DEMİRYOLU RAYLARI İÇİN GERÇEK ZAMANLI BULANIK OTOMATA İLE GÖRME TABANLI ARIZA TEŞHİS SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Yük. Müh. Orhan YAMAN

Doktora Tezi
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE

AĞUSTOS-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU RAYLARI İÇİN GERÇEK ZAMANLI BULANIK OTOMATA İLE GÖRME TABANLI ARIZA TEŞHİS SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Orhan YAMAN

(141129201)

Anabilim Dalı: Bilgisayar Mühendisliği

Programı: Yazılım

Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18/07/2018

AĞUSTOS-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU RAYLARI İÇİN GERÇEK ZAMANLI BULANIK OTOMATA İLE GÖRME TABANLI ARIZA TEŞHİS SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Orhan YAMAN

(141129201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 18.07.2018
Tezin Savunulduğu Tarih: 09.08.2018

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE (F.Ü)**

Diğer Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ (A.Ü)**

Doç. Dr. Arif GÜLTEN (F.Ü)

Doç. Dr. İlhan AYDIN (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Mahmut SİNECEN (A.D.Ü)

AĞUSTOS-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, demiryolu rayları için bulanık otomata ile görme tabanlı kalite kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir. Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak demiryolu sisteminde özellik çıkarımı yapılmaktadır. Bulanık otomata tabanlı yöntemler geliştirilerek durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır. Hazırladığım bu tez çalışmasının da bu amaç doğrultusunda faydalanılabilir bir kaynak olmasını umuyorum.

Bu çalışmada değerli vaktini bana ayırarak çalışmamın bitirilmesinde her türlü desteğini esirgemeyen sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE'ye teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Danışmanım olarak her konuda benim için harcadığı zaman ve çabalardan ötürü tekrar teşekkür ediyorum.

Ayrıca, hayatımın her anında ilgi, anlayış ve her türlü desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

TEŞEKKÜR

Bu tezde geliştirilen yöntemler Ekim 2014-Eylül 2016 yılları arasında 114E202 nolu TÜBİTAK 1001 araştırma projesi ile desteklenmiştir. Tezdeki yazılımsal ve donanımsal uygulamaların temin edilmesinde maddi desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna teşekkür ederim.

Bu tezde yapılan çalışmalar Aralık 2016-Kasım 2018 yılları arasında MF.16.65 nolu FUBAP Doktora Tezi Araştırma Projesi ile desteklenmiştir. Tezdeki uygulamaların geliştirilmesinde maddi desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Orhan YAMAN
ELAZIĞ - 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **II**
İÇİNDEKİLER ..... **III**
ÖZET ..... **VIII**
SUMMARY ..... **IX**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **X**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **XVI**
SEMBOLLER LİSTESİ ..... **XVIII**
KISALTMALAR LİSTESİ ..... **XIX**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Demiryolu Hattındaki Bazı Kavramlar 1
1.2. Durum İzleme ve Arıza Teşhisi 2
1.3. Literatür Özeti 3
1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı 20
1.5. Tezin Yapısı 23
2. DEMİRYOLU BİLEŞENLERİ VE ARIZALARI **25**
2.1. Demiryolu Bileşenleri 25
2.1.1. Ray 26
2.1.2. Travers 26
2.1.3. Balast 27
2.1.4. Makas 28
2.1.5. Bağlantı Malzemeleri 28
2.2. Demiryolu Arızaları 30

Sayfa No

2.2.1. Ray Mantarında Oluşan Oval Boşluklar 32
2.2.2. Ray Mantarında Oluşan Yatay Çatlaklar 33
2.2.3. Ray Mantarında Oluşan Düşey Çatlaklar 34
2.2.4. Ray Mantarında Oluşan Kısa Dalga Boylu Ondülasyon 35
2.2.5. Ray Mantarında Oluşan Uzun Dalga Boylu Ondülasyon 36
2.2.6. Ray Mantarında Oluşan Yanal Aşınma 37
2.2.7. Ray Mantarında Oluşan Düşey Aşınma 38
2.2.8. Ray Yüzeyinin Kabuklanması 39
2.2.9. Ray Mantarında İç Köşe Kabuklanması 40
2.2.10. Ray Mantarında Oluşan Kılcal Çatlaklar 41
2.2.11. Ray Mantarında Oluşan Tekerlek Yanığı 42
2.2.12. Ray Mantarı Yüzeyinde Çökme 43
2.2.13. Ray Mantar-Gövde Birleşim Yerinde Yatay Çatlak..... 44
2.2.14. Ray Gövde-Taban Birleşim Yerinde Yatay Çatlak 45
2.2.15. Ray Gövdesinde Oluşan Düşey Çatlak..... 45
2.2.16. Ray Gövdesinde ve Tabanında Korozyon 46
2.2.17. Ray Gövdesinde Oluşan Çapraz Çatlaklar 47
2.2.18. Ray Tabanında Oluşan Düşey Çatlak..... 48
2.2.19. Alüminotermit Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak 48
2.2.20. Alüminotermit Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak 49
2.2.21. Yakma Alın Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak 49
2.2.22. Yakma Alın Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak 50
2.2.23. Elektrik Ark Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak 50
2.2.24. Elektrik Ark Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak 50

Sayfa No

2.3. Ray Bağlantı Elemanları Arızası 50
2.4. Ray Arızaları Tespit Yöntemleri 51
2.4.1. Ultrasonik Yöntemi 52
2.4.2. Girdap Akımları Yöntemi 53
2.4.3. Radyografi Yöntemi 53
2.4.4. Sıvı Penetrant Yöntemi 54
2.4.5. Manyetik İndüksiyon Yöntemi 55
2.4.6. Görme Tabanlı Yöntemler 55
3. KARMAŞIK BULANIK OTOMATALAR 57
3.1. Sonlu Durum Makineleri ve Otomatalar 57
3.2. Bulanık Mantık ve Bulanık Otomatalar 60
3.2.1. Bulanık Mantık 61
3.2.2. Bulanık Mantık Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi 64
3.2.3. Bulanık Otomatalar ve Ayrık Olay Sistemleri 67
3.2.4. Bulanık Otomata Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi 73
3.3. Karmaşık Bulanık Mantık ve Karmaşık Bulanık Otomatalar 78
3.3.1. Karmaşık Bulanık Mantık 78
3.3.2. Karmaşık Bulanık Mantık Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi 81
3.3.3. Karmaşık Bulanık Otomata 86
3.3.4. Karmaşık Bulanık Otomata Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi 88
3.4. Bölüm Değerlendirmesi 92
4. ÖNERİLEN RAY BİLEŞEN TESPİT YÖNTEMLERİ 95
4.1. Deney Aracının Geliştirilmesi ve Görüntü Alma Ortamının Oluşturulması 95
4.2. Ray Bileşenlerinin Tespiti ve Durum İzlemesi için Karar Ağacı Tabanlı Bir Yaklaşım 99
4.2.1. Önerilen Yöntem 100

Sayfa No

4.2.2. Deneysel Sonuçlar 109

4.3. Ray Yüzey ve Bileşenleri için PSO Tabanlı Teşhis Yaklaşımı 113

4.3.1. Önerilen Yöntem 114

4.3.2. Deneysel Sonuçlar 119

4.4. Bölüm Değerlendirmesi 125

5. ÖNERİLEN RAY YÜZEYİ İZLEME VE ARIZA TEŞHİS YÖNTEMİ 126

5.1. Oto Korelasyon Tabanlı Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi 126

5.1.1. Önerilen Yöntem 127

5.1.2. Deneysel Sonuçlar 130

5.2. Ray Yüzeyi Arıza Türünün Tespiti İçin Bulanık Mantık Tabanlı Bir Yöntem 135

5.2.1. Önerilen Yöntem 136

5.2.2. Deneysel Sonuçlar 142

5.3. Bölüm Değerlendirmesi 146

6. TERMAL GÖRÜNTÜ İŞLEME VE DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ . 147

6.1. Ray Yüzey İzleme için Termal Görüntü İşleme Tabanlı Bir Yöntem 147

6.1.1. Önerilen Yöntem 148

6.1.2. Deneysel Sonuçlar 150

6.2. Demiryollarında Kestirimci Bakım için Karmaşık Bulanık Sistem Tabanlı Termografi Yaklaşımının Geliştirilmesi 153

6.2.1. Önerilen Yöntem 153

6.2.2. Deneysel Sonuçlar 159

6.3. Demiryollarında Termal Görüntüler Kullanılarak Karmaşık Bulanık Otomata Tabanlı Arıza Tespit Yöntemi 161

6.3.1. Önerilen Yöntem 162

6.3.2. Deneysel Sonuçlar 167

6.4. Bölüm Değerlendirmesi 169

Sayfa No

7. SONUÇLAR 171
KAYNAKLAR 175
ÖZGEÇMİŞ 190

ÖZET

Demiryolu araçları, yolcu ve kargo taşımacılığında dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yüksek hızlı demiryolu araçlarının gelişmesiyle birlikte ray hatlarının güvenliği çok önemli hale gelmiştir. Ulaşım güvenliğinin sürekli olarak sağlanması için demiryolu hattındaki bileşenlerin düzenli aralıklarla muayene edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, demiryolu raylarındaki arızaların teşhis edilebilmesi için gerçek zamanlı, bulanık otomata yapısı kullanan görüntü işleme tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Tez kapsamında öncelikle karmaşık bulanık otomata yapısı ortaya konulmuş ve uygulanabilirliği sağlanmıştır. Daha sonra ray hatlarındaki ray yüzeyi, bağlantı elemanları, traversler ve diğer bileşenlerdeki olası aşınma, kırılma, çatlama veya ondülasyon gibi arızaların teşhisine yönelik görüntü işleme tabanlı temassız yöntemler geliştirilmiş ve deneysel sonuçları verilmiştir.

Tez kapsamında üç temel noktada bilimsel katkı ve yenilik sunulmuştur. İlk olarak tezde bulanık otomataların gerçek zamanlı uygulanabilirliği araştırılmış ve karmaşık bulanık otomatalar geliştirilmiştir. Daha sonra görüntü işleme uygulaması üzerinde karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Uygun şartlarda karmaşık bulanık mantık kullanan otomataların avantajları irdelenmiştir. İkinci olarak, tezde ray yüzey ve bileşenlerindeki arızaların teşhisine yönelik gerçek zamanlı uygulanabilen ve yaklaşık 100 km/h hızla giden bir tren üzerinde çalışabilecek yapıda yöntemler sunulmuştur. Üçüncü olarak ise tezde raylardaki bazı hataların tespiti ve durum izlemesi için termal görüntü kullanan teknikler sunulmuş ve deneysel görüntüler üzerinden doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, bu doktora tez çalışması kapsamında hızlı görüntü alan kameralar kullanılarak raylardaki çoğu arızaların tespiti için yeni yöntemler önerilmiş ve bunların performansları deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar 114E202 numaralı TUBİTAK 1001 araştırma projesi ve MF.16.65 numaralı FUBAP doktora tezi araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Raylı sistemler, Arıza teşhisi, Bulanık otomata, Karmaşık bulanık mantık, Görüntü işleme.

SUMMARY

DEVELOPMENT OF VISION BASED FAULT DIAGNOSIS SYSTEM WITH REAL TIME FUZZY AUTOMATA FOR RAILWAYS

Railway vehicles are widely used in our country as well as in the world for passenger and cargo transportation. With the development of high-speed railway vehicles in recent years, the safety of rail lines has become very important. The components of the railway line must be inspected at regular intervals in order to ensure continued safety of transport.

In this thesis study, image processing based methods using real time, fuzzy automata structure has been developed in order to diagnose failures in railway tracks. Within the scope of the thesis firstly complex fuzzy automata structure has been put forward and its applicability has been achieved. Image processing based contactless methods were then developed to diagnose failures such as possible wear, fracture, cracking or undulation in track surfaces, joints, transverses and other components on rail tracks, and experimental results are given.

Scientific contribution and innovation are presented in three main points within the thesis. First, the real-time feasibility of fuzzy automata in the thesis has been researched and complex fuzzy automata have been developed. Then comparative results were obtained on image processing application. Advantages of complex fuzzy logic automata have been explored. Secondly, there are built-in methods that can be implemented on a train that can be applied in real time to diagnose faults in track surfaces and components in the thesis and run at a speed of about 100 km/h. Thirdly, techniques using thermal image for detection and condition monitoring of some errors on the rail in the thesis are presented and verified on experimental images.

As a result, in this doctoral thesis, new methods for detecting most failures on the rail were suggested using fast imaging cameras and their performance was verified by experimental results. The studies carried out within the scope of the thesis were supported by the research project of TUBITAK 1001 numbered 114E202 and FUBAP PhD thesis research project of numbered MF.16.65.

Key Words: Rail systems, Fault diagnosis, Fuzzy automata, Complex fuzzy logic, Image processing.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Durum izleme ve arıza tespiti için kullanılan temassız yöntem 3
Şekil 1.2 Literatürde önerilen karar ağacı tabanlı yöntem 4
Şekil 1.3 Literatürde önerilen ikili desen tabanlı yöntemin akış şeması 6
Şekil 1.4 Literatürde önerilen demiryolu denetim sisteminin genel mimarisi 7
Şekil 1.5 Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek 8
Şekil 1.6 Veri işleme modülünün akış şeması 8
Şekil 1.7 Önerilen demiryolu denetim sisteminin genel mimarisi 9
Şekil 1.8 Literatürde önerilen ray yüzey arızası tespit yöntemi 10
Şekil 1.9 Literatürde önerilen ray yüzey tanıma ve arıza tespit yönteminin akış şeması 11
Şekil 1.10 Literatürde önerilen üç aşamalı yöntemin akış şeması 12
Şekil 1.11 Spalling görüntü işlemenin akış şeması 13
Şekil 1.12 Literatür akış şeması 14
Şekil 1.13 Literatürde önerilen yöntemin akış şeması 14
Şekil 1.14 Literatürdeki çalışmanın blok şeması 15
Şekil 1.15 Literatürde önerilen yöntemin akış şeması 15
Şekil 1.16 Literatürde önerilen yöntem 16
Şekil 1.17 Demiryolu bileşenlerinde hata tespiti için geliştirilen yöntemin düzeneği ve yöntem için işlem akışı 17
Şekil 1.18 Tez çalışması kapsamında geliştirilen sistemin genel mimarisi 21
Şekil 2.1 Demiryolu hattının genel bileşenleri 25
Şekil 2.2 Demiryolu rayları 26
Şekil 2.3 Demiryolu travers türleri 27
Şekil 2.4 Demiryolunda balast görüntüleri 27
Şekil 2.5 Örnek bir makas geçiş sistemi ve bileşenleri 28

Sayfa No

Şekil 2.6 Rayı raya bağlayan malzemeler 29
Şekil 2.7 Rayı traverse bağlayan bağlantı malzemeleri 30
Şekil 2.8 Örnek bir ray üzerinde sıklıkla oluşan arızalar 32
Şekil 2.9 Ray mantarında oluşan oval boşluk arızasına ait örnek görüntü 33
Şekil 2.10 Ray mantarında oluşan yatay çataklara ait örnek görüntü 34
Şekil 2.11 Ray mantarında oluşan düşey çatlaklara ait örnek görüntü 35
Şekil 2.12 Ray yüzeyinde oluşan kısa dalga boylu ondülasyon görüntüsü 36
Şekil 2.13 Ray yüzeyinde oluşan uzun dalga boylu ondülasyon görüntüsü 37
Şekil 2.14 Ray mantarında oluşan yanal aşınma arızasına ait örnek görüntü 38
Şekil 2.15 Ray mantarında oluşan düşey aşınma arızasına ait görüntü 39
Şekil 2.16 Ray yüzeyindeki kabuklanma arızasına ait örnek görüntü 39
Şekil 2.17 Ray mantarında iç köşe kabuklanmasına ait örnek görüntü 40
Şekil 2.18 Ray mantarının iç köşesinde oluşan kılcal çatlak görüntüsü 41
Şekil 2.19 Ray yüzeyinde oluşan tekrarlı tekerlek yanığı görüntüsü 43
Şekil 2.20 Ray yüzeyinde çökme arızası görüntüsü 44
Şekil 2.21 Ray mantarı ile gövde birleşim yerindeki yatay çatlak arızası görüntüsü 44
Şekil 2.22 Ray gövdesi ile tabanı arasındaki yatay çatlak görüntüsü 45
Şekil 2.23 Ray gövdesinde oluşan düşey çatlak görüntüsü 46
Şekil 2.24 Ray tabanında oluşan korozyon arızası görüntüsü 47
Şekil 2.25 Ray gövdesinde çapraz çatlak kusuru 47
Şekil 2.26 Ray tabanında oluşan düşey çatlaktan dolayı oluşan kırık 48
Şekil 2.27 Bağlantı bileşeni arızaları 51
Şekil 2.28 Rayların manuel olarak ultrasonik yöntemle muayene edilmesi 52
Şekil 2.29 Demiryolu hattında rayların girdap akımları yöntemi ile muayene edilmesi 53
Şekil 2.30 Radyografi yönteminin temel yapısı 54
Şekil 2.31 Penetrant sıvısının uygulanması 54
Şekil 2.32 Manyetik indüksiyon ve ultrasonik test aracına ait görüntü 55
Şekil 2.33 Görme tabanlı yöntem kullanan örnek demiryolu aracı 56

Sayfa No

Şekil 3.1 Örnek bir sonlu durum makinesi için geçiş diyagramı 58
Şekil 3.2 Örnek bir sonlu durum otomatın geçiş diyagramı 60
Şekil 3.3 Bulanık mantıkta yaygın kullanılan üyelik fonksiyonları 62
Şekil 3.4 Bulanık mantık yaklaşımının genel gösterimi 63
Şekil 3.5 Bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yöntemi 64
Şekil 3.6 Gri görüntüden alınan 3x3 boyutundaki matrisler 65
Şekil 3.7 Önerilen yöntemde kullanılan üyelik fonksiyonları 65
Şekil 3.8 Önerilen yöntem için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları 67
Şekil 3.9 Bulanık otomata için örnek geçiş diyagramı 70
Şekil 3.10 Otomata ile ayrık bir olay sistemin modellenmesi 71
Şekil 3.11 Bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yöntemi 73
Şekil 3.12 Önerilen bulanık otomata yapısı 74
Şekil 3.13 Bulanık otomata geçiş diyagramı 75
Şekil 3.14 Önerilen yöntem için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları 77
Şekil 3.15 Karmaşık bulanık kümesi ve mimarisi 79
Şekil 3.16 Önerilen karmaşık bulanık mantık tabanlı yöntemin akış şeması 82
Şekil 3.17 Gri görüntü üzerinde yatay ve dikey hesaplama 82
Şekil 3.18 Önerilen yöntemde kullanılan üyelik fonksiyonları 83
Şekil 3.19 Önerilen karmaşık bulanık mantık yöntemi için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları 85
Şekil 3.20 Önerilen karmaşık bulanık otomata yönteminin akış şeması 88
Şekil 3.21 Önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı 90
Şekil 3.22 Karmaşık bulanık otomata geçiş diyagramı 91
Şekil 3.23 Önerilen karmaşık bulanık otomata yöntemi için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları 92
Şekil 3.24 Uygulamaların karşılaştırılması için kullanılan örnek görüntüler 92
Şekil 3.25 Örnek görüntüler için elde edilen sonuçlar 94
Şekil 4.1 Deney aracının bilgisayar ortamındaki çizimi 96
Şekil 4.2 Gerçek bir demiryolu tekerinin ve rayın ölçüleri 96
Şekil 4.3 Oluşturulan deney aracı görüntüsü 97
Şekil 4.4 Demiryolu aracının demiryolu hattı üzerine yerleştirilmiş görüntüleri 98

Sayfa No

Şekil 4.5 Deney aracı üzerine kurulan kamera ve diğer malzemeler 98
Şekil 4.6 Ray bileşen tespiti için önerilen yaklaşım 101
Şekil 4.7 Canny kenar çıkarım algoritmasının akış şeması 102
Şekil 4.8 Canny kenar çıkarım adımların örnek görüntüde uygulanması 104
Şekil 4.9 Hough dönüşümün sözde kodu 105
Şekil 4.10 Karar ağacı yapısı 106
Şekil 4.11 Önerilen yöntemde geliştirilen deneysel düzenek 109
Şekil 4.12 Beton traverse ait bir demiryolundan alınan örnek görüntüler 110
Şekil 4.13 Örnek görüntüler üzerinde ray yüzeyinin incelenmesi 112
Şekil 4.14 Önerilen yöntemin blok şeması 114
Şekil 4.15 Önerilen yöntemin akış şemaları 115
Şekil 4.16 Demiryolu görüntüsüne korelasyon katsayısı kullanılarak ray yüzeyinin tespit edilmesi 116
Şekil 4.17 PSO'nun akış diyagramı 118
Şekil 4.18 Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak demiryolu bileşen tespiti 118
Şekil 4.19 Görüntü alımında kullanılan deneysel yapı 119
Şekil 4.20 Ahşap traverse sahip olan demiryolu hattından alınan görüntüler ve bu görüntülere önerilen yöntemin uygulanması 120
Şekil 4.21 Beton traverse sahip olan demiryolu hattından alınan görüntüler ve bu görüntülere önerilen yöntemin uygulanması 121
Şekil 4.22 Ahşap, beton traverslere sahip demiryolu için bağlantı bileşeni tespiti ve ray yüzeyi için korelasyon değerleri 122
Şekil 4.23 Sonuçların birleştirilmesi ve durum izleme 124
Şekil 5.1 Önerilen yöntemin blok şeması 127
Şekil 5.2 Önerilen yöntemin akış şeması 128
Şekil 5.3 Görüntüden oto korelasyon değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi 129
Şekil 5.4 Örnek bir görüntüden elde edilen sinyaller ve ray yüzeyinin tespit edilmesi..... 130
Şekil 5.5 Dört kameradan alınan örnek görüntüler ve elde edilen sonuçlar 131

Sayfa No

Şekil 5.6 Ahşap traverse sahip demiryolu hattında makas tespiti örneği 132
Şekil 5.7 Sağlam ve arızalı ray yüzeyi görüntüleri ve sonuçları 133
Şekil 5.8 Örnek ray yüzeyi görüntüleri kullanılarak ray yüzeyi arıza teşhisi ve ray yüzeyi durum izleme yapılması 134
Şekil 5.9 Önerilen yöntemde kullanılan akış şeması 136
Şekil 5.10 Örnek görüntü üzerinde Otsu yönteminin uygulanması 138
Şekil 5.11 Görüntüden varyans değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi 139
Şekil 5.12 Örnek bir sinyal üzerinden yeni özeliklerin elde edilmesi 140
Şekil 5.13 Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları 141
Şekil 5.14 Örnek görüntüler 142
Şekil 5.15 Ray yüzeyi tespiti ve varyans değerleri 143
Şekil 5.16 Öznitelik sinyalinin normalize ve aşıma işlemi 144
Şekil 6.1 Önerilen yöntemin mimarisi 148
Şekil 6.2 Örnek bir termal görüntüye Watershed yönteminin uygulanması 149
Şekil 6.3 Örnek görüntü üzerinde ray tespiti ve durum izleme 150
Şekil 6.4 Kameradan alınan normal görüntüler 151
Şekil 6.5 Kameradan alınan termal görüntüler 151
Şekil 6.6 Ray yüzey durum izleme ve arıza tespiti 152
Şekil 6.7 Bir ülkeye ait tahmini verilerle oluşturulan yıllık sıcaklık grafiği 154
Şekil 6.8 Giriş üyelik fonksiyonları için kullanılan yıllık tahmini sıcaklık ve gün ışığı grafiği 154
Şekil 6.9 Karmaşık giriş üyelik fonksiyonları 155
Şekil 6.10 Önerilen ray yüzey tespiti yöntemi ve ray birleşim noktası tespit yönteminin akış şeması 156
Şekil 6.11 Örnek bir görüntüde ray yüzeyinin tespit edilmesi ve iki ray arası mesafenin ölçülmesi 157
Şekil 6.12 İki ray arası mesafenin izlenmesi için önerilen çıkış üyelik fonksiyonu 158
Şekil 6.13 Farklı mevsim şartlarında alınan termal görüntüler ve ray yüzey tespiti 159
Şekil 6.14 Farklı mevsim şartlarında ray birleşim noktasının tespiti ve iki ray arası mesafenin ölçülmesi 160
Şekil 6.15 Önerilen görüntü ve sinyal işleme akış şeması 162

Sayfa No

Şekil 6.16 Otsu yöntemi ile örnek görüntü üzerinde ray yüzey tespiti 163
Şekil 6.17 Ray yüzey görüntüsünden özellik sinyalinin elde edilmesi 163
Şekil 6.18 Örnek özellik sinyali 164
Şekil 6.19 Önerilen karmaşık bulanık otomata akış şeması 165
Şekil 6.20 Geçişler için kullanılabilecek üyelik fonksiyonları 165
Şekil 6.21 Önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı 166
Şekil 6.22 Bu çalışmada kullanılan örnek termal görüntüler 167
Şekil 6.23 Ray yüzey görüntüleri ve özellik sinyalleri 168
Şekil 7.1 Tez çalışması sonucunda elde edilen sistem 173

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1 Arıza teşhisi için literatürde kullanılan arızaların türlerine göre sınıflandırılması . 19
Tablo 2.1 Genel olarak bilinen ray arızalarına ait UIC kodları 31
Tablo 3.1 Durum geçiş ve çıkış fonksiyonları 58
Tablo 3.2 Sonlu durum otomatın geçiş tablosu 60
Tablo 3.3 Önerilen kural tablosu 66
Tablo 3.4 Önerilen bulanık otomatanın geçiş tablosu 76
Tablo 3.5 Önerilen bulanık mantık ve bulanık otomata ile kenar çıkarım işleminin başarı oranı 77
Tablo 3.6 Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu 84
Tablo 3.7 Örnek görüntüleri ile karmaşık bulanık sonucunun incelenmesi 86
Tablo 3.8 Önerilen karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata ile kenar çıkarımın başarı oranı 92
Tablo 4.1 Frame kamera, Lens, Frame Grabber kartına ait genel özellikler 99
Tablo 4.2 Demiryolu bileşen tespiti ve ray yüzeyi izleme için farklı durumlardaki doğruluk oranları 111
Tablo 4.3 Önerilen yöntemin performansı 112
Tablo 4.4 Bağlantı bileşen ve ray yüzeyi tespitinde eşik değerlerine göre başarı oranının değişimi 123
Tablo 4.5 Bağlantı bileşen tespiti ve ray yüzeyi için önerilen yöntemin çalışma süreleri ... 125
Tablo 5.1 Önerilen yöntemin çalışma performansı 135
Tablo 5.2 Önerilen kural tablosu 141
Tablo 5.3 Örnek görüntülerden elde edilen özellikler kullanılarak bulanık mantık sonucu 145
Tablo 5.4 Örnek görüntüler için hata matrisi 146
Tablo 6.1 Bu çalışmada kullanılan termal kameranın özellikleri 150
Tablo 6.2 Karmaşık giriş üyelik fonksiyonlarına ait aylık sıcaklık, gün ışığı, modül ve faz değerleri 156

Sayfa No

Tablo 6.3 Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu 158
Tablo 6.4 Örnek ray görüntüleri ile karmaşık bulanık sonucunun incelenmesi 161
Tablo 6.5 Önerilen karmaşık bulanık otomatanın geçiş tablosu 166
Tablo 6.6 Örnek görüntüler için karmaşık bulanık otomata ile ray analiz sonuçları 169

SEMBOLLER LİSTESİ

$\mathbf{x}$	: Pikselin yatay koordinatı
$\mathbf{y}$	: Pikselin dikey koordinatı
$\boldsymbol{m}$	: Doğrunun eğimi
$\boldsymbol{b}$	: Öteleme değeri
$\boldsymbol{\theta}$	: x ekseni ile doğruya gelen dikme arasındaki açı
$\boldsymbol{p}$	: Köşeden doğruya dik uzaklık
$\boldsymbol{K}$	: Eşik sınıf sayısı
$\boldsymbol{T_1}$	: İlk eşik değeri
$\boldsymbol{T_2}$	: İkinci eşik değeri
$\boldsymbol{T_3}$	: Üçüncü eşik değeri
$\boldsymbol{T_4}$	: Dördüncü eşik değeri
$\boldsymbol{C_k}$	: K sınıf sayısına ait gri seviye
$\boldsymbol{w_k}$	: Sıfırıncı dereceden birikimli momentleri

KISALTMALAR LİSTESİ

CCD : Charge Coupled Device

FPGA : Field Programmable Gate Array

RGB : Red, Green, Blue

R : Kırmızı

G : Yeşil

B : Mavi

PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu

UKR : Uzun Kaynaklı Ray

SKR : Sürekli Kaynaklı Ray

UIC : Uluslararası Demiryolu Birliği

IoT : Nesnelerin interneti

DVM : Destek Vektör Makineleri

IMU : Ataletsel Ölçü Birimi

TCDD : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları

1. GİRİŞ

Demiryolu ulaşımı, dünya genelinde uzun yıllardır kullanılmakta olan önemli bir ulaşım türüdür. Ülkemizde ise demiryolu ulaşımı, 1856 yılında 130 km'lik İzmir-Aydın arası demiryolu ağının kurulmasıyla başlamıştır [1]. Son yıllarda, ülkemizde olduğu gibi tüm dünyada demiryolu araçları daha da geliştirilerek, insanların yaygın olarak kullandığı hızlı ve konforlu bir ulaşım haline gelmiştir. Demiryolu araçları, ulaşımı sağlaması için bir ray hattına ihtiyaç duymaktadır. Bu devasa ve ağır araçların güvenli bir şekilde ulaşımı sağlayabilmesi için ray hattının sağlam olması son derece önemlidir [2]. Demiryolu ulaşımına ilginin daha da artması, bu ulaşımdaki aksaklıkların giderilmesi için çalışmaların artmasını tetiklemiştir. Bu hattı oluşturan en önemli bileşenler ray, travers ve bağlantı elemanlarıdır. Demiryolu bileşenlerinde oluşan hasarlar erken tespit edilip onarılmadıklarında büyük arızalara, kazalara ve maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle, demiryolu sistemlerinde kaliteli bir ulaşımın sağlanabilmesi için hattı oluşturan bileşenlerin sağlam olması gerekmektedir.

Demiryolu bileşenleri genel olarak temaslı ve temassız olmak üzere iki şekilde izlenmektedir. Temaslı izleme yöntemi için geliştirilen yapılar genellikle yavaş olup demiryolu bileşenleri ile temas halinde olması gerekmektedir [3]. Bu yöntemler günümüzde artık tercih edilmemekte ve bunun yerine temassız durum izleme yöntemleri daha çok tercih edilmektedir [3-5]. Bu yöntemlerde kullanılan kameralar ile demiryolu hattı temassız bir şekilde izlenmekte ve geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile demiryolu hattında oluşan arızalar tespit edilmektedir. Bu tür yöntemler daha hızlı çalışarak iş yükünü azaltmaktadır.

1.1. Demiryolu Hattındaki Bazı Kavramlar

Ray, demiryolu araçlarının hat üzerinde rahat hareket etmelerini sağlamak ve demiryolu araçlarının ağırlık ve etkilerini traverslere iletmek için döşenmiş, kimyasal bileşimi demir, karbon, silis, manganez, fosfor ve kükürt olan çubuklara denilmektedir [6]. Raylar mantar, gövde ve taban olarak adlandırılan üç bölümden oluşmaktadır.

Conta, rayların birbirlerine bağlandığı yolun ek yerlerine denilmektedir.

Travers, raydan gelen yükleri daha geniş bir yüzeye yayarak balasta ileten, üzerine rayların monte edildiği, iki paralel rayın aynı hizada belirlenen şekilde durmasını sağlayan üst yapı malzemesidir [7]. Traversler; demir, ahşap, beton ve plastik olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır.

Balast, platformun üstüne döşenen, traverslerin aralarını dolduran ve traverse yataklık eden sert ve sağlam taşlardan 30-60 mm ölçülerinde kırılmış keskin köşeli, kübik şekilli malzemelerdir [6]. Balastlar, traversten gelen yükleri platform üzerinde daha geniş alana homojen olarak yaymaktadır. Yolu sabit bir eksende tutmakta, yolu otlardan ve yağmur sularını süzmek suretiyle çamurdan korumaktadırlar [7].

Apleti, Genellikle hareket eden vagonun fren yapmasıyla tekerleğin dönmemesi durumunda ortaya çıkan, tekerleğin bir bölgesinde aşınmadan dolayı oluşan düzleşmedir [6].

Makas, raylı sistem yolu üzerinde hareket eden demiryolu araçlarının diğer bir yola geçmesini sağlayan yol değiştirme mekanizmasına denilmektedir [7, 8].

Kurp, farklı doğrultudaki yolları birleştiren yolun eğri kısımlarına kurp denilmektedir. Yolun farklı doğrultudaki doğru kesimlerini birleştirmek için kullanılmaktadır. Daire parçalarından oluşan kurplar, seyahat güvenliği ve yolcu konforu için oldukça önemlidir.

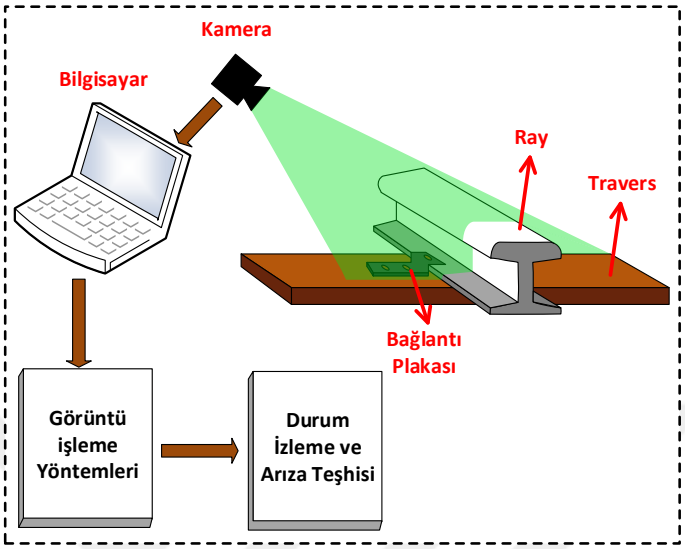
Dever, kurplarda belirli bir hızda giden araçları savurmak isteyen merkezkaç kuvvetini zararsız hale getirmek için dış rayın iç raya oranla belirli bir miktar yükseltilmesine denilmektedir [6]. Standart ray hattında bu eğim en fazla 150 mm, hızlı tren hattında ise en fazla 180 mm'dir [6].

Ekartman, döşenmiş iki rayın, ray mantarı iç yanakları arasında kalan yatay mesafeye denmektedir. TCDD'de bu açıklık 1435 mm'dir [6]. Bu değer UIC (Dünya Demiryolları Birliği) standartlarınca belirlenmiş bir değerdir.

1.2. Durum İzleme ve Arıza Tespiti

Günümüzde demiryolu hattını oluşturan bileşenlerin izlenmesi için temaslı ve temassız birçok yöntem geliştirilmiştir. Temaslı yöntemler genellikle bir araç veya uzman personel aracılığıyla yapılmaktadır. Bu yöntemler oldukça maliyetli ve zaman almaktadır. Ayrıca temaslı yöntemlerde durum izleme yapılırken, ray ve diğer bileşenlere hasar verme oranı yüksektir. Literatürde mevcut çalışmalar incelendiğinde temassız yöntemlerin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu tezde demiryolu bileşenlerinde ve ray yüzeylerinde

oluşan arızaların tespit edilmesi için görüntü işleme tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Şekil 1.1'de durum izleme ve arıza teşhisi için kullanılan temassız yöntemin yapısı verilmiştir.



Şekil 1.1. Durum izleme ve arıza tespiti için kullanılan temassız yöntem

Şekil 1.1'de verildiği gibi bir kamera aracılığıyla demiryolu sisteminden görüntüler alınmaktadır. Elde edilen görüntüler üzerinde bazı görüntü işleme teknikleri kullanılarak durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Görüntü işleme tabanlı yöntemlerin geliştirilmesi için kurulan deneysel düzenekler oldukça basit olup, büyük maliyet gerektirmeyen yapılardır.

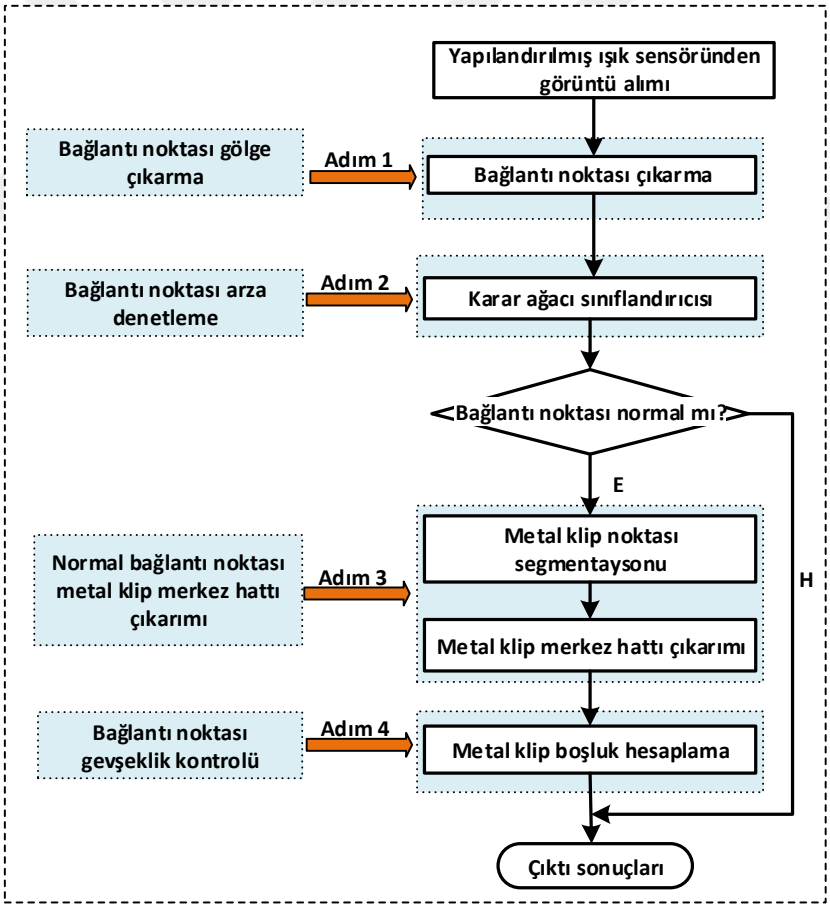
1.3. Literatür Özeti

Literatürdeki demiryollarında durum izleme ve arıza tespiti ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalar genel olarak demiryolu birleşenleri, ray yüzeyi ve ray hattı olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilmektedir. Demiryolu bileşenleri ile ilgili çalışmalarda genellikler ray, travers, bağlantı bileşenleri ve balast gibi bileşenler tespit edilerek durum izleme ve kusur tespiti yapılmaktadır [13-17].

Savato ve diğ. [18], demiryolu hattının deformasyonunu izlemek için desen izdüşümünü kullanmaya yönelik yeni bir yaklaşım önermiştir. Önerilen algılama yaklaşımında, vagona monte edilmiş bir algılama sistemi ile yaklaşık 100 km/h hızla hareket ederken izleme yapılmaktadır. İki kamera kullanılarak ray hattında bulunan traversler tespit edilmektedir.

Malathy ve diğ. [19], demiryolu hattını gerçek zamanlı izlemek ve ray çatlaklarını tespit etmek için bir yöntem önermiştir. Demiryolu hattında durum izleme ve arıza tespiti için Nesnelerin interneti (IoT) teknolojisini kullanmıştır. Geliştirilen modelde ultrasonik sensör kullanılarak ray çatlakları tespit edilmektedir. Çatlakların konumlarını izlemek için GPS alıcısı kullanılmaktadır. Ray çatlaklarını yetkililere bildirmek için GSM modül kullanılmaktadır. Ayrıca GPS ve GSM modüllerinin çalışmadığı baz istasyonlarından uzak bölgeler içinde bir kamera ile demiryolu izlenmektedir.

Mao ve diğ. [20], hasarlı ve gevşek ray bileşenlerinin tespiti için ışık sensörlerinin kullanıldığı bir yöntem önermiştir. Alınan görüntüler üzerinde özellik çıkarımı yapılarak karar ağacı ile bağlantı bileşenleri tespit edilmektedir. Karar ağacı sınıflandırıcısını kullanarak önerilen yöntemde %99.8 başarı elde etmiştir. Önerilen karar ağacı tabanlı yöntemin akış şeması Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Literatürde önerilen karar ağacı tabanlı yöntem [20].

Manikandan ve diğ. [21], (DVM) destek vektör makinesi sınıflandırıcısını kullanarak görüntü işleme tabanlı ray bileşen izleme ve hata tespiti yapmıştır. Ray hattından alınan görüntüler üzerinde ön işleme yaparak gabor filtresi kullanmaktadır. Elde edilen özellikler DVM sınıflandırıcısına verilip bağlantı bileşenin sağlam ya da arızalı olduğunu kontrol edilmektedir. Bu çalışmada %97.5 başarı sağlamıştır.

Feng ve diğ. [22], demiryolu bileşen analizi ve arıza tespiti için görme tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada iki kamera kullanılarak aynı anda ray hattının tamamı izlenmektedir. Elde edilen görüntüler üzerinde bağlantı bileşeni ve travers tespit edilmektedir. Önerilen yöntemin başarısı %99.4'dir.

Biswas ve diğ. [23], ray bağlantı bileşenlerinin tespiti, sınıflandırması ve kusur tespiti için gerçek zamanlı yeni bir yöntem önermiştir. Ray hattından yaklaşık 50 cm uzaklıkta kamera kullanarak RGB görüntü almaktadır. Alınan renkli görüntüleri öncelikle gri görüntüye dönüştürerek görüntü üzerinde özellik noktaları tespit etmektedir. Daha sonra özellik eşleştirme yaparak bağlantı bileşen elemanlarını tespit etmektedir.

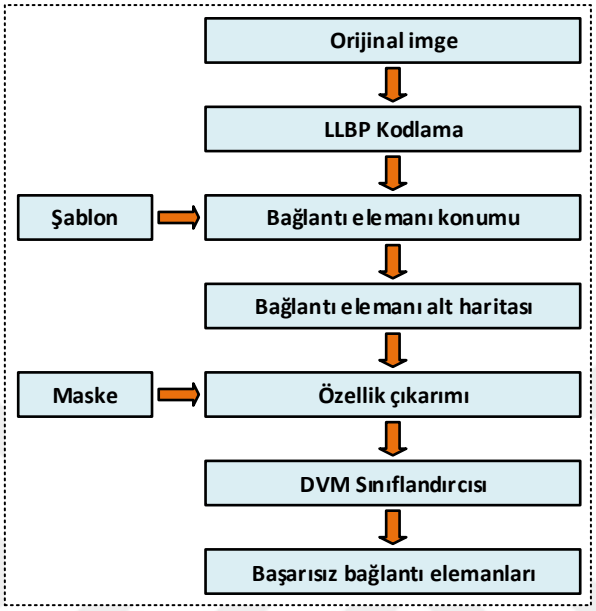
Liu ve diğ. [24], Demiryolu bağlantı bileşeni tespiti ve bu bileşenlerde oluşan kusurların tespit edilebilmesi için bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yöntem, orijinal test bağlantı bileşen görüntüsü kullanmaktadır. Bu görüntüler üzerinde ikili simetri örneğini kullanarak karşılıklı bağlantı bileşenlerini kontrol etmektedir. Bu çalışmada 110×170 piksel boyutunda 1500 adet görüntü kullanılmıştır.

Aytekin ve diğ. [25], gerçek zamanlı makine görmesi kullanarak demiryolu bağlantı bileşen izleme için bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem, lazer kamera kullanılarak ray hattını taramaktadır. Taranan ray hattı üzerinde bağlantı bileşenleri izlenerek eksik bağlantı elemanlarını tespit etmektedir.

Gibert ve diğ. [26], ray bileşen ve travers tespiti için durum izleme ve görme tabanlı bir yöntem önermiştir. DVM algoritmasını kullanarak bağlantı bileşeni görüntüleri üzerinde sınıflandırma yapmaktadır. Bu çalışmada 160×160 piksel boyutunda görüntüler kullanılarak %99.7 başarı elde edilmiştir. Gibert ve diğ. [27], bir başka çalışmasında demiryolu bileşenlerin tespit edilebilmesi için derin öğrenme tabanlı yeni bir yöntem geliştirmiştir.

Fan ve diğ. [28], yüksek hızlı trenlerde bağlantı bileşenlerinin tespiti için lokal ikili desen tabanlı bir yöntem önermiştir. Merkez noktası ile üst ve alt bölgeler arasındaki ilişkiyi ele alan çizgiyi tespit etmek için ikili kodlama yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, bağlantı elemanlarının ana bileşenlerini etkili bir şekilde temsil etmiştir. Birçok yöntemle

karşılaştırıldığında, önerilen yöntem, özellikle aydınlatma ve arka planın uygun olmadığı gerçek veri kümelerinde başarılı olmuştur. Fan ve diğ. [28] önerdiği yöntemin akış şeması Şekil 1.3'te verilmiştir.

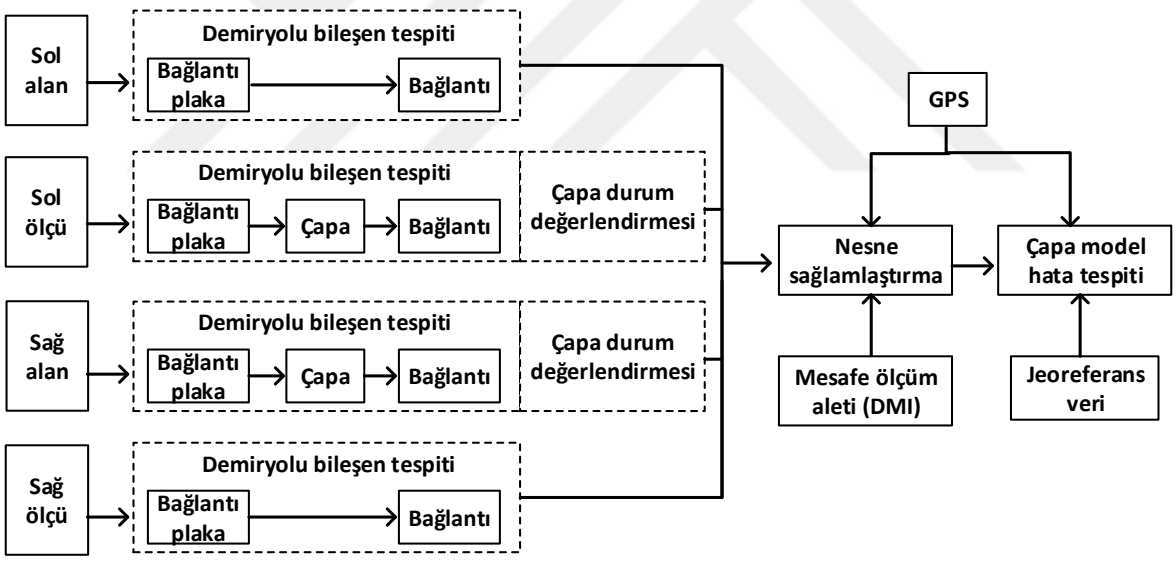


Şekil 1.3. Literatürde önerilen ikili desen tabanlı yöntemin akış şeması [28].

İkili desen tabanlı yöntemin test edilmesi için 4000 sağlam görüntü, 1000 kısmen eksik bağlantı bileşeni ve 1000 tamamen eksik bağlantı bileşeni görüntüsü kullanılmıştır. 820×350 piksel renkli görüntüler kullanılmıştır. Bu görüntüler üzerinde bağlantı bileşeni tespit edilerek ana görüntü üzerinden 104×64 boyutunda görüntü kareleri elde edilmektedir. Yuan ve diğ. [29], dalgacık dönüşümü ve şablon eşleştirme kullanarak bağlantı bileşenlerinin tespiti için bir program geliştirmiştir. Önerilen yöntemin hızlı olabilmesi için 2048×2048 boyutundaki görüntüler 128×128 piksel boyutunda küçültülmüştür. Liu ve diğ. [30], demiryolu bağlantı kusurlarının tespiti için bilgisayar görmesi kullanmıştır. Orijinal test bağlantı elemanları görüntüsünün birinci ve ikinci simetri örneğini oluşturmak için eksen-simetrik yapıdan yararlanmıştır. Birinci ve ikinci görüntü üzerinde bir şablon kullanılarak bağlantı bileşenleri tespit edilmektedir. Geliştirilmiş temsile dayalı bağlantı elemanları tanıma için birinci ve ikinci resmi birleştirmiştir. Önerilen yöntemde 1500 örnek görüntü üzerinde %91.7 oranda başarı sağlanmıştır. Krummenacher ve diğ. [31], makine öğrenmesi kullanarak demiryolu araçlarının tekerleklerinde oluşan arızaları tespit etmiştir. Tekerlek yüzeyinde oluşan bir hata ray yüzeyi ile teması sırasında titreşime neden olmaktadır. Bu nedenle titreşim sensörleri kullanılarak veri seti oluşturulmuştur.

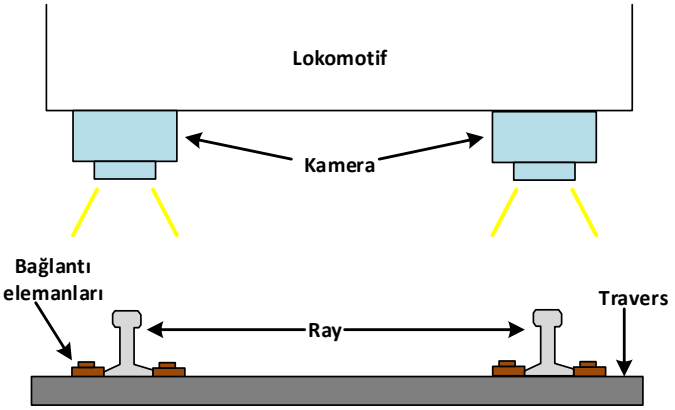
Oluşturulan veri seti derin öğrenme ile birlikte kullanılarak arıza tespiti yapılmıştır. Askarinejad ve diğ. [32], ray birleşme noktalarını izlemek için gerilim temelli bir yöntem geliştirmiştir. Tekerlek yükü detektörü kullanarak ray bağlantı noktalarındaki kuvveti ölçmektedir. Elde edilen sonuçları referans ray hattı ile karşılaştırarak bağlantı noktasındaki arızaları tespit etmektedir. Laboratuvar ortamında geliştirilen deneysel düzenek ile referans ray hattını kalibre etmiştir.

Trinh ve diğ. [33], mesafe ölçüm aleti, GPS sensörü ve 4 kamera kullanarak demiryolu ray bileşenlerinin algılanması için bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntemde görüntü işleme tabanlı otomatik denetim sistemi geliştirilmiştir. Bağlantı plakalarının ve diğer bileşenlerin algılanması için Hough dönüşümünü kullanarak yatay çizgileri tespit etmiştir. Sobel kenar çıkarımı kullanarak kenar çıkarımı yapılmış ayrıca önerilen yöntemde bağlantı plakalarının yanı sıra bağlantı noktaları ve çapalar tespit edilerek konumları belirlenmiştir. Önerilen bu yöntemde geliştirilen yöntemin genel mimarisi Şekil 1.4'te verilmiştir.



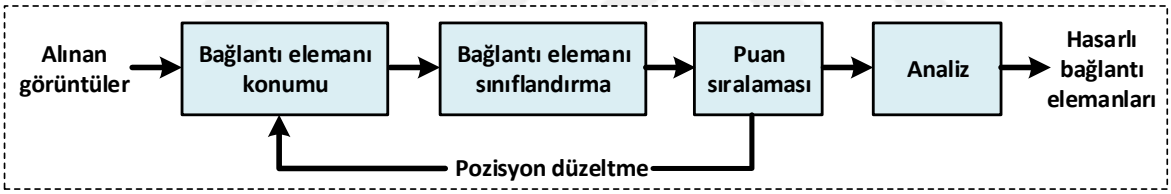
Şekil 1.4. Literatürde önerilen demiryolu denetim sisteminin genel mimarisi [33]

Şekil 1.4'te verilen literatürde dört kamera kullanılarak demiryolunda farklı konumlardan görüntüler almıştır. Kameralardan alınan görüntüler üzerinde görüntü işleme yapılarak bağlantı plakaları ve bağlantı noktaları tespit edilmiştir. Feng ve diğ. [34] demiryolu bağlantı elemanları, travers ve rayın tespiti için görme tabanlı bir yöntem önermiştir. Demiryolundan alınan görüntüler üzerine görüntü işleme yöntemleri uygulanarak bileşen tespiti yapılmıştır. Üç farklı bağlantı elemanı için önerilen yöntem test edilmiştir. Geliştirilen deneysel düzenek Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5. Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek [34]

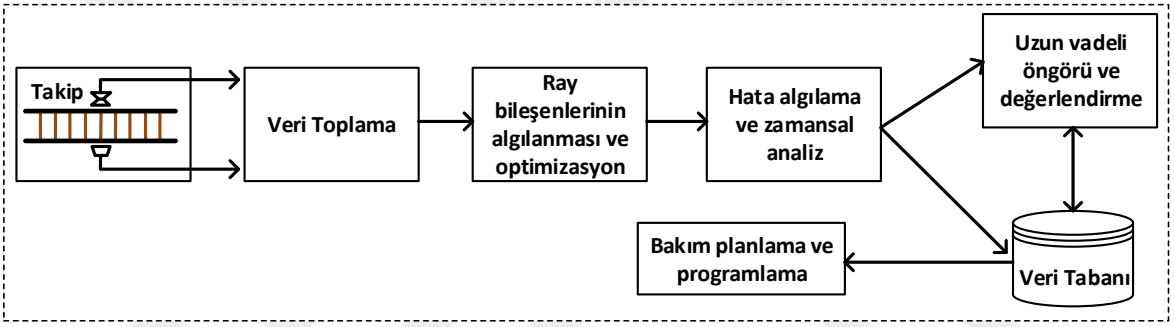
Önerilen yöntemde deneysel düzenek kullanılarak 560×900 piksel boyutunda görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinde bağlantı bileşen konum tespiti, bağlantı bileşenleri sınıflandırılması ve puan sıralaması yapılmaktadır. Görüntüler üzerinde line segment detector LSD algoritması kullanılarak ray tespiti, travers tespiti ve travers tahmini yapılmıştır. Veri işleme modülünün akış şeması Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Veri işleme modülünün akış şeması [34]

Önerilen yöntemde %95.2 başarı ile bağlantı elemanlarının tespiti yapılmıştır. Önerilen yöntemin test edilmesi için 110 km uzunluğundaki bir demiryolu hattı kullanılarak 57124 görüntü alınmıştır. Alınan görüntülerde toplam 399078 adet bağlantı bileşeni tespit edilmiştir. Görüntülerde tespit edilen bağlantı elemanlarının boyutu 110×160 pikseldir. Önerilen yöntemde, kullanılan diğer algoritmalarda test edilerek sonuçlar alınmıştır. Babenko [35] yapmış olduğu doktora çalışmasında demiryolu hattında bileşen tespiti ve arıza tespiti yapmıştır. Demiryolu ray yüzeyi ve bağlantı elemanlarını tespit ederek bu bileşenlerde oluşan arızaları ve şekilsel bozuklukları tespit etmektedir. Clark ve diğ. [36], demiryolunun en önemli parçalarından biri olan balastın termal olarak incelenmesi için bir çalışma önermiştir. Farklı koşullarda demiryollarından görüntüler alınarak balastın görüntüsünde oluşan sıcaklık değişimi izlenmektedir. Temiz ve kirli balast görüntüleri

kullanılarak testler yapılmıştır. Ying ve diğ. [37], Otomatik ray takip muayene için demiryolu bileşen algılama, optimizasyon ve değerlendirilmesi için bir yöntem önermiştir. Önerilen bu yöntemde 16 km/h hızla ilerleyen bir trende, 20 fps ile görüntüler alınmıştır. Alınan demiryolu görüntüleri üzerinde; ray, çapa, bağlantı, bağlantı plaka ve eklem çubuğu tespit edilmektedir. Demiryolu bileşenleri tespiti için görüntü üzerinde Sobel operatörü ile kenar çıkarımı yapılarak bileşenlerin kenarları elde edilmektedir. Elde edilen kenar çıkarım görüntüsü üzerine Hough dönüşümü uygulanarak görüntüdeki kenarların konumları tespit edilmektedir. Tespit edilen demiryolu bileşenlerinin konumları ve mevcut durumları incelenerek bileşenler hakkında analizler yapılmıştır. Önerilen demiryolu denetim sisteminin genel mimarisi Şekil 1.7'de verilmiştir.

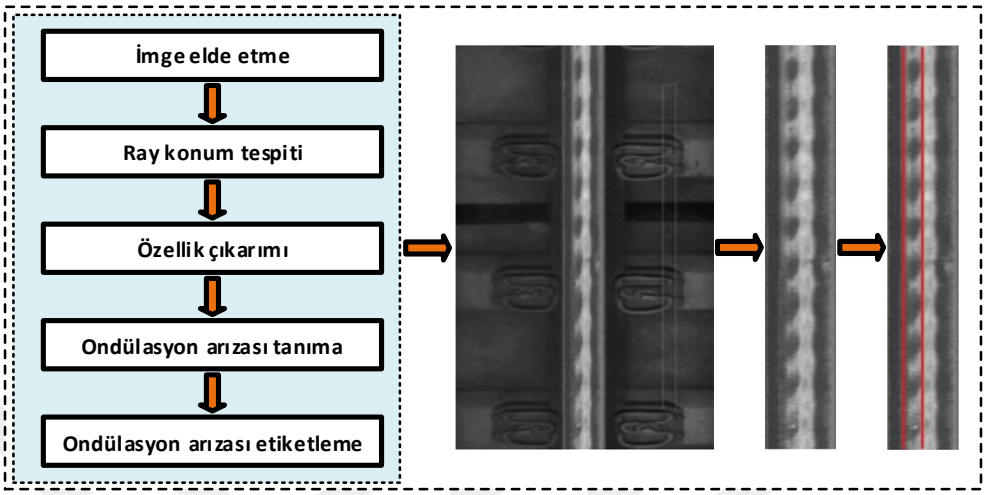


Şekil 1.7. Önerilen demiryolu denetim sisteminin genel mimarisi [37]

Önerilen Batch algoritmasının elde edilen sonuçları diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemde kullanılan GPS sensörü ile oluşan arızaların konum bilgileri kaydedilerek demiryolu hattındaki bileşenlerin durum analizleri bir veri tabanında kaydedilmiştir. Sawadisav [38], hataların bulunmasına yönelik bir çalışma sunmuştur. Çalışmada, Federal Demiryollarından alınan kaza bilgileri kullanılarak potansiyel hata durumlarını tanımlamıştır. Görüntü toplama sistemi için, 30 fps özelliğinde bir kamera 12 inç yükseklikte ve 30 derece açıyla yerleştirilmiştir. Nesne tanıma için, örnek örüntü bilgisi kullanılmıştır. Bu çalışmada iki farklı algoritma önerilmektedir. Birinci algoritma, bağlantı bileşenlerinin belirlenmesi, ikincisi ise kenar ve içerik belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda, sonuçlar farklı hata türleri için verilmiştir.

Demiryolu hattında ray yüzeyinde oluşan arızaların tespit edilebilmesi için literatürde birçok çalışma mevcuttur [39-43]. Li ve diğ. [44], ray yüzey arızalarının tespiti için siber destekli, görme tabanlı bir kontrol sistemi önermiştir. Geliştirilen deney düzeneğinde ışık kaynağı kullanılarak alınan görüntülerin dış ortamdan etkilenmemesi sağlanmıştır. Alınan

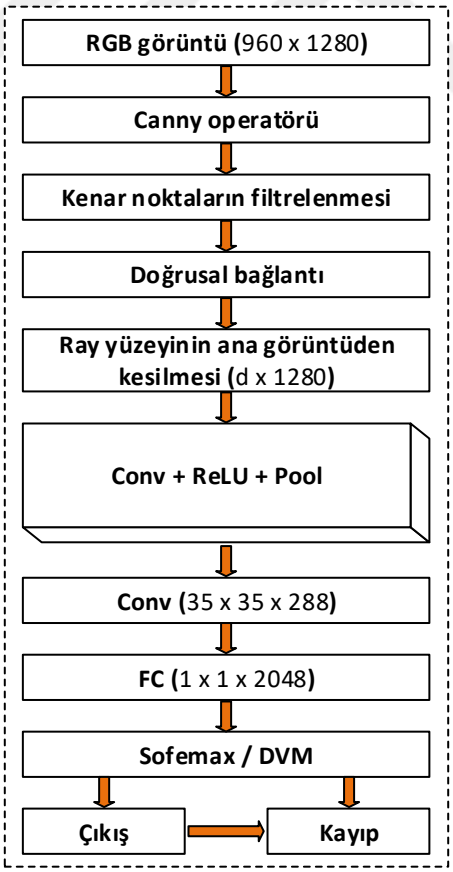
görüntüler üzerinde ray yüzey arızasının tespit edilebilmesi için geliştirilen yöntemin akış şeması Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8. Literatürde önerilen ray yüzey arızası tespit yöntemi [44].

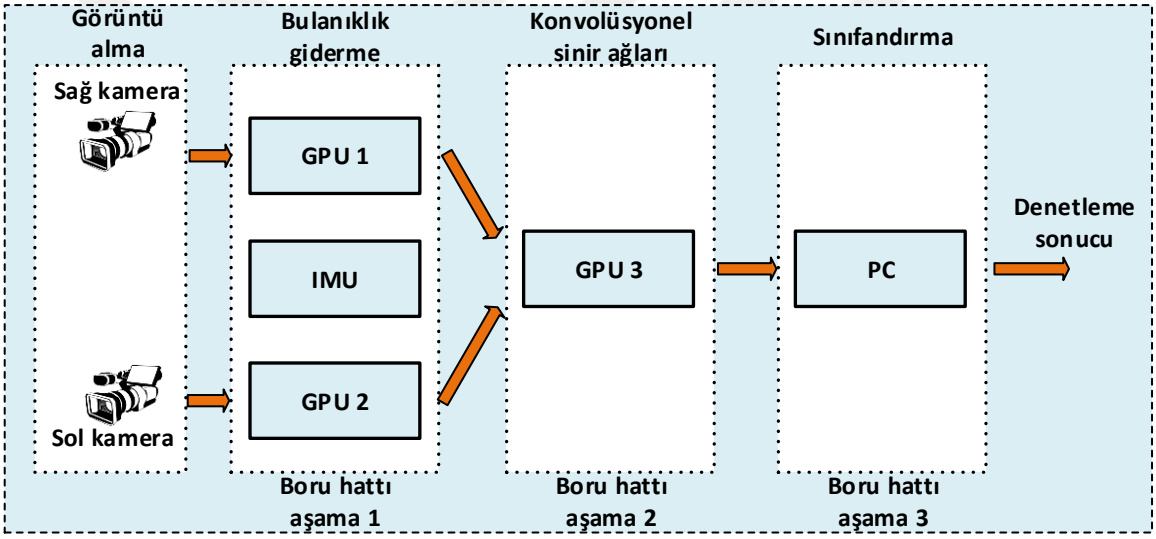
Literatürde önerilen yöntemde iki veri seti kullanılmıştır. Birinci veri setinde 400 adet ray yüzey görüntüsü kullanılmıştır. İkinci veri setinde 800 sağlam 200 arızalı toplamda 1000 ray yüzey görüntüsü kullanılmıştır. Bir görüntü karesi 16.6 ms'de yaklaşık %99 başarı oranı ile çalışmaktadır. Zhuang ve diğ. [45], ray yüzey arızalarının otomatik görme tabanlı tespit edilebilmesi için bir çerçeve önermiştir. Bir eğitim veri seti kullanarak kaskatı sınıflandırma yapmışlardır. Görüntü üzerinde öncelikle ray yüzeyi tespit edilerek ray yüzeyi görüntüsü üzerinde özellik çıkarımı yapılmaktadır. Özellik çıkarımı yaparken Haar-like yöntemini kullanmıştır. Görüntüde bölütleme yapmak için Otsu yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan görüntü boyutları 512×512 pikseldir. Geliştirilen yöntemin çalışma hızı ortalama 24 ms'dir. Min ve diğ. [46], makine görmesi ile ray yüzey arızaları için gerçek zamanlı tespit yöntemi sunmuştur. İçerisinde led ışıklandırma sisteminin bulunduğu bir deney aracı oluşturularak görüntü alınmıştır. Yöntemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için ön işleme adımında hedef görüntü tespit edilerek ana görüntüden çıkarılmaktadır. Önerilen yöntem; görüntü alma, hedef alanın tespiti, görüntü elde etme, kusur tespiti ve arızaların kullanıcıya bildirilmesi olmak üzere beş adımdan oluşmaktadır. Biao ve diğ. [47], adaptif arka plan çıkarımı yöntemi ile görüntü segmentasyonu tabanlı ray yüzey kusur tespiti yapılmıştır. Ray görüntüsü üzerinde tüm satırları tarayıp mevcut satır üzerindeki piksel değerleri kullanılarak bir sinyal elde edilmiştir. Sinyal üzerindeki ani değişimler ray yüzeyinde kusur olarak algılanmaktadır. Geliştirilen yöntemde ray

yüzeyindeki blok kusurlar %83.17, lineer kusurlar ise %78.54 oranda tespit edilmiştir. Andersson [48] yapmış olduğu tez çalışmasında ray yüzey arızalarının oluşumunu incelemiştir. Ray yüzeyinde oluşan arızaları modellemiştir. Gan ve diğ. [49], hiyerarşi çıkarım tabanlı ray yüzey denetleme sistemi geliştirmiştir. Kurulan deneysel düzenek ile alınan ray yüzey görüntüleri ön işleme adımından geçmektedir. Elde edilen görüntü üzerinde kaba çıkarıcı ve ince çıkarıcı yöntemleri kullanılarak ray yüzey arızaları ortaya çıkarılmıştır. Ray yüzeyi görüntüsü sonucuna son işlem yapılarak ray yüzey arızaları net bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Shang ve diğ. [50], derin öğrenme kullanarak ray yüzey arızalarının tespiti için görüntü tanıma ve sınıflandırma yöntemi önermiştir. $960x1280$ piksel boyutunda görüntü üzerinde ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi görüntüleri derin öğrenme yöntemi ile birlikte kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır. Önerilen yöntemde orijinal görüntüler kullanıldığında başarı oranı yaklaşık %92 iken ray yüzey görüntüsünün kesilerek alındığı görüntü üzerinde başarı oranı yaklaşık %95'tir. Literatürde önerilen ray yüzey tanıma ve arıza tespiti yönteminin akış şeması Şekil 1.9'da verilmiştir.



Şekil 1.9. Literatürde önerilen ray yüzey tanıma ve arıza tespiti yönteminin akış şeması [50]

Santur ve diğ. [51], demiryolu denetleme ve arıza teşhisi için boru hattı uygulaması kullanarak adaptif bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yöntem üç aşamalı bilgisayar görmesinden oluşmaktadır. İlk olarak, üç aşamalı bir boru hattı mimarisi uygulanarak sol ve sağ ray hatlarından alınan görüntülerde IMU destekli bulanıklık algılaması gerçekleştirilmiş ve derin öğrenme kullanılmıştır. Üçüncü test aşamasında, anomali tespit ve sınıflandırma eğitimi yapılmıştır. Uygulamayı grafik işlem üniteleri üzerinde paralel programlamayla gerçekleştirerek, görüntü işlemeye dayalı ve gerçek zamanlı olarak çalışabilen, son derece hassas, düşük maliyetli bir bilgisayarlı görüntü kontrol sistemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürde önerilen üç aşamalı yöntemin akış şeması Şekil 1.10'da verilmiştir.

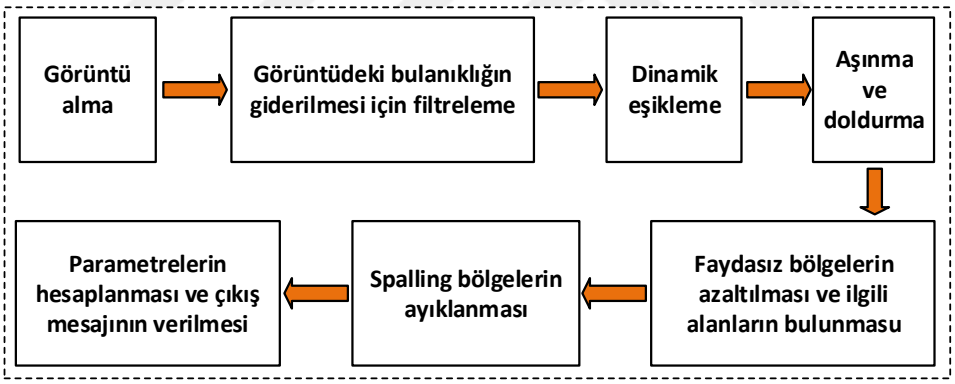


Şekil 1.10. Literatürde önerilen üç aşamalı yöntemin akış şeması [51]

Faghih-Roohi ve diğ. [52], ray yüzey arızalarının tespiti için derin konvolüsyonel sinir ağı tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Ray yüzeyinde oluşan altı farklı arıza türü için 700 kilometrelik ray hattı izlenerek toplamda 22408 adet görüntü kullanılmıştır.

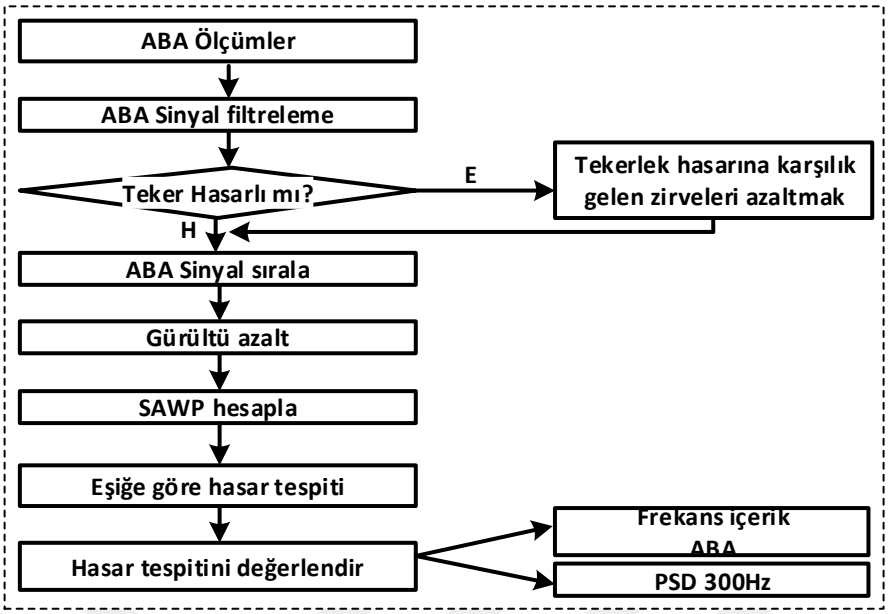
Hu ve diğ. [53], ray yüzey arızaları için görme tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Öncelikle demiryolu görüntüsünden ray yüzeyi algılanarak ilgisiz alanlar ortadan kaldırılmaktadır. Görüntüdeki gürültüyü azaltmak için Gaussian filtrenin iki boyutlusu kullanılmıştır. Filtrelenmiş görüntü üzerinde bir eşik değer uygulanarak ray yüzeyindeki arızalar tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarda, önerilen yaklaşımın %93.5 başarılı olduğu görülmektedir.

Quingyong ve diğ. [54], görüntü işleme tabanlı temassız bir yöntem geliştirerek ray yüzeyinde oluşan arızaları gerçek zamanlı tespit etmişlerdir. Ray görüntülerinden parça çıkarımı yapılarak ray yüzeyi çıkarılmıştır. Çıkarılan ray yüzeylerinden kontrast arttırma yöntemi ile yüzey arızaları bulunmuştur. Bu yöntem sadece ray yüzeyini tespit ederek yüzey arızalarını bulmaktadır. Tastimur ve diğ. [55], ray yüzey arızalarının tespiti için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önermiştir. Demiryoluna ait görüntüler alarak Hough dönüşümü ile ray yüzeyini tespit etmiştir. Ray yüzeyi üzerinde morfolojik işlemler kullanarak ray yüzey arızalarını tespit etmiştir. Liu ve diğ. [56], çalışmasında, ray yüzeyi kusurlarının muayenesi için yapay görme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Ray yüzeyinde oluşan spalling arızaları, çatlaklar ve diğer birçok arıza analiz edilmiştir. Demiryolu görüntüsüne görüntü segmantasyonu ve bazı özellik çıkarım yöntemleri uygulanmıştır. Arızalı bölge görüntüden çıkarılarak dinamik eşleştirme yapılmaktadır. Ray yüzeyinde oluşan çatlakların boyutu hesaplanarak kusur değerlendirmesini Şekil 1.11'deki yöntem ile önermiştir.



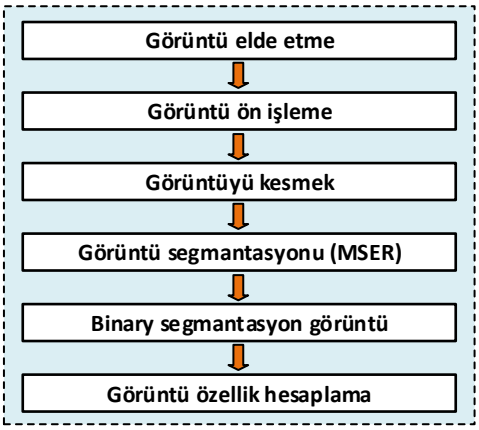
Şekil 1.11. Spalling görüntü işlemenin akış şeması [56]

Bocciolone ve diğ. [57], ray yüzeyinde oluşan arızaların tespiti için sinyal işleme tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde trenin demiryolu hattında gitmesi sırasında ortaya çıkardığı titreşim sinyalleri kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri üzerinden sinyal işleme yöntemleri geliştirerek arıza tespiti yapılmaktadır. Maria ve diğ. [58], demiryolu hattında ray yüzeyi arızalarının tespiti için titreşim tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Trenin tekerinin üzerine titreşim sensörü yerleştirerek demiryolu hattı boyunca sinyal elde etmişlerdir. Elde edilen sinyaller üzerine dalgacık dönüşümü kullanarak ray yüzeyinde oluşan arızaları tespit edilmiştir. Kullandığı yöntemin akış şeması Şekil 1.12'de verilmiştir.



Şekil 1.12. Literatür akış şeması [58].

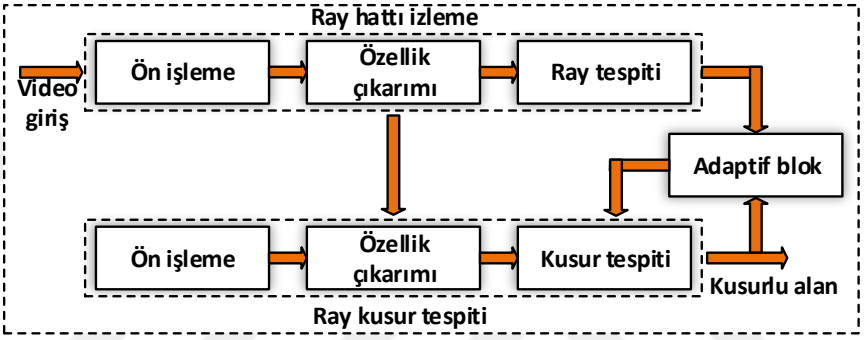
Ashwani ve diğ. [59] demiryolu ray arızalarının tespiti için görüntü segmantasyonu tabanlı bir yöntem önermişlerdir. 'Maksimum Kararlı Ekstremal Bölge İşareti' yöntemi kullanarak ray yüzeyinde oluşan arızaları tespit etmişlerdir. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1.13'te verilmiştir.



Şekil 1.13. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması [59].

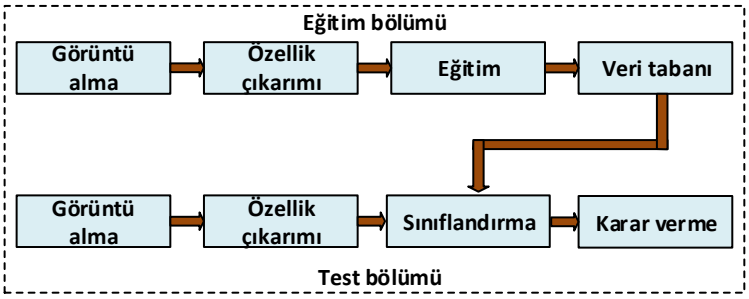
Xiaoqing ve diğ. [60], ray yüzeyi arızalarının tespiti için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Termal kameralar kullanarak ray yüzeyi görüntüsü almışlardır. Termal görüntüler üzerinde görüntü işleme yapılarak ray yüzey arızaları tespit edilmiştir. Ke ve diğ. [61], ray yüzey durum izleme için sınıflandırma yöntemi önermişlerdir. Ray

yüzeyi görüntüsü üzerinde kenar çıkarımı ve segmentasyon ile sınıflandırma yapmaktadır. Michael ve diğ. [62], ray yüzeylerinde oluşan arızaların tespiti için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde ray yüzeyi yakın kameralar ile izlenmektedir. Böylece ray yüzeyinde oluşan çok küçük hasarlar tespit edilmektedir. Canan ve diğ. [63], ray kusur tespiti ve sınıflandırması için gerçek zamanlı görüntü işleme yöntemi önermiştir. Görüntü işleme yöntemleri kullanarak ray yüzeyleri ve ray kusurları tespit edilmiştir. Sınıflandırma algoritmaları kullanarak ray kusurlarını sınıflandırmıştır. Ray yüzey tespiti ve ray kusurları sınıflandırma yöntemlerinin blok şeması Şekil 1.14'te verilmiştir.



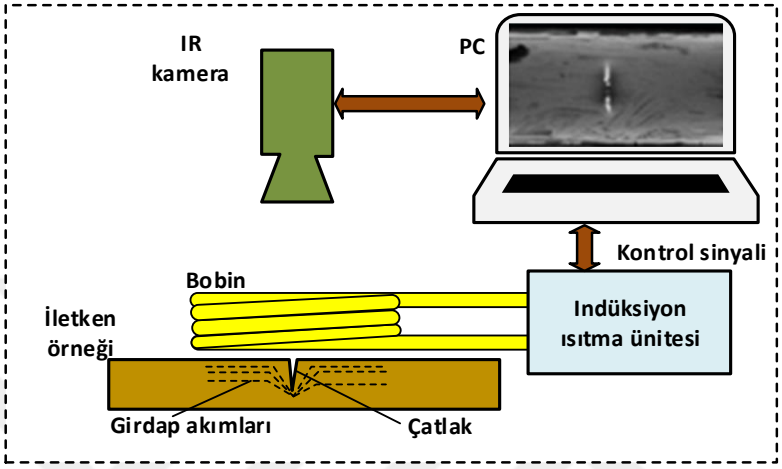
Şekil 1.14. Literatürdeki çalışmanın blok şeması [63].

Yunus ve diğ. [64], öncelikle arızasız ray hattı içeren bir video görüntü üzerinde özellik çıkarımı yapmışlardır. Daha sonra yine arızasız ray hattını içeren görüntü üzerinde sanal arızalar oluşturularak özellik çıkarımı yapılmış ve bu iki veri grubu arızalı ve sağlam olarak etiketlenerek sistem eğitilmiştir. Test aşamasında algoritma arızalı ve sağlam çerçeveler içeren yeni bir video görüntü üzerinde uygulanmış, çalışma süresi ve doğruluk performansı ölçülmüş ve bir karar mekanizması oluşturulmuştur. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması [64]

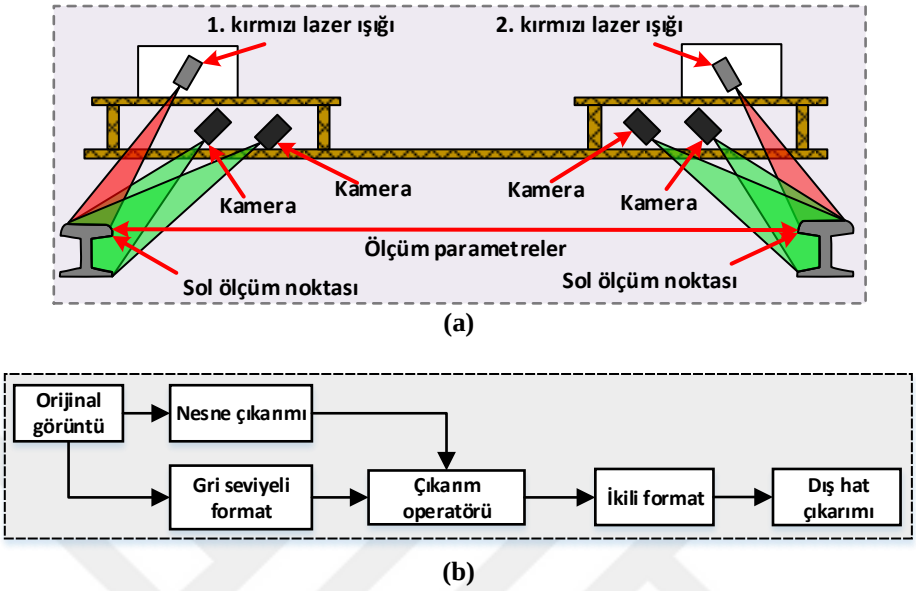
Wilson ve diğ. [65], demiryolu ray yüzeyinde oluşan arızaların tespit edilebilmesi için termal görüntü kullanmışlardır. Öncelikle ray yüzeyinin belirli bir parçası ısıtılmaktadır. Bu ısıtma sonucunda termal görüntü ile ray izlenmektedir. Ray izleme ve arıza tespiti için önerilen yöntem Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16. Literatürde önerilen yöntem [65]

Şekil 1.16'da verilen bu yöntemin uygulanması oldukça maliyetli ve uzun zaman almaktadır. Chen ve diğ. [66], basınçtan kaynaklanan kırık ve çatlakların belirlenmesi için yöntem önermiştir. Çalışmanın temel işlemleri; görüntü toplama, özellik çıkarımı, hata tanımlama ve hata algılamadır. Benzerlik ölçümleri, matematiksel yöntemler ve örüntü tanıma süreçleri bulanık mantık kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, gerçek görüntüler üzerinde test edilerek elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada Bin ve diğ. [67], ayrık hataları ve kıvrılmaları bulmak için bilgisayar görmesi tabanlı bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemde iki temel birim vardır. Bunlar Görüntü Toplama Alt sistemi ve Görüntü Analiz Alt sistemi birimi, bir kamera ve 4 adet LED ışıktan oluşmaktadır. Bu birimden elde edilen görüntüler 1200×512 çözünürlüğüne sahiptir. Görüntü Analiz Altsistemi birimi üç işlemi yerine getirecek şekilde tasarlanmıştır ve ray izlerinin genişletilmesi, kontrast iyileştirilmesi ve hataların bölge tespiti işlemlerini yapmaktadır. Algoritmalardan elde edilen sonuçlar, toplam 600 adet görüntü kullanılarak test edilmiştir. Farklı bir çalışmada ise, Zheng ve diğ. [68], ray ölçüm noktalarının bulunması için gerçek zamanlı bir yöntem önerilmiştir. İşlemler, bir CCD kamera ve kırmızı lazer ışıkları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme safhasında, nesne tanıma, diferansiyel, adaptif eşik

bulunması, morfolojik işlemler kullanılmaktadır. Bu sistemin tasarımı ve süreçlerin akış diyagramı Şekil 1.17'de verilmektedir.



Şekil 1.17. Demiryolu bileşenlerinde hata tespiti için geliştirilen yöntemin düzeneği ve yöntem için işlem akışı [68]. **(a)** Sisteme ait tasarım. **(b)** Alınan orijinal görüntünün dış hat çıkarımı aşamasına kadar gördüğü işlemler.

Demiryolunda, lokomotifin tepesine sabitlenen kameralar ile ray hattı görüntüleri alınmaktadır. Bu görüntüler üzerinde ray hattı izlenerek kusur tespiti veya makas geçişleri tespiti yapılmaktadır [69-72]. Wohlfeil ve diğ. [73], çalışmasında, demiryolu hattında trenlerin çarpışmaması için demiryolu hat anahtarlarının tespitini yapmışlardır. Lokomotifin üzerine yerleştirilen kameradan demiryolu hattının görüntüsü alınmıştır. Alınan görüntüden demiryolu bileşenleri tespit edilerek makas geçişleri belirlenmiştir. Önerilen yöntem farklı bölgelerde farklı hava koşullarında test edilerek başarısı gözlemlenmiştir.

Birden fazla trenin bir demiryolu hattını kullanabilmeleri için makas sistemi geliştirilmiştir. Makas sistemi sayesinde trenler yön değiştirebilir, başka bir trene yol verebilir veya istasyonda bekleme noktalarına geçebilir. Makas sisteminin geliştirilmesi demiryolu hattını oldukça kullanılabilir hale getirmiştir. Bu nedenle demiryolu ulaşımı için makas sistemi büyük öneme sahiptir. Makas geçişleri sırasında aşırı sürtünme ve aşınma oluşmaktadır. Bu tür istemeyen durumlar, zamanla ray yüzeyinde büyük aşınmalar oluşturmaktadır. Bu aşınmaların erken teşhis edilmemesi durumunda büyük kazalar oluşabilmektedir. Oluşabilecek kazalar yolcular için yaralanmalara ve can kaybına neden

olabilir. Ayrıca kaza sırasında demiryolu hattı bir süreliğine trafiği aksatmaktadır ve büyük maddi kayıplar oluşmaktadır. Günümüzde demiryolu hattı belirli aralıklarla kontrol edilmekte ve oluşabilecek arızalar erken teşhis edilmektedir.

Makas sistemi ile ilgili birçok literatür çalışması yapılmıştır. Johansson ve diğ. [74], makas geçişi sırasında sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan aşınma arızalarının tespiti için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada Makas geçiş bileşenleri izlenmektedir. Makas geçişi sırasında tekerin raya temas etmesini simülasyon ile modellemiştir. Modelleme sonucunda raya gelebilecek yüklere göre gözlem yapmıştır. Palsson [75] demiryollarında Makas geçiş bölümlerinde optimizasyon üzerine tez çalışmasını tamamlamıştır. Bu tez çalışmasında Makas geçiş bileşenleri izlenerek bu bileşenlerde oluşan arızalar incelenmiştir. Makas geçişleri sırasında Makas geçiş bölgelerinde oluşan değişimler gözlemlenmiştir. Bir raydan başka bir raya olan yük dağılımı incelenmiştir. Singh ve diğ. [76], insansız hava aracı görüntülerini kullanarak görme tabanlı ray hattı tespiti ve izleme yöntemi önermiştir. İnsansız hava aracı kamerasından alınan görüntü üzerinde HSV renk dönüşümü yapılarak renk tabanlı maske kullanmıştır. Renk tabanlı olarak ray hattı tespit edilmekte ve Canny kenar çıkarım yöntemi ile ray hattına ait çizgiler elde edilmektedir. Ray hattında gerekli ölçümleri yaparak durum izleme ve arıza tespiti yapmaktadır. Mittal ve diğ. [77], derin öğrenme kullanarak görme tabanlı ray hattı durum izleme yöntemi geliştirmiştir. Birkaç lokomotif üzerine yerleştirilen kamera ile 100 GB Full HD video görüntüsü almıştır. Alınan görüntüler üzerinde derin öğrenme yöntemi geliştirerek kayıp balastları tespit etmektedir. Eğitim sırasında 181 pozitif ve 340 negatif görüntü kullanılmıştır. Test için 470 km ray hattından toplamda 25000 görüntü alınarak %88.9 başarı sağlamıştır. Ayrıca ray hattındaki diğer arızaları da tespit etmektedir. Bunun dışında makas geçişleri, demiryolu trafik ışıklarını da tespit etmektedir.

Literatürde lazer kameralar kullanılarak ray yüzey arızaları tespit edilebilmektedir [78-82]. Ayrıca kızılötesi kameralar kullanılarak ray hattı arıza tespiti yapılmaktadır [83,84]. Ultrasonik sinyaller kullanılarak ray yüzeyi için durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır [85-87]. Görüntü işleme tabanlı yöntemlerin dışında sinyal işleme tabanlı yöntemler kullanılarak ray bileşenleri, bağlantı elemanları ve ray yüzeyi arızası tespit edilebilmektedir [88-95]. Bütün bu çalışmaların dışında bir de model tabanlı demiryolu bağlantı bileşenleri, ray birleşme noktası ve ray yüzeyi izleme ve arıza tespiti gibi çalışmalar da mevcuttur [96-100]. Literatürde kullanılan arıza türü, giriş verileri ve kullanılan yöntemler Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Ray arıza teşhisi için literatürde ki çalışmaların yöntemlerine göre sınıflandırılması

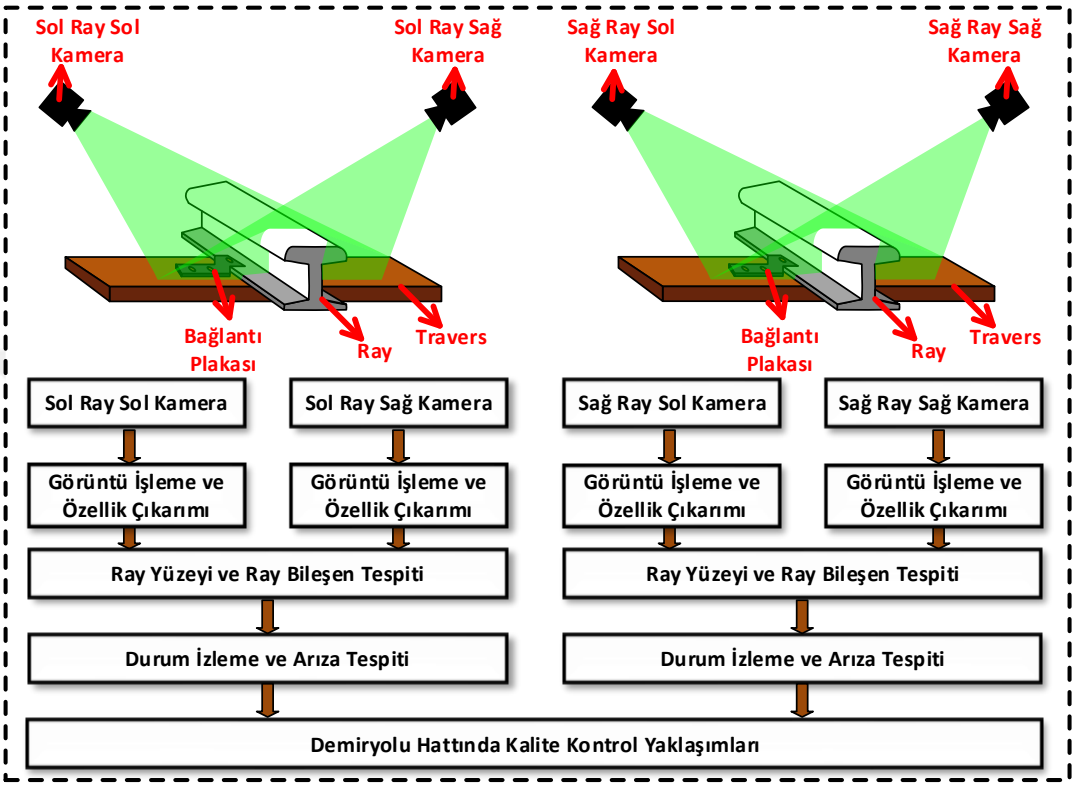
Kullanılan sensörler	Arıza	Kullanılan yöntem	Kaynaklar
Lazer Kamera	• Demiryolu bağlantı elemanları izleme	• Makine görmesi yöntemleri	[25,78-82]
GPS, GSM Sensörü	• Demiryolunda oluşan arızaların konumunun belirlenmesi		[19,33,37]
CCD Kamera	• Ray bileşen tespiti, durum izleme ve oluşan arızaların tespiti	• Destek vektör makinesi (DVM) • Gabor filtresi • Temel görüntü işleme yöntemleri • Derin öğrenme • İkili desen eşleştirme tabanlı • Dalgacık dönüşümü • Şablon eşleştirme • Hough dönüşümü • Sobel kenar çıkarımı • Line segment detector • Batch algoritması	[18, 21, 23,24,26-30,33-35,37,38]
	• Gevşek ray birleşen tespiti	• Kara ağacı yöntemi	[20]
	• Ray yüzey tespiti, izleme ve arızaları	• Görme tabanlı yöntemler • Haar-like yöntemi • Otsu yöntemi • Makine görmesi yöntemleri • Adaptif arka plan çıkarımı • Görüntü segmentasyonu • Derin öğrenme • Derin konvolüsyonel sinir ağı • Gaussian filtresi • Kenar çıkarım yöntemleri • Nesne tanıma yöntemleri	[44-47,49,50,52,-56,59,62,63,68]
	• Makas tespiti	• Temel görüntü işleme yöntemleri	[73-75]
	• Ray hattı izleme ve anormal durum tespiti	• HSV renk dönüşümü • Maskeleme • Kenar çıkarımı	[76]
Ultrasonik Sensörler	• Ray çatlaklarının tespiti	• Nesnelerin interneti (IoT)	[19,85-87]
Titreşim sensörü	• Demiryolu araçlarının tekerlek arızalarının tespiti	• Makine öğrenmesi	[31]
	• Ray yüzey arızaları	• IMU destekli bulanıklık algılama yöntemleri • Boru hattı yöntemi	[51,57,58]
Akım, Gerilim sensörü	• Ray birleşme noktalarını izleme ve arıza tespiti	Temel sinyal işleme yöntemleri	[32]
Termal kamera	• Ray bileşen tespiti	• Temel görüntü işleme yöntemleri	[36]
	• Ray yüzey tespiti ve arızaları	• Temel görüntü işleme yöntemleri	[60,65]
Model tabanlı	• Ray yüzey arızası tespiti ve modelleme	• Modelleme yöntemleri • Bulanık mantık • Matematiksel modeller	[48,66,96-100]
Sinyal işleme tabanlı	• Ray yüzey arızası tespiti	• Temel sinyal işleme yöntemleri	[57,58,85-87]
Kızılötesi kameralar	• Ray yüzey izleme ve arıza tespiti	• Görüntü işleme tabanlı yöntemler	[83,84]

1.4. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, demiryolu rayları için çok amaçlı öğrenme yöntemleri kullanılarak bulanık otomata ile görme tabanlı kalite kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir. Tez çalışması sürecinde geliştirilen algoritmaların temel amacı kameralardan alınan görüntüler üzerinde demiryolu hattında durum izleme ve arıza tespitinin yapılmasıdır. Durum izleme ve arıza tespiti yapılırken görüntü işleme ve sinyal işlemin yanı sıra, bulanık otomata, karmaşık bulanık sistem ve karmaşık bulanık otomata tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Görüntü işleme sonucunda elde edilen özellikler, karmaşık bulanık sistem ve bulanık otomata tabanlı yöntemler ile birlikte kullanılarak gerçek zamanlı kalite kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu çerçevede tezin genel amaçları aşağıdaki şekilde verilmiştir.

- Frame kameralardan alınan görüntüler üzerinde gerçek zamanlı ray yüzeyinin tespit edilmesi,
- Ray yüzeyi üzerinde oluşan arızaların tespit edilmesi, arıza boyutlarının hesaplanması ve arıza türünün sınıflandırılması,
- Frame kameralardan alınan görüntülerde geçek zamanlı ray bağlantı elemanlarının tespit edilmesi ve gerçek zamanlı izlenmesi,
- Ray bağlantı elemanlarında yapısal arızaların öğrenme tabanlı yöntemler ile gerçek zamanlı tespit edilmesi,
- Makas geçişlerinin izlenmesi ve geçişlerde oluşan arızaların tespit edilmesi,
- Bağlantı elemanlarının tespiti ve arıza teşhisi için görüntü işleme tabanlı gerçek zamanlı çalışmaya uygun yaklaşımlar geliştirilmesi,
- Dört adet frame kameradan alınan görüntüler ilişkilendirilerek elde edilen özelliklerin birlikte kullanılması,
- Ray yüzeyi, ray bileşenleri, bağlantı elemanları ve makas geçişlerinde oluşan arızaların çok amaçlı öğrenme yöntemleri ve bulanık otomata kullanılarak kalite kontrol yaklaşımlarının geliştirilmesi,
- Bilgisayar ortamında geliştirilen yaklaşımların gömülü kartlar üzerinde çalıştırılması ve gerçek zamanlı uygulanması,
- Dört adet kameradan alınan görüntülerin gömülü kartlar üzerinde eş zamanlı çalışabilmesi ve elde edilen sonuçların birleştirilmesi için paralel bir yapının geliştirilmesi,

Bu tez çalışmasının amacı ve kapsamında yapılan sistemin genel mimarisi Şekil 1.18'de özetlenmiştir.



Şekil 1.18. Tez çalışması kapsamında geliştirilen sistemin genel mimarisi

Bu tezde veri seti oluşturma ve geliştirilen yazılımların test edilebilmesi için bir deney aracı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde rayları yakından izleyen dört adet frame kamera kullanılmıştır. Her bir kameradan alınan görüntüler üzerinde görüntü işleme ve özellik çıkarım yöntemleri geliştirilmiştir. Görüntüler üzerinde ray yüzeyi, demiryolu bileşenleri ve makas geçişi tespit edilmiştir. Durum izleme ve arıza tespiti için öğrenme ve bulanık otomata tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Dört adet kameradan elde edilen sonuçlar birleştirilerek demiryolu hattında kalite kontrol yaklaşımları geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanma ve/veya değerlendirme aşamasında olan yayın çalışmalarına ilave olarak sonuçlanan akademik yayın çalışmaları aşağıda verilmiştir [101-116].

- "Development of a Complex Fuzzy System-Based Thermography Approach for Predictive Maintenance in Railways", Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, (Hakem değerlendirmesinde), 2018.

- "Ray Yüzeyi ve Birleşme Noktası Tespiti için Complex Fuzzy Automata Tabanlı Yeni bir Yaklaşım", International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), (Hakem değerlendirmesinde), 2018.
- "Method Based on Thermal Image Processing for Rail Surface Monitoring in Railways", In International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'18), 704-708, 2018.
- "A New Approach for Condition Monitoring and Detection of Rail Components and Rail Track in Railway", International Journal of Computational Intelligence Systems, 11(1), 830-845, 2018.
- "Demiryolu Hattında Oto-Korelasyon Tabanlı Makas Geçişi ve Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(2), 41-50, 2017
- "Improved Rail Surface Detection and Condition Monitoring Approach with FPGA in Railways", In International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'17) 108-111, 2017.
- "A Fault Diagnosis Approach for Rail Surface Anomalies Using FPGA in Railways", International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 5, 42-46, 2017.
- "A real time interface for vision inspection of rail components and surface in railways", International in Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 1-6, 2017.
- "A vision based diagnosis approach for multi rail surface faults using fuzzy classificiation in railways", International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 713-718, 2017.
- "A New Computer Vision Based Method for Rail Track Detection and Fault Diagnosis in Railways", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 6(1), 22-17, 2017.
- "Detection of rail switch passages through image processing on railway line and use of condition-monitoring approach", In International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16), 99-105, 2016

- “Real time implementation for fault diagnosis and condition monitoring approach using image processing in railway switches”, International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4(Special Issue-1), 307-313, 2016.
- “PSO Based Diagnosis Approach for Surface and Components Faults in Railways”, International Journal of Computer Science and Software Engineering, 5(5), 89-96, 2016.
- “Image processing based fault detection approach for rail surface”, In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 1118-1121, 2015.
- “Görüntü Eşleştirme Kullanan Temassız Ray Hattı Durum Analizi Yöntemi”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015, 1005-1009, 2015.
- “Fuzzy Logic Based Rail Component Detection Method Using Line Extraction from Continuously Images”, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2015).

1.5. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması *giriş bölümü* ile birlikte yedi bölümden oluşmaktadır. *Birinci bölümde,* demiryolu hattını oluşturan bazı kavramlar açıklanarak durum izleme ve arıza tespiti hakkında genel bir giriş yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında literatür çalışması yapılarak, demiryolu bileşenlerinde durum izleme ve arıza tespiti için geliştirilen teknikler kullanılan araç ve gereçler incelenmiştir. Tezin amacı ve kapsamı açıklanarak bu süreçte yapılan bilimsel çalışmalar verilmiştir.

İkinci bölümde, başta ray, travers, balast ve diğer bağlantı malzemeleri olmak üzere demiryolu bileşenleri ve özellikleri açıklanmıştır. Daha sonra demiryolu arızaları verilerek bu arızaların oluşma nedenleri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, bulanık otomata, karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomatalar açıklanmıştır. Bulanık otomata, karmaşık bulanık sistem ve karmaşık bulanık otomata ile ilgili uygulamalar verilmiştir.

Dördüncü bölümde, Önerilen ray birleşenleri tespit yöntemleri sunulmuştur. Kameralardan alınan görüntüler üzerinde görüntü işleme yöntemleri ile özellik çıkarımı yapılmaktadır. Elde edilen özellikler kullanılarak ray bileşenleri tespit edilmektedir.

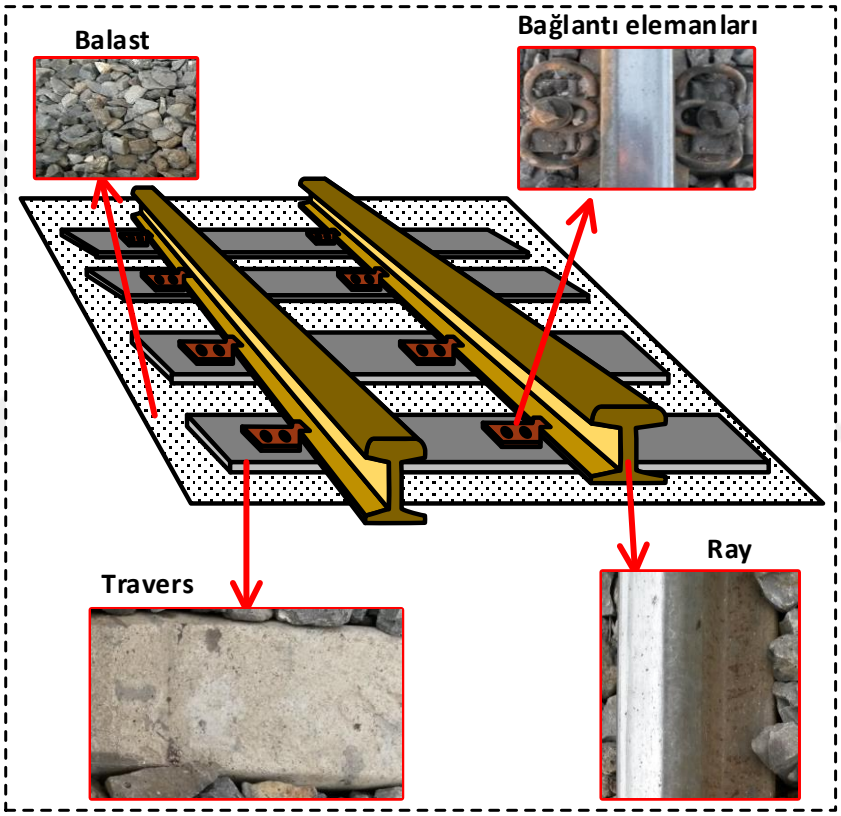
Beşinci bölümde, geliştirilen ray yüzeyi izleme ve arıza tespit yöntemleri açıklanmıştır. Ray hattı görüntüleri üzerinde ray yüzeyleri tespit edilmiştir. Ray yüzey görüntüleri ana görüntüden çıkarılarak durum izleme ve arıza tespiti yapılmıştır. Arızalı ray yüzeylerinde, arızalı bölgeye ait özellikler elde edilerek arızanın türü belirlenmeye çalışılmıştır.

Altıncı bölümde, termal görüntü işleme ve durum izleme tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Termal kamera ile elde edilen görüntüler üzerinde karmaşık bulanık sistem geliştirilerek durum izleme yapılmıştır. Ayrıca termal görüntü işleme yöntemleri geliştirilerek ray yüzeylerinde oluşan arızalar tespit edilmiