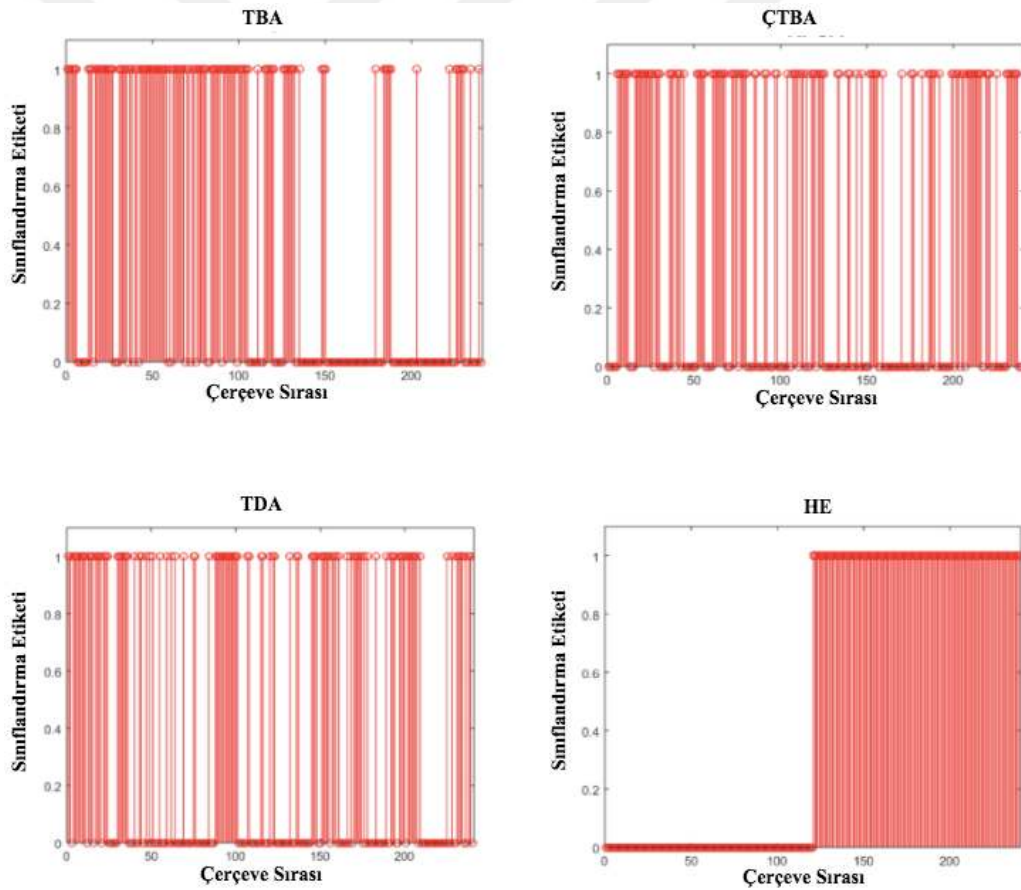
Bir çerçeve için (sn)		TBA	ÇTBA	TDA	HK
	Özellik Çıkarımı	0.02	0.03	0.03	0.03
	Eğitim Süresi	0.003	0.003	0.01	0.003
	Test Süresi	0.14	0.14	0.12	0.04
Doğruluk Oranı (%)		80	60	60	60

Gerçekleştirilen 2.senaryoda aynı video üzerinde arıza büyüklüğü yine 0.2% olacak şekilde arıza yeri değiştirilerek çalışma tekrar edilmiştir. Gerçekleştirilen 3.senaryoda video test süresi 4 saniye’ye çıkarılmıştır. Video süresinin uzaması ile birlikte travers, civata gibi bağlantı elemanlarının fiziksel şekil ve konumlarının çerçeveden çerçeveye farklılık göstermesi nedeni ile özellik çıkarım işlemindeki doğruluk oranı düşmüştür. Tablo 3.4’te 4 saniyelik test süresi için yöntemlerin doğruluk performansı verilmiştir.

Gerçekleştirilen 4.senaryoda arıza sayısı en fazla 3 ve toplam arıza büyüklüğü 0.5% değerini geçmeyecek şekilde sanal arıza oluşturulmuş ve 20 saniyelik test videosu ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test için kullanılan video süresinin uzaması ile birlikte TBA, ÇTBA yöntemlerinde doğruluk performansları kısmen düşmüştür. HK yöntemi 50% genel doğruluk performansı ile tüm arızalı çerçeveleri doğru sınıflandırmıştır. Yöntemlerin doğruluk karşılaştırmaları Şekil 3.15’te performans karşılaştırmaları ise Tablo 3.5’te verilmiştir. Sonuçlar 250 çerçeve için verilmiştir, “1” doğru sınıflandırma, “0” yanlış sınıflandırmayı göstermektedir.

Tablo 3. 5. Özellik çıkarım yöntemlerinin performans karşılaştırması

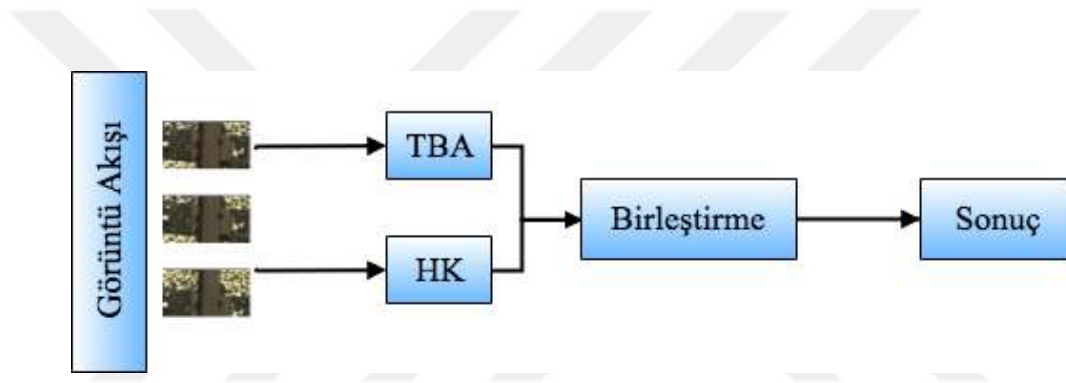
Doğruluk	Arızalı Çerçeveler	Sağlıklı Çerçeveler	Toplam
Çerçeve Oranı (%)	50	50	100
TBA (%)	42	68	55
ÇTBA (%)	33	67	50
TDA (%)	38	54	46
HK (%)	98	2	50



Şekil 3.15. Önerilen yaklaşım doğruluk performansları.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar da video akışından gelen arızalı ve arızasız çerçeve sayıları eşit seçilmiştir. Gerçekleştirilen dört farklı senaryoda genel olarak en yüksek doğruluk

oranı TBA yöntemi ile en hızlı çalışma süresi ise TDA yöntemi ile elde edilmiştir. Arızalı ve arızasız çerçeveler için ayrı ayrı doğruluk oranları karşılaştırıldığında TBA yöntemi arızasız çerçevelerin tespitinde HK yöntemi ile arızalı çerçevelerin tespitinde en yüksek doğruluk oranına sahiptir. Genel doğruluk oranının yükseltilmesi için Denklem 3.46 kullanılmıştır. Denklem 2’de p, h sırası ile aynı çerçeve için TBA ve HK yöntemlerinden elde edilen sonuçları göstermektedir, bu sayede yöntemin genel doğruluk oranı artırılmıştır. Bu durum Tablo 3.6’da özetlenmiştir. Sonuç olarak test aşamasında gerçek zamanlı olarak çalışabilecek ve yüksek doğruluk oranına sahip yöntemin blok diagramı Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. TBA ve HK yöntemlerinin birleştirilmesi

$$z = 1 - (1 - p)(1 - h) \quad (3.46)$$

Tablo 3. 6. TBA ve HK yöntemlerinin birleştirilmesi

	Arızalı Çerçeveler	Sağlıklı Çerçeveler	Ortalama
TBA (%)	32	68	50
HK (%)	98	2	50
TBA+HK (%)	≥68 , ≤98		

3.7. Ray Hatlarında Adaptif Arıza Teşhisi İçin Boru Hattı Mimarisi Kullanan Bir Yaklaşım

Tez çalışmasının bu bölümünde bilgisayar görmesi kullanılarak gerçekleştirilen ray denetimi uygulamalarında yaşanan iki önemli dezavantajın giderilmesi amacı ile yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu dezavantajlardan ilki ray hattı üzerinde hareket esnasında fiziksel titreşim nedeni ile elde edilen görüntüler üzerinde oluşan bulanıklık etkisidir. Bu etki arıza teşhis algoritmalarından beklenen yüksek doğruluk oranı için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. İkinci dezavantaj ise gerçek zamanlı çalışma gereksinimidir. Bu dezavantajların giderilmesi için bu çalışmada boru hattı mimarisi kullanılan yeni bir yaklaşım sunulmuştur [96, 97].

Üç aşamalı boru hattı mimarisinin uygulandığı çalışmada ilk aşamada sol ve sağ ray hattından alınan görüntüler üzerinde AÖB destekli bulanıklık tespiti yapılmıştır. İkinci aşamada sol ve sağ kameradan alınan ve ilk aşamada bulanık etkinin giderildiği görüntü üzerinde EYSA kullanılarak analiz yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise sınıflandırma yapılarak teşhis sonucu üretilmiştir. Uygulama GİB üzerinde paralel programlama ile gerçekleştirilerek yüksek doğruluk oranına sahip, gerçek zamanlı çalışabilecek uygun maliyetli, bilgisayar görmesi temelli bir ray denetimi işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bilgisayar görmesine dayanan ray analizinde sistemin giriş verisini kamera görüntüleri oluşturmaktadır. Ancak ray hatlarının fiziksel yapıları gereği oluşturduğu titreşimler görüntüler üzerinde bulanıklık etkisine neden olmaktadır. Bu durum ray analizinin genel doğruluk oranını düşürebilmektedir [96]. Bulanık görüntülerin manuel olarak düzeltilmesi zaman kaybına yol açmakta aynı zamanda sistemin gerçek zamanlı denetim uygulamalarında kullanımında mümkün olmamaktadır.

Görüntü işleme uygulamalarında görüntü netsizliği bulanıklık olarak adlandırılmaktadır. Görüntülenen nesnenin kameranın netleme hızından daha yüksek hızda olması ya da fotoğraf çekilirken kameranın çekim anında titreşim, el hareketi ya da ortamdan kaynaklanan sebeplerle hareket etmesi görüntü üzerinde bulanık etkiler oluşturmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda bulanık etkiden dolayı oluşan netsizlik sistemin doğruluk oranını azaltan genel bir dezavantaj durumudur. Görüntü üzerinde bulanıklığı önlemek için geleneksel olarak kameranın üç ayak, Steadicam ve benzeri fiziksel araçlarla sabitlenmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu çözüm ray denetimi uygulamaları için uygun değildir [96].

Görüntü işleme uygulamalarında bulanıklık etkisinin giderilmesi netleştirme olarak adlandırılmaktadır ve görüntü üzerinde ters konvolüsyon işlemi gerçekleştirilerek yapılmaktadır. Netleştirme işleminin başarımı ters konvolüsyon işleminde seçilen parametrelere bağlıdır ve bu parametreler manuel olarak elle seçilmekte ya da tahmin edilmektedir. Sony firmasından Ito ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada kamera hareketinden kaynaklanan titreşimin oluşturduğu bulanıklık etkisi görüntünün Fourier spectrum'unda boş değerlere sahip olması olarak tanımlanmıştır [98]. Çalışmada seri olarak elde edilen görüntüler üzerinde bulanıklık etkisinin giderilmesi için bulanıklık çekirdek değerinin tahmin edilmesine yönelik bir çalışma sunulmuştur.

Microsoft firmasından Joshi (2010) ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada 200 Hz bir AÖB insansız hava araçlarından çekilen görüntüler üzerinde netleştirme işlemi yapılması için kullanılmıştır. Kullanılan AÖB verileri ile kamera Euler açıları anlık olarak bulunmuş, açı değişimleri ile netleştirme etkisi otomatik olarak tespit edilmiş ve netleştirme parametreleri AÖB verileri kullanılarak otomatik olarak seçilmiştir [86].

Wang (2011) bilgisayar görmesine dayalı ray denetimi için kamera görüntüleri üzerinde oluşan bulanıklık etkisini eğitim görüntüleri üzerinde incelemiş ve netleştirme işlemi için makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem sunmuşlardır [99]. Çalışmaya göre ray hatlarında iki tür bulanıklık etkisi oluşabilmektedir. Ray denetimi test işlemi sırasında çok yüksek hızlarda hareket edilmesi durumunda hareket bulanıklığı etkisi oluşmaktadır. Çalışmada ray titreşimlerinden kaynaklanan anlık sarsıntılardan dolayı oluşan blur türü ise Gaussian tipte bulanıklık olarak tanımlanmıştır.

Bilgisayar görmesi kullanan ray hattı denetim uygulamalarında sistemin giriş verilerini oluşturan görüntüler üzerinde ray hattında oluşan fiziksel titreşimlerin sebep olduğu bulanıklık etkisinin otomatik olarak tespit edilerek ters konvolüsyon işleminin buna uygun gerçek zamanlı ve adaptif olarak yapılabilmesi için [86] numaralı çalışmaya benzer şekilde AÖB verilerinin kullanılması önerilmiştir. Böylece sistemin genel doğruluk oranının arttırılması amacıyla adaptif netleştirme yapılan bir ön işleme aşaması ray denetiminde kullanılmıştır.

Bilgisayar görmesi kullanan ray denetim uygulamalarında bir diğer önemli nokta sistemin yüksek hızlarda çalışmasıdır. Günümüzde raylı ulaşım sistemleri 300 km/s hızlarında hareket edebilmektedir. Denetim işleminin yüksek hızlarda çalışabilmesi uzun mesafeli denetim uygulamalarında son derece önem arz etmektedir.

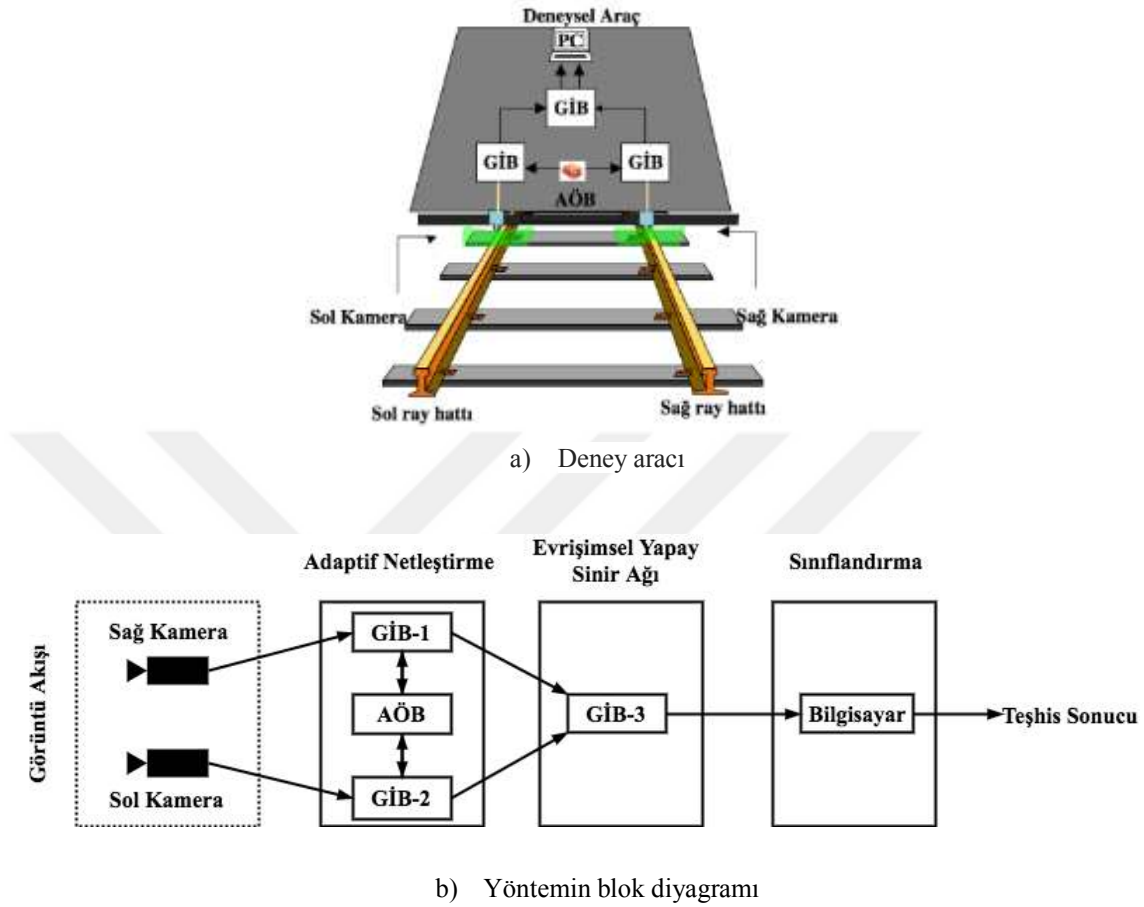
Yüksek çözünürlüklü sayısal kameraların kullanıldığı ray denetimi uygulamalarında alınan görüntülerin çerçeve boyutunlarına bağlı olarak 75 km/s hızına ulaşabilmektedir [93].

Daha yüksek çalışma hızlarına ulaşmak için yüksek çözünürlüklü kamera kullanmak yerine üç boyutlu görüntü alabilen lazer kameralar kullanılması bir başka çözümdür. Qingyong Le ve arkadaşları (2012) ray yüzeyi arızalarını bulmak amacıyla çalışmalarında lazer kamera kullanmış ve 100 km/s hızına yakın gerçek zamanlı çalışma hızı elde etmişlerdir. Ancak lazer kamera maliyetlerinin çok yüksek olması bu sistemlerin kullanımında dezavantaj oluşturmaktadır. Yüksek çalışma hızı için kullanılabilecek bir diğer çözüm FPGA gibi özel donanımlar kullanmaktır [94]. FPGA tabanlı sistemlerin gerek donanımsal olarak gerçekleştirilmesi gerekse programlanmasının daha fazla emek ve zaman gerektirmesi en büyük dezavantajdır.

Lazer kameraların yüksek maliyeti, FPGA gibi donanımların gerçekleşme zorluklarına karşın bu çalışmada Nvidia Cuda kütüphanesi kullanılarak BİB üzerinde paralel programlama gerçekleştirilerek yüksek çalışma hızlarına ulaşılmıştır. Üç adet Nvidia GİB ve bir bilgisayar kullanılan uygulama boru hattı mimarisine uygun olarak tasarlanmıştır.

Çalışmada makine öğrenmesi yöntemi olarak EYSA seçilmiştir. EYSA büyük veriler üzerinde hızlı ve performanslı çalışan aynı zamanda GİB donanımları üzerinde paralel çalışabilen bir yöntem olması nedeni ile seçilmiştir.

Sonuç olarak tez çalışmasının bu kısmında bilgisayar görmesi kullanan ray denetimi uygulamaları için paralel GİB programlama kullanılarak, EYSA temelli üç aşamalı boru hattı mimarisi kullanan bir yaklaşım sunulmuştur. İlk adımda ray hattından sol se sağ kameradan alınan görüntüler AÖB verileri ile birlikte incelenerek bulanıklık etkisi tespit edilmiş ve netleştirme işlemi adaptif olarak gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda görüntü üzerinde makine öğrenmesi eğitim ve test amacıyla EYSA kullanılmıştır. Üçüncü ve son adımda ise teşhis sonucu üretilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin kavramsal görünümü ve blok diyagramı Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Boru hattı mimarisi kullanan adaptif ray arıza teşhisi yaklaşımı yöntemi blok diyagramı

Tez çalışmasının bu kısmında önerilen yaklaşımda üç adet GİB ve bir adet bilgisayarın kullanıldığı üç aşamalı boru hattı mimarisi ile gerçekleştirilmiştir. İlk adımda sol ve sağ kameralardan elde edilen görüntü üzerinde gürültü temizleme işlemi yapıldıktan sonra AÖB verileri kullanılarak bulanıklık tespiti ve netleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu adımda sol ve sağ kameradan elde edilen görüntüler GİB-1 ve GİB-2 üzerinde eşzamanlı olarak işlenerek gürültü ve bulanıklık giderilmiş görüntü veri matrisi halinde GİB-3'e iletilmektedir. Boru hattı mimarisi 2.aşamada İB-3'te sol ve sağ kameradan elde edilen görüntüler üzerinde EYSA kullanılarak model eğitimi ve test işlemleri gerçekleştirilmektedir. Boru hattı mimarisi 3. aşamada ise bir bilgisayar üzerinde model üzerinde sınıflandırma yapılarak teşhis sonucu üretilmektedir. Çalışmada netleştirme, EYSA ve sınıflandırma adımları Nvidia Cuda [100] kütüphanesi kullanılarak GİB üzerinde paralel programlama kullanılarak koşturulmuştur.

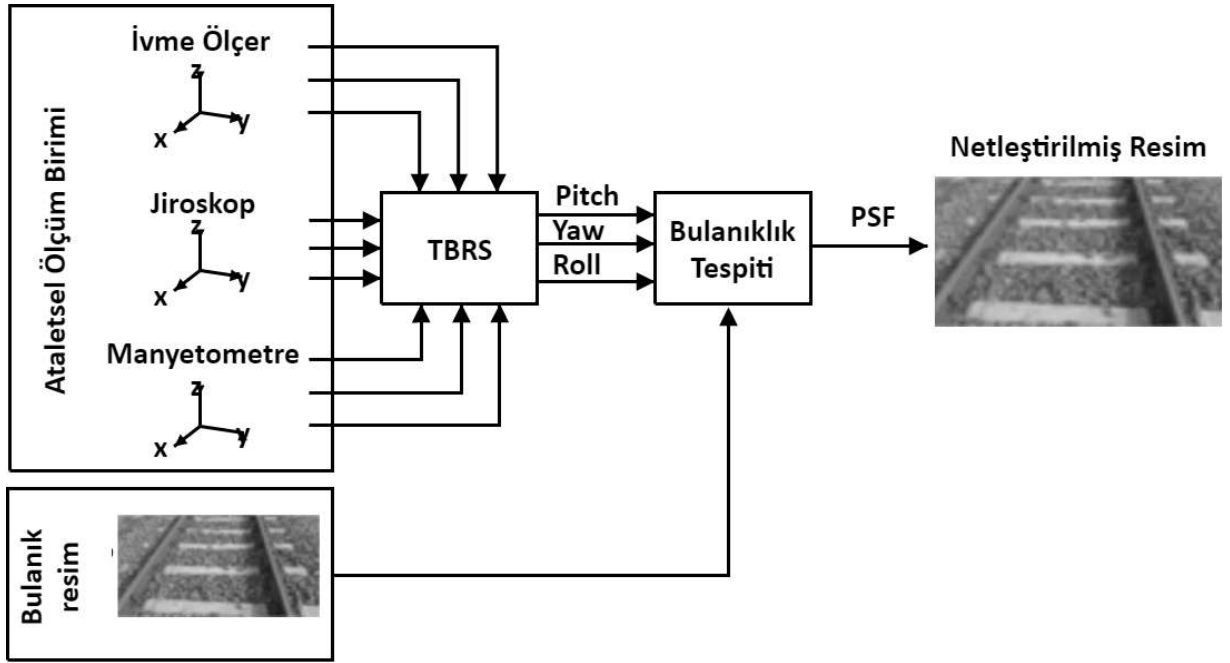
İlerleyen kısımlarda üç aşamalı boru hattı mimarisinin tüm aşamaları sırası ile detaylandırılmıştır.

3.7.1. Boru Hattı Mimarisi 1.Aşama: Bulanıklık Tespiti ve Netleştirme

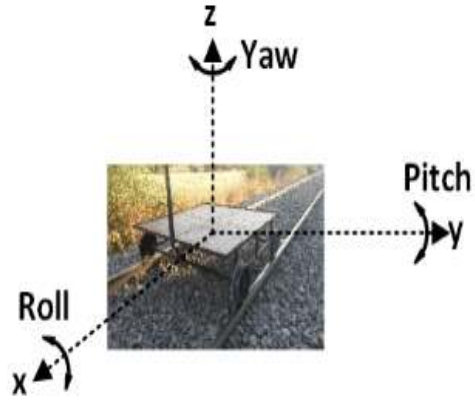
Uygulamada bulanıklık tespiti yapılmadan önce kameradan alınan görüntü üzerinde gürültü temizleme işlemi yapılmıştır. Gürültü temizleme aşamasında seçilen eşik değerlerle Gaussian ve tuz-biber tipte standart gürültü temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Görüntü üzerinde oluşan titreşim temelli bulanıklık etkisinin tespit edilmesi ve adaptif bir şekilde netleştirme işleminin gerçekleştirilmesi için AÖB kullanan bir yaklaşım sunulmuştur. Bu aşamanın blok diagramı Şekil 3.18’de verilmiştir.

3.7.1.1. Ataletsel Ölçüm Birimleri (AÖB)

Bünyelerinde ivme ölçer, jiroskop, manyetometre gibi dâhili ölçüm algılayıcılarını barındıran bir AÖB’ler sefer sistemlerinin bir parçası olarak genellikle otonom mobil robotlar, gemicilik, hava ve uzay araçlarında yönelim açıları, pozisyon bilgilerinin bulunmasında, kontrol uygulamalarında denge sağlanması amacıyla kullanılmaktadır [101]. AÖB’ler raylı ulaşım sistemlerinde ray hattı yapı malzemelerinin döşenmesi ve süspansiyon sistemlerinde de kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak AÖB’ler sahip oldukları serbestlik derecesi (SD), çalışma hızları ve ölçüm hassasiyetleri gibi tipik özelliklerine göre isimlendirilir ve tercih edilirler [101]. AÖB kullanan uygulamada temel hedef Şekil 3.18’de verilen üç boyutlu yönelim açılarının yüksek doğruluklu bulunmasıdır. Bu amaçla Xsens firmasına ait 10 KHz 10-SD MTİ-100 serisi AÖB kullanılmıştır [102]. Tablo 3.7’de 10-SD algılayıcı verileri, sahip oldukları serbestlik derecesi ve çıkış verileri verilmiştir.



a) Yöntemin blok diyagramı



b) Üç boyutlu uzayda Euler açılarının gösterimi

Şekil 3.18. Adaptif bulanıklık tespiti ve durulaştırma aşaması blok diyagramı ve üç boyutlu uzayda Euler açılarının gösterimi

Tablo 3. 7. AÖB’te kullanılan algılayıcılar, serbestlik dereceleri ve ölçüm birimleri

Algılayıcı	Algılayıcının Açıklaması	Serbestlik Derecesi	Algılayıcı Ölçüm Birimi
İvme Ölçer	İvmelenme hızı	x,y,z	m/s ²
Jiroskop	Açısal hız değişimi	x,y,z	°/sn
Manyetometre	Manyetik alan	x,y,z	au
Barometre	Atmosferik basınç	z	pa

3.7.2. AÖB Verilerinin Birleştirilmesi

Şekil 3.18’de verilen Euler uzayda nesnenin x-ekseninde yaptığı açı Roll, y-ekseninde yaptığı açı Pitch ve z-ekseninde yaptığı açı Yaw olarak isimlendirilmektedir. Euler açılarının bulunmasında dönüşüm matrisleri, kalman filtresi ve Sebastian Magdwick tarafından açık kaynak olarak geliştirilen Tutum ve Baş Rerens Sistemi (TBRs) algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır [101]. TBRs algoritması bir nesnenin yönelim açılarının yüksek doğruluklu olarak tespiti için algılayıcı verilerinin birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Kullanılan AÖB’ün SD sayısının yüksek olması Euler açılarının yüksek doğruluklu bulunmasında önemlidir. Tablo 3.7’de Euler açılarının çıkış veri aralıkları ve Xsens MTİ-100 AÖB gürültü hassasiyeti verilmiştir.

Tablo 3. 8. Euler açıları ve açıklamaları

Euler Açıları	Çıkış değeri (derece)	Tipik hata hassasiyeti (derece)
Yunuslama (Pitch)	-90 ... +90	0.3
Sapma (Yaw)	-180 ... +80	1
Yuvarlanma (Roll)	-180 ... +80	0.2

AÖB sadece algılayıcı bilgileri içerirken, TBRS konum ve yön bilgilerini de verir. TBR algoritmasında temel hedef Denklem 3.47’de verilen ve yön bilgilerini içeren dördey vektör elemanlarının bulunması ya da tahmin edilmesidir, dördey vektörün başlangıç durumundaki değerleri ise Denklem 3.48’de verildiği gibidir. Dördey vektör sensörden veri alınan her adımda güncellenmektedir.

$$q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3] \quad (3.47)$$

$$q = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3.48)$$

Dönme matrisi R dördey vektör kullanılarak hesaplanmaktadır, başlangıç değeri olarak Denklem 3.49’da verildiği gibi diyagonaldir.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Euler açılarını simgeleyen yunuslama (p), sapma (y), yuvarlanma (r) açıları sırası ile Denklem 3.50 – Denklem 3.52 ile hesaplanmaktadır.

$$p = \arctan \left(\frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right) \quad (3.50)$$

$$y = -\arcsin (2(q_1 q_3 - q_0 q_2)) \quad (3.51)$$

$$r = \arctan \left(\frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right) \quad (3.52)$$

Deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken Xsens MTI-100 AÖB ile sabit durumda ve titreşim oluşturularak ölçüm yapılmış ve Euler açıları bulunmuştur. Sistemde görüntü üzerinde bulanıklık olduğuna karar verilmesi için p, y, r açılarından en az birinin belirlenen eşik değerden yüksek olması gerekmektedir. Ray hattında test cihazı ile hareket ederken gürültü olarak kabul edilebilecek bir titreşim sürekli mevcut olacaktır, eşik değeri altında kalan bu titreşim gürültüsü deneysel çalışmalar sırasında göz ardı edilmiştir.

Ancak arızalı bir ray hattında özellikle arıza bulunan noktalarda ve/veya yol düşüklüğü, eksik civata gibi durumlarda titreşim değeri fazla olmakta ve görüntü üzerinde bulanıklık etkisi yaratmaktadır.

Bu titreşim değerleri Denklem 3.53'te verildiği gibi beklenen eşik değerden yüksek ise bulanık etkiye neden olacak sarsıntı olarak kabul edilerek görüntüde bulanıklık etkisi meydana geldiği sonucu üretilecek ve netleştirme işlemi için tahminlenen bulanıklık çekirdek büyüklüğü bu açılardaki değişim miktarı ile ilişkili olacaktır.

$$D = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } p \text{ veya } r \text{ veya } y > \text{eşik değeri ise} \\ 0, & \text{Diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.53)$$

Bulanıklık işlemi matematiksel olarak Denklem 3.54'te ki gibi tanımlanabilir. Bulanıklık etkisi giriş görüntüsü olan I ile bulanıklık çekirdek matrisi K ile konvolüsyonu sonrası gürültü N ilavesi ile oluşmaktadır. Buradaki amaç ise konvolüsyon işlemi öncesi net görüntünün bulunmasıdır. Bu amaçla bulanık görüntünün K ile ters konvolüsyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir.

$$B = I \otimes K + N \quad (3.54)$$

Çalışmada bulanıklık çekirdek değerininin (PSF) tahmin edilmesi için ayrıca bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Arıza bulunan bir ray hattında elde edilen görüntülerin veri olarak kullanıldığı çalışmada, veri kümesi üzerinde bulanıklık tespiti ve en uygun netleştirme oranları elle belirlenerek eğitim için bir YSA kullanılmıştır. Bu ağda sistem girişleri TBRS algoritmasından elde edilen Euler açı değerleri ve elle belirlenen PSF oranı, sistemin çıkışı ise netleştirme işleminde kullanılacak PSF değeridir. Sistemin basitleştirilmiştir matematiksel modeli Denklem 3.55'te verilmiştir.

$$PSF = (D * \alpha) * \begin{cases} |p_t - p_{t-1}| \\ |y_t - y_{t-1}| \\ |r_t - r_{t-1}| \end{cases} \quad (3.55)$$

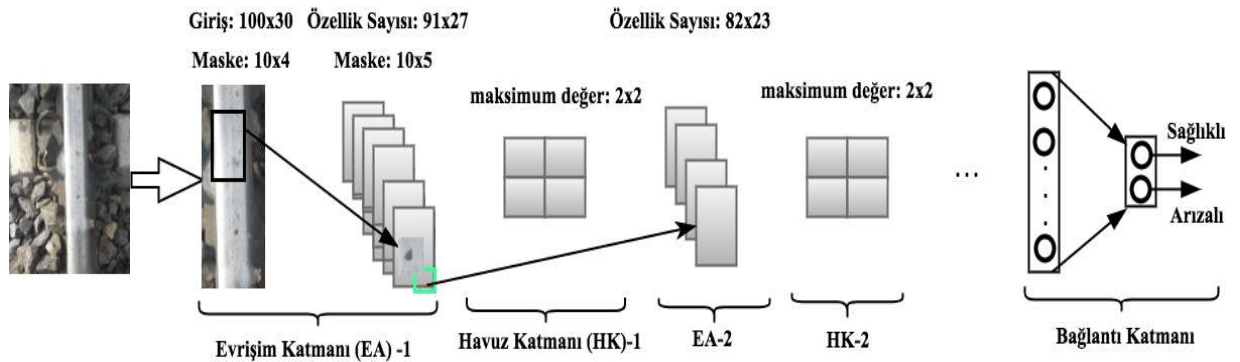
3.7.3. Boru Hattı Mimarisi 2.Aşama: EYSA

Modelin eğitiminde Bölüm 3.6’da anlatılan EYSA kullanılmıştır. Eğitim amacı ile 658x492 boyutunda görüntüler kullanılmıştır. Model üzerinde derin öğrenmeye uygun olarak giriş verilerine gürültü ekleme, boyutlandırma ve döndürme gibi ön işlemler kullanılarak giriş veri kümesi büyütülmüştür. Modelde üç evrişim ve havuz katmanı kullanılmıştır. İlk evrişim katmanında giriş konvolüsyon pencere boyutu 10x4, ikinci evrişim katmanında 10x5, üçüncü evrişim katmanında ise 5x2 seçilmiştir. Tüm havuz katmanlarında çekirdek matrisleri 2x2 seçilmiştir. Havuz katmanlarında özellik seçimi olarak pencere içindeki nokta maksimum değeri kullanılmıştır. Evrişim katmanlarından sonra aktivasyon fonksiyonu olarak relu seçilmiştir, çıkış katmanında ise softmax kullanılmıştır. Evrişim katmanında ki giriş görüntüsünün pencere boyutları (x, y) maske boyutu (a, b) ile ifade edilirse elde havuz katmanı için elde edilecek toplam pencere sayısı Denklem 3.56’da ki gibi olacaktır. Toplam pencere sayısı üzerinde havuz katmanında kullanılan pencere boyutu (k, l) olduğunda ilk katmanda eğitimde toplanacak toplam özellik sayısı p Denklem 3.58’de ki bulunur.

$$n = (x - a + 1)(y - b + 1) \quad (3.56)$$

$$m = (a - k + 1)(b - l + 1) \quad (3.57)$$

$$p = nm \quad (3.58)$$



Şekil 3.19. Önerilen yaklaşım EYSA diyagramı

3.7.4. Boru Hattı Mimarisi 3.Aşama: Sınıflandırma

Önerilen yaklaşım boru hattı mimarisi son aşaması sınıflandırma işleminin yapılması ve etiketlenmiş verilerin karşıtlık matrisi kullanılarak performans analizi yapılmasıdır. Tablo 3.8’de karşıtlık matrisi verilmiştir. Bir karşıtlık matrisi üzerinde temel olarak verilerin gerçekte olması gereken etiketleri ve model tarafından sınıflandırılan etiketleri kullanılarak sistem doğruluğu ve hassasiyeti gibi değerler bulunmaktadır. DP gerçekte pozitif olan ve sistem tarafından da pozitif olarak tanımlanan sınıfları, DN gerçekte negatif olan ve sistem tarafından da negatif olarak sınıflandırılan, YN gerçekte pozitif olan ancak sistem tarafından negatif olarak sınıflandırılan ve son olarak YP gerçekte negatif olan ancak sistem tarafından pozitif olarak sınıflandırılan verileri simgelemektedir. Bu matrise göre sistemin doğruluk değeri ACC Denklem 3.59’a göre doğru sınıflandırılan verilerin toplam veri sayısına bölünmesiyle elde edilir. Sistemin DP oranı ve YP oranları ise Denklem 3.60’da verilmiştir. Sistemin F_1 ve *Precision* değeri ise Denklem 3.61’de ki gibi bulunmaktadır [103].

$$ACC = \frac{DP + DN}{N} \quad (3.59)$$

$$DPR = \frac{DP}{DP + YP}, YPR = \frac{YP}{YP + DN} \quad (3.60)$$

$$F_1 = \frac{2DP}{2DP + YP + YN}, Precision = \frac{DP}{DP + YP} \quad (3.61)$$

Tablo 3. 9. Karşıtlık Matrisi

	Modelde Gerçekleştirilen Tahminler		
Gerçek Sınıflar		Pozitif	Negatif
	Pozitif	Doğru Pozitif (DP)	Yanlış Negatif (YN)
	Negatif	Yanlış Pozitif (YP)	Doğru Negatif (DN)

3.7.5. Deneysel Sonuçlar

Tezin bu bölümünde gerçekleştirilen deneysel çalışma iki aşamalıdır. İlk aşamada ray hattından elde edilen görüntüler üzerinde bulanıklık tespiti ve adaptif durulaştırma, ikinci aşamada ise arıza teşhisi yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar için kullanılan bilgisayar ve sayısal kameraların taşınması amacı ile Şekil 3.20’de verilen deney aracı kullanılmıştır.



Deney aracı



Xsens MTI-100 AÖB



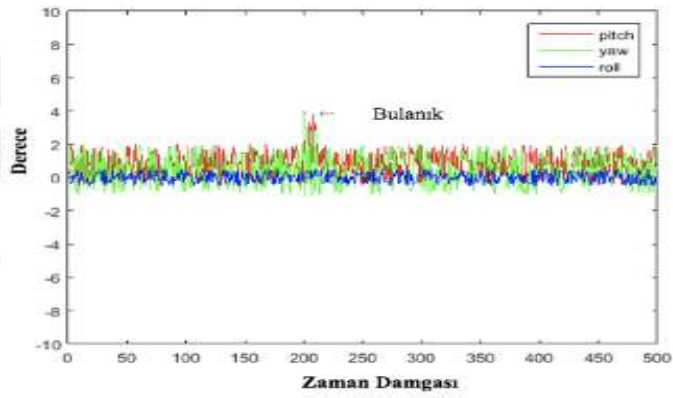
Mako G032B/C kamera

Şekil 3.20. Deneysel araç, AÖB ve sayısal kamera

Çalışmanın elde edilen deneysel sonuçlara ilişkin boru hattı mimarisinin çalışma aşamaları Tablo 3.10’da, karşılıklı matrisi Tablo 3.11’de verilmiştir. adaptif netleştirme kullanılarak yapılan çalışmada sistemin doğruluk ve performans değerleri artmaktadır. AÖB’den elde edilen TBRS Euler açıları ve zaman damgası ile birlikte alınan görüntüler üzerinde ray hattı sarsıntılarından dolayı oluşan bulanıklık tespiti hemen hemen tüm görüntüler üzerinde yapılmıştır. Ancak sarsıntının belirli bir eşik değerden daha yüksek olduğu durumlarda bulanıklık tespiti yapılmakla birlikte, netleştirme yapılamamıştır.

Tablo 3. 10. Boru Hattı Mimarisi Aşamaları Çalışma Süreleri

Boru Hattı Mimarisi Aşamaları	Zaman Sırası		
	t1	t2	t3
(n). Görüntü	Aşama-1	Aşama-2	Aşama-3
(n+1). Görüntü	Aşama-1	Aşama-2	
(n+2). Görüntü	Aşama-1		
Zaman (sn)	0.015	0.005	0.005
1 Görüntü için toplam süre	0,025		



Bulanık Görüntü



Netleştirilen Görüntü

Şekil 3.21. AÖB tabanlı bulanıklık tespiti

Tablo 3. 11. Önerilen Yaklaşımın Karşıtlık Matrisi

Gerçek Durum	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	1856	43
	Arızalı	3	98
Test performansları (%)	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Görüntü netleştirme olmadan	0.93	0.95	0.94
Görüntü netleştirme ile	0.977	0.99	0.98

Arıza teşhisi ile elde edilen bazı deneysel sonuçlar Şekil 3.22’de verilmiştir. A’da gerçekte sağlıklı olan ve sistem tarafından da sağlıklı olarak sınıflandırılan DP etiketli bir çerçeve görülmektedir. B’de gerçekte sağlıklı olan ama model tarafından arızalı olarak sınıflandırılan YN etiketli bir çerçeve görülmektedir, bu bir yanlış sınıflandırma örneğidir, modelin bu çerçeveyi çöp nedeni ile yanlışlıkla arızalı olarak sınıflandırıldığı görülmektedir. C’de ise gerçekte arızalı olan ama sistem tarafından sağlıklı olarak sınıflandırılan YP etiketli bir çerçeve görülmektedir, burada aşınma türü arıza mevcut olmasına rağmen model tarafından sağlıklı olarak sınıflandırılmıştır. D’de ise arızalı olarak sınıflandırılan ve gerçekte de arızalı olan DN ile etiketlenen bir çerçeve görülmektedir. Görülen çerçeve oyulma türü arızaya sahiptir ve sistem tarafından da arızalı olarak sınıflandırılmıştır.

Gerçek zamanlı bir sistemde ise çalışma hızının bulunması için Denklem 3.62 kullanılmaktadır. Denkleme göre V kullanılmalıdır. Buna göre çalışma hızı hesaplanırken kamera görme alanı fov değeri önem arz etmektedir ve çalışma hızı birim sürede teşhis sonucu üretilen fov uzunluğuna bağlı olarak hesaplanmalıdır, a sabit değeri hız dönüşümü için 100.000 olmaktadır, yöntemin km/s gerçek zamanlı çalışma hızının bulunmasında kullanılan sabit değeri ifade etmektedir.

$$V = \frac{m. h. fov}{n. a} \quad (3.62)$$



a) DP olarak sınıflandırılan sağlıklı bir çerçeve



b) YN olarak sınıflandırılan gerçekte sağlıklı olan bir çerçeve



c) YP olarak sınıflandırılan sağlıklı bir çerçeve



d) DN olarak sınıflandırılan arızalı bir çerçeve

Şekil 3.22. Deneysel sonuçlar

3.8. Bölüm Değerlendirmesi ve Sonuçlar

Tez çalışmasının bu bölümünde üç ayrı uygulama önerilmiş ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

İlk uygulamada görüntü işleme temelli bir yaklaşım sunulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda sunulan yöntemin oyulma, aşınma, kırık türde arızalara sahip ray analizinde kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem ile ray yüzeylerinde oluşabilecek oyulma, aşınma, kırık türü arızaların tespiti ile birlikte arıza büyüklüğünün hesaplanması da mümkün olabilecektir. Çalışmalar dört çekirdekli 2 Ghz hızında i5 işlemciye ve 4GB belleğe sahip bir bilgisayarda matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Yöntemle birlikte saniyede 40 çerçeve gerçek zamanlı olarak işlenebilmiştir.

İkinci uygulama da ray hattına ait video görüntüler üzerinde makine öğrenmesi temelli arıza teşhisi yapılmıştır. Çalışmada ray arızalarının teşhisinde test amacı ile kullanılan video görüntü çerçevelerinde sanal olarak arıza oluşturulmuştur. Çalışma farklı arıza türleri ve test sürelerine sahip dört farklı senaryo ile tekrar edilerek güvenilirliği test edilmiştir. Genel olarak en yüksek doğruluk oranı TBA yöntemi ile en hızlı çalışma süresi TDA ile elde edilmiştir. TBA yöntemi ile test aşamasında saniyede 7 çerçeve işlenebilmektedir. Bu değer ile önerilen sistem 25 km/saat hızında hareket eden bir test cihazı üzerinde 55% doğruluk oranı ile çalışabilecektir. Sadece arızalı çerçevelerin tespitinde HK yöntemi ile çok yüksek doğruluk oranı (98%) elde edilmiştir. HK yönteminin kullanılması durumunda test aşamasında saniyede 9 çerçeve işlenebilmektedir. Bu değer ile önerilen sistem 30 km/saat hızında hareket eden bir test cihazı üzerinde 50% doğruluk oranı ile çalışabilecektir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile TBA ve HK yöntemleri birleştirilerek sistemin genel doğruluk oranı 85%'e yükseltilmiştir. Bu değer ile önerilen sistem 15 km/saat hızında hareket eden bir test cihazı üzerinde 85% doğruluk oranı ile çalışabilecektir.

Üçüncü uygulamada ise boru hattı mimarisi kullanan, AÖB ile ray hattı sarsıntılarının kaynaklanan bulanıklık tespiti ve adaptif netleştirme yapılan bir arıza teşhis yaklaşımı sunulmuştur. Genel olarak bir ray denetimi uygulamasından beklenen üç kriter bulunmaktadır. Bunlar yüksek doğruluklu sonuç, yüksek çalışma hızı ve bu görevin uygun maliyetli olarak gerçekleştirilmesidir. Bilgisayar görmesi kullanan uygulamalarda sistemin giriş verisini görüntüler oluşturmaktadır. Yüksek doğruluk oranı elde edebilmek için bu görüntülerin gürültüsüz ve net olması gerekmektedir. Ancak ray hatlarında fiziksel koşullar nedeniyle oluşan titreşimler sistemin giriş verisi olan görüntüler üzerinde bulanık etkiye neden olmaktadır.

Uygulamanın gerçek zamanlı çalışabilmesi için bulanık etkinin dinamik olarak ve hızlı tespit edilebilmesi ve giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla çalışmada ray denetimi sisteminde kameralar ile birlikte AÖB kullanılması önerilmiştir. Çalışmada AÖB elde edilen algılayıcı verileri TBRS algoritması ile birleştirilerek Euler uzaydaki yunuslama, yuvarlama ve sapma açı değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerdeki değişimler sayesinde bulanıklık tespiti ve netleştirme işlemi için gerekli *PSF* değeri dinamik olarak bulunabilmiştir.

Bulanıklık tespiti işleminde DPR 98%, YPR 2% olarak gerçekleşmiştir. Ray hattı arıza teşhisinde ise DPR değeri 97% oranında yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. Ray denetim uygulamalarında beklenen ikinci başarı kriteri yüksek çalışma hızıdır. Bu çalışmada ise klasik sıralı MİB programlama ile 85% oranda benzerlik içeren, öğrenilmesi ve uygulanması kolay GİB programlama kullanılarak özel donanımlar kullanan sistemlere yakın yüksek çalışma hızları elde edilebilmiştir.

Sistemde Nvidia Cuda kütüphanesi kullanılarak saniyede 40 görüntü üzerinde bulanıklık tespiti, netleştirme işlemi, özellik çıkarımı ve EYSA ile sınıflandırma yapılmıştır. Gerçek zamanlı çalışmada görüntü 50 cm uzunluğa sahip bir alan için 0.025 saniyede sonuç üretilerek 72 km/s gerçek zamanlı çalışma hızı elde edilmiştir.

4. LAZER KAMERA KULLANILARAK RAY PROFİLİ ARIZA TEŞHİSİ

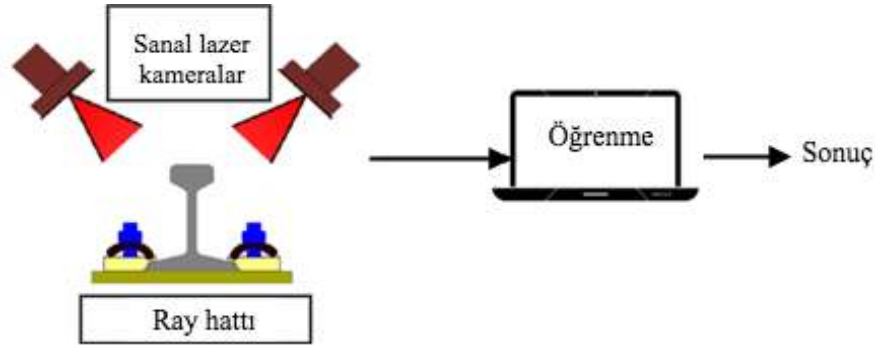
Ray hatları günümüzde raylı araç ya da özel bir test aracı ile bilgisayar görmesi kullanılarak denetlenmektedir. Temassız denetim yöntemlerinden biri olan bilgisayar görmesi temelli ray denetiminde sistemin ana giriş verisini sayısal kameralardan alınan görüntüler oluşturmaktadır. Kodlayıcı, ışık kaynağı, AÖB ve güç kaynağı ise yardımcı donanımlar olarak kullanılmaktadır. Yöntem eğitim ve test olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında ray hattından elde edilen görüntüler “arızalı” ve “sağlıklı” olarak etiketlenerek eğitim algoritması gerçekleştirilmektedir. Test aşamasında ise eğitim aşamasında kullanılmayan veriler üzerinde doğruluk ve performans analizi yapılmaktadır.

Bilgisayar görmesi temelli ray denetimi işlemi yüksek hızlı ve yüksek doğruluklu olarak yapılabilmesinin yanı sıra bazı olumsuzluklara da sahiptir. Sayısal kameralardan alınan iki boyutlu gri ya da RGB görüntü çerçevelerinin kullanılmaktadır. Ray hatlarında zamanla yağ ve toz birikintilerinden oluşan lekeler teşhis sonuçlarının Yanlış Negatif (YN) olmasına neden olabilmektedir. Bu durum ray analiz işleminin doğruluk değerini düşürmektedir. Ray hatlarında iki boyutlu gri ya da RGB veriler kullanmak yerine üç boyutlu veri kullanmak görüntü işleme algoritmalarını yanıltan YN durumlarını azaltmaktadır. Sayısal kameralardan elde edilen veriler yatay ve düşey noktalar ile bu noktalardaki renk değerleridir. Üç boyutlu görüntülemeye ise elde edilen veri yatay ve düşey noktalar ve bu noktanın hassas mesafe değeridir. Dolayısı ile makine öğrenmesi yöntemlerinin giriş verilerini de bu mesafe verileri oluşturmaktadır.

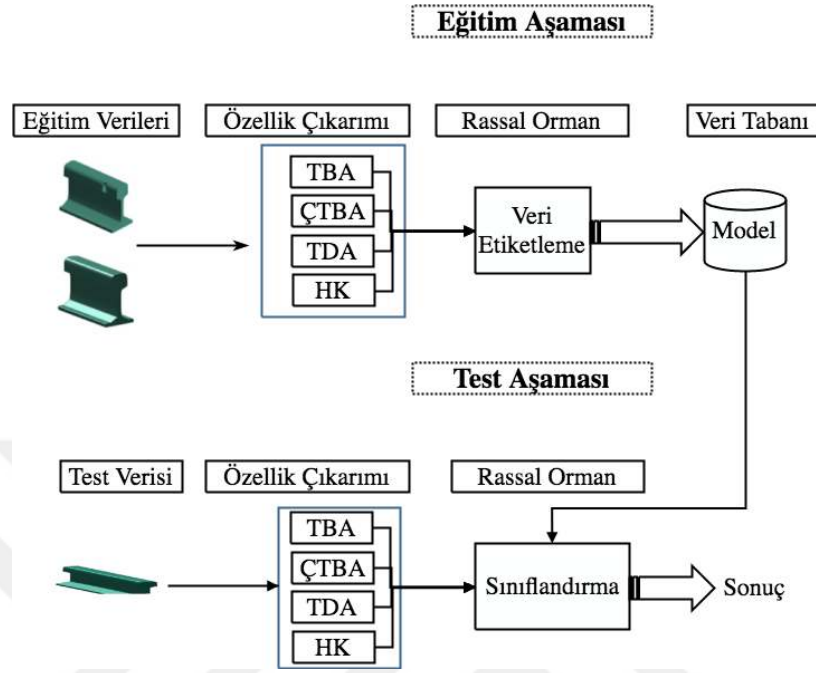
Tez çalışmasının bu bölümünde ray analizi işleminin üç boyutlu görme ile yapıldığı üç farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalardan ilki üç boyutlu ray analizi benzetim çalışması, ikincisi üç boyutlu lazer kamera kullanan deneysel bir çalışma ve sonuncusu iki adet lazer kameranın 45° açıyla ray hattının her iki yanına yerleştirildiği aynı anda rayın hem sol hem de sağ yüzeyinin analiz edilmesini sağlayan çalışmadır.

4.1. Üç Boyutlu Ray Arıza Teşhisi Benzetim Çalışması

Tez çalışmasının bu kısmında ray dış yüzeylerinde oluşması muhtemel delinme, oyuk, çatlak türü arızaların teşhisi için Matlab ortamında bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir [104]. Şekil 4.1’de verilen benzetim çalışmasında demiryolu ray hattının üst ve yan yüzeylerinde oluşan ray arızalarının bulunması hedeflendiği için ray hattının her iki tarafını aynı açı ile gören sanal lazer kameralar bulunmaktadır. Sanal lazer kameralardan okunan mesafe değerleri sistemin giriş verilerini oluşturduğu çalışma iki adımlı olarak gerçekleşmektedir. Eğitim aşamasında arızalı ve arızasız olarak etiketlenen ray profilleri sisteme giriş verisi olarak verilmiş, bu veriler üzerinde ön işlem yapıldıktan sonra dört farklı özellik çıkarım metodu ile öz değer elde edilmiş ve eğitim için bir RO oluşturulmuştur. Test aşamasında ise okunan ray hattı profillerinden özellik çıkarım yöntemleri ile tekrar öz değer elde edilerek sınıflandırma yapılmış ve teşhis sonucu üretilmiştir. Choquet Bulanık İntegral (CBI) methodu [105] ile sistemin genel doğruluk oranı arttırılmış ve sonuç olarak ray hatlarında fiziksel bir test cihazı üzerinde gerçek zamanlı ve yüksek doğruluklu çalışabilecek bir system önerilmiştir. Benzetim çalışması altı ana bölümden oluşmaktadır. İlerleyen bölümde Şekil 4.2’de blok diyagramı verilen benzetim çalışmasına ait aşamalar anlatılmaktadır.



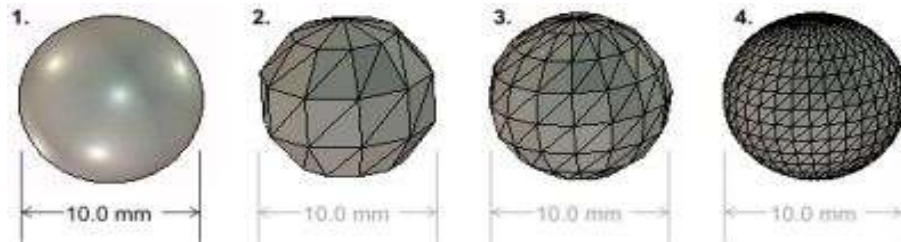
Şekil 4.1. Üç boyutlu ray arıza teşhisi benzetim çalışması



Şekil 4.2. Üç boyutlu ray arıza teşhisi benzetim çalışması blok diyagramı

4.1.1. Üç Boyutlu Ray Profili Oluşturma

Blender ve benzeri katı modelleme yazılımları çizimlerin ölçülü ve vektör tabanlı üç boyutlu çizimlerini oluşturmada kullanılmaktadır [106]. Günümüzde katı modelleme’de yaygın olarak “.stl” formatı kullanılmaktadır [107]. Üç boyutlu yazıcılar içinde bir standart hale gelen bu formatta katı modelin yüzey geometrisi birbirleriyle bağlantılı üçgenler aracılığı ile oluşturulmaktadır, üçgen sayısı ne kadar fazla ise üç boyutlu cismin çözünürlüğü Şekil 4.3’te görüldüğü gibi o kadar yüksek olacaktır.



Şekil 4.3. Katı modellemede üç boyutlu modelin üçgenler ile oluşturulması [109]

Şekil 4.4’te bir katı modelin ascii format içeriği verilmiştir. Dosya bir “solid” ismi ve “endsolid” anahtar kelimeleri ile başlayıp bitmektedir. Modeli oluşturan her bir üçgen “facet” anahtar sözcüğü ile tanımlanmaktadır. “Facet” bloğu içerisinde tanımlanan her bir “vertex” ise üçgenlerin koordinatlarını vermektedir.

```

solid name
{
  facet normal  $n_i$   $n_j$   $n_k$ 
  outer loop
    vertex  $v1_x$   $v1_y$   $v1_z$ 
    vertex  $v2_x$   $v2_y$   $v2_z$ 
    vertex  $v3_x$   $v3_y$   $v3_z$ 
  endloop
endfacet
}
endsolid name

```

Şekil 4.4. Üç boyutlu katı model ascii dosya içeriği

Benzetim çalışmasının bu adımında Blender katı modelleme yazılımı kullanılarak S49 ray profili ölçüleri esas alınarak hiç arıza içermeyen ve arıza içeren üç boyutlu ray profilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu ray profilleri Matlab ortamında okunarak üç boyutlu veri matrisi oluşturulmaktadır [108]. Şekil 4.3’te solda S49 ray profilinin üç boyutlu modeli görülmektedir. Bu üç boyutlu modelin Matlab ortamında görüntülenmesi ve üç boyutlu veri matrisine dönüştürülebilmesi için ortadaki şekilde olduğu gibi katı modeldeki üçgenler birleştirilmiş ve renklendirilmiştir. Son olarak sağda ise arıza içeren bir üç boyutlu ray profili verilmiştir.



a) Üç boyutlu S49 ray profilinin yüzey geometrisi



b) Üç boyutlu S49 ray profili

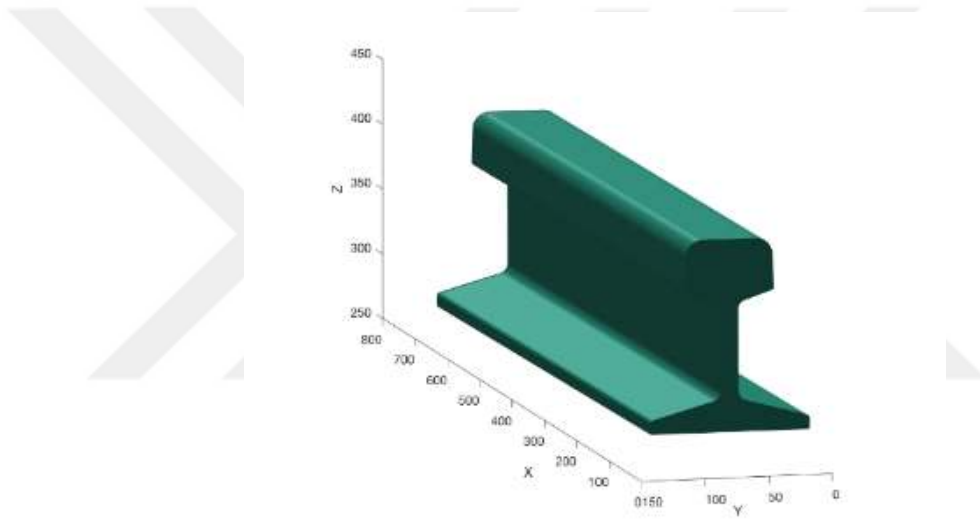


c) Üç boyutlu arıza içeren S49 ray profili

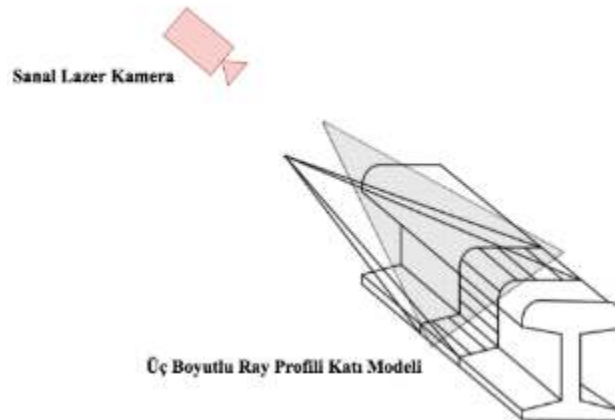
Şekil 4.5. Blender ortamında oluşturulan arıza içeren ve arıza içermeyen ray profilleri

4.1.2. Üç Boyutlu Ray Profilini Okuma

Benzetim çalışmasının bu adımında Blender ortamında oluşturulan arızalı ve arızasız üç boyutlu modele ait veriler Matlab ortamında okunmaktadır. Şekil 4.6'da önce üç boyutlu modelin matlab ortamında nasıl görüntülediği verilmiştir. Matlab ortamında yüzey geometrisi bilgilerini oluşturan tüm üçgensel noktalar birleştirilerek bütün bir görüntü elde edilmiş ve renklendirme yapılmıştır.



- a) Matlab ortamında üç boyutlu katı model yüzey bilgilerinin elde edilmesi



- b) Üç boyutlu katı modelin boş bir üç boyutlu veri matrisi içine yerleştirilmesi

Şekil 4.6. Üç boyutlu ray profili bilgilerinin Matlab ortamında okunması

Benzetim çalışması lazer kameralarda olduğu gibi ray profiline olan mesafe değerlerinin elde edilmesi ve bu bilgilerin giriş verisi olarak kullanılması prensibine dayanmaktadır. Bu amaçla bu üç boyutlu profil kendisinden daha büyük başka bir üç boyutlu model içine yerleştirilmiştir. Her iki modelin başlangıç noktaları birleştirilerek kalibre edilmiş ve ray profili sürekli x yönünde okunmuştur. Sanal lazer kamera ile ray profili arasındaki mesafe bilgileri Denklem 4.1'e göre bulunmaktadır. Denklemden (x_{cam}, y_{cam}) kameranın koordinat bilgilerini, (x_i, y_i) ise ray profilinin koordinat bilgilerini göstermektedir.

$$\sum_{i=1}^p p_i = \sum_{i=1}^p \sqrt{(x_{cam} - x_i)^2 + (y_{cam} - y_i)^2} \quad (4.1)$$

4.1.3. Ön İşlemler

Benzetim ortamında ideal koşullar altında çalışıldığında ortalama mesafe karşılaştırması yapmak doğru sonuç elde etmede yeterli olacak ve sistem 100% doğrulukla çalışacaktır. Ancak gerçek koşullar düşünüldüğünde sistemdeki veriler gürültülü olacaktır. Bunu yanı sıra ölçüm hatalarından dolayı arızalı olan bir profil arızasız olarak yada arızasız bir ray profili arızalı olarak ölçülebilecektir. Bu nedenle hem eğitim hemde test aşamasında elde edilen ölçüm değerlerine Denklem 4.2'de verildiği tek düze dağılıma sahip rassal bir gürültü eklenmiştir.

$$f(z) = \begin{cases} \frac{1}{y-x}, & \text{Eğer } x < z < y \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (4.2)$$

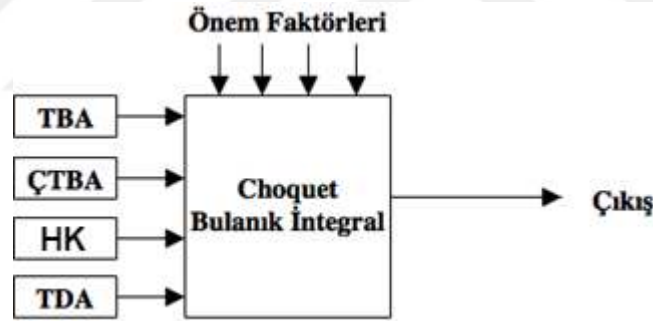
4.1.4. Özellik Seçimi

Benzetim çalışmasında elde edilen veriler üzerinde bir önceki bölümde anlatılan özellik çıkarım algoritmaları kullanılarak ray profilini simgeleyen öz değerler elde edilmiştir. Bu benzetim çalışmasında özellik çıkarım yöntemlerinden TBA, ÇTBA, TDA ve HK yöntemleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemi olarak ise eğitim ve test aşamalarında RO kullanılmıştır.

4.1.5. Özellik Birleştirme

Çalışmada ray profillerinden dört farklı yöntem ile özellik çıkarımı yapılarak öz değerler elde edilmektedir. Bu öz değerler ile önsel bir çalışma yapılarak doğruluk performansları karşılaştırılmış ve Choquet Bulanık İntegral (CBİ) metot ile birleştirilmiştir [110]. Deneysel çalışmalar sonucu dört adet özellik çıkarım metodundan elde edilen çıkış değerleri basitleştirilmiş eşitliği Denklem 4.3'te blok diyagramı ise Şekil 4.7'de verilen CBİ yöntemine göre sistemin çıkış doğruluk oranı belirlenmiştir. Denklemde (g_i) özellik çıkarım yöntemlerinden elde edilen öz değerleri, $h(x_i)$ ise ağırlık faktörlerini simgelemektedir. Çalışmada CBİ yöntemi sağlıklı ve arızalı ray profilleri için ayrı ayrı uygulanmıştır.

$$f = \sum_{i=1}^t h(x_i) * g_i \quad (4.3)$$



Şekil 4.7. Özellik birleştirme adımı

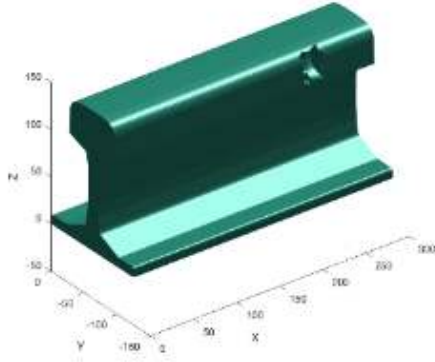
4.1.6. Eğitim ve Test

Eğitim ve test aşamasında simülasyon çalışmasında elde edilen arızalı ve arızasız ray profillerinden elde edilen öz değerler etiketlenerek kullanılmıştır. Her bir özellik çıkarım yönteminden ikişer adet öz değer eğitim algoritmasında kullanılmıştır. Elde edilen bu iki sınıfa ait veriler RO algoritması ile eğitime tabi tutularak karar ormanı oluşturulmuştur. RO içindeki ağaç sayısı ise on adet olarak seçilmiştir. Büyük veriler üzerinde yüksek doğruluklu ve hızlı çalışması RO yönteminin seçilmesinin en büyük nedenidir.

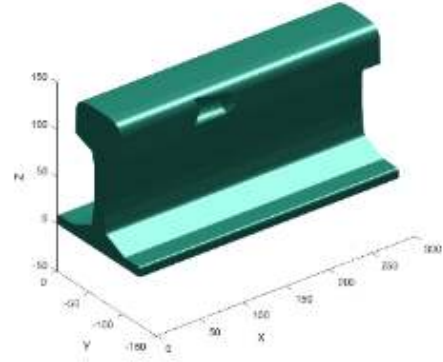
Test aşamasında sistemde daha önce kullanılmayan arızalı ve sağlıklı ray profilleri içeren bir ray hattı kullanılmıştır. Test aşamasında bu ray hattından okunan profillerden öz değer elde etme işlemi tekrar yapılarak elde edilen değer karar ormanı içinde karşılaştırılarak en yakın olduğu sınıf tespit edilerek çerçevede arıza bulunup bulunmadığı sonucu üretilmektedir.

4.1.7. Benzetim Çalışması Sonuçları

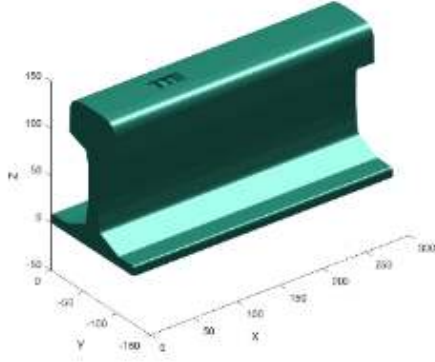
Benzetim çalışmasında ray dış yüzeylerinde oluşması muhtemel delinme, oyuk, çatlak türü arızaların tespiti için Matlab ortamında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikli olarak sağlıklı bir ray profili katı modelleme yazılımı Blender kullanılarak üç boyutlu olarak oluşturulmuş ve Matlab ortamında sanal bir lazer kameradan ray dış yüzeyine olan mesafeler ölçülerek sağlıklı ray profili elde edilmiştir. Arızalı ray profili bu sağlıklı ray profili üzerinde değişken boyutlarda sanal arızalar oluşturularak elde edilmiştir. Şekil 4.8’de arıza oluşturulan ray profilleri görülmektedir.



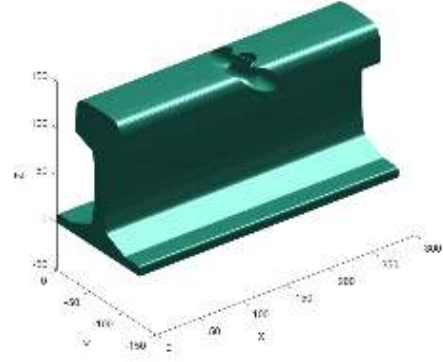
a) Yandan arıza oluşturulan ray profili



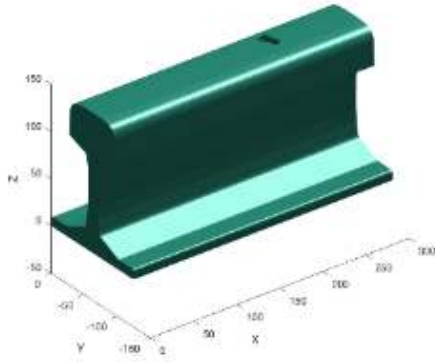
b) Yandan arıza oluşturulan ray profili



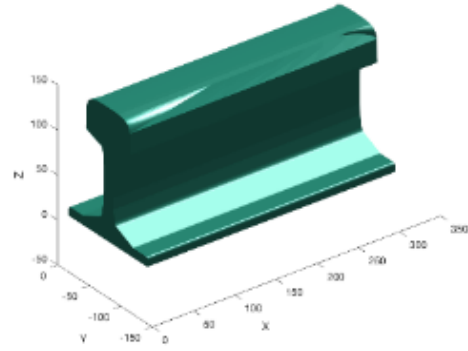
c) Üstten arıza oluşturulan ray profili



d) Üstten arıza oluşturulan ray profili

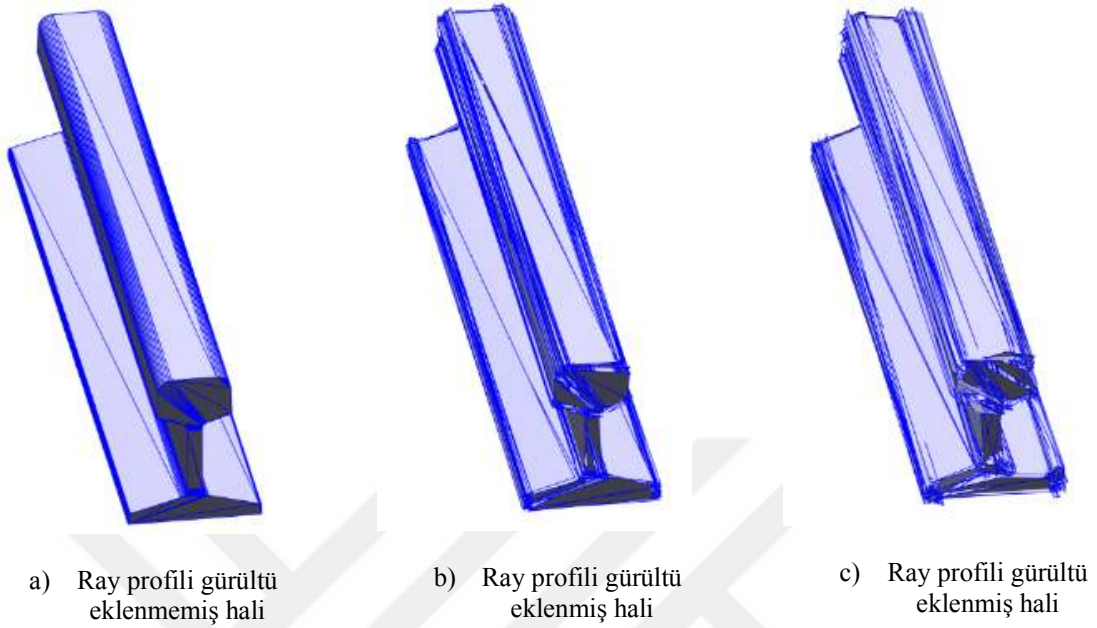


e) Üstten arıza oluşturulan ray profili



f) Aşınma türü arıza oluşturulan ray profili

Şekil 4.8. Benzetim çalışması için oluşturulan arıza içeren ray profilleri



Şekil 4.9. Ray profili katı modele gürültü ekleme işlemi

Benzetim ortamında ideal koşullar altında çalışıldığında HK metodu kullanılarak sağlam ray profili referans değerine uymayan tüm profiller arızalı olarak kabul edildiğinde sistem 100% ideal doğruluk oranında çalışabilmektedir.

Benzetim ortamı ideal koşullar altında çalıştığından ve ray hattından okunan tüm profil değerleri birebir aynı olacağından bu doğruluk değeri mümkün olabilmiştir. Ancak gerçek fiziksel koşullar altında çalışma ortamının ideal olması mümkün değildir. Özellikle gerçek fiziksel koşullarda ray hatlarında hareket ve ağırlıktan dolayı titreşim gürültüsü meydana gelmektedir ve gürültü okunacak değerleri değiştirecektir. Şekil 4.9'da gürültü içermeyen ray profiline alttaki şekilde tek düze rassal dağılıma sahip gürültü eklenmiştir.

Tablo 4.1'de test aşamasında arızalı ve arızasız profiller içeren bir ray profili üzerinde doğruluk performans değerleri ve CBİ ile elde edilen genel doğruluk oranları verilmiştir.

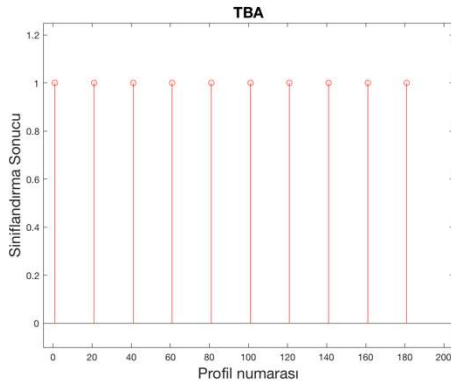
En hızlı çalışma süresi özellik olarak sadece ortalama ve standart sapma değeri özellik olarak alındığı için HK ile elde edilmiştir. En yüksek doğruluk oranı TBA ile en düşük doğruluk oranı ise ÇTBA ile elde edilmiştir. ÇTBA yöntemi genel olarak en düşük doğruluk oranına sahip olmakla birlikte Şekil 4.10'da görülebileceği gibi 180. profil doğruluk oranı daha yüksek olan TDA ile yanlış sınıflandırılmasına rağmen ÇTBA ile doğru sınıflandırmıştır.

Kullanılan yöntemler için doğruluk performansları arızalı ve arızasız çerçeveler için ayrı ayrı hesaplanarak CBİ methodu ile ağırlıklandırılmıştır. CBİ için seçilem giriş (h) ve ağırlık faktörleri (g) değerleri deneysel çalışmalar sonucu en uygun olarak seçilmiştir. Son adımda ise arızalı ve arızasız çerçeveler için ayrı ayrı gerçekleştirilen test sonuçlarının doğruluk oranları verilmiştir.

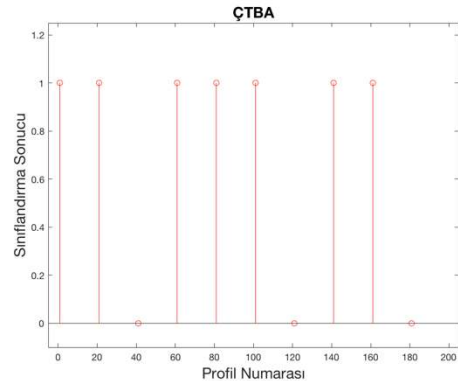
Tablo 4. 1. Benzetim çalışması ile elde edilen doğruluk değerleri

Yöntem	Sağlıklı Ray		Arızalı Ray	
	h	g	h	g
TBA	0.995	0.25	0.995	0.25
ÇTBA	0.91	0.1	0.92	0.1
HK	0.996	0.4	0.98	0.4
TDA	0.98	0.25	0.99	0.25
CBİ ile doğruluk (%)	99.5		98.5	

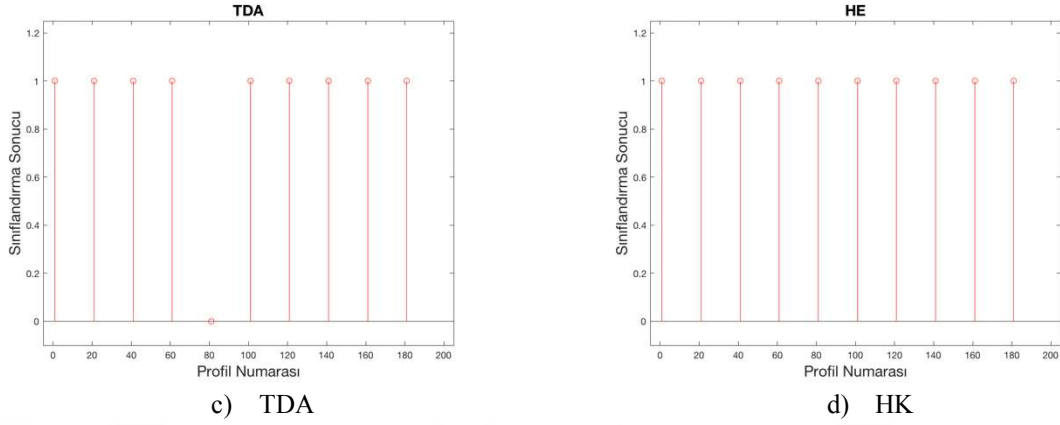
Şekil 4.10'da çalışmada kullanılan dört farklı özellik çıkarım yöntemi karşılaştırmalı grafik olarak verilmiştir. Sonuçların belirgin görünebilmesi için sonuçlarda toplam 200 adet profil için 20 ve katı profil numaralarına ait sonuçlar gösterilmiştir. Teşhis sonucu eğer doğruluk tablosuna göre sınıflandırma doğru yapılmış ise y-ekseninde “1” ile yanlış sınıflandırma yapılmış ise “0” ile gösterilmektedir. X-ekseni ise profil numaralarını göstermektedir.



a) TBA



b) ÇTBA



Şekil 4.10. Benzetim çalışması sınıflandırma sonuçları

4.2. Lazer Kamera Kullanılarak Üç Boyutlu Görüntü Elde Etme

Tez çalışmasının bu bölümünde lazer kamera kullanılarak üçgenleme ile hassas mesafe verilerine dayalı ray arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir. İlerleyen bölümde önce üç boyutlu görüntüleme teknikleri hakkında bilgi verilerek, lazer kamera çalışma prensibi anlatılacak ardından yapılan deneysel çalışma ve sonuçları verilecektir. Ccd ve Cmos kameralar ile (x, y) düzleminde iki boyutlu görüntü alınabilmektedir. Görüntü gri seviye ise tek kanal, renkli ise RGB gibi üç kanallı olarak nitelendirilmektedirler. Üç boyutlu görüntülerde ise bu renk kanalları yerine ya da ilaveten (z) düzlemindeki mesafe verileri yer almaktadır. Üç boyutlu görüntü elde etme; yani (z) düzleminde ki mesafe verilerini elde etme için literatürde yaygın olarak üç yöntem kullanılmaktadır.

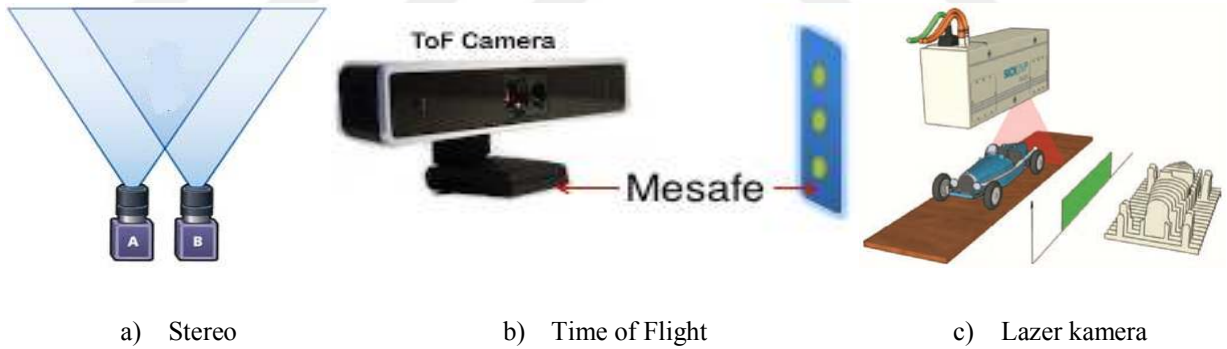
4.2.1. Üç Boyutlu Görüntü Elde Etme Yöntemleri

Üç boyutlu görüntüleme amacı ile literatürde yaygın olarak Stereo [111], Time of Flight (ToF) [112] kameralar ve lazer kameralar kullanılmaktadır [113]. Stereo görme tekniği insan görme prensibi ile çok benzerdir. Kalibre edilmiş iki ayrı kamera kullanılarak yapılan görüntülemelerde kameralar arasındaki mesafe ve açı değerleri bilindiğinden görüntü de ki her bir noktanın iki ayrı kamerada ki izdüşümleri geometrik yöntemler ile ölçülerek nokta mesafesinin bulunması prensibine dayanır.

Maliyet olarak ucuz olmakla birlikte doğruluk performansları; kalibrasyon ve kamera parametrelerinin hassasiyetine bağlıdır. Arıza teşhis veya bilgisayarlı görme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Hem RGB kamera hem de bir kızılötesi algılayıcı içeren ToF kameralar kızılötesi dalgaların uçuş süresini de ölçerek RGB bilgilerinin yan ısıra derinlik bilgisini de elde ederler. Özellikle oyun konsolları, sanal gerçeklik, üç boyutlu modelleme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Uygun maliyetli ve düşük hassasiyetli çözümlere sahiptir. Bu nedenle arıza teşhisi uygulamalarda kullanımları çok nadirdir.

Üç boyutlu görüntüleme kullanılan bir diğer yöntem ise lazer kameraların kullanılmasıdır. Lazer kameralar yüksek çalışma hızları ve hassas mesafe ölçme kabiliyetleri nedeni ile arıza teşhis uygulamalarında çok yaygın kullanılmaktadır. Şekil 4.11’de üç yöntem ve çalışma prensipleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4.2’de üç boyutlu görüntülemede kullanılan her üç yöntemin öne çıkan avantaj ve dezavantajları verilmiştir.



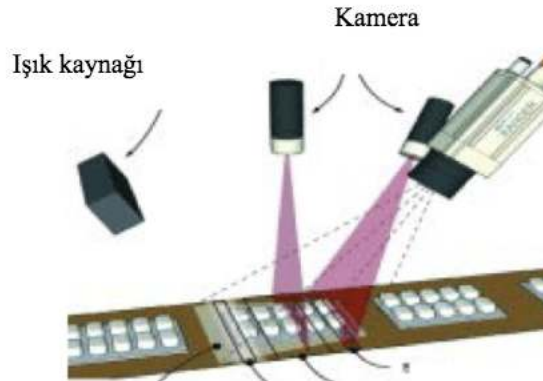
Şekil 4.11. Üç boyutlu görüntü elde etme yöntemleri [114]

Tablo 4. 2. Üç boyutlu görüntülemelerde kullanılan ana yöntemler

Yöntem	Donanım	Avantaj	Dezavantaj
Stereo	İki adet kalibre edilmiş kamera	Uygun maliyet	Doğruluk hassasiyeti kalibrasyona bağlı
ToF Kameralar	Kızıl ötesi ışık kaynağı, faz dedektörü ve kamera	Uygun maliyet	Düşük doğruluk hassasiyeti
Lazer Kamera	Kalibre edilmiş kamera, enkoder ve lazer çizgi kaynağı	Yüksek doğruluk hassasiyeti	Yüksek maliyet

4.2.2. Lazer Kameralar İle Üç Boyutlu Görüntü Elde Etme

Lazer kameralar Şekil 4.12'de ki gibi kalibre edilmiş bir kamera, lazer çizgi kaynağı ve kodlayıcıdan oluşur. Bu bileşenler genellikle tümleşik ürün halindedir. Sistem sürekli fotoğraf çekerek lazer çizgideki profil değişikliğinden faydalananarak nesnenin üç boyutlu profilini çıkartır. Üç boyutlu görüntülemelerde lazer kamera kullanmak diğer yöntemlere oranla maliyeti çok daha yüksek bir çözümdür ancak yüksek çalışma hızları ve doğruluk hassasiyetleri nedeni ile endüstriyel uygulamalarda makine görmesi yardımıyla gerçek zamanlı kusur tespit edilmesi gereken tüm uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

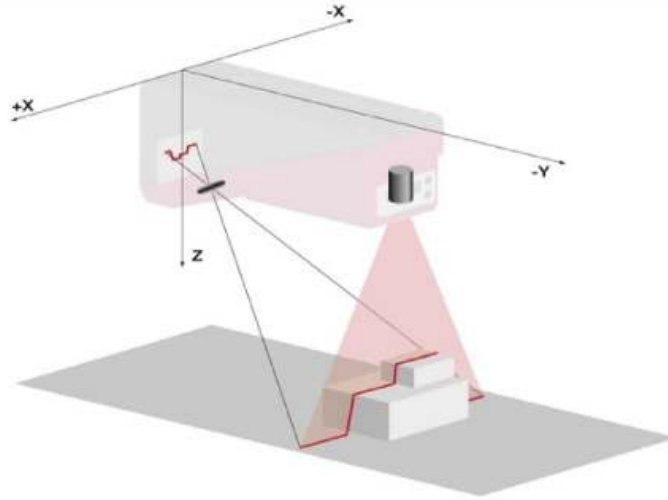


Şekil 4.12. Lazer kamera ile üç boyutlu görüntüleme [114]

Lazer görüntülemeye üç boyutlu görüntüsü elde edilmek istenen nesnenin hareketli veya sabit olmasına bağlı olarak kullanılan teknikte değişmektedir. Sabit nesnelerde üç boyutlu görüntü elde edilirken obje üzerine lazer deseni düşürülerek profil çıkartma işlemi yapılır. Hareketli nesnelerde ise objenin kontrollü bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir. Nesnenin ne kadar hareket ettiği bir kodlayıcı yardımı ile bulunabilir.

4.2.2.1. Lazer Üçgenleme

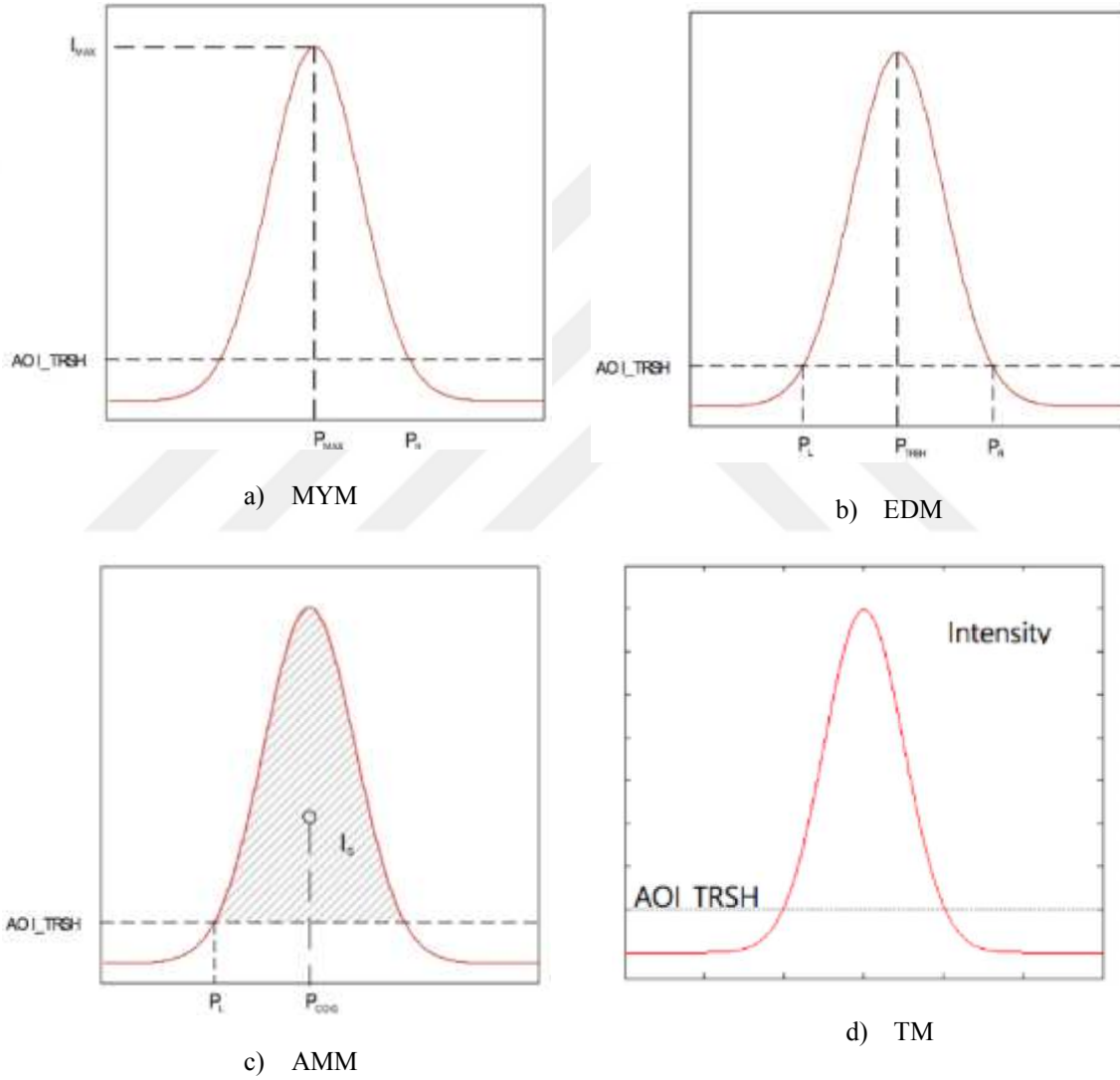
Kamera sistemi veya nesnenin hareketli olduğu durumlarda profili çıkarılmak istenen objenin kontrollü bir şekilde hareket etmesi gerekmektedir. Kodlayıcı yardımı ile nesnenin ne kadar hareket ettiği bulunur, böylece objedeki profil değişimleri izlenebilir. Kalibre edilmiş kamera objenin fotoğrafını çekerek lazer çizgi kaynağındaki değişiklikleri kaydeder [113]. Şekil 4.13'te lazer kamera ile üç boyutlu profil çıkarma işleminde üç boyutlu uzaydaki eksenler verilmektedir. Lazer üçgenleme ile elde edilen derinlik bilgisinin basitleştirilmiş eşitliği Denklem 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Lazer üçgenleme yöntemi [114].

$$z = \frac{x}{\sin(a)} \quad (4.4)$$

Deneysel çalışmalarda Autommation Teknoloji üreticisine ait AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanılmıştır. Bu lazer kamera üçgenleme için Maksimum Yoğunluk Modu (MYM), Eşik Değer Modu (EDM), Ağırlık Merkezi Modu (AMM) ve Tepe Modu (TM) yöntemlerini kullanılmaktadır. Şekil 4.14'te bu yöntemler görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.14. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera üçgenleme de kullanılan yöntemler [114]

Şekil 4.14'te verilen görsellerde yer alan Gauss eğrileri her bir algoritmaya ait lazer ışık demetini simgelemektedir. MYM algoritmasında lazer ışınının maksimum yoğunluk değeri nokta değerine göre hesaplanmaktadır.

Eşik değeri modunda (P_L, P_R) sırası ile lazer ışığının sol ve sağ kenarı olmak üzere $P_{\text{Threshold}}$ Denklem 4.5'e göre hesaplanmaktadır.

Denklem 4.5 – Denklem 4.8 aralığında verilen denklemlerde verilen I_s Gauss yoğunluk toplamını, M_s yoğunluk toplam momentini, I_p yoğunluk eşik değeri göstermek üzere P_{COG} lazer çizgi kaynağının değerini vermektedir.

TM yönteminde ise Gauss yoğunluk fonksiyonu eğrisinin ilk türev değeri ölçüm değeri olarak kullanılmaktadır.

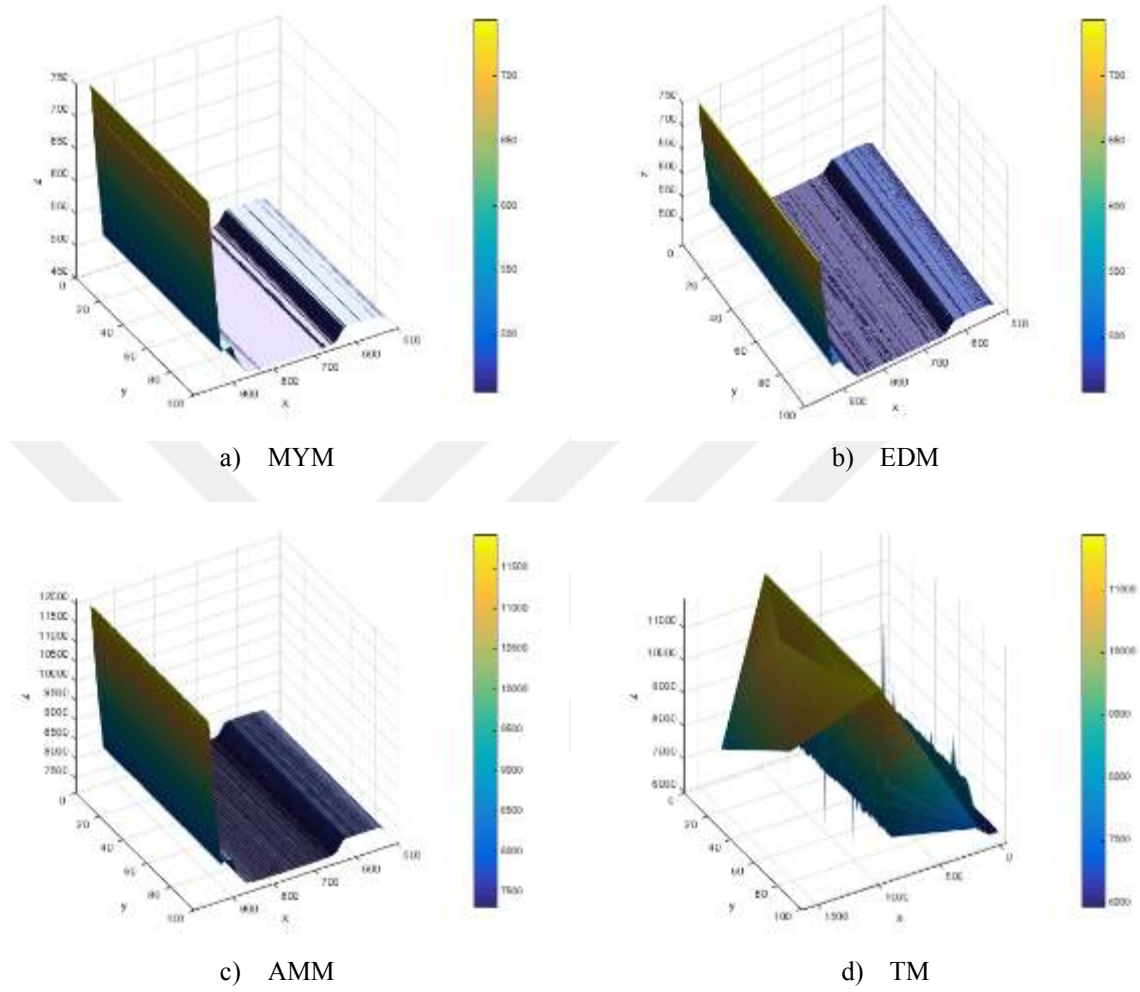
$$P_{\text{Threshold}} = \frac{P_L + P_R}{2} \quad (4.5)$$

$$I_s = \sum I_p, \quad (4.6)$$

$$M_s = \sum P \times I_p \quad (4.7)$$

$$P_{\text{COG}} = P_L + M_s/I_s \quad (4.8)$$

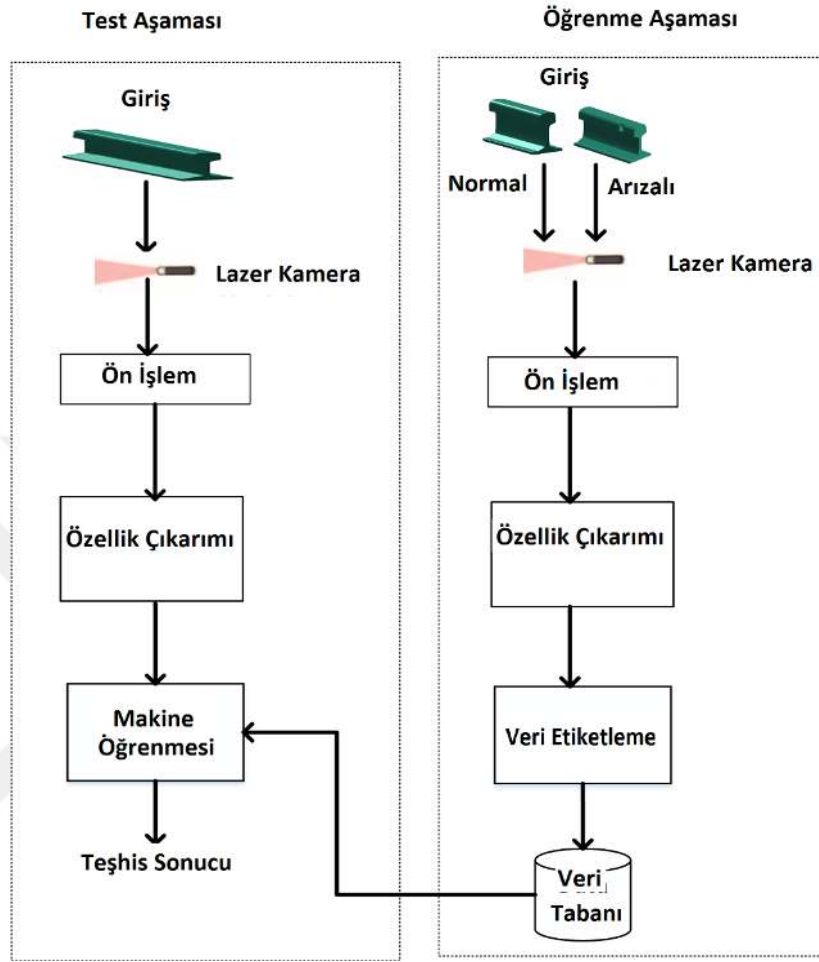
Bazı lazer kameralarda mesafe ölçümünde üçgenleme haricinde projeksiyon ızgaralama adı verilen bir başka yöntemde daha kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan ölçüm tekniği lazer üçgenleme'ye çok benzemektedir. Temel farklılık nesnenin hareketli değil sabit olması ve obje üzerine tek lazer çizgi yerine birden fazla lazer çizgi demeti gönderilmesidir. Birçok endüstriyel saha uygulamalarında lazer üçgenleme yöntemi bu yöntemle kıyasla daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.15'te AT C5-1600CS19-500 lazer kamera ile ray hattından dört yöntemle alınan görüntüler verilmiştir. TM yöntemi hariç diğer üç yöntemle çok benzer sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak TM algoritması ile elde edilen sonuçların gürültüye karşı daha az duyarlı olması nedeni ile uygulama genelinde kullanılmamıştır.



Şekil 4.15. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera görüntüleme yöntemleri

4.3. Lazer Kamera Kullanarak Yanal Ray Arıza Teşhisi

Tez çalışmasının bu kısmında gerçekleştirilen çalışma için önerilen yöntem eğitim ve test olmak üzere iki ana adım içermektedir [24,25]. Eğitim aşamasında ray profilinden elde edilen ray profilleri “arızalı” ve “sağlıklı” olarak etiketlenmiş, bu veriler üzerinde özellik çıkarımı yapılarak makine öğrenmesi algoritmasının giriş verisi oluşturulmuştur. Test aşamasında ise eğitim aşamasında kullanılmayan ray profilleri ile işlem adımları gerçekleştirilerek yöntemin doğruluk performansı elde edilmiştir. Şekil 4.16’da önerilen çalışmanın genel blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.16. Lazer kamera temelli ray arıza teşhis yöntemi

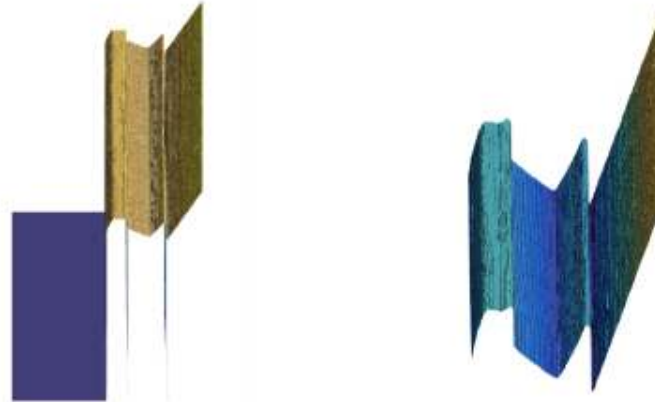
4.3.1. Ön İşlem

Lazer kameradan elde edilen verilerin, eğitim ve test aşamalarında doğrudan kullanılmadan önce bazı ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bu ön işlemler lazer kamera çalışma menzili ve kör noktalardan dolayı oluşan verilerin düzenlenmesi ile alakalıdır. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera 700 ± 250 mm çalışma menziline sahiptir. Lazer kamera görüş açısı ve menzil içinde kalan tüm objeleri taramaktadır. Sadece istenilen objenin taranması için homojen ve çalışma menzili dışında kalan bir arka plan kullanılabilir ancak fiziksel çalışma koşullarında bu mümkün değildir. Lazer kamera her bir profilde üç boyutlu modda 1600×1 boyutunda vektörel veri elde etmektedir.

Görüş açısı içinde kalan ancak çalışma menzili dışında kalan (450 mm'den daha yakın objeler 0, 950 mm'den daha uzak mesafeler ise varsayılan olarak maksimum değer olarak okunmaktadır). Bu durumda birleştirilen profillerden elde edilen üç boyutlu veri matrisi içinde oldukça fazla sayıda sıfır değeri olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sınıflandırma algoritması başarımını da kötü yönde etkilemektedir. Ön işlem adımında Denklem 4.9'da ki gibi verinin anlamını ve görünümünü değiştiren bu veriler matrisi içinden süzülmemektedir.

$$d = \sum_{i=1}^{1600} \{Eğer x \neq 0\} \quad (4.9)$$

Şekil 4.17'de bir lazer taramasında çalışma menzili dışında kalan tarama verilerinin matristen çıkarılmadan ve çıkarıldıktan sonraki görüntüleri kıyaslama amacı ile verilmiştir. Şekil 4.17 solda lazer kamera verileri üzerinde ön işlem yapılmadan önceki durum verilmiştir. Aynı şekilde sağda ise bu veriler temizlendikten sonra ray profili görülmektedir. Bu veriler üç boyutlu matris olarak Matlab ortamında görüntülendiğinde yaklaşık iki kat veri içerdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra bu sıfır değerli veriler özellik çıkarım algoritmalarının öz değerlerini doğrudan etkileyerek sınıflandırma başarımını da düşürmektedir.



Şekil 4.17. Lazer kamera verileri üzerinde ön işlem gerçekleştirme

4.3.2. Özellik Çıkarımı

Lazer kamera ile her ölçme işleminde 1-10000 profil ölçümü yapılabilmektedir. Ölçülecek profil sayısı objeye düşürülecek lazer demetinin genişliğinin ve veri boyutunun da artması anlamına gelmektedir. Profil sayısının fazla tutulduğu durumda lazer demetinin genişliğinden dolayı özellikle veri etiketleme aşamasında profilleri *arızalı* ve *arızasız* olarak etiketleme işlemi de zorlaşmaktadır. Bu nedenle eğitim ve test aşamalarında ray hattından her bir ölçümde 1/profil alınmış ve görüntüleme için birleştirilmiştir. Her bir profil 1600 adet veri içermektedir.

Bölüm 3'te anlatılan özellik çıkarım yöntemlerinin çalışması için 1600x1 boyutundaki vektör Denklem 4.10'da ki eşitliğe göre $a = 40$ seçilerek 40x40 boyutunda kare matrise dönüştürülmüştür. Bu adım sonrası eğitim aşamasında bir ray profilinden Bölüm 3'te verilen yöntemlerle elde edilen ilk dört öz değerler Tablo 4.3'te verilmiştir. HK yöntemi haricinde ki diğer üç yöntemde ray profilinden elde edilen vektör axa boyutunda kare matrise dönüştürülerek öz değer elde etme işlemi yapılmıştır. HK yönteminde ise öz değer olarak ortalama ve sapma olmak üzere iki değer kullanılmıştır. TBA, ÇTBA, TDA yöntemlerinde elde edilen veriler {0-1} aralığına normalize edilmiştir.

$$m_{axa} = \sum_{y=1}^a \sum_{x=1}^a P_i \quad (4.10)$$

Tablo 4. 3. Ray profili verisi üzerinde elde edilen öz değerler

Yöntemler	1. Öz değer	2. Öz değer	3. Öz değer	4. Öz değer
TBA	0.039	0.32	0.28	-0.02
ÇTBA	-0.0857	-0.0860	-0.013	0.054
TDA	0.99	0.105	0.079	0.02
HK	0.93	0.06		

4.3.3. Veri Etiketleme

Özellik çıkarımından sonraki adımda makine öğrenmesi algoritmasında kullanılmak üzere veri etiketleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Veri etiketleme işlemi elle *arızal* ve *arızasız* olmak üzere iki sınıfta elle gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlem sonucunda makine öğrenmesi RO algoritmasında kullanılacak veri tabanı oluşturulmuş olmaktadır.

4.3.4. Eğitim

AT C5-1600CS19-500 lazer kamera yatay ve düşeyde 313×15 mikronmetre çözünürlük hassasiyetine ve her profilde 1600 nokta sayısına sahiptir. Denklem 4.4'e göre menzil 700mm olduğunda 500mm görüş açısı ile birlikte yatayda profilde ki her iki nokta arasındaki mesafe 0.3125 mm mesafeye denk düşecektir. Mesafe değeri olarak ise $700\text{mm} \pm 250\text{ mm}$ ölçüm aralığı 16 bit değer ile temsil edilmektedir. Deneysel çalışmalarda Şekil 4.18'de gösterilen aşınma, delik, çatlak türü arızalar içeren yaklaşık 2 metre uzunluğunda ray profili kullanılmıştır. Kamera parametreleri düşünüldüğünde bu ray profilinden yaklaşık 500.000 profil elde etmek teorik olarak mümkündür. Ancak kameranın bu hassasiyette hareket ettirilmesi ve ray arıza teşhisinin mikrometre hassasiyetinde çalışması mümkün değildir.

Tez çalışmasının bu kısmında önerilen sistemin doğruluk performansı için Şekil 4.18'de verilen ray profilinden elde edilen 10.000 adet profil kullanılmıştır. Tüm ray profilleri *arızalı* ve *arızasız* olarak sınıflandırılmış ve toplam veri setinin 60%'ı sistemin eğitimi için, 40%'ı ise testi için ayrılmıştır. Makine öğrenmesi algoritması olarak RO seçilmiş, ormandaki ağaç sayısı 50 olarak seçilmiştir. Test aşamasında önerilen yöntem ile elde edilen teşhis sonuçları ve profilin gerçek sınıfı kullanılarak Bölüm 3'te anlatılan ve Tablo 3.8'de verilen zıtlık matrisi oluşturularak sistem doğruluk performansı, hassasiyeti ve keskinliği bulunmuştur. Test işlemi 1600×1 vektör üzerinde ön işlem yapılması, özellik elde edilmesi ve sınıflandırılması aşamalarını kapsamaktadır. En hızlı çalışma süresi HK yöntemi ile en yüksek doğruluk oranı ise TBA yöntemi ile verilmiştir. Tüm yöntemler ile elde edilen çalışma süresi ve doğruluk değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.



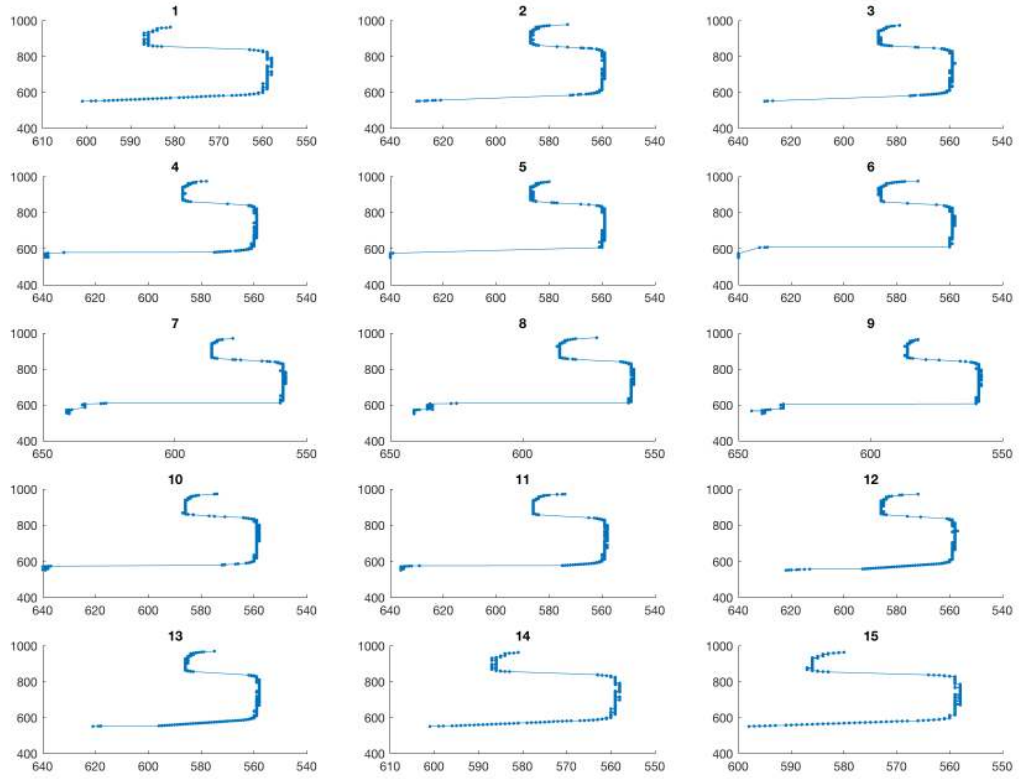
Şekil 4.18. Deneysel çalışmalarda kullanılan ray profili

Tablo 4. 4. Kullanılan özellik çıkarım yöntemlerinin kıyaslanması

	TBA	ÇTBA	TDA	HK
Çalışma süresi (sn/profil)	150	140	200	300
Doğruluk oranı (%)	98	93	96	95

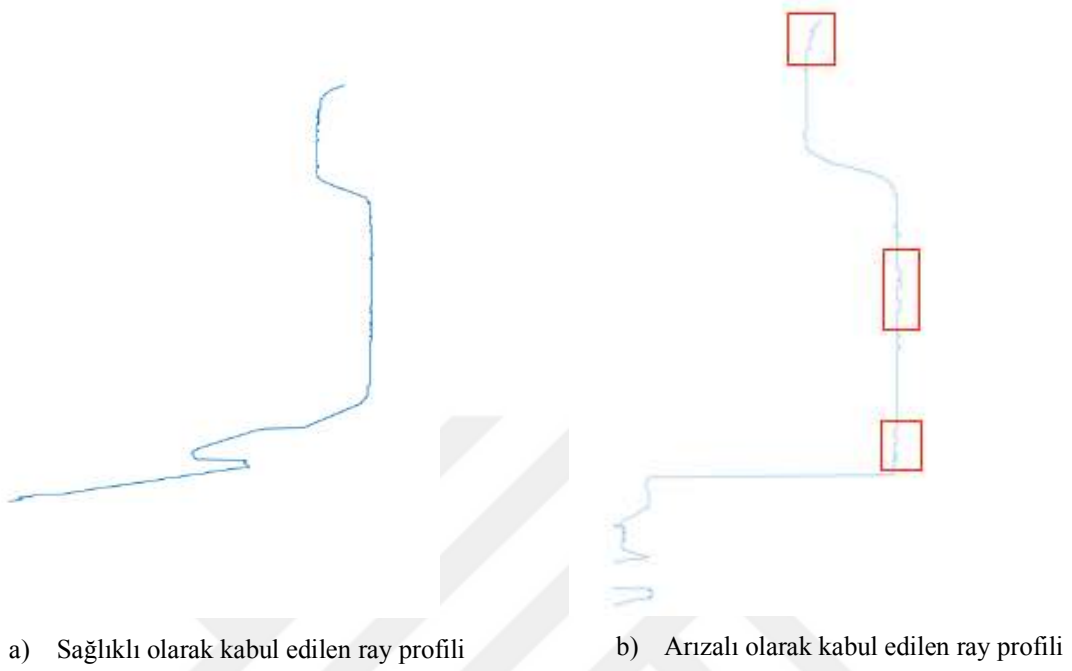
4.3.5. Sonuçlar

Lazer kamera kullanılarak yapılan ray arıza teşhisinde kullanılan dört özellik çıkarım yöntemi ile elde edilen çalışma süresi ve doğruluk değerleri Tablo 4.4'te özet olarak verilmiştir. Şekil 4.19'da çalışma için kullanılan veri setinden örnekler verilmiştir.



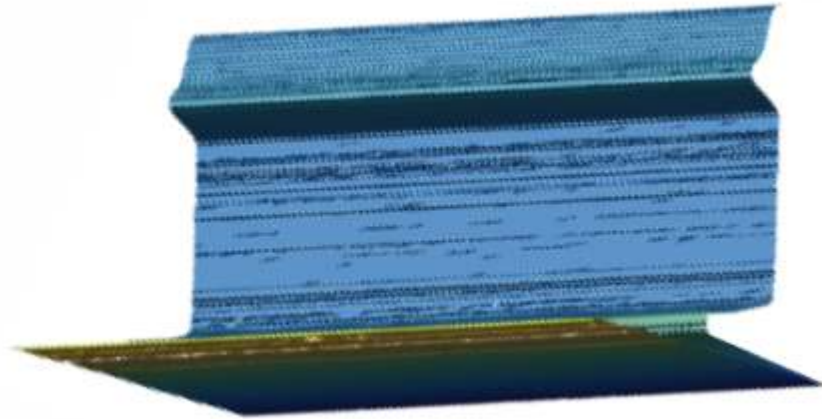
Şekil 4.19. Lazer kamera ile elde edilen ray profili veri seti örnekleri

Lazer kamera mesafe ölçümünde ki çözünürlük hassasiyetinden dolayı pürüzsüz bir görüntü elde etmek mümkün değildir, bu nedenle Matlab ortamında görüntülenen tüm profiller yakından bakıldığında arızalı, aşınmış gibi görünmektedir. Arıza olup olmadığına ise lazer profili elde edilen noktada ki gerçek ray görüntüsü esas alınarak etiketlenmiştir. Şekil 4.20'de arızalı ve sağlıklı ray profilleri yakından gösterilmiştir, arızalı olarak kabuk edilen profilde mantar başında ve gövdede aşınma mevcuttur.

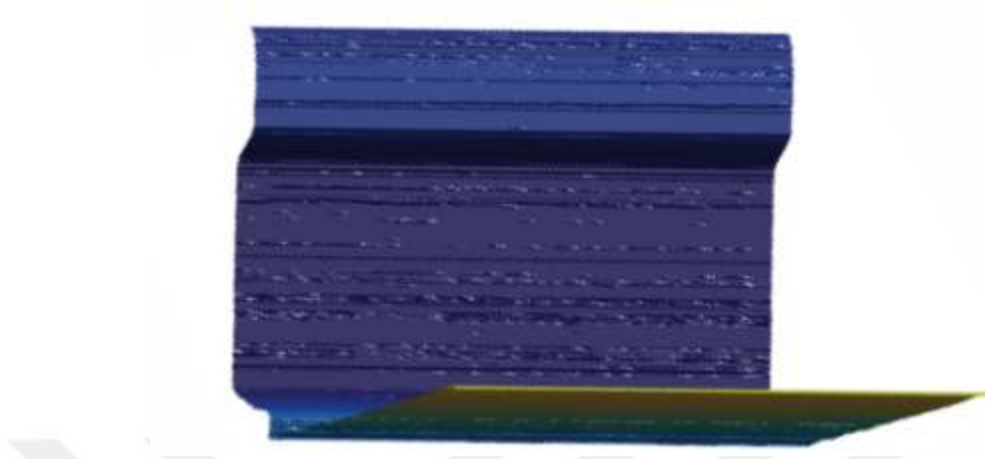


Şekil 4.20. Arızalı ve sağlıklı ray profillerinin büyütülmüş hali

Şekil 4.21’de ise ray profillerinden elde edilen birleştirilmiş görüntü verilmiştir. Bölüm 5’te anlatılan derin öğrenme temelli ray arıza teşhisi çalışmasında veri girişi olarak tek profil değil, birleştirilmiş profiller kullanılmaktadır. Birleştirme işlemi sonrası elde edilen üç boyutlu matris veri üzerinde yatay ve/veya dikey yönde renklendirme yapılabilmektedir.



a) Ray hattının solundan alınan birleştirilmiş görüntü



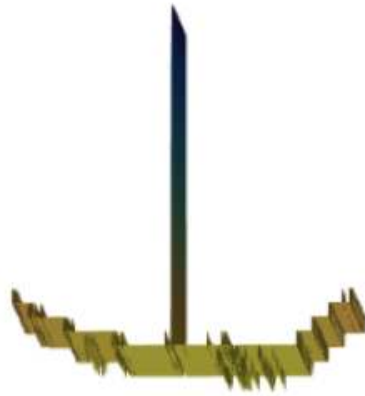
b) Ray hattının sağından alınan birleştirilmiş görüntü

Şekil 4.21. Ray hattından elde edilen birleştirilmiş profil görüntüleri

Şekil 4.22’de ise arızalı bir bölgeden alınan ray profili görüntüsü ve lazer kamera ile elde edilen profillerin birleştirilmiş üç boyutlu görüntüsü verilmiştir. Çatlaktan ileriye giden lazer demetinden elde edilen sonsuz uzunluk görüntüsü üç boyutlu lazer kameranın ölçebildiği maksimum değer olarak varsayıldığı için üç boyutlu görünümde dikey bir görüntü elde edilmektedir, bu kısım ray profilindeki çatlığa karşılık gelmektedir.



a) Arızalı bölge



b) Arızalı bölgenin üç boyutlu görünümü

Şekil 4.22. Arızalı ray bölgesi ve üç boyutlu profili

Tez çalışmasının bu bölümünde lazer kamera ile ray arıza teşhisi için TBA, TDA, ÇTBA ve HK olmak üzere dört adet özellik çıkarım yöntemi ve makine öğrenmesi algoritması olarak RO kullanılmıştır. Toplam 10.000 adet ray profili ile makine öğrenimi dört özellik seçim yöntemi için ayrı ayrı çalıştırılmış ve Tablo 4.5'te her bir yöntem için elde edilen karşıtlık matrisleri verilmiştir.

Tablo 4. 5. TBA ile elde edilen karşıtlık matrisi

TBA	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
Gerçek Sınıflar		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	3160	35
	Arızalı	45	760
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	98	98.5	98.75

Tablo 4. 6. ÇTBA ile elde edilen karşıtlık matrisi

ÇTBA	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
Gerçek Sınıflar		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	3105	235
	Arızalı	165	595
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	92.5	94	93

Tablo 4. 7. TDA ile elde edilen karşıtlık matrisi

TDA	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
Gerçek Sınıflar		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	3200	95
	Arızalı	65	640
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	96	98	97.5

Tablo 4. 8. HK ile elde edilen karşıtlık matrisi

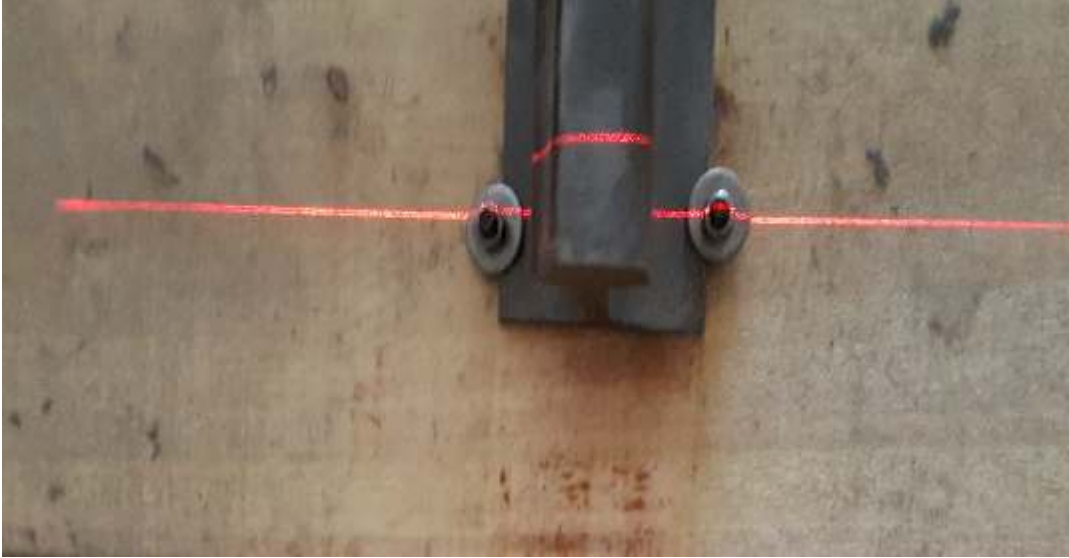
HK	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
Gerçek Sınıflar		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	3250	55
	Arızalı	135	550
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	95	96	97

4.4. Lazer Kamera Kullanarak Dikey Ray Arıza Teşhisi

Bölüm 4.3'te lazer kamera ray hattına dikey konumlandırıldığı için ray mantar başı ve yanal yüzey muayenesi aynı anda yapılabilir. Ray yanal yüzeylerde oluşacak arıza teşhisi için etkin bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde tüm ray hattını aynı anda muayene etmek için dört adet lazer kamera ve bu verileri aynı anda işleyecek bir mimariye ihtiyaç vardır.

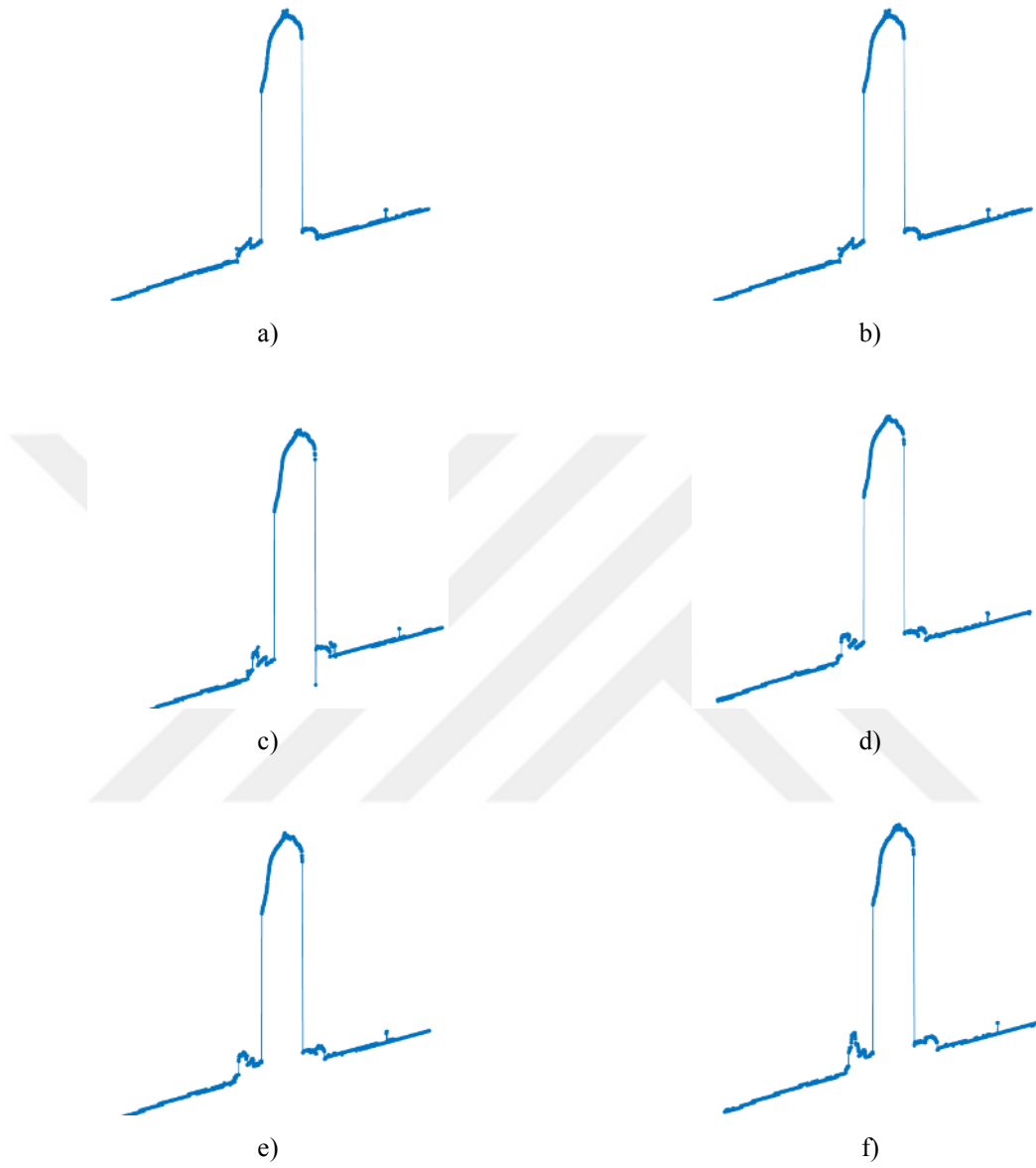
Bu yöntemin bir diğer dezavantajı ise dört adet lazer kamera kullanmanın donanımsal maliyetidir. Literatürde bazı çalışmalar ray hattı sadece üst yüzeyi denetleme işlemine tabi tutulmuştur [115], bunun yanı sıra civata tespiti gibi bağlantı elemanların da oluşan arızaların bulunmasında da ray hattı üstten dikey olarak denetlenmesi gerekmektedir [116, 117]. Ray hattının üstten dikey olarak denetlenmesi ile yanal denetleme kıyaslandığında bir diğer avantaj ray hattının üst orta tepe noktasında oluşabilecek arızaların yanal denetlemede kör nokta probleminden dolayı tespit edilemeyebileceği durumudur. Ancak bu dezavantaj ve artan maliyete rağmen ray hattının yanal denetimi çok daha efektif bir denetim yöntemidir.

Bu bölümde sunulan yöntemin çalışma adımları yine ön işlem, özellik çıkarımı, veri etiketleme, eğitim ve öğrenme adımları tamamen Bölüm 4.3 ile aynıdır. Farklı olan sadece ray hattı denetiminin Şekil 4.23'te olduğu gibi üstten gerçekleştirilmesidir.



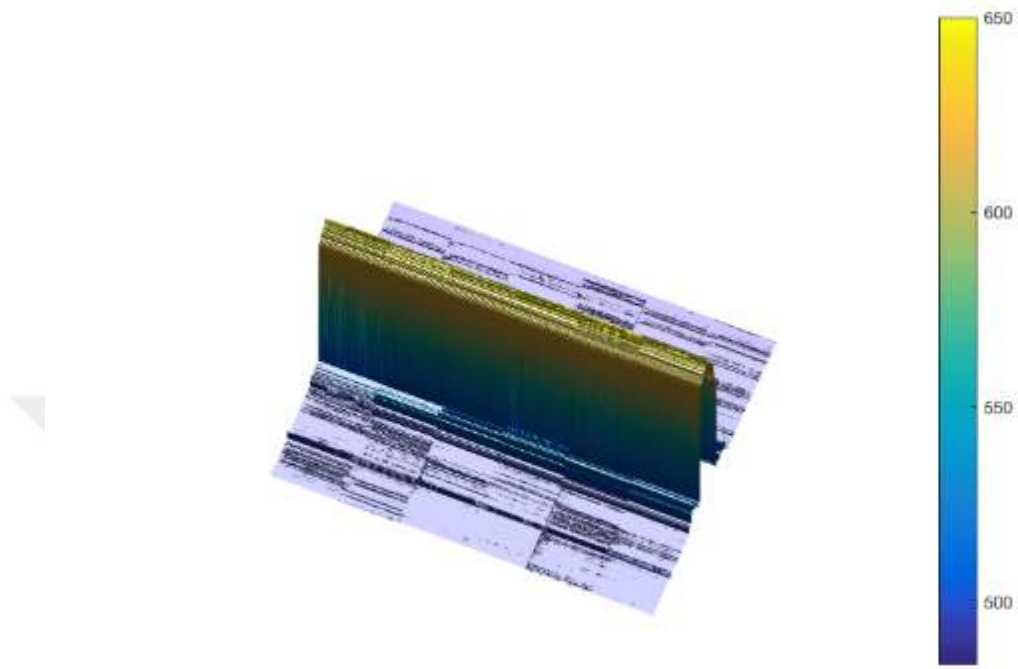
Şekil 4.23. Şekil 4.23. Lazer kamera Kullanarak Dikey Arıza Teşhisi

Şekil 4.24'te tez çalışmasının bu kısmında kullanılan veri seti örnekleri gösterilmiştir. Örnek ray profillerinde ray yanal yüzeyi aslında lazer kamera tarafından görülememektedir, dolayısı ile görüntülerde verilen rayın yanal görüntüsü değil, ara değer üreterek elde edilen birleştirilmiş görüntüdür.

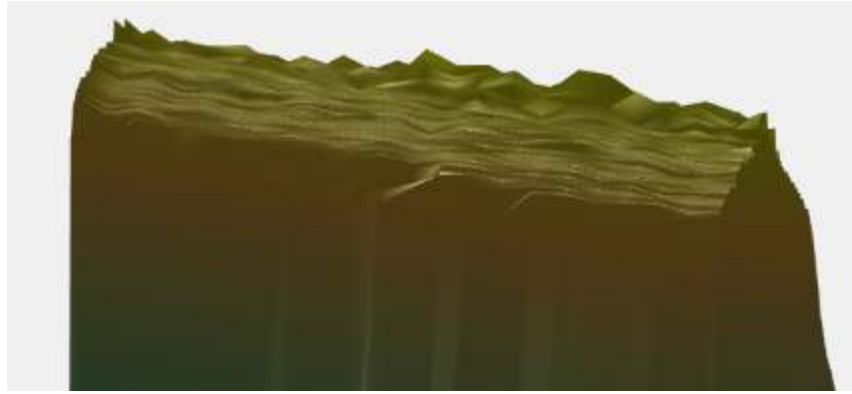


Şekil 4.24. Lazer kamera kullanarak dikey arıza teşhisi eğitim verisi örnekleri

Şekil 4.25 a’da eğitim aşamasında kullanılan lazer kameradan alınan mesafe verilerini içeren ray profillerinin birleştirilmiş görüntüsü verilmektedir, b’de ise bu üç boyutlu nokta kümesinin yakınlaştırılmış görüntüsü verilmektedir.



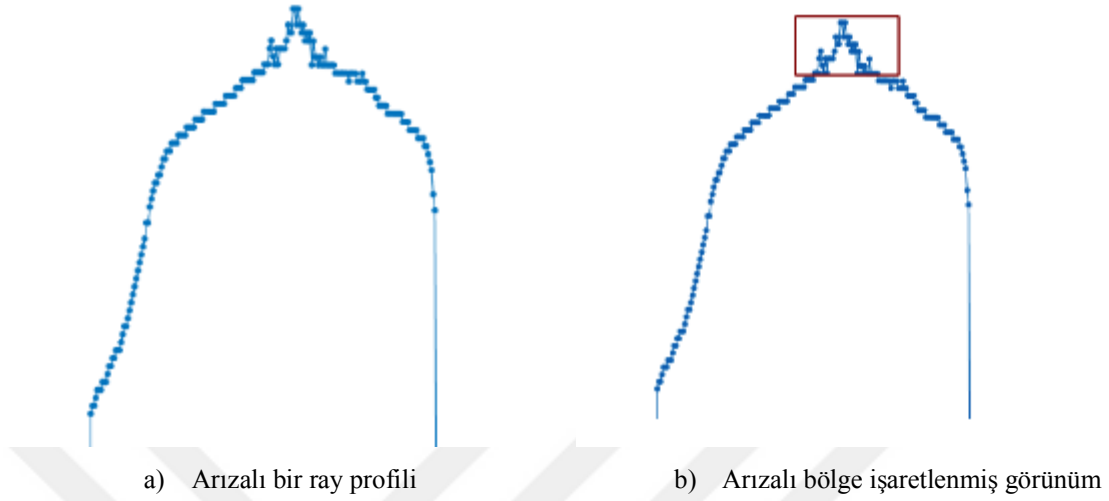
a) Lazer kamera kullanarak dikey profil teşhisi



b) Lazer kamera kullanarak dikey profil denetimi 3D nokta bulutları

Şekil 4.25. Lazer kamera kullanarak dikey ray arıza teşhisi

Şekil 4.26'da test aşamasında arıza teşhis edilen ray profillerinin karşıdan görünümü verilmiştir.



Şekil 4.26. Test aşamasında arıza tespiti

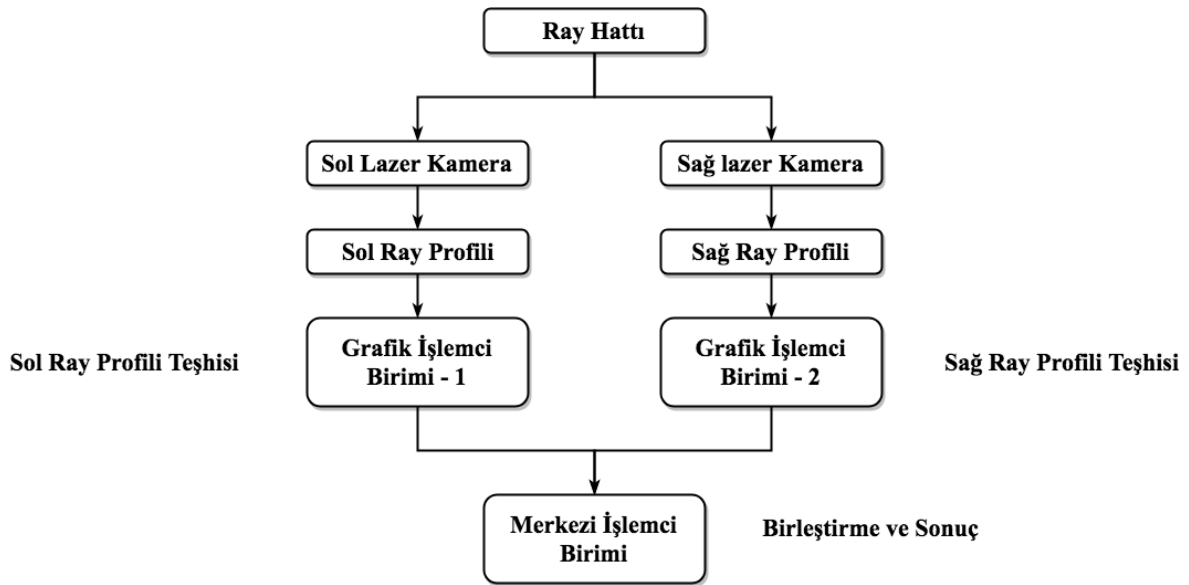
Eğitim ve test işleminde Bölüm 4.3'te olduğu gibi RO algoritması kullanılmıştır. Toplam 5.000 adet ray profili etiketlenerek, 4.000 tanesi eğitim işleminde, 1.000 tanesi ise test işleminde kullanılarak karışıklık matrisi oluşturulmuştur. Bölüm 4.3'te kullanılan özellik seçim yöntemleri içinde en yüksek doğruluk oranı TBA ile elde edildiği için bu bölümde diğer özellik seçim yöntemleri kullanılmamıştır. Tablo 4.7'de karışıklık matrisi verilmiştir. Bölüm 4.3'te verilen yanal ray arıza tespiti yöntemine yakın doğruluk elde edilmiştir.

Tablo 4. 9. TBA ile elde edilen karışıklık matrisi

Gerçek Sınıflar	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	741	6
	Arızalı	9	244
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	98.5	98.8	98.9

4.5. Çift Lazer Kameralı Ray Arıza Teşhisi

Tez çalışmasında gerçekleştirilen son uygulama ray profilinin solu ve saği için aynı anda teşhis sonucu üretmektir. Bu uygulama için önerilen yaklaşımın blok diyagramı Şekil 4.27’de verilmiştir. Ray profilini 45° görecektir lazer kamera ray mantar başı üst ve yan yüzeyini aynı anda görebilecektir. Bu durumda ray hattının en kritik iki noktası tek bir lazer kamera ile denetim işlemine tabi tutulabilecektir. Ray hattının hem soluna hem sağına yerleştirilecek birer lazer kamera ile ray hattı denetim işlemi tek seferde gerçekleştirilebilecektir. Önerilen yaklaşımda bir demiryolu denetimi için toplam dört adet lazer kamera gerekecektir. Ancak tez çalışması kapsamında iki adet lazer kamera kullanılarak yaklaşımın kullanılabilirliği doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan AT C5-1600CS19-500 lazer kamera bilgisayar bağlantısı Ethernet arabirimi aracılığı ile bilgisayara bağlanmaktadır. Çift Ethernet kartı ve güç kaynağı kullanılarak iki lazer kameradan aynı anda veri almak mümkündür. Her kameradan alınan profil verisi üzerinde teşhis sonucu bağımsız olarak üretilmektedir. Her bir lazer kameradan alınan ray profili üzerinde arıza teşhis işlemi Tensorflow [118] programlama kütüphanesi kullanılarak GİB üzerinde çalıştırılmaktadır. Ray profilinin sol veya sağında arıza olması Denklem 4.11’de olduğu gibi rayın arızalı olduğu sonucunu üretmek için yeterlidir.



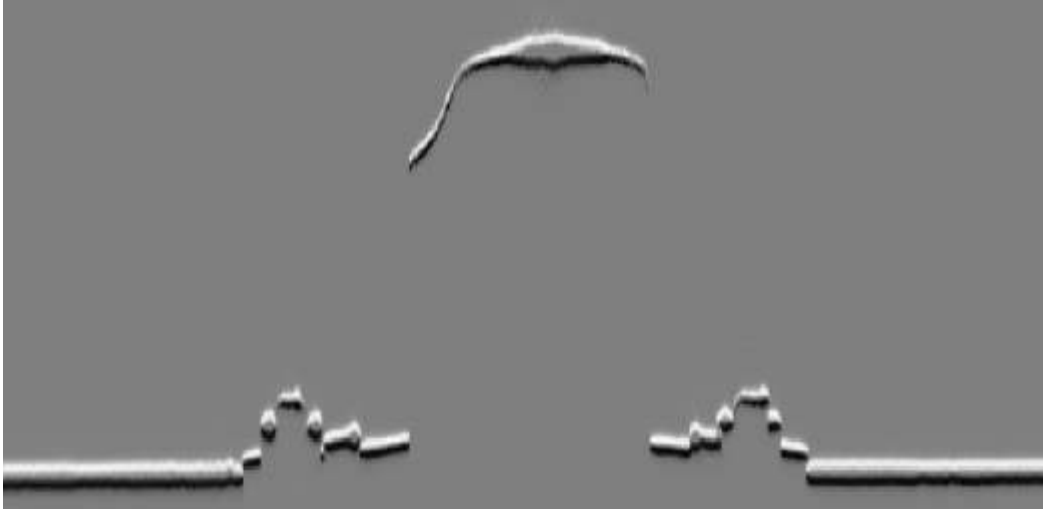
Şekil 4.27. Çift lazer kamera ile ray profili arıza teşhisi

$$P = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } P_{sol} = 1 \text{ veya } P_{sag} = 1 \\ 0, & \text{Aksi durumda} \end{cases} \quad (4.11)$$

Şekil 4.28 a'da deneysel çalışmalarda kullanılan ray profili verilmiştir. Bu ray profilinden karşıdan AT C5-1600CS19-500 lazer kamera ile alınan filtrelenmiş gri seviye görüntü ise Şekil 4.29 b'de verilmiştir.



a) Ray profili



b) Ray profilinin filtrelenmiş gri seviye görüntüsü

Şekil 4.28. Çalışmada kullanılan ray profili ve profilin gri seviye görüntüsü

Şekil 4.29’da ise sol ve sağ lazer kameradan elde edilen üç boyutlu profil verileri olarak verilmiştir. Deneysel çalışmalar esnasında ray hattının sol ve sağ üst köşelerinden aynı anlarda 2.500’er adet toplam 5.000 adet ray profili alınmıştır. Deneysel çalışmada bu veriler önce *sol* ve *sağ* diye sonra kendi içlerinde *arızalı* ve *sağlıklı* olarak etiketlenmiştir. Teşhis sonucu olarak sol veya sağ profil için arızalı sınıflandırılması yapılması yeterlidir. Bu nedenle sonuçları Tablo 4.5’te verilen yanal ray muayenesi ile elde edilen 98% doğruluk oranı önemli ölçüde artmıştır. 2.500 adet ray profillerinin 2.000 adeti eğitim işleminde kullanılmış, 500 adeti ise test işlemi için ayrılmıştır. Test aşamasında elde edilen karşıtlık matrisi Tablo 4.10’da verilmiştir.

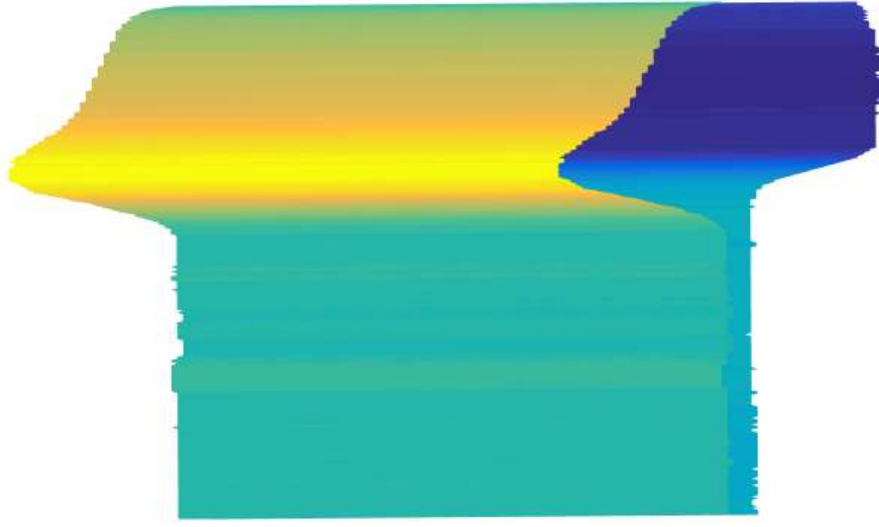
Tablo 4. 10. Çift lazer kameralı yanal ray arıza teşhisi karşıtlık matrisi

TBA	Sistem Tarafından Gerçekleştirilen		
Gerçek Sınıflar		Sağlıklı	Arızalı
	Sağlıklı	397	4
	Arızalı	2	97
	Doğruluk	Keskinlik	F_1 score
Test performansları (%)	98.8	98.5	99.25

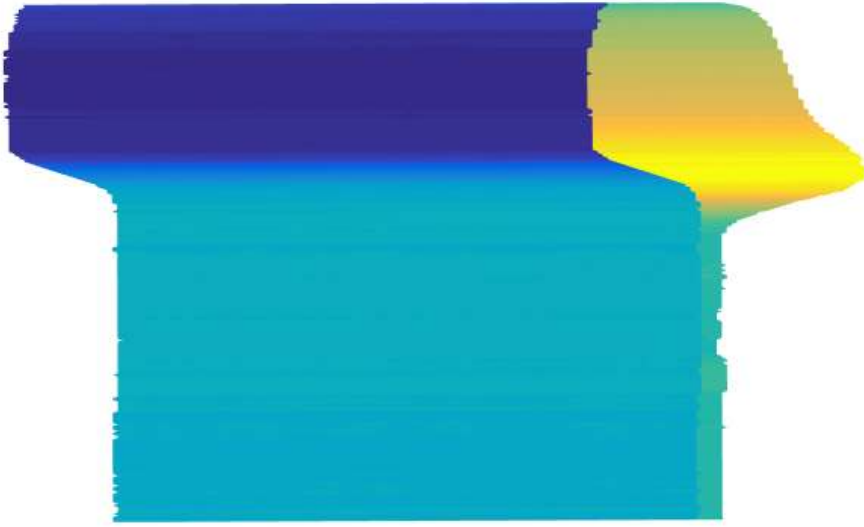
Deneysel çalışmalar için Python programlama dili ve Tenworflow kütüphanesi kullanılarak, 640 çekirdeğe ve 2GByte belleğe sahip iki Nvidia GTX 750 GİB kullanılmıştır. Tensorflow kütüphanesi ile paralel programlama kullanılmıştır. Tablo 4.11’de test aşamasında elde edilen çalışma performansları verilmiştir. Tensorflow kütüphanesi paralel programlama ile GİB üzerinde MİB’e göre yaklaşık 20 kata kadar hız artışı elde edilmektedir.

Tablo 4. 11. Çift lazer kameralı yanal ray arıza teşhisi çalışma performansı

	MİB kullanılarak	GİB kullanılarak
Özellikler	İ5 2.7 GHZ 4 Çekirdek	1020 Mhz 640 Çekirdek
Ortalama test süresi (500 profil için)	15 sn	<1 sn



a) Soldan görünüm



b) Sağdan görünüm

Şekil 4.29. Çift lazer kamera ile gerçekleştirilen ray denetim işlemi

4.6. Saha Testleri

Deneysel çalışmalar sonrası gerçek bir tren üzerinde iki adet bilgisayar ve iki adet lazer kamera kullanılarak saha testleri yapılmıştır. İki adet lazer kamera ve AÖB Şekil 4.30 a’da ki gibi tren altına yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Sahadan veri alınmaya başlamadan önce lazer kamera açı ve mesafe kalibrasyonu yapılarak saha ortamında veri alınmıştır. Şekil 4.30 b’de ki gibi iki lazer kamera iki ayrı bilgisayara bağlanmıştır. Her bilgisayar üzerinde Nvidia GTX 750 GİB bulunmaktadır. Bilgisayarlar çift Ethernet girişine sahiptir. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera bilgisayar ile Ethernet port üzerinden 1 Gbit/sn hızla haberleşmektedir. Her bir profil verisi $1600 \times 1 \times 16$ bit uzunluğundadır. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera saniyede en fazla 25.000 profil üretebilmektedir. 1G bit Ethernet arabirim hızı düşünüldüğünde bir saniyede teorik olarak 40.000’den fazla profil lazer kameradan bilgisayara iletilebilecektir. Dolayısı ile lazer kamera ile bilgisayar arasındaki haberleşme süresi saniyede 25.000 profil okunabilmesine imkan tanımıştır. İleriye yönelik çalışmalar için ray profili verileri aynı zamanda veritabanınada kaydedilmektedir. Sata 6 Gbit/sn arabirime sahip SSD disk ile profiller diske yazılabilmektedir. Tablo 4.11’e göre GİB kullanılarak her bir profil üzerinde teşhis sonucu üretme hızı 0.002 sn’dir. Bu teşhis sonucu üretmeye hızı ile bir profilin profilin bilgisayara iletme süresi ve zaman damgası ile birlikte diske yazma süresi kıyaslandığında ihmal edilebilir değerlerdir. Ancak yinede örnekleme hızı 0.0025 seçilmiştir. Bu durumda her 0.0025 saniyede bir demiryolundan veri örnekleme gerçekleştirilmiştir. AT C5-1600CS19-500 yanal çözünürlük 313 mikrometredir. Bu durumda 1 sn sürede demiryolundan 400 adet ray profili verisi okunarak teşhis sonucu üretilebilir. Yanal çözünürlük değeri ile işlem yapılabilen profil sayısı çarpılarak 1 saniyede 124 mm ray hattı denetlenmiş olacaktır. Bu değerlere göre 1 saatlik ray denetimi işleminde gerçek fiziki değer olarak 0.446 km ray hattı denetlenmiş olacaktır. Saha testlerinde Nvidia GTX 750 GİB kullanılmıştır. Lazer kamera maliyeti ile GİB maliyeti mukayese edildiğinde üç boyutlu ray denetim sistemi için GİB maliyeti ihmal edilebilir bir değer olacaktır ve seçilecek GİB özelliğine göre saniyede 25.000 profil üzerinde teşhis sonucu üretmek mümkün olacaktır. Bu durumda 1 saatlik operasyon işleminde 28.17 km ray hattı denetlenebilecektir. Lazer kamera kullanan ray denetimi uygulamalarında mikrometre hassasiyetinde tüm ray hattını kusursuz olarak denetlemek mümkün değildir.

Literatür çalışmaları veri işleme hızı oranında belirli periyotlarla ray hattından örnekleme almak şeklinde çalışmaktadır. Dolayısı ile saha testleri göz önüne alındığında gerçek zamanlı olarak her 0.0025 saniyede bir örnekleme alınarak çalışılması ideal bir değer olarak ele alınmaktadır. Tablo 4.12’de saha testlerinde elde edilen performans değerleri özet olarak sunulmuştur.

Tablo 4. 12. Saha testleri çalışma performansı

Özellik	Değer
1 profil boyutu	1600×1×16-bit
Profil okuma+diske yazma	0.0005
1 profil üzerinde teşhis sonucu üretme	0.002
Örnekleme periyodu	0.0025
1 saniyede işlenebilen toplam profil sayısı	800
Lazer kamera yatay çözünürlük	313 mikrometre
1 saatlik operasyon ile denetlenebilecek ray hattı gerçek fiziki uzunluğu	0.446 km
1 saatlik operasyon ile işlem yapılan toplam profil sayısı	2.880.000



a) İki adet lazer kameranın trene yerleştirilmesi



b) Kameralar için mesafe ve açı kalibrasyonu yapılması



c) Lazer kameralardan veri alınması

Şekil 4.30. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen saha testleri

4.7. Bölüm Değerlendirmesi ve Sonuçlar

Tezin bu bölümünde bir önceki bölümde sayısal kamera kullanarak gerçekleştirilen ray arıza teşhisi işlemi AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanılarak üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sırası ile üç boyutlu ray denetimi benzetim çalışması, lazer kamera kullanarak yanal arıza teşhisi, lazer kamera kullanılarak üstten dikey arıza teşhisi ve çift lazer kamera kullanılarak ray profili arıza teşhisi uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmasında S49 ray profili ölçüleri temel alınarak katı bir ray modeli Blender ortamında oluşturulmuştur. Arıza içermeyen sağlıklı ray katı modeli çeşitli yerlerinde rassal büyüklük ve şekillerde arızalar oluşturulmuştur. Ardından katı model profilleri sanal bir lazer kamera kullanılarak üç boyutlu veri matrisi halinde okunarak profiller *sağlıklı* ve *arızalı* olarak etiketlenmiştir. Eğitim işlemi için RO ve özellik seçim yöntemleri olarak TBA, TDA, ÇTBA, HK yöntemleri kullanılmıştır. Yöntemin genel doğruluk oranını arttırmak için CBI yöntemi kullanılmıştır. Benzetim çalışmasının gerçek koşullara uygun olması için katı modele rassal gürültü eklendikten sonra eğitim ve test işlemleri yerine getirilmiştir.

Bu bölümde gerçekleştirilen ikinci çalışma AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanarak ray profili yanal muayene gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 10.000 adet lazer profili verisi etiketlenmiştir. Bu verilerden 6.000 adeti eğitim işleminde, 4.000 adeti test işleminde kullanılmıştır. Lazer kameradan elde edilen vektör verisi matris formuna dönüştürüldükten sonra TBA, ÇTBA, TDA ve HK özellik seçim yöntemleri kullanılarak RO algoritması ile ayrı ayrı eğitilmiştir. En yüksek başarımlı oranı 98% ile TBA özellik seçimi kullanılarak elde edilmiştir.

Bu bölümde gerçekleştirilen üçüncü çalışma AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanarak ray profilinin üstten dikey muayene edilmesidir. Bu yöntem yapısı gereği sadece ray üst yüzeylerinde bulunan arızaları teşhis edebilir ancak aynı zamanda üstten gerçekleştirildiği için civata tespiti ya da civata arıza teşhisinde de kullanılabilir bir yöntemdir. Bu uygulama da toplam 5.000 adet ray üst yüzey profili etiketlenerek, 4.000 tanesi eğitim işleminde, 1.000 tanesi test işleminde kullanılmıştır. Özellik seçim yöntemi olarak bir önceki uygulamada en yüksek doğruluk elde edilen TBA özellik seçim yöntemi kullanılmış ve 98% doğruluk oranı elde edilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde gerçekleştirilen son uygulamada iki adet AT C5-1600CS19-500 lazer kamera ray hattının sol ve sağına 45° açıyla yerleştirilerek hem mantar başı hem mantar yan yüzeyinde oluşacak arıza teşhisi yapılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların ardından gerçek bir raylı araç üzerinde önerilen yaklaşımın kullanılabilirliği test edilmiştir. Gerçek saha ortamında her iki lazer kameradan 5 ms’ de örnekleme yapılarak ray hattının hem solu hem sağı için teşhis sonucu üretebilmektedir.



5. RAY ARIZA TESPİTİNDE BÜYÜK VERİ VE DERİN ÖĞRENME

Tipik bir ray hattı bir kaç km'den binlerce km'ye kadar olabilmektedir. Bu uzunluktaki ray hattının insan emeği ile denetlenmesi mümkün değildir. Bu amaçla günümüzde ray denetimi makine görmesi ile otomatize bir şekilde yapılmaktadır. Makine görmesi sistemlerinin giriş verilerini yüksek çözünürlüklü kameralar ve diğer algılayıcılardan alınan veriler oluşturmaktadır. Bu veriler makine öğrenmesi yöntemleri ile değerlendirilerek teşhis sonucu üretilmektedir. Ancak hem uzun mesafeli, hem uzun süreli hem de tekrarlı ray denetim uygulamalarında oluşan veri miktarı ve veri çeşitliliği çok büyüktür, ayrıca günümüz donanımları saniyede onbinlerce veri üretmektedir. Bu verilerin uygun bir şekilde işlenmesi, depolanması ve analizi Büyük Veri temelli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Büyük veri üzerinde öğrenme işleme yapılması için geleneksel olarak bilgisayar üzerinde koşturulan algoritmalar uzun zaman gerektirmekte ve gerçek zamanlı sistemler için uygun olmamaktadır. Bu darboğazı aşmak için dağıtık paralel programlama kullanılabilir. Ancak dağıtık paralel programlama işlemi donanımsal maliyeti yüksektir [119]. Bir başka dezavantaj ise paralel programlama öğrenme ve algoritmaların paralel programlamaya uyarlanma maliyetidir. Bununla birlikte büyük veri üzerinde öğrenme ve gerçek zamanlı çalıştırma işlemleri için GİB'ler de kullanılabilir. GİB'ler BİM ile kıyaslandığında çekirdek sayılarının fazla olması nedeni ile 100 kata kadar daha hızlı çalışabilirler [120]. Hem günümüz koşullarında GİB maliyetlerinin çok uygun hale gelmesi hem de MİB programlama ile GİB programlamanın birbirlerine çok büyük oranda benzemesi büyük veri uygulamalarında GİB'lerin kullanılmasını cazip hale getirmiştir. Ancak geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları büyük veri üzerinde öğrenme ve test işlemleri için yetersiz kalmaktadır, bu amaçla özellikle büyük veri uygulamalarında derin sinir ağları gibi derin öğrenme algoritmaları kullanılmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında ray analizinde büyük veri yaklaşımı kullanılması ve ray analizinin derin öğrenme ile gerçekleştirilmesi için iki farklı uygulama önerilmiştir.

5.1. Ray Analizi Uygulamalarında Büyük Veri Temelli Yaklaşım

Bilgisayar görmesine dayalı sistemlerde ray denetiminde ışık kaynağı, AÖB, yüksek çözünürlüklü sayısal çizgi/CCD/CMOS türü kameralar, üç boyutlu veri elde eden lazer kameralar kullanılmaktadır [121]. Bu yöntemler ile gerçek zamanlı çalışma hızı ve yüksek doğrulukluk elde edilebilmektedir. Ray analizinde bilgisayar görmesi kullanılması genel olarak eğitim ve test aşamasından oluşmaktadır. Eğitim aşamasında görüntü işleme ve makine öğrenmesi ile sistem eğitilir, test aşamasında ise görüntüler üzerinde teşhis sonucu üretilir. Görmeye dayalı olduğu için ray hattının gövde ve taban kısmındaki arızaların denetiminde de kullanılabilir. Yöntemin en büyük dezavantajı görüntü işleme algoritmalarının yağ ve kir lekelerini arıza gibi algılayabilme ihtimalidir. Ot ve çakıların içine gömülen civata tespitinde de kısmen başarılı olabilmektedir [122].

RGB-D kameraların kullanıldığı ray analizi uygulamalarında Kinect/Primesense gibi kameralar kullanılarak her noktanın RGB değerinin yanı sıra mesafe bilgiside elde edilebilmektedir [123]. Bu tür algılayıcılar özellikle oyun konsolu, hareket algılama ve tanıma gibi uygulamalarda başarı ile kullanılabilir. Ray denetimi işleminde RGB-D kameraların kullanıldığı analiz işlemi, görüntü işlemeye dayalı analiz ile kıyaslandığında yağ ve toz lekelerinden kaynaklı YN sonuçlar üretilmesi, doğruluk oranını düşürebilmektedir. Ancak bu tür algılayıcılar ölçüm hassasiyeti nedeni ile küçük boyutlu arızaları teşhis etmede başarısız olmaktadır.

Son muayene yöntemi ise üç boyutlu veri üreten lazer kameraların kullanıldığı üç boyutlu ray analiz yöntemidir. Bu yöntemde lazer üçgenleme yöntemi kullanılarak ray hattının üç boyutlu profile çıkarılmaktadır. Sistemin giriş verilerini ise hassas mesafe bilgileri oluşturmaktadır. Görüntü işleme yerine bu hassas mesafeleri kullanıldığı için en yüksek doğruluk oranı ve çalışma hızı bu yöntemde elde edilebilmektedir [124].

Ray denetiminde sistemin ana giriş verisini oluşturan kameraların yanı sıra çeşitli algılayıcılarda kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar AÖB'inlerinin birer parçası olan ivme ölçer, yön ölçer, jiroskop ve barometre gibi algılayıcılardır. Ray hatları fiziksel yapıları gereği titreşim ve sarsıntıya neden olmaktadır. Bu nedenle giriş verileri üzerinde istenmeyen bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmaların algılanabilmesi için bu algılayıcılar yardımcı giriş verileri olarak kullanılmaktadır [125].

Ray denetimi uygulamalarında bir çok farklı sensor ve giriş aygıtları kullanılmaktadır. Bu veriler makine öğrenmesi algoritmaları ile yorumlanarak teşhis sonucu üretilmektedir.

Özellikle uzun mesafeli, uzun süreli ve tekrarlı ray denetimi uygulamalarında bir çok donanım kaynağından yüksek hızlı ve büyük boyutlu veri alınmaktadır. Bu verilerin uygun bir şekilde depolanabilmesi, işlenebilmesi, makine öğrenmesi algoritmaları ile eğitilmesi, gerçek zamanlı teşhis sonucu üretilmesi ve gerektiği zaman yeniden kullanılabilmesi için büyük veri yaklaşımı gerekmektedir.

Büyük veri günümüzde sağlık, eğitim, ekonomi gibi alanlarda stratejik kararların alınmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından ilki; etiketlenmemiş veriler üzerinde danışmansız öğrenme temelli sınıflandırma işlemidir. İkincisi görüntü işleme, nesne tanıma gibi uygulamalarda danışmanlı öğrenme temelli sınıflandırma işlemidir. Üçüncüsü büyük veri yığınları arasında ilişkili verileri tespit etme ve değerli bilgi çıkarımıdır [126].

5.1.1. Büyük Veri ve Ray Analizi İlişkisi

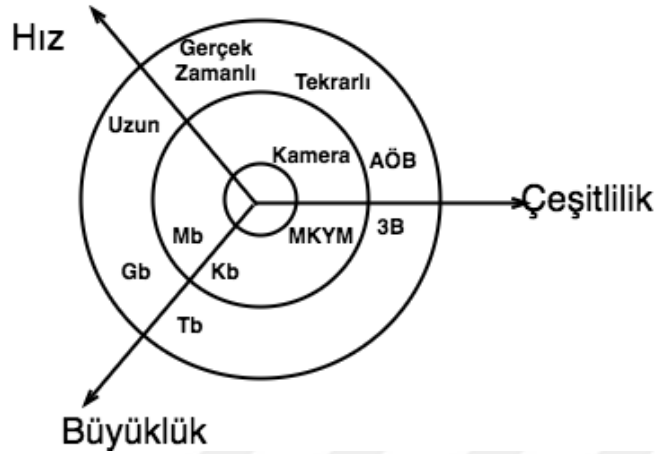
Günümüz endüstriyel uygulamalarında bir çok farklı türden kaynaktan veri girişi alınmaktadır. Bu veriler büyük veri ile analiz edilerek bankacılık, sağlık, enerji gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Büyük veri kavramı literatürde Volume (Büyüklik), Variety (Çeşitlilik) ve Velocity (Hız), olarak olarak bilinen 3V modeli ile açıklanmaktadır [127].

Çeşitlilik: Veri çeşitliliğini ifade etmektedir. Ray analizi uygulamalarında yüksek çözünürlüklü kamera, RGB-D kameralar, lazer kamera, yön ölçer, jiroskop, manyetometre gibi bir çok farklı veri giriş aygıtı kullanılmaktadır. Bu aygıtlardan elde edilen veriler makine öğrenmesi yöntemleri ile yorumlanarak teşhis sonucu üretilmektedir.

Hız: Verinin büyüme hızını ifade etmektedir. Ray analizi uygulamalarında kullanılan yüksek çözünürlüklü kameralar saniyede 160 çerçeve, AÖB algılayıcıları saniyede 10.000 adet algılayıcı bilgisi, lazer kameralar saniyede 25.000 üç boyutlu profile üretmektedir.

Büyüklik: Verinin büyüklüğünü ifade etmektedir. Ray analizi uygulamalarında kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera, RGB-D kamera, lazer kamera AÖB algılayıcıları gibi her kaynaktan her saniyede yüzlerce mbyte veri alınmaktadır. Şekil 5.1’de büyük veri ile ray analizi arasındaki ilişki görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. Büyük veri ile ray analizi ilişkisi

Bunların yanı sıra literatürde Verification (Doğrulama) ve Value (Değer) olmak üzere 2V daha kullanılmaktadır. Doğrulama büyük veri içinde gereksiz bilgilerin temizlenmesi, filtrelmesi olarak yorumlanabilir. Değer ise veriden elde edilecek faydalı bilgiyi ifade etmektedir.

Uzun süreli, uzun mesafeli, tekrarlı ray analizi uygulamalarında veri boyutu ivmeli olarak artacaktır. Bu verinin geleneksel yöntemlerle işlenerek analiz edilmesi çok zordur. Makine öğrenmesi algoritmaları genel olarak eğitim ve test aşamasından oluşmaktadır. Eğitim aşamasında eğitim verileri kullanılarak bir model oluşturulmaktadır. Test aşamasında ise yeni veriler üzerinde sistem performansı ölçülmektedir. Gerçek dünya uygulamalarında ise yeni veriler üzerinde, gerçek zamanlı olarak sonuç üretilmektedir. Büyük veriye erişimde sıcak, soğuk ve ılık tipte veri olmak üzere toplam üç adet erişim türü vardır.

Soğuk Veri: Makine öğrenmesi algoritmaları tarafından işlenmeden önce ham olarak tutulan veri türünü ifade etmektedir.

Sıcak Veri: Gerçek zamanlı uygulamalarda gerçek zamanlı olarak erişilmesi gereken veri türünü ifade etmektedir.

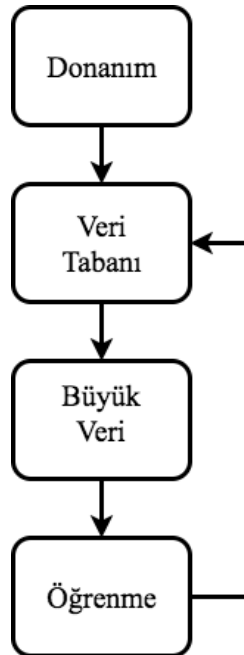
Ilık Veri: Yukarıdaki iki kavram arasında kalan veri türü bu gruba girmektedir.

Tablo 5.1’de ray analizi ve büyük veri ilişkisi, veri çeşitliliği, hızı ve büyüklüğü bilgileri ile birlikte verilmiştir.

Tablo 5. 1. Ray analizi ve büyük veri ilişkisi

Donanım	Giriş Verisi	Veri Büyüklüğü	Veri Hızı
Kamera	KMY çerçeveler	5.000x3.000x3x32-bit	160 fps
MKMY kamera	KMY çerçeve + Mesafe matrisi	640x480x4x16-bit	30 fps
Lazer kamera	Hassas mesafe bilgisi	1600×16-bit	25.000 Hz
AÖB, ivme ölçer	3-SD İvme ölçer	41 Byte	10.000 Hz
AÖB, yön ölçer	3-SD Yön ölçer		10.000 Hz
AÖB, jiroskop	3-SD Manyetik alan ölçer		10.000 Hz
Diğer Donanımlar	Ultrasonik aygıtlar, ısı, nem gibi algılayıcılar, kodlayıcı		

Şekil 5.2’de büyük veri yaşam döngüsü blok diyagramı verilmiştir. İlerleyen bölümde bu adımlar açıklanmaktadır [127].



Şekil 5.2. Büyük veri yaşam döngüsü

Donanım: Ray analizinde farklı giriş aygıtlarından elde edilen verilerin büyük veri temelli olarak depolanması gerekmektedir. Büyük veri uygulamalarında ilişkisel veri tabanları bu amaçla yeterli olmadığı için ilişkisel olmayan veri tabanları kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılabilecek açık kaynak Hadoop, MongoDB gibi teknolojiler mevcuttur [129].

Büyük Veri: İlişkisel veri tabanları üzerinde veriden bilgi elde etmek için SQL sorgularına benzer sorgular kullanılmaktadır. Bu aşama haritalama ve indirgeme olmak üzere iki ana alt aşamaya ayrılmaktadır. Haritalama ve indirgeme işlemi ilişkisel veri tabanlarında kullanılan sorgulara benzemektedir. Ancak büyük veri üzerinde geleneksel veritabanlarında olduğu gibi sorgu ifadeleri kullanılması yetersiz kalmaktadır. Bu amaçla indekslenen veriler üzerinde haritalama ve indirgeme işlemi uygulanmaktadır. Haritalama işlemi veri setinin işçilere dağıtılmasını, indirgeme işlemi ise bu veriler üzerinde yapılan analiz sonuçlarının birleştirilmesi işlemi olarak yapılmaktadır [130].

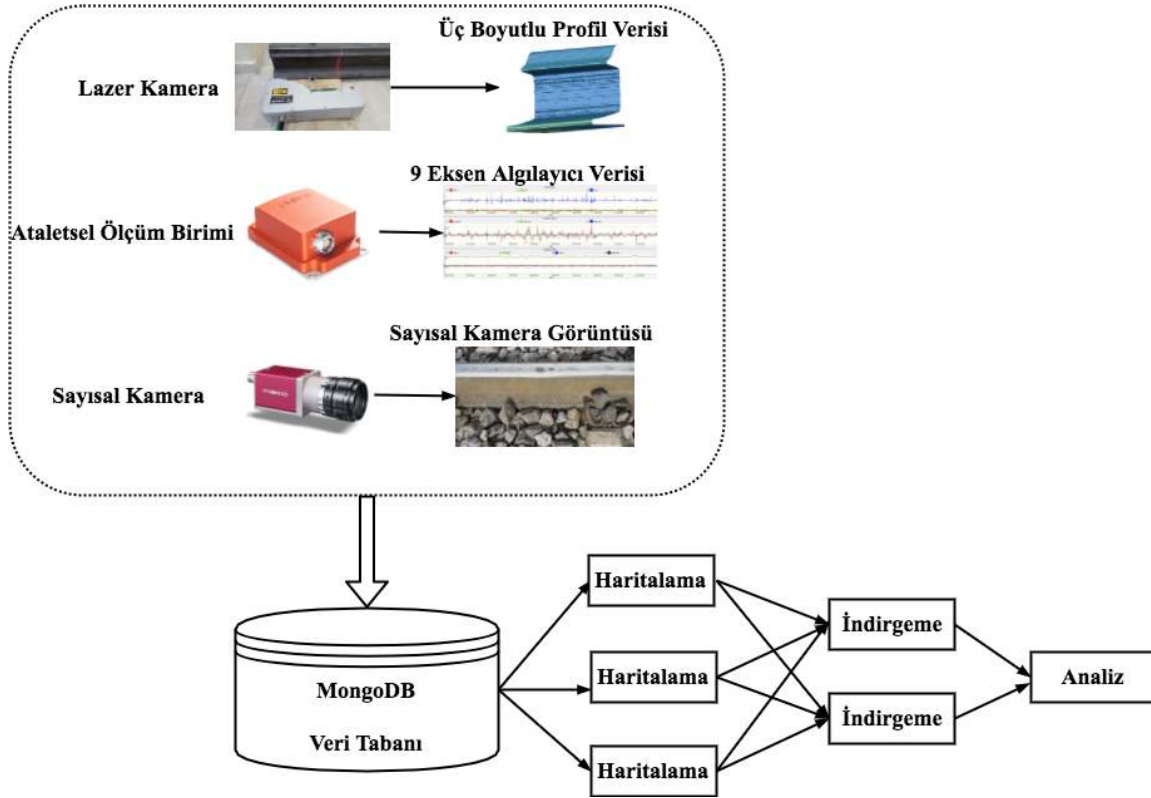
Öğrenme: Haritalama indirgeme işlemi sonrası giriş verileri üzerinde makine öğrenmesi algoritmaları ile eğitim gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu adımdan sonra oluşturulan model gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilir.

Bu amaçla genel olarak derin öğrenme ağları ve RO gibi sınıflandırıcı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler GİB üzerinde paralel programlama kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığı zaman hem çalışma süresi, hem elde edilen doğruluk değerleri ile üstündür [131].

Ray analizi uygulaması Tablo 5.1 ile birlikte değerlendirildiğinde de bir km’lik ray hattından analiz için toplanan veri miktarı Gbyte boyutundan büyük olmaktadır, periyodik bir yıllık ray denetimi göz önüne alındığında bir yıllık veri miktarı Pbyte boyutunda olacaktır. Tipik bir ray analizi uygulamasında t analiz süresini, n adet giriş kaynağından alınan veri, donanım kaynağının saniyede ürettiği veri miktarı ve veri hızı çarpıldığında v veri miktarı basitçe Denklem 5.1’deki gibi bulunacaktır.

Bu verilerin uygun bir şekilde zaman damgası ile birlikte etiketlenmesi, depolanması, tekrarlı makine öğrenmesi algoritmalarında tekrar kullanılması için ilişkisel olmayan MongoDB gibi bir veri tabanında depolanması önerilmektedir [132].

$$v = t \sum_{i=1}^n k_i^b k_i^f \quad (5.1)$$

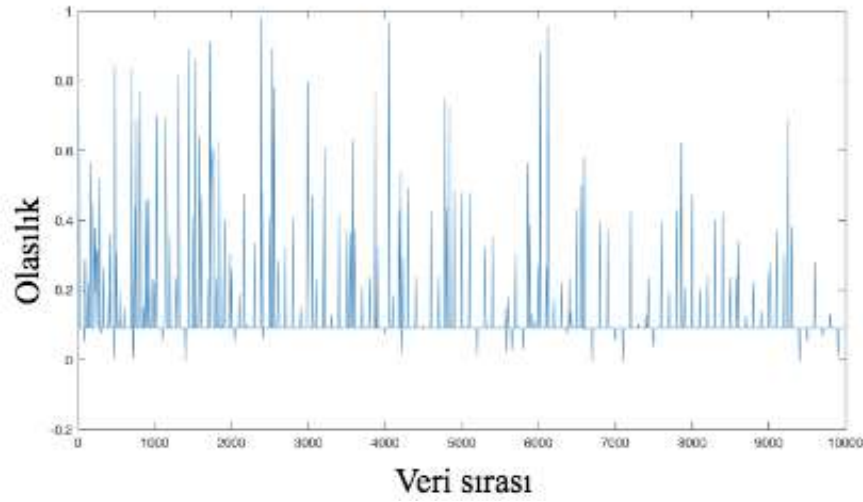


Şekil 5.3. Büyük veri ve ray analizi için önerilen yöntem blok diyagramı

Büyük veri ile ray analizi uygulamasının entegre edilmesi sadece ray hattına ait analiz bilgilerinin depolanması, ya da bu büyük veri üzerinde makine öğrenmesi yapılarak teşhis sonucu üretilmesi işlemlerini kapsamamaktadır. Büyük verinin bir amacı da değerli bilgi elde etmektedir. Mevsimsellik, fiziksel koşullar, ray hattının kullanım yoğunluğu ve buna benzer diğer bilgiler büyük veri içerisine dahil edilerek ray hattı risk analizi, arıza ve kazaların sebepleri, zamanlaması, büyüklüğü hakkında tahmin yürütmek, ilişkili olduğu düşünülmeyen ancak birlikte değişen parametreleri analiz etmek büyük veri yaklaşımı sayesinde mümkün olacaktır. Şekil 5.3'te verilen önerilen yöntem üç katmanlıdır, ilk katman donanımsal kaynaklardan veri alınmasıdır, ikinci katman depolama katmanıdır. Burada ilişkisel olmayan dağıtık yapıya uygun büyük veri temelli bir veritabanı kullanılması önerilmiştir.

Üçüncü katman ise büyük verinin kendisidir. Yaklaşımın doğrulanması için deneysel bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmasında tezin bir önceki bölümlerinde analtılan lazer kamera, sayısal kamera ve AÖB kullanılmıştır. Bu veriler zaman damgası bilgileri kullanılarak veritabanına kaydedilmiştir. Eğitim işleminde kullanılacak veriler MongoDB büyük veri kütüphanesi olan küme kütüphanesi ile haritalama ve indirgeme yapılarak elde edilmiş ve EYSA kullanılarak eğitilmiştir.



Şekil 5.4. Test çalışması sınıflandırma sonuçları

Şekil 5.4'te 10000 adet test verisi için deneysel çalışma sonuçları görülmektedir. X-ekseni ilgili verinin sıra numarasını, y-ekseni ise sınıflandırma sonucu hatalı olma olasılığını gösteren {0-1} aralığındaki tahmin değeridir. Çıkış aktivasyon fonksiyonu sigmod seçildiği için kesin teşhis sonucu üretilebilmesi için eşik değeri uygulanması gerekmektedir.

Tablo 5. 2. Seçilen eşik değere göre arızalı teşhis sonuçları

Eşik değeri	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Arızalı çerçeve sayısı	40	110	180	280	340

5.2. Derin Öğrenme Tabanlı Ray Analizi

Bilgisayar görmesi temelli ray analizi işleminde literatür çalışmaları civata, travers, ray hattı gibi bileşenlerin tespit edilmesi, eksik ya da arıza durumlarının teşhis edilmesi olarak sınıflandırılabilir. Sayısal kamera kullanan sistemlerde sistemin giriş verilerini yüksek çözünürlüklü çerçeveler oluşturmaktadır. Yüksek boyutlu çerçeveler üzerinde gerçek zamanlı işlem yapabilmek için bu veriler üzerinde önışlem yapılarak TBA gibi yöntemlerle özellik çıkarımı yapılmaktadır. Böylece daha düşük boyutlu veriler üzerinde çalışmak mümkün olmaktadır. Eğitim setinde bulunan etiketlenmiş veri sayısının çok olması eğitim algoritmasının eğitimi ve yüksek doğruluklu sonuç elde etmek açısından son derece önemlidir. Ray denetimi ve genel olarak diğer bilgisayar görmesi uygulamalarında öğrenme algoritmasının seçiminde yöntemin bellek gereksinimi, sınıflandırma başarısı ve gerçek zamanlı çalışma hızı gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır.

Literatürde birçok öğrenme algoritması içinde YSA'lar kullanılmakta idi ancak YSA kullanan uygulamalarda eğitim işleminin yüksek işlem gücü gerektirmesi, aşırı öğrenme ve eksik öğrenme durumlarının yaşanması nedeni ile yerlerini başka yöntemlere bırakmış durumda idiler. Bunun en büyük nedeni yıllar içinde verinin niteliği, çeşitliliği, hızı ve hacminin artmasıdır. Ancak 2006 yılı sonrası özellikle Dünya genelinde yapılan ImageNet yarışmalarında derin yapay sinir ağlarının kullanımı ile elde edilen başarımlar dikkatleri tekrar YSA'lar üzerine çekmiştir [91]. Günümüzde gerçek zamanlı nesne tanıma, sınıflandırma, ses ve konuşma tanıma gibi uygulamalarda derin öğrenme araştırma ve geliştirme amacı ile yaygın olarak kullanılmaktadır. YSA'ların tekrar popüler olmasında ki en büyük nedenlerden biri GİB'lerin maliyetinin günümüzde oldukça uygun olmasıdır.

Ray denetim işleminde derin öğrenme temelli yaklaşım Gigert (2015) tarafından ray hattı bağlantı elemanlarının görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilerek segmentasyon işleminde yüksek doğruluk oranı elde etmek için kullanılmıştır, toplam dört adet makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmasının mukayese edildiği çalışmada en yüksek doğruluk oranı EYSA ile elde edilmiştir [133]. Faghih-Roohi (2016) ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada ray yüzeyi hatalarının teşhisi için video kameradan elde edilen çerçeveler üzerinde EYSA ile sınıflandırma yapılarak 92% doğru sınıflandırma oranı elde edilmiştir [93].

YSA ve DÖ kıyaslandığında YSA'lar karmaşıklığı daha az problemlerin çözümü için uygundur, DÖ ise ses tanıma, gerçek zamanlı otonom otomobil, arama motorlarında görsel arama, metin indeksleme ve anlam çıkarma, çok boyutlu bilgisayar görmesi, endüstride gerçek zamanlı arıza teşhisi gibi uygulamalar için uygundur [4]. YSA'ların yaygın olduğu zaman diliminde dağıtık programlama ve GİB maliyetleri yüksek olduğu için YSA ile çözülen problemler sıralı akış'a uygun MİB'ler üzerinde çalışan problemlerdir. Bu açıdan günümüz DÖ ile çözülen problemlerin geleneksel YSA'lar ile MİB'ler üzerinde sıralı olarak koşturulması mümkün değildir. Üçüncü bir fark ise büyük veri kavramı açısından kıyaslandığında ortaya çıkmaktadır.

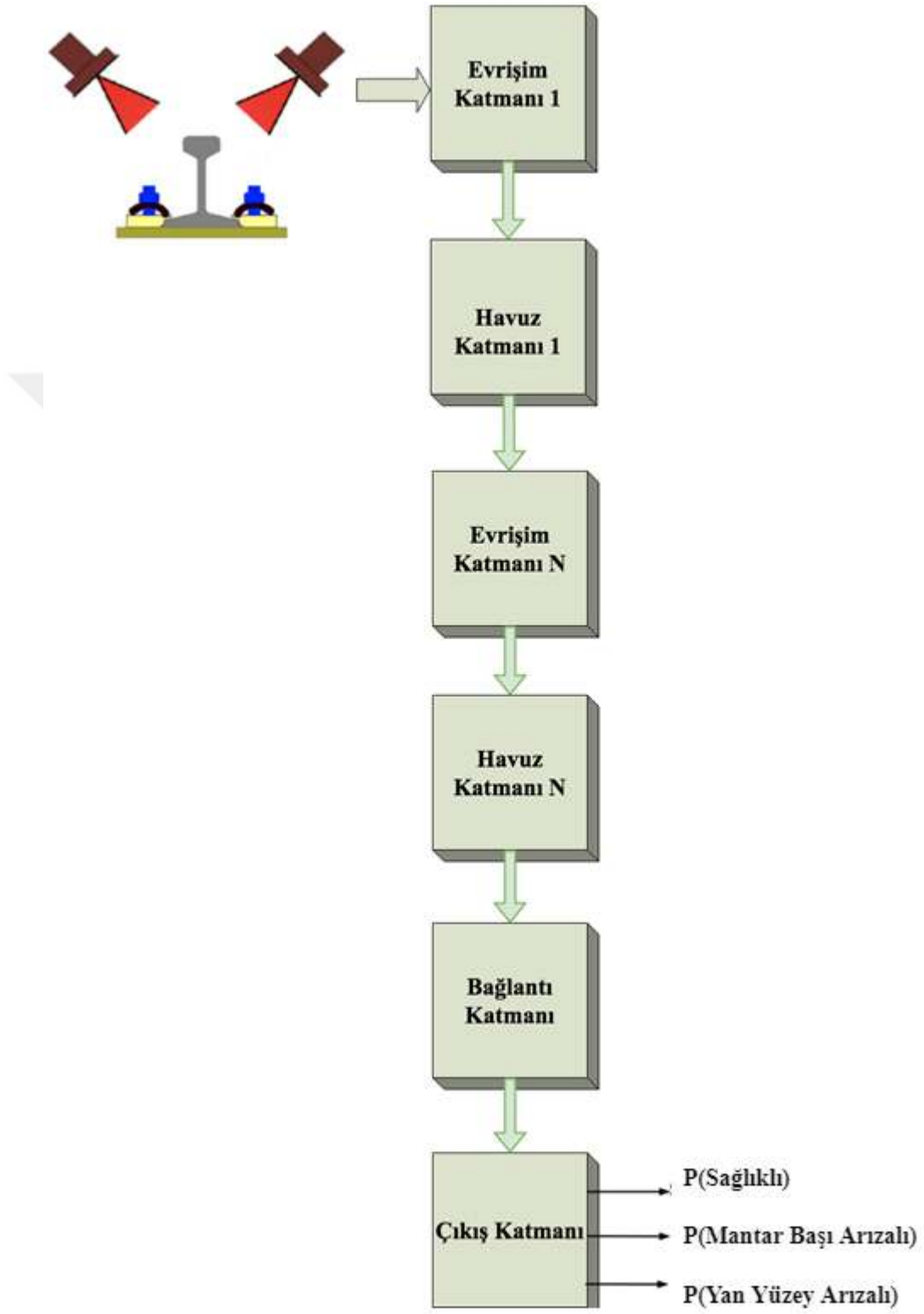
Günümüzde donanım kaynaklarının sayısı, çalışma hızları, ürettikleri verinin boyutu artmıştır. YSA'lar bu tür veriler üzerinde öğrenme işlemi yapmak için yeterli etkinliğe sahip değildir. YSA'lar özellik çıkarımı uygulayarak giriş verisi üzerinde boyut indirgeme yaparlar. YSA modellerinin az bellek tüketmesi ve hızlı çalışması açısından önemli bir adımdır, ancak bununla birlikte veriyi doğru temsil etme ve veriden öğrenme başarımını düşüren bir durumdur. DÖ yaklaşımında ise giriş verisi üzerinde özellik çıkarımı ile boyut indirgeme yapılmaz, hatta aksine giriş verisine gürültü ekleme, döndürme, uzatma, yeniden boyutlandırma gibi ön işlemlerle giriş veri kümesi artırılır. Böylece algoritma veriden öğrenmek için daha güçlü hale gelmiş olur. Tablo 5.3'te YSA ile DÖ arasında belirgin farklar gösterilmiştir [91,135].

Tablo 5. 3. Geleneksel Yapay Sinir Ağları ile Derin Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Geleneksel Yapay Sinir Ağları	Derin Öğrenme
Büyük veri üzerinde etkin değildir.	Büyük veriden öğrenme için uygundur.
Boyut indirgeme kullanılır, giriş verilerinden özellik çıkarımı yapılır.	Algoritmanın daha iyi öğrenme yapabilmesi için giriş verisinin boyutu artırılır, özellik seçimi yapılır.
Aşırı öğrenme veya eksik öğrenme oluşabilir.	Aşırı öğrenme veya eksik öğrenme durumlarına karşı daha dayanıklıdır.

5.3. Lazer Kamera Kullanarak Derin Öğrenme Temelli Ray Arıza Teşhisi

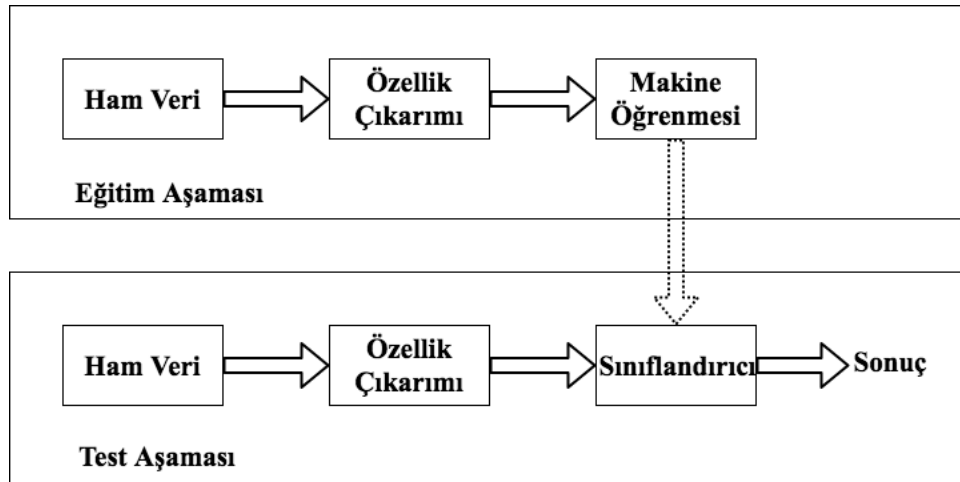
Bu çalışmada bilgisayar görmesi temelli ray denetimi işlemi için literatür çalışmaları incelenerek yeni bir yaklaşım sunulmuştur [134]. Önerilen yöntemin genel blok diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir. Çalışmada ray hattı üst ve yan yüzeylerinde oluşabilecek kırık, oyuk, delinme ve çatlak gibi arıza durumlarının teşhisi amaçlanmıştır. Çalışma için ray hattı üzerinde hareket eden özel bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneği üzerinde ray hattının her iki yüzeyini gören toplam iki adet üç boyutlu lazer kamera kullanılmıştır. Eğitim aşamasında elde edilen üç boyutlu ray profilleri sağlıklı ve arızalı olarak etiketlenmiştir. Arızalı veriler kendi aralarında arızanın bulunduğu yere göre mantar başı ve yan yüzey olarak sınıflandırılmıştır. Ray analizi uygulamalarında çoğunlukla ray üst yüzeyinde bulunan arızalar teşhis edilmektedir ancak ray hatlarının güvenliği için ray yan yüzeylerinde oluşan hataların bulunması da son derece kritik bir işlemdir. “Sağlıklı”, “Mantar başı arızası”, “Yan yüzey arızası” olmak üzere üç sınıfta toplanan ve etiketlenen ray profilleri EYSA kullanılarak eğitilmiştir. Test aşamasında okunan ray profilleri eğitilen EYSA kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sonuç olarak çalışmada ray üst ve yan yüzeylerinde oluşan hataların yüksek hızlı ve %98 doğruluklu bulunabildiği DP temelli yeni bir ray denetimi yaklaşımı sunulmuştur.



Şekil 5.5. Lazer kamera kullanan derin öğrenme temelli ray arıza teşhisi

5.3.1. Ön İşlemler

Bilgisayar görmesi kullanan makine öğrenmesi yöntemlerinde giriş verilerini oluşturan çerçeveler yüksek çözünürlüklü olmalarından dolayı büyüktür. Bu durum özellikle gerçek zamanlı problemlerde dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle giriş verileri üzerinde Bölüm 4’te anlatılan özellik çıkarım yöntemleri kullanılmaktadır. Böylece giriş verisi olarak büyük boyutlu verinin kendisi ile değil öz değerleri kullanılmaktadır. Daha küçük boyutlu veri ile uğraşmak çalışma zamanını kısaltmak açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Ancak verinin boyutunu küçültmek aynı zamanda anlamını da düşürebilmektedir, bir başka deyişle veride ki önemli özellikler kaybolabilmektedir. Günümüz de DÖ kullanılan alanlarda ise çok katmanlı öğrenmenin gerçekleştirilebilmesi için veri yeterli bilgiye ve çeşitliliğe sahip olmalıdır. DÖ algoritmaları ve kullanılan donanım kaynakları da bu veriyi işleyecek kompleksliğe ve yeteneğe sahip olmalıdır. Şekil 5.6’ta geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımı verilmiştir. Eğitim aşamasında etiketli veriler ve ait oldukları sınıflar seçilen makine öğrenmesi algoritması kullanılarak eğitilirler, test aşamasında ise test verisinin öğrenilen parametreler kullanılarak en yakın olduğu sınıf bulunur ve sonuç üretilir. Teşhis ve sınıflandırma gibi problemlerinin çözümünde geleneksel yaklaşımın yetersiz kaldığı, büyük veri kümelerine sahip yada gerçek zamanlı uygulamalarda ise Şekil 5.7’de örnek uygulaması verilen DÖ kullanılmaktadır.



Şekil 5.6. Geleneksel Makine Öğrenmesi Yaklaşımı



Şekil 5.7. Derin öğrenme yaklaşımı [135].

Everingham (2010) ve arkadaşlarına göre DÖ uygulamalarının aşağıda ki dört temel özelliği içermesi gerekmektedir [135].

- **Veri Çeşitliliği:** Veri gerçek dünyayı yansıtacak çeşitliliğe sahip olmalıdır.
- **Veri Açıklaması:** Veri algoritmanın öğrenebilmesi için yeterli bilgiye sahip olmalıdır (Bu nedenle DÖ uygulamalarında veri üzerinde özellik çıkarımı yada boyut küçültme yapılmaz).
- **Algoritma Kompleksliği:** Algoritmalar DÖ yapacak güce sahip olmalıdır.
- **Algoritma Hızı:** Algoritmalar büyük veriyi işleyecek hıza sahip olmalıdır.

Ray analizi uygulamalarında CCD/CMOS kameralar, AÖB ve lazer kameralar gibi bir çok farklı kaynaktan gerçek zamanlı olarak büyük miktarda veri alınmaktadır. Örneğin deneysel çalışmalarda kullanılan AT CS-1600 lazer kamera her nokta 0,3125 mm ye karşılık gelmektedir. Tek bir lazer demeti profili 1600×1 uzunluğunda bir vektör verisidir ve dosya sisteminde 20KB yer kaplamaktadır. Sadece 1 km ray hattı düşünüldüğünde yaklaşık 60 GB büyüklüğünde 3 milyondan fazla lazer profili elde edilebilmektedir. Bu işlem tekrarlı, periyodik ve uzun süreli düşünüldüğünde veri üstel olarak artacaktır. Dolayısı ile ray analizi problemi DÖ için yukarıda sözü edilen veri çeşitliliği ve veri açıklaması açısından son derece uygundur. DÖ uygulamalarında geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları yetersiz ve etkisiz kalmaktadır, bu nedenle günümüzde EYSA gibi derin öğrenme algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fakat bu algoritmaların gerçek zamanlı çalışması geleneksel MİB programlama yaklaşımı ile mümkün değildir. Günümüz GİB'leri çok çekirdekli yapıları ile paralel programlama yaklaşımına çok uygundur (Bölüm 3'te Şekil 3.5'te verilmiştir). Tez çalışmasının bu bölümünde DÖ uygulamaları için Google tarafından geliştirilen Tensorflow çatısı yukarıda sözü edilen Algoritma kompleksliği ve Algoritma hızı ilkelerini sağlamak için seçilmiştir [118].

DÖ uygulamalarında öğrenme performansını artırmak için genellikle giriş verisi üzerinde çoğaltma uygulanır. Çoğaltma işlemi verinin görüntü olduğu uygulamalarda veriye gürültü ekleme, renk kanallarını değiştirme, simetrisini alma, germe, uzatma, döndürme gibi işlemlerdir. Uygulanan veri çoğaltma yöntemi sayısına bağlı olarak giriş verisinin boyutu bir kaç kattan onlarca kata kadar artırılabilir. Tez çalışmasının bu kısmında DÖ uygulamasının giriş verisini lazer kameradan elde edilen profiller oluşturmaktadır. Bu profiller üzerinde aşağıdaki veri çoğaltma yöntemleri uygulanarak giriş verileri çoğaltılmıştır. Veri çoğaltma işlemi verileri etiketledikten sonra öğrenme performansını artırmak amacı ile yapılmaktadır.

Kaydırma: Giriş verisini oluşturan tek bir ray profili 1600×1 boyutunda bir vektör verisidir. Lazer kameralar oldukça hassas ölçüm yapabilen aygıtlardır. Gerek deneysel çalışmalar, gerek gerçek fiziksel koşullarda kamera ile ray hattı arasındaki mesafenin hiç değişmeden korunması mümkün değildir, bu nedenle bu vektör üzerinde hem ileri yönde, hem geri yönde Denklem 5.2'de olduğu gibi kaydırma işlemi yapılmaktadır. Kaydırma işlemi sonucunda giriş verilerinde bir değişiklik yapılmaksızın pozitif ve negatif yönde öteleme yapılmaktadır. Denklemden P ham veriyi s kaydırma miktarın ve P_k ise elemanları kaydırılmış vektörü ifade etmektedir. x hem pozitif, hem negatif seçilerek iki yönde ayrı ayrı kaydırılmış vektör elde edilmektedir.

$$P_k = \sum_{i=0}^n P_{i+s} \quad (5.2)$$

Sabit Ekleme: Deneysel çalışmalarda kullanılan lazer kamera tümleşik bir aygıttır ve lazer çizgi kaynağı ile kamera kalibre edilmiştir. Çalışma ortamında giriş verilerini lazer kamera tarafından ölçülen nokta değerleri oluşturmaktadır. Bu nokta değerleri lazer kamera ile ray profili arasında ki mesafe değeri kullanılarak mm cinsinden gerçek değerlere dönüştürülebilmektedir.

Ancak eğitim ve test aşamasında bu mesafe bilgisi pozitif ya da negatif yönde değişebileceğinden vektör üzerindeki her bir değere Denklem 5.3'te olduğu gibi bir x sabiti hem pozitif hemde negatif olarak eklenmiştir. Bu ekleme sonucunda P giriş verisinden yeni P_e vektörü elde edilmiştir.

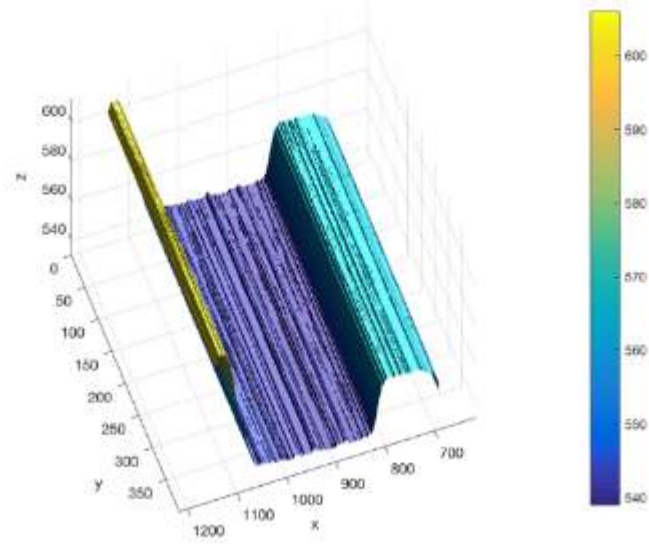
$$P_e = x + P \quad (5.3)$$

Gürültü Ekleme: Bölüm 3'te yer verilen ray benzetim çalışmasında ideal koşullar altında çalışıldığı için 100% doğruluk değeri elde etmek mümkün olmuştur, bu nedenle benzetim çalışmasında ki ray profilleri verisine tek düze dağılıma sahip gürültü eklenmiştir. Benzer bir işlemde tez çalışmasının bu kısmında etiketlenmiş veriler üzerinde Denklem 5.4 kullanılarak tekdüze dağılımlı rassal bir gürültü eklenmiştir. Denklemde z giriş verisi a ve b sırayla eklenecek gürültü aralığıdır.

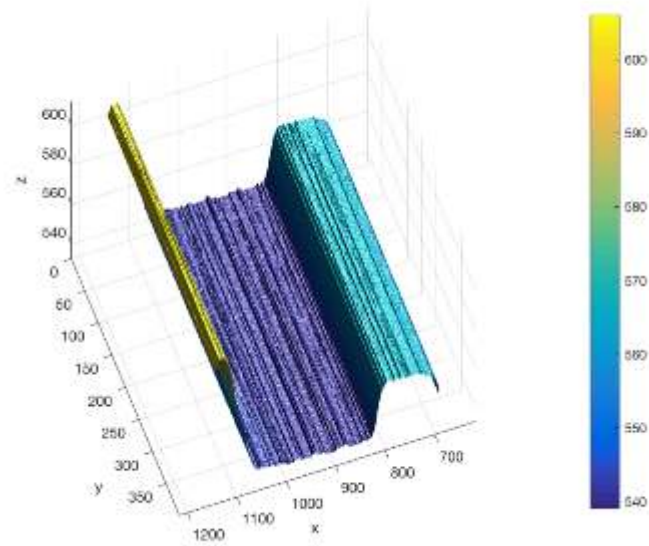
$$P_{g1} = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{Eğer } a < z < b \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases} \quad (5.4)$$

Yukarıda anlatılan üç farklı yöntemle birlikte giriş veri kümesi boyutu 25 katına çoğaltılmıştır. Kaydırma miktarı s miktarı sırası ile $\{-3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ nokta değeri seçilerek vektör üzerinde öteleme yapılmıştır. EYSA ağı eğitim aşamasında özellik seçimi pencere boyutu 4×4 seçileceği için kaydırma adımları 5'er adım olacak şekilde ve toplam veri kümesi üzerinde 2% değerini aşmayacak aralıkta seçilmiştir. İkinci veri çoğaltma yöntemi olan sabit ekleme adımında x sabit miktarı sırası ile $\{-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ nokta değeri olacak şekilde eklenmiştir. Deneysel çalışmalar esnasında lazer kamera ile ray arasında ki mesafe 700 mm olacak şekilde seçilmiştir. Öteleme miktarı negatif yönde maksimum 4 mm, pozitif yönde 6mm olacak şekilde seçilmiştir, öteleme miktarı 1% değerinin altında tutulmuştur.

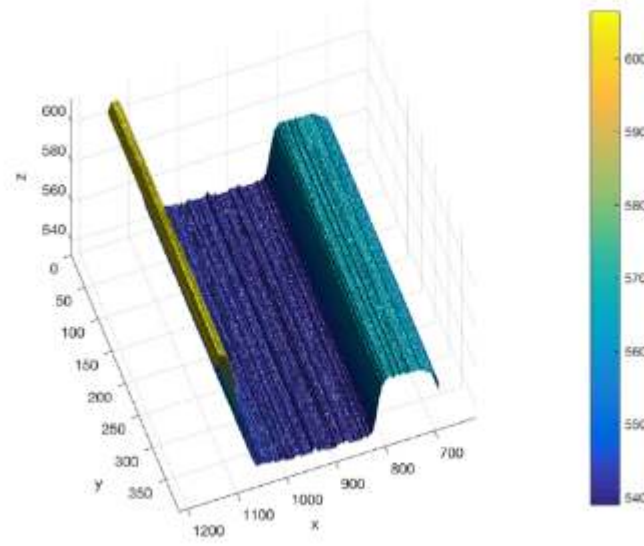
Son veri çoğaltma yöntemi gürültü ekleme işlemidir. Gürültü eklerken dağılım ortalama değeri $\{0-1\}$ aralığında seçilmiştir. Bu adımlar sonrası elde edilen çoğaltılmış veri setlerine ait görüntüler Şekil 5.8'de verilmiştir.



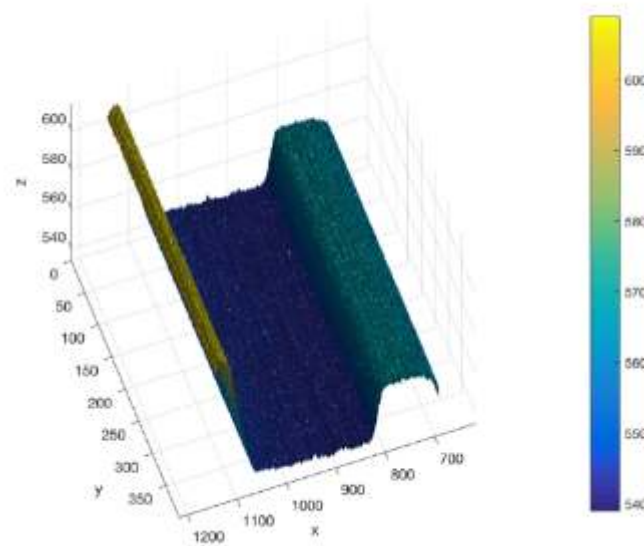
a) Birleştirilmiş ray profilleri ham veri



b) Birleştirilmiş ray profilleri ham veriden ön işlem aşamasında çoğaltılan veri



c) Birleştirilmiş ray profilleri ham veriden ön işlem aşamasında çoğaltılan veri



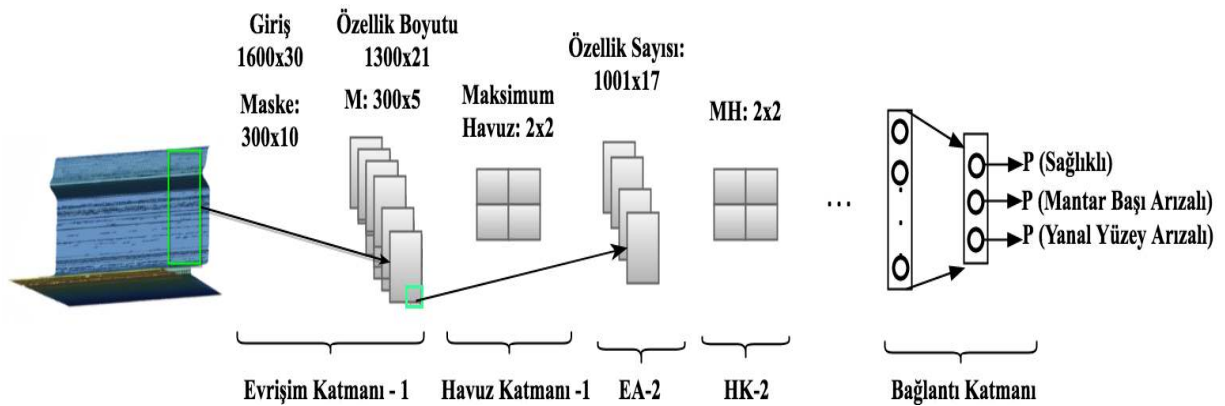
d) Birleştirilmiş ray profilleri ham veriden ön işlem aşamasında çoğaltılan veri

Şekil 5.8. Derin öğrenme için kullanılan ham veri ve ön işlem adımları ile çoğaltılmış veriler

Veri çoğaltma işlemleri sonucu her biri 50 adet lazer demeti içeren 10.000 adet veri seti, 250.000 adet veri seti oluşturulmuştur. Bu verilerin 200.000 adeti eğitim aşamasında kullanılmış, 50.000 adeti test aşaması için ayrılmıştır.

5.3.2. EYSA Eğitimi

Eğitim işlemi için Şekil 5.9’da verilen 5 katmanlı Bölüm 3’te anlatılan bir EYSA kullanılmıştır. Tüm katmanlarda özellik seçimi olarak maksimum havuz kullanılmıştır. İlk evrişim katmanında maske boyutu 300×5 seçilmiştir, Giriş veri boyutu 1600×30 olduğundan ilk katmanda elde edilen özellik sayısı 1301×21 olarak gerçekleşmiştir. 2. evrişim katmanında özellik sayısı 1001×17 ve maske boyutu 300×5 olarak seçilmiştir. Kalan katmanlarda maske boyutu 300×5 boyutu seçilmiştir, böylece 3. Evrişim katmanında 701×13 , 4. evrişim katmanında 401×9 , 5. evrişim katmanında 101×5 adet özellik elde edilmiştir. Tüm havuz katmanlarda maske boyutu 2×2 olarak seçilmiş ve özellik seçici olarak maksimum havuzlama ile pencere içindeki maksimum değer alınmıştır. Çıkış katmanında üç sınıfa ait $\{0-1\}$ aralığına normalize edilmiş olasılıksal çıkış değerleri bulunmaktadır. Tablo 5.4’te bu çalışmaya ait kullanılan donanım ve yazılım kaynakları tablo halinde verilmiştir. Uygulamanın gerçek zamanlı olarak Ubuntu işletim sistemini kullanan bir platformda Python programlama dili ile kodlanmıştır. DÖ kütüphanesi olarak Google tarafından geliştirilen Tensowrflow kütüphanesi kullanılmıştır. Tensorflow hem MİB hem GİB üzerinde çalışabilen, açık kaynak kodlu, esnek bir mimariye sahip, masaüstü, sunucu, bulut, mobil aygıt gibi bir çok platforma api desteği veren günümüzün en popüler DÖ kütüphanelerinden bir tanesidir.



Şekil 5.9. Lazer kamera kullanan arıza teşhisi için kullanılan EYSA yapısı

Tablo 5. 4. Lazer kamera profil verileri ile derin öğrenme tabanlı arıza teşhisinde kullanılan yazılım ve donanım kaynakları

Bileşen	Açıklama
İşletim sistemi	Ubuntu 16.04
GPU	Nvidia Geforce GTX 750
Lazer kamera	AT C5-1600CS19-500
Programlama ortamı	Python 2.7
Derin öğrenme kütüphanesi	Tensorflow, Keras
Diğer kütüphaneler	Numpy, matplotlib

5.3.3. Sonuçlar

Test işlemi için 50.000 adet veri seti kullanılmıştır (2.500 adet ham veri ve ham veriden çoğaltılan veri setleri dahil). Bu veriler “sağlıklı”, “mantar başı arızalı” ve “yan yüzey arızalı” olarak üç sınıfa ayrılmıştır. Gerçekte bu ham verilerin 1.500 adeti sağlıklı, 750 adeti mantar başı arızalı ve 250 adeti yan yüzey arızalı verilerdir. Bu verilerden 650 adetinde sadece mantar başı, 50 tanesinde sadece yan yüzey arızası mevcuttur, 100 adet profilde hem mantar başı hem yan yüzey arızası mevcuttur. Tablo 5.5’de test veri setinin ait oldukları sınıflar verilmiştir.

Tablo 5. 5. Ham veri setine ait gerçek sınıf etiketleri

	Sağlıklı	Mantar başı arızalı	Yan yüzey arızalı
Sağlıklı	1.500	-	-
Mantar başı arızalı	-	750	100
Yan yüzey arızalı	-	100	50

Tablo 5. 6. Lazer kamera kullanan derin öğrenme tabanlı ray arıza teşhisi karşılık matrisi

Gerçek Sınıflar	Sistem tarafından gerçekleştirilen sınıflandırma				
				Arızalı	
			Sağlıklı	Mantar başı	Yan yüzey
		Sağlıklı	1486	5	9
	Arızalı	Mantar başı	14	724	12
		Yan yüzey	11	5	234

Tablo 5.6’da elde edilen test sonuçları karşılık matrisi verilmiştir. Karşılık matrisi üzerinde doğruluk, keskinlik ve hassasiyet hesaplaması Bölüm 3’te verilmişti, ancak Bölüm 3’te bu değerler iki sınıflandırıcı bir karşılık matrisi için geçerlidir. Denklem 3.59’da verilen iki sınıflı bir sınıflandırıcıda doğruluk değerinin hesaplanması için DP değerleri ile DN değerlerinin toplam veri sayısı N ’e bölünmesi ile elde edilebilir. Çok sınıflandırıcı bir sınıflandırıcıda ise doğruluk Denklem 5.5’te ki gibi tüm DP değerlerinin (karşılık matrisinde ki köşegen değerler DP sınıflarına ait değerleri tutar) toplam N sayısına bölünmesi ile edilebilir. Denklemden N toplam veri sayısını S_i karşılık matrisi köşegen değerlerinde tutulan DP sınıfları göstermektedir. Bu denkleme üç sınıflı sınıflandırıcı kullanılan DÖ temelli ray analizi uygulamasında 98% genel doğruluk oranı elde edilmiştir.

$$ACC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (5.5)$$



a) Sağlıklı ray profili



b) Mantar başı ve yan yüzey arızalı ray profili



c) Yan yüzey arızalı bir ray profili

Şekil 5.10. Çalışmada kullanılan bazı ray profilleri

5.4. Bölüm Değerlendirmesi ve Sonuçlar

Tezin bu bölümünde ray analizi işlemi için büyük veri yaklaşımı sunulmuş ve DÖ tabanlı ray arıza teşhisi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Günümüz Dünyası uygulamalarında birçok farklı kaynaktan, farklı türde, hızlı ve büyük miktarda veri üretilmektedir. Bu verilerin makine öğrenmesi uygulamalarında kullanılabilmesi, depolama, veri seçimi, analiz ve yeniden değerlendirme işlemleri için özel yaklaşımlar kullanılması gerektirmektedir. Büyük veri için uygun bir depolama yada veri tabanı sistemi, büyük veri üzerinde haritalama ve seçme işlemi yapabilecek algoritmalara ve bu veriyi işleyecek güçte makine öğrenmesi yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bir uygulamada büyük veriden söz edebilmek için Hız (yeni veri üreme hızı), Çeşitlilik (veri çeşitliliği) ve Hacim (veri büyüklüğü) olmak üzere üç ana kavram söz konusudur.

Ray analizi uygulamalarında AÖB, CCD/CMOS kameralar, lazer kameralar gibi bir çok farklı donanım kaynağı kullanılmaktadır, AÖB'leri tipik olarak saniyede 10.000 adet paket büyüklüğü 41 Byte veri üretmektedir.

Endüstriyel kameralar saniyede 150 adet büyüklüğü bir kaç Mbyte olabilen görüntü dosyaları, lazer kameralar ise saniyede 25.000 adet her biri 1600×1 vektör uzunluğunda 20 Kbyte boyutunda veri üretmektedir. Sadece bir kaç km'lik bir ray hattı analizinde tüm donanım verileri göz önüne alındığında büyüklüğü Tbyte olarak ifade edilebilecek milyonlarca veri elde edilmesi söz konusudur. Daha uzun mesafeli, tekrarlı ve periyodik ray analizi uygulamalarında bu veri üstel olarak büyüyecektir. Bu durum ray analizi uygulamalarının büyük veri yaklaşımı ile değerlendirilmesi gerekliliğini doğurmuştur.

Büyük veriler üzerinde geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları yetersiz kalmaktadır, bu nedenle günümüzde DÖ algoritmaları kullanılmaktadır. DÖ geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları ile kıyaslandığında gerek gerçek zamanlı çalışma ve gerekse de elde edilebilen doğruluk performansları kriterleri ile üstünlük göstermektedirler. DÖ algoritmalarında giriş veri boyutunun veriyi yeterince ifade edecek boyutta ve anlamda olması gerekmektedir, bu nedenle DÖ uygulamalarında giriş verisi üzerinde, gürültü ekleme gibi manipülasyonlarla veri çoğaltma işlemi gerçekleştirilir. Veri üzerinde boyut indirgeme, özellik çıkarımı gibi yöntemler yerine verinin anlamını düşürmeden veri seçme işlemi gerçekleştirilir. Bu hususlar göz önüne alındığında DÖ uygulamalarının geleneksel olarak MİB'ler ile programlanması ve gerçek zamanlı çalıştırılması mümkün değildir. Bu nedenle GİB'ler üzerinde paralel programlama yapan yaklaşımları kullanan programlama çatıları kullanılmaktadır. Tezin bu kısmında lazer profillerini giriş verisi olarak alan üç sınıflı sınıflandırıcıya sahip bir DÖ uygulaması Python programlama dili ve Google tarafından geliştirilen açık kaynak Tensorflow kütüphanesi kullanılarak yaklaşık 98% genel doğruluk değeri elde etmek mümkün olmuştur.

6. SONUÇLAR

Bu tezde gerçek zamanlı ray profili arıza tespiti için lazer kamera kullanan bilgisayar görmesine dayalı algoritmalar önerilmiştir. Tez çalışması süresince literatür çalışmaları incelenerek teorik yaklaşımlar sunulmuş, bu teorik yaklaşımlar pratiğe dönüştürülerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş, saha testleri ile deneysel çalışmalar doğrulanmış ve kullanılabilirliği ispatlanmıştır. Tez süresi boyunca önerilen yaklaşım ve gerçekleştirilen çalışmalar kronolojik sırası ile verilmiştir.

Ray hattında oluşan çatlak, delinme ve göçme gibi arızaların görüntü işleme temelli olarak teşhis edilebilmesi için bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yaklaşım temel olarak dört adımda çalışmaktadır. İlk adımda ray hattından elde edilen dikey görüntü üzerinde kamera ile ray hattı arasındaki mesafe bilgisi ve kamera görüş alanı parametreleri kullanılarak sadece ray hattına ait görüntü kırılmıştır. İkinci adımda görüntü üzerinde yerel normalizasyon uygulanarak görüntü arka plan ve arızalı alan farkı daha belirgin hale getirilmiştir. Üçüncü adımda görüntü üzerinde seçilen eşik değere göre ikili dönüşüm yapılmıştır. Bu adım sonrası görüntü üzerinde arka plan, gürültülü alan ve arızalı bölge kalmıştır. Son adımda nokta komşuluk değerine göre seçilen eşik değeriyle gürültü olarak kabul edilen alanlar görüntüden silinmiştir. Arka planında görüntüden silinmesiyle sadece arızalı bölge görüntüde kalmıştır. Önerilen yaklaşım ile arıza tespiti ile birlikte arızalı alanın geometrisi de elde edilebilir, böylece kamera parametreleri de kullanılarak arızalı alanın büyüklüğü de hesaplanabilir. Ancak önerilen yaklaşımın başarımı eşik değerlerin seçimine bağlıdır.

Ray hattından elde edilen video görüntüler üzerinde arıza tespiti yapılabilmesi için makine öğrenmesi temelli bir yaklaşım sunulmuştur. Deneysel çalışmada ray hattından elde edilen görüntüler üzerinde çerçeve büyüklüğünün 0.5% geçmeyecek şekilde sanal arıza oluşturularak çerçeveler arızalı ve sağlıklı olarak etiketlenmiştir. Arıza büyüklüğü ve yeri rassal olarak değişen dört farklı senaryo ile elde edilen görüntüler üzerinde TBA, ÇTBA, TDA ve HK yöntemleri ile öz değerler elde edilmiştir. Elde edilen öz değerler giriş verisi olarak kullanılmış ve RO algoritması kullanılarak eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Eğitim işlemi sonrasında test verileri üzerinde elde edilen sınıflandırma sonuçları gerçek sınıflar ile karşılaştırılarak doğruluk performansı ölçülmüştür. Arızalı ve sağlıklı çerçeve sayılarının eşit seçildiği çalışmada özellik çıkarım metotlarının performans değerleri arızalı ve sağlıklı çerçeveler için ayrı ayrı elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda sağlıklı çerçeveler üzerinde en yüksek doğruluk oranı (98%) temel bileşen analizi ile, arızalı çerçeveler üzerinde en yüksek doğruluk oranı (68%) ile histogram karşılaştırma ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Böylece TBA ve HK yöntemlerini birleştirerek çerçevenin arızalı olma olasılık değeri için bir iki yöntemin birleştirilmesi önerilmiştir. Böylece karma olarak 83% doğruluk performansı elde edilmiştir.

Ray hatlarında görüntüler üzerinde bulanıklık tespiti yapan bir yaklaşım sunulmuştur. Ray hatlarında bilgisayar görmesine dayalı arıza teşhis uygulamalarında yaşanan bir diğer problem ray hatlarında oluşan titreşimin görüntüler üzerinde bulanıklık etkisi oluşturmaktır. Bu durum hem aşırı bulanık görüntülerin eğitim verisi olarak kullanılamayıp elenmesi açısından hem de eğitim algoritmasının performansı açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Önerilen yaklaşımda yönölçer, jiroskop ve ivmeölçer gibi sensörleri barındıran AÖB verileri ile görüntüler üzerinde oluşan bulanıklık arasındaki ilişki makine öğrenmesi temelli olarak incelenmiştir. AÖB’te kullanılan her sensör 3 serbestlik derecesine sahiptir, öncelikle AÖB girişinde kullanılan toplam 9 sensör bilgisi AHRS algoritması ile birleştirilerek nesnenin üç boyutlu Euler uzaydaki değişimlerini gösteren pitch, yaw, roll değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak bulanıklık tespiti ve adaptif bulanıklık giderme için Euler açıları ve görüntüyü olmak üzere dört veri girişli bir yaklaşım önerilmiştir. Manuel olarak bulanıklık tespit edilen görüntüler üzerinde yine manuel olarak Matlab ortamında en iyi netleştirme parametresi elle seçilmiştir. Böylece test verileri için Euler açıları ve görüntü bilgisinin yanı sıra, bulanıklık oranı parametresi içeren öğrenmiş bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model ile birlikte test aşamasında bulanıklık tespiti ve bulanık görüntüler üzerinde adaptif netleştirme yapılabilmektedir. Önerilen yaklaşımın en büyük dezavantajı titreşimin çok şiddetli ya da iki/üç yönde (Euler açıları) düzensiz değiştiği durumlarda bulanıklık tespiti yapılabilebile netleştirme yapılamamasıdır.

Ray hatlarında gerçek zamanlı arıza teşhis işlemi performans iyileştirmesi için boru hattı mimarisi ve paralel programlama kullanan bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yaklaşım üç ana adım içermektedir. İlk adımda ray hattından elde edilen görüntü üzerinde bulanıklık tespiti ve netleştirme yapılmaktadır.

İkinci adımda görüntü üzerinde 3 katmanlı bir EYSA kullanılarak arıza teşhisi yapılmıştır. Üçüncü adım ise sınıflandırma yapılarak teşhis sonucu üretilmesidir. Uygulamada demiryolunda hareket etmesi için tasarlanan özel bir test cihazı kullanılmıştır. Test cihazı üzerinde kullanılan iki kamera sol ve sağ rayı dikey olarak üstten görmektedir. Uygulama gerçek zamanlı performans iyileştirmesi için Nvidia CUDA kütüphanesi kullanılarak GİB üzerinde çalıştırılmıştır. Boru hattı mimarisi yaklaşımı ile MİB üzerinde (n+1).çerçeve için sınıflandırma yapılırken, (n).çerçeve için GİB üzerinde bulanıklık tespiti ve netleştirme işlemi yapılmaktadır. Önerilen yaklaşım ile birlikte Mako G032B/C kameradan elde edilen her çerçeve üzerinde 50cm alan için arıza teşhis işlemi 0.025 saniyede yapılabilmektedir. Böylece önerilen yaklaşım gerçek bir test cihazı üzerinde 72 km/s gerçek hızda çalışabilecektir.

Üç boyutlu ray hattı arıza teşhisi için benzetim çalışması önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda lazer kamera ile ray arıza teşhisi için ray profilinin gerçek ölçülerde katı modeli kullanılmıştır. önerilen yaklaşım için öncelikle Blender ortamında üç boyutlu ve tamamen sağlıklı gerçek ölçülerde ray profili oluşturulmuştur. Ardından yine üç boyutlu ve rassal yerlerde rassal arızalar içeren gerçek ölçülerde ray profilleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu profillerden elde edilen sağlıklı ve arızalı profil verileri üzerinde TBA, TDA, HK, ÇTBA yöntemleri kullanılarak öz değerler elde edilmiş ve RO algoritması ile eğitilmiştir. Benzetim çalışması ideal koşullar ile çalışıldığında 100% doğruluk oranı elde etmek mümkün olmuştur. Gerçek dünyayı modellemesi için profiller üzerine Gauss dağılıma sahip rassal gürültü eklenerek eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir. TBA, TDA, HK, ÇTBA yöntemleri ile elde edilen sonuçlar CBİ ile birleştirilmiştir.

Üç boyutlu ray arıza teşhisi için AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanan bir yaklaşım önerilmiştir. İlk uygulamada lazer kamera ile yanal ray arıza teşhisi yapılmıştır. Bu yaklaşımda lazer kamera ray hattını yan görecektir şekilde konumlandırılarak mantar yanal yüzeyi ve gövde üzerindeki arızaların bulunması hedeflenmiştir. Lazer kamera MYM, EDM, AMM ve TM olmak üzere dört farklı modda üç boyutlu veri elde etmektedir. Deneysel çalışmalarda TM ile elde edilen verilerin diğerlerine oranla çok fazla gürültü içerdiği, diğer üç yöntemle birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Lazer kamera ile elde edilen her bir ray profili 1600×1x16-bit uzunluğunda bir vektör verisidir. Eğitim aşamasında öncelikle vektör verisi TBA, TDA, HK, ÇTBA ile öz değer elde edilmesi için matris forma yeniden boyutlandırılmıştır. Ardından öz değerler elde edilmiş ve RO ile eğitim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Toplam 10.000 ader lazer profil verisi etiketlenmiş, bu profillerden 6.000 adeti eğitim işleminde, 4.000 adeti eğitim işleminde kullanılmıştır. Dört yöntemin doğruluk performansları ayrı ayrı karşılaştırılmış ve en yüksek doğruluk oranı 98% ile TBA ile elde edilmiştir.

AT C5-1600CS19-500 lazer kamera ile dikey arıza teşhisi yapılan bir yaklaşım önerilmiştir. Bir önceki yaklaşımda ray mantar başı yanıl yüzey ve gövdesinde ki arızalar teşhis edilebilirken ray üst yüzeyindeki arızalar teşhis edilememektedir. Bu yaklaşım da ise ray yanıl yüzeyindeki arızalar teşhis edilemez ancak ray üst yüzeyinde ki arızalar teşhis edilebilir. Buna ek olarak bu yaklaşımla civata tespiti yapılabilmektedir. Bu yaklaşımla bir önceki çalışmaya yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Ray profili sol ve sağını iki lazer kamera ile çapraz teşhis edecek bir yaklaşım önerilmiştir. Daha önceki iki yaklaşımda kendi içinde avantaj ve dezavantajlara sahiptir. İlkinde ray üst yüzeyinde arızalar teşhis edilemezken, ikincisinde ray yanıl yüzeydeki arızalar teşhis edilememektedir. Bu yaklaşımda ray hattını sol ve sağ 45° üst çaprazdan göreceğ şekilde hem ray üst yüzeyi hem de ray mantar başı yanıl yüzeyi aynı anda denetlenebileceğdir. Ayrıca çift lazer kamera kullanılacak olması nedeni ile ray denetimi tek yönde yapılabileceğdir. Uygulamanın gerçek zamanlı çalışabilmesi Nvidia GTX 750 GİB üzerinde Google tarafından geliştirilen açık kaynak Tensorflow kütüphanesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda doğruluk oranı 99% değerine yaklaşmış, MİB ile kıyaslandığında GİB üzerinde paralel programlama yaklaşımı ile 20 kat hız artışı elde edilmiştir.

Demiryolu arıza teşhisi için büyük veri ve derin öğrenme temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Büyük veri literatürde 3V konsepti ile anılmaktadır. Bunlar sırası ile verinin üreme hızı, veri çeşitliliği ve verinin hacmidir. Ray hattı denetiminde sayısal kamera, lazer kamera, kodlayıcı, zaman damgası, 9 serbestlik dereceli AÖB gibi birçok donanım kaynağı her saniyede on binlerce veri üretmektedir. Uzun mesafeli, tekrarlı ve periyodik ray denetimlerinde elde edilecek milyonlarca veri PByte büyüklüğü ile ifade edileceğdir. Bu durumda ray denetimi işleminde verinin büyük veri temelli bir yaklaşımla ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu veri üzerinde öğrenme işlemi gerçekleştirilmesi de derin öğrenme yaklaşımı gerektirmektedir. Derin öğrenme geleneksel öğrenme ile kıyaslandığında *aşırı öğrenme* veya *eksik öğrenme* problemlerine karşı daha bağışıklıdır. Bir diğerk fark geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımlarında çalışma hızı performansı iyileştirmesi için veri üzerinde özellik seçimi yapılmaktadır.

Bu yaklaşım her ne kadar çalışma zamanı performansını iyileştirse de verinin anlamını düşürmektedir. Derin öğrenme yaklaşımında ise özellik seçimi ile veri boyutunu küçültmenin aksine veriye gürültü ekleme, açı değiştirme, öteleme gibi yöntemlerle veri çoğaltma işlemi uygulanmaktadır. Buradaki temel amaç modele değişken durumlardada sınıflandırma başarımı kazandırmaktır. Deneysel çalışmada giriş verisi olarak lazer kamera profil verileri kullanılmıştır. Ham veri seti üzerinde kaydırma, sabit mesafe ekleme ve gürültü ekleme yöntemleriyle veri seti 25 katına çıkarılmıştır. Eğitim işleminde 5 katmanlı bir EYSA kullanılmıştır. Tüm katmanlarda 2x2 pencere üzerinde maksimum değer ile özellik seçimi yapılmıştır. Ray profilleri *sağlıklı*, *mantar başı arızalı* ve *mantar yanal yüzeyi arızalı* olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır. EYSA ağı üç sınıflı bir sınıflandırıcı kullanılarak eğitilmiş ve genel doğruluk oranı olarak 99% sonuç elde edilmiştir.

Önerilen yaklaşımların doğrulanması için saha testleri yapılmıştır. Saha testleri için gerçek bir tren üzerine iki adet lazer kamera çapraz olarak yerleştirilmiş, mesafe ve açı kalibrasyonu ardından veri alınmıştır. AT C5-1600CS19-500 lazer kamera yatay olarak 313 mikrometre çözünürlüğe sahiptir. Saha testlerinde 0.0025 saniyede bir örnekleme yapılarak hem sol hem sağ profil için teşhis sonucu üretilmiştir. Her saniye sol ve sağ olmak üzere 400'er adet profil üzerinde teşhis sonucu üretilebilmektedir. Bu durumda 1 saatlik ray denetiminde 2.880.000 ray profili için teşhis sonucu üretilcek, toplam lazer profili veri boyutu yaklaşık 54 GB olacak ve gerçek fiziksel uzunluk değeri olarak 0.446 km ray uzunluğu denetlenmiş olacaktır. Saha testleri ile önerilen yaklaşımın gerçek zamanlı çalışabileceği kanıtlanmış, ray denetimi işleminin büyük veri ve derin öğrenme temelli bir problem olarak ele alınması gerekliliği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., Hoffmann, M., 2014. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, **6(4)**, 239-242.
- [2] Lee, J., Kao, H. A., Yang, S., 2014. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment, 6th CIRP Conf. on Indust. Product-Service Systems, *16*, 3-8.
- [3] Koscielny, J. M., Bartys, M., 2015. The requirements for a new layer in the industrial safety systems. *IFAC-PapersOnLine*, **48(21)**, 1333-1338.
- [4] Kasai, S., 2003. Computer-aided diagnosis system, *U.S. Patent Application No. 10/207,276*.
- [5] Doi, K., 2007. Computer-aided diagnosis in medical imaging: historical review, current status and future potential, *Computerized medical imaging and graphics*, **31(4-5)**, 198-211.
- [6] Jardine, A. K., Lin, D., Banjevic, D., 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical systems and signal processing*, **20(7)**, 1483-1510.
- [7] Lei, Y., He, Z., Zi, Y., 2008. A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with applications*, **35(4)**, 1593-1600.
- [8] Patel, K. K., Kar, A., Jha, S. N., Khan, M. A., 2012. Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products. *Journal of food science and technology*, **49(2)**, 123-141.
- [9] Çelik, H. İ., L. C. Dülger, M. Topalbekiroğlu., 2014. Development of a machine vision system: real-time fabric defect detection and classification with neural networks, *The Journal of The Textile Institute*, **105(6)**, 575-585.
- [10] De Felice, F., Petrillo, A., 2011. Methodological approach for performing human reliability and error analysis in railway transportation system. *International Journal of Engineering and Technology*, **3(5)**, 341-353.
- [11] Bocciolone, M., Caprioli, A., Cigada, A., Collina, A., 2007. A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21(3)**, 1242-1254.
- [12] Wilson, J. R., Norris, B. J., 2005. Rail human factors: Past, present and future. *Applied ergonomics*, **36(6)**, 649-660.
- [13] Jie, L., Siwei, L., Qingyong, L., Hanqing, Z., Shengwei, R., 2009. Real-time rail head surface defect detection: A geometrical approach. In *Industrial Electronics, IEEE International Symposium on ISIE 2009*, July 5-8, Seoul, South Korea, 769-774.
- [14] Liu, Z., Sun, J., Wang, H., Zhang, G., 2011. Simple and fast rail wear measurement method based on structured light. *Optics and Lasers in Engineering*, **49(11)**, 1343-1351.
- [15] Feng, H., Jiang, Z., Xie, F., Yang, P., Shi, J., Chen, L., 2014. Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems. *IEEE transactions on instrumentation and measu.*, **63(4)**, 877-888.
- [16] Min, Y., Xiao, B., Dang, J., Yue, B., Cheng, T., 2018. Real time detection system for rail surface defects based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, **1(3)**, 1-12.

- [17] Hinas, A., Roberts, J. M., Gonzalez, F., 2017. Vision-Based Target Finding and Inspection of a Ground Target Using a Multirotor UAV System. *Sensors*, **17**(12), 2929.
- [18] Ping, L. Z. W. W. W., 2010. Design of machine vision system for inspection of rail surface defects, *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, **11**, 007.
- [19] Skibicki, J. D., Judek, S., 2018. Influence of vision measurement system spatial configuration on measurement uncertainty, based on the example of electric traction application. *Measurement*, **116**, 281-298.
- [20] Malamas, E. N., Petrakis, E. G., Zervakis, M., Petit, L., Legat, J. D., 2003. A survey on industrial vision systems, applications and tools, *Image and vision computing*, **21**(2), 171-188.
- [21] Min, Y., Xiao, B., Dang, J., Yue, B., Cheng, T., 2018. Real time detection system for rail surface defects based on machine Vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(3), 1-12.
- [22] Judek, S., Jarzebowicz, L. 2014. Algorithm for automatic wear estimation of railway contact strips based on 3D scanning results, In *Electrical and Power Engineering (EPE), International Conference and Exposition on, Oct 16-18, Lasi, Romania* 724-729.
- [23] Fan, X., Zhu, A., Huang, L., 2017. Noncontact measurement of indoor objects with 3D laser camera-based. In *Information and Automation (ICIA), 2017 IEEE International Conference on*, July 18-20, Macau, China, 386-391.
- [24] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E., 2016. Learning Based Experimental Approach For Condition Monitoring Using Laser Cameras In Railway Tracks. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, **4**(Special Issue-1), 1-5.
- [25] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E., 2016. Condition Monitoring Approach Using 3dModelling Of Railway Tracks With Laser Cameras. In *International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16), Sept 1-3, Konya, Turkey*, 132-135.
- [26] Zerbst, U., Beretta, S., 2011. Failure and damage tolerance aspects of railway components. *Engineering Failure Analysis*, **18**(2), 534-542.
- [27] Facchinetti, A., Gasparetto, L., Bruni, S., 2013. Real-time catenary model for the hardware-in-the-loop simulation of the pantograph–catenary interaction. *Vehicle System Dynamics*, **51**(4), 499-516.
- [28] Qi, X., 2013. *Dynamic Structural Deflection Measurement with Range Cameras* (Doctoral dissertation, University of Calgary).
- [29] Molleda, J., Usamentiaga, R., Millara, Á. F., García, D. F., Manso, P., Suárez, C. M., García, I., 2016. A profile measurement system for rail quality assessment during manufacturing, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **52**(3), 2684-2692.
- [30] Bisheng Yang , Lina Fang, 2014. Automated Extraction of 3-D Railway Tracks from Mobile Laser Scanning Point Clouds, *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, **7**(12), 4750-4761.
- [31] Kim S., Park C., Kim Y., Park C., 2009. Parameter characteristics of rail inspection measurement system of HSR-350x, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **23**(4), 1019-1022.

- [32] Arnold, R., Lu, S., Hogan, C., Farritor, S., Fateh, M., El-Sibaie, M., 2006. Measurement of vertical track modulus from a moving railcar. In *Proceedings of the AREMA Annual Conference, Sept, Louisville, KY*, 1-7.
- [33] Judek, S., Jarzebowicz, L., 2016. Analysis of measurement errors in rail vehicles' pantograph inspection system, *Elektronika ir Elektrotechnika*, **22(3)**, 20-23.
- [34] Hackel, T., Stein, D., Maindorfer, I., Lauer, M., Reiterer, A., 2015. Track detection in 3D laser scanning data of railway infrastructure. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 11-14, Pisa, Italy*, 693-698.
- [35] Babenko., P., 2013. Visual Inspection Of Railroad Tracks, PhD thesis, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 14(2), 751-760.
- [36] Rail Transit Fixed Structures Inspection and Maintenance Working Group., 2017. Rail Transit Track Inspection and Maintenance, April 7.
- [37] Alemi, A., Corman, F., Lodewijks, G., 2017. Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **231(8)**, 961-981.
- [38] Zuspan, J. F., 2013. *Rail Transit Track Inspection Practices* (No. Project J-7, Topic S04).
- [39] Kohut, P., Mikrut, S., Pyka, K., Tokarczyk, R., Uhl, T., 2012. Research on the prototype of rail clearance measurement system, *Intr. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Infor. Sciences*, Sept 1, Melbourne, Australia, 385-389.
- [40] Bakhrakh., A., 2014. Solving Problems of Railway Safety and Maintenance with Laser Scanning Systems, 2014 Diversified Business Communications.
- [41] Rizvi, A. R., Khan, P. R., Ahmad, S., 2017. Crack Detection in Railway Track Using Image Processing. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, **3(4)**, 489-496.
- [42] Wang, Y. G., Xie, D., Wang, H., Li, X., Shi, J., Li, H., Li, J., 2017. Construction of Visual Inspection Database for Catenary on High-speed Railways, In *MATEC Web of Conferences*, Sept 29, Beijing, China, 1-5.
- [43] Siddiqui, A. A., 2015. *A New Inspection Method Based on RGB-D Profiling* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [44] Karaköse, M., Yaman, O., Akın, E., 2016. Real time implementation for fault diagnosis and condition monitoring approach using image processing in railway switches, **4(Special Issue-1)**, 307-313.
- [45] Wilson, J., Tian, G., Mukriz, I., Almond, D., 2011. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue. *NDT & E International*, **44(6)**, 505-512.
- [46] Fan, Y., Dixon, S., Edwards, R. S., Jian, X., 2007. Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head, *Ndt & E Intr.*, **40(6)**, 471-477.
- [47] Thomas, H. M., Heckel, T., Hanspach, G., 2007. Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **49(6)**, 341-344.
- [48] Clark, R., 2004. Rail flaw detection: overview and needs for future developments. *Ndt & E International*, **37(2)**, 111-118.

- [49] Li, Y., Trinh, H., Haas, N., Otto, C., Pankanti, S., 2014. Rail component detection, optimization, and assessment for automatic rail track inspection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**(2), 760-770.
- [50] Mittal, S., Rao, D., 2017. Vision Based Railway Track Monitoring using Deep Learning. *arXiv preprint arXiv:1711.06423*, 1-10.
- [51] Mikrut, S., Kohut, P., Pyka, K., Tokarczyk, R., Barszcz, T., Uhl, T., 2016. Mobile laser scanning systems for measuring the clearance gauge of railways: state of play, testing and outlook. *Sensors*, **16**(5), 683.
- [52] Nielsen, J., Berggren, E., Lölgen, T., Müller, R., Stallaert, B., Pesqueux, L., 2013. Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities Important for Ground Borne Vibration.
- [53] Jovanović, S., Božović, D., Tomićić-Torlaković, M., 2014. Railway infrastructure condition-monitoring and analysis as a basis for maintenance management, **66**(04), 347-358.
- [54] Xiong, Z., Li, Q., Mao, Q., Zou, Q., 2017. A 3D laser profiling system for rail surface defect detection. *Sensors*, **17**(8), 1791.
- [55] Zhou, Y., Wang, S., Mei, X., Yin, W., Lin, C., Hu, Q., Mao, Q., 2017. Railway Tunnel Clearance Inspection Method Based on 3D Point Cloud from Mobile Laser Scanning. *Sensors*, **17**(9), 2055.
- [56] Yang, Q., Lin, J., 2011. Track gauge dynamic measurement based on 2D laser displacement sensor, In *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on, July 15-17, Hohhot, China*, 5473-5476.
- [57] Resendiz E., Hart J. M., Ahuja N., 2013. Automated visual inspection of railroad tracks, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **14**(2), 751-760.
- [58] Xie, Y., Talbot, M., Zhao, K., Laurent, J., 2014. *Automatic track inspection using 3d laser profilers to improve rail transit asset condition assessment and state of good repair-A preliminary study*, Jan 14-16, Washington DC, USA, 1-15.
- [59] Rizzo, P., Bartoli, I., Marzani, A., di Scalea, F. L., 2005. Defect classification in pipes by neural networks using multiple guided ultrasonic wave features extracted after wavelet processing, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **127**(3), 294-303.
- [60] Tomoyuki B., Ukai M., 2012. A vision-based approach for rail extraction and its application in a camera tilt control system, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, **13**(4), 1763-1771.
- [61] Cannon D.F., Edel K.O., Grassie S.L., Sawley K., 2003. Rail defects: an overview, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **26**(10), 865-886.
- [62] Mariani, S., Nguyen, T. V., & di Scalea, F. L., 2017. Air-coupled ultrasonic testing of rails: experimental prototype and finite element simulations. *Materials Evaluation*, **75**(12), 1497-1507.
- [63] Zheng S., Chai X., An X., Li L., 2012. Railway track gauge inspection method based on computer vision, In *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Aug 5-8, Chengdu, China, 1292-1296.
- [64] Giben, X., Patel, V. M., Chellappa, R., 2015. Material classification and semantic segmentation of railway track images with deep convolutional neural networks,

- In *Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on*, Sept 27-30, QC, Canada, 621-625.
- [65] Maiolino, P., Woolley, R. A., Popov, A., Ratchev, S., 2015. Structural quality inspection based on a RGB-D sensor: supporting manual-to-automated assembly operations. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, **9(1)**, 12-15.
 - [66] Zhu, L., Hyypä, J., 2014. The use of airborne and mobile laser scanning for modeling railway environments in 3D. *Remote Sensing*, **6(4)**, 3075-3100.
 - [67] [Online]. Available: <http://www.mermeccgroup.com/inspect/track-measurement/60/rail-profile.php>
 - [68] [Online]. Available: http://www.pavemetrics.com/wpcontent/uploads/2016/03/LRAIL_Flyer2.pdf
 - [69] [Online]. Available: <http://www.matisa.chenmatisa-auscultation-vehicles.php>
 - [70] [Online]. Available: http://www.kldlabs.com/?page_id=64
 - [71] [Online]. Available: <http://www.graw.com/en/track-measurement/trolley-for-track-geometry-with-laser-cameras-tep.html>
 - [72] [Online]. Available: <http://www.graw.com/en/track-measurement/3d-laser-scanning-system-for-rail-and-turnout-profile-measurement-scorpion.html>
 - [73] [Online]. Available: <http://www.graw.com/en/track-measurement/inertial-track-geometry-trolley-itec.html>
 - [74] [Online]. Available: <http://www.kummlermatter.nl/resources/public/lava3/media/kcfinder/files/brochure-dtk-en1.pdf>
 - [75] [Online]. Available: http://beenavision.com/BV_PDF%20Files/Low-Res-2017/TrackView-Profile-LQ.pdf
 - [76] Singh, M., Singh, S., Jaiswal, J., Hempshall, J., 2006. Autonomous rail track inspection using vision based system, In *Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference*, Oct 16-17, VA, USA, 56-59.
 - [77] Zhou, F., Song, Y., Liu, L., Zheng, D., 2018. Automated visual inspection of target parts for train safety based on deep learning, *IET Intelligent Transport Systems*.
 - [78] Koch, C., Georgieva, K., Kasireddy, V., Akinci, B., Fieguth, P., 2015. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure. *Advanced Engineering Informatics*, **29(2)**, 196-210.
 - [79] Bro, R., Smilde, A. K., 2014. Principal component analysis. *Anal. Methods*, **6(9)**, 2812-2831.
 - [80] Higham, N. J., 2015. The Singular Value Decomposition.
 - [81] Ghashami, M., Perry, D. J., Phillips, J., 2016. Streaming kernel principal component analysis. In *Artificial Intelligence and Statistics*, May 9-11, Cadiz, Spain, 1365-1374.
 - [82] Izenman, A. J., 2013. Linear discriminant analysis, In *Modern multivariate statistical techniques*, Springer, 237-280.
 - [83] Shen, D., 2007. Image registration by local histogram matching, *Pat. Recgn*, **40(4)**, 1161-1172.
 - [84] Liu, Z., Wang, W., Zhang, X., Jia, W., 2010. Inspection of rail surface defects based on image processing, In *Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010 2nd International Asia Conference*, March 6-7, Wuhan, China, 472-475.

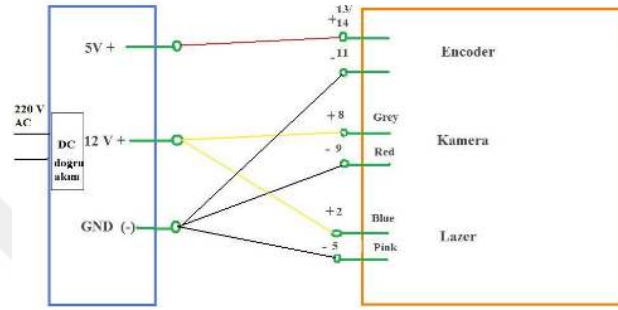
- [85] Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R., 2014. *Image processing, analysis, and machine vision*, Cengage Learning.
- [86] Joshi, N., Kang, S.B., Zitnick, C.L., Szeliski R., 2010. Image deblurring using inertial measurement sensors, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **29(4)**, 1-8.
- [87] Santur, Y., Karaköse, M., Akın, E., 2015. Random Forest Based Diagnosis Approach for Rail Fault Inspection in Railways. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Nov 26-28, Bursa, Turkey, 714-719.
- [88] Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification, *International Journal of Remote Sensing*, **26(1)**, 217-222.
- [89] Bertolini, F., Galimberti, G., Schiavo, G., Mastrangelo, S., Di Gerlando, R., Strillacci, M. G., Fontanesi, L., 2018. Preselection statistics and Random Forest classification identify population informative single nucleotide polymorphisms in cosmopolitan and autochthonous cattle breeds. *animal*, **12(1)**, 12-19.
- [90] Ren, R., Hung, T., Tan, K. C., 2018. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection, *IEEE transactions on cybernetics*, **48(3)**, 929-940.
- [91] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E., 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems*, 1097-1105.
- [92] Ciregan, D., Meier, U., Schmidhuber, J., 2012. Multi-column deep neural networks for image classification. In *Computer vision and pattern recognition (CVPR), 2012 IEEE conference on, June 16-21, RI, USA*, 3642-3649.
- [93] Faghieh-Roohi, S., Hajizadeh, S., Núñez, A., Babuska, R., De Schutter, B., 2016. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects, In *Neural Networks (IJCNN), 2016 International Joint Conference on, July 24-29, BC, Canada*, 2584-2589.
- [94] Li, Q., Ren, S., 2012. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **61(8)**, 2189-2199.
- [95] Santur, Y., Karaköse, M., Akın, E., Aydın, İ., 2015. Ray Yüzeylerindeki Hata Kontrolü İçin Yerel Normalizasyon Tabanlı Teşhis Yaklaşımı. Otomotik Kontrol Türk Milli Komitesi (TOK), , Sep 10-12, Denizli, Turkey, 1-6.
- [96] Santur, Y., Karaköse, M., Aydın, İ., Akın, E., 2016. IMU based adaptive blur removal approach using image processing for railway inspection. In *Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2016 International Conference on, May 23-25, Bratislava, Slovakia*, 1-4.
- [97] Santur, Y., Karaköse, M., Akın, E., 2018. An adaptive fault diagnosis approach using pipeline implementation for railway inspection. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **26(2)**, 987-998.
- [98] A. Ito, A. C. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, R.G. Baraniuk., 2014. Blurburst: Removing blur due to camera shake using multiple images, *ACM Trans. Graph.*, **3(1)**, 1-15.
- [99] L. Wang, Y. Hang, S. Luo, X. Luo, X. Jiang., 2011. Deblurring Gaussian-blur images: A preprocessing for rail head surface defect detection, *Service Operations Logistics and Informatics (SOLI) 2011 IEEE International Conference on, July 10-12, Beijing, China*, 451-456.
- [100] Nvidia, C. U. D. A., 2010. Programming guide.

- [101] S. O. Madgwick, 2010. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, *Report x-io and University of Bristol (UK)*, **25**, 1-32
- [102] Mti User Manual., 2014. *Xsens Technologies B. V.*
- [103] Davis, J., Goadrich, M., 2006. The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning, June 25-29, NY, USA*, 233-240.
- [104] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E., 2016. Choquet Fuzzy Integral Based Condition Monitoring and Analysis Approach Using Simulation Framework for Rail Faults. IEEE International Conference on Industrial Informatics In *International Conference (INDIN), July 19-21, Poitiers, France*, 345-350.
- [105] Auephanwiriyaikul, S., Keller, J. M., Gader, P. D., 2002. Generalized Choquet fuzzy integral fusion. *Information fusion*, **3**(1), 69-85.
- [106] Blender, I., 1998. Blender corporation. Holland.
- [107] Hiller, J. D., Lipson, H., 2009. STL 2.0: a proposal for a universal multi-material Additive Manufacturing File format. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 266-278.
- [108] Matlab, The Mathworks Inc., Natwick, MA (USA),
- [109] [Online]. Available: <http://www.partner3d.com/apa-itu-file-stl-dan-bagaimana-cara-membukanya/cad-vs-stl-1/>
- [110] Karaköse, M., Aydin, I., Akin, E., 2010. The intelligent fault diagnosis frameworks based on fuzzy integral, In *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, June 14-16, Pisa, Italy, 1634-1639.
- [111] Barry, A. J., Oleynikova, H., Honegger, D., Pollefeys, M., Tedrake, R., 2015. Fast onboard stereo vision for uavs. In *Vision-based Control and Navigation of Small Lightweight UAV Workshop, International Conference On Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1-7.
- [112] Corti, A., Giancola, S., Mainetti, G., Sala, R., 2016. A metrological characterization of the Kinect V2 time-of-flight camera. *Robotics and Autonomous Systems*, **75**, 584-594.
- [113] Kjaer, K. H., Ottosen, C. O., 2015. 3D laser triangulation for plant phenotyping in challenging environments. *Sensors*, **15**(6), 13533-13547.
- [114] AT C5-1600CS19-500 User Manuel, 2010.
- [115] Franca, J. G. D., Gazziro, M. A., Ide, A. N., Saito, J. H., 2005. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view, In *Image Processing, IEEE International Conference on ICIP*, Sep 14, Genova, Italy, 1-425.
- [116] Peng, X. K. Y. C. Z., LIANG, J., 2010. 3D Detection Technique of Surface Defects for Steel Rails Based on Linear Lasers, *Journal of Mechanical Engineering*, **8**, 003.
- [117] Gibert, X., Patel, V. M., & Chellappa, R., 2015. Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection, In *Applications of Computer Vision (WACV), IEEE Winter Conference on*, Jan 5-9, HI, USA, 694-701.
- [118] Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Kudlur, M., 2016. TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning, In *OSDI*. 16, Aug 22, Boston, USA, 265-283.
- [119] Jordan, M. I., Mitchell, T. M., 2015. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects, *Science*, **349**(6245), 255-260.

- [120] Lee, V. W., Kim, C., Chhugani, J., Deisher, M., Kim, D., Nguyen, A. D., Singhal., 2010. Debunking the 100X GPU vs. CPU myth: an evaluation of throughput computing on CPU and GPU. *ACM SIGARCH computer architecture news*, **38(3)**, 451-460.
- [121] Zhan, D., Yu, L., Xiao, J., Chen, T., 2015. Multi-camera and structured-light vision system (MSVS) for dynamic high-accuracy 3D measurements of railway tunnels. *Sensors*, **15(4)**, 8664-8684.
- [122] Aytekin, Ç., Rezaeitabar, Y., Dogru, S., Ulusoy, I., 2015. Railway fastener inspection by real-time machine vision. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **45(7)**, 1101-1107.
- [123] Siddiqui, A. A., 2015. *A New Inspection Method Based on RGB-D Profiling* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [124] Jarzebowicz, L., Judek, S., 2014. 3D machine vision system for inspection of contact strips in railway vehicle current collectors. In *Applied Electronics (AE), 2014 International Conference on, Sept 9-10, Pilsen, Czech Republic*, 139-144.
- [125] Gao, Z., Ge, M., Li, Y., Shen, W., Zhang, H., Schuh, H., 2018. Railway irregularity measuring using Rauch–Tung–Striebel smoothed multi-sensors fusion system: quad-GNSS PPP, IMU, odometer, and track gauge. *GPS Solutions*, **22(2)**, 36.
- [126] Marz, N., Warren, J., 2015. *Big Data: Principles and best practices of scalable realtime data systems*, Manning Publications Co.
- [127] Chen, M., Mao, S., Liu, Y., 2014. Big data: A survey. *Mobile networks and applications*, **19(2)**, 171-209.
- [128] Li, Q., Zhong, Z., Liang, Z., Liang, Y., 2015. Rail inspection meets big data: methods and trends. In *Network-Based Information Systems (NBIS), 2015 18th International Conference on, Sept 2-4, Taipei, Taiwan*, 302-308.
- [129] Dede, E., Govindaraju, M., Gunter, D., Canon, R. S., Ramakrishnan, L., 2013. Performance evaluation of a mongodb and hadoop platform for scientific data analysis, In *Proceedings of the 4th ACM workshop on Scientific cloud computing, June 17, NY, USA*, 13-20.
- [130] Shim, K., 2012. MapReduce algorithms for big data analysis. *Proceedings of the VLDB Endowment*, **5(12)**, 2016-2017.
- [131] Chen, X. W., Lin, X., 2014. Big data deep learning: challenges and perspectives. *IEEE access*, **2**, 514-525.
- [132] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E., 2017. Big data framework for rail inspection, IEEE on In *Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Sept 16-17, Malatya, Turkey*, 1-6.
- [133] Gibert, X., Patel, V. M., Chellappa, R., 2017. Deep mul titask learning for railway track inspection. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, **18(1)**, 153-164.
- [134] Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E., 2017. A new rail inspection method based on deep learning using laser cameras, IEEE on In *Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Sept 16-17, Malatya, Turkey*, 1-6.
- [135] Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K., Winn, J., Zisserman, A., 2010. The pascal visual object classes (voc) challenge. *International journal of computer vision*, **88(2)**, 303-338.

EK-1. AT C5-1600CS19-500

Bu tez çalışmasında, deneysel ve saha ortamında AT C5-1600CS19-500 lazer kamera kullanılmıştır. Lazer kamera beslemesi için güç kaynağı ile bağlantısı Şekil EK-1.1'de verilmiştir. Tablo EK-1.1'de ise lazer kamer özellikleri verilmiştir.



Şekil Ek-1.1. Lazer kamera güç kaynağı bağlantısı

Tablo EK-1.1 Lazer kamera özellikleri

Özellik	Açıklama
Gri seviye resim dosyası formatı	.tiff, .png
Görüntü çözünürlüğü	1600×1088 8/16-bit gri seviye
3d dosya formatı	.xyz, .raw
Profil boyutu	1600×16 bit
3D ölçüm hassasiyeti (yatay, düşey)	313x15 mikrometre
Ölçüm hızı	25.000 HZ
Veri haberleşmesi - Ethernet	1 Gbit/sn - Ethernet
Görüş açısı genişliği	500 mm
Çalışma menzili	700mm ±250mm
Çalışma gerilimi	5-24 V

Labels in the image:

- Anlık Görüntü
- Canlı Görüntü
- Görüntü Modu Ayarları
- 3D Modu Ayarları
- Görüntü Penceresi
- Bilgi Penceresi
- Aygıt Ayarları
- Görüntü Analiz Penceresi

208

ÖZGEÇMİŞ

Yunus SANTUR, 1979 yılında Elazığ'da doğmuş, ilk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlamıştır. 1996-2011 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde lisans eğitimini tamamlamıştır. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Kemaliye Hacı Ali Akın Meslek Yüksek Okulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazanmış ve 2009 yılında yüksek mühendis ünvanını almıştır. 2011 yılında vatanini görevini Hakkari Çukurca'da jandarma olarak yapmıştır. 2012 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalında doktora eğitimine başlamıştır. 2015 yılında yatay geçişle Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalına geçerek doktora eğitimine devam etmiştir. Halen Fırat Üniversitesi Enformatik bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.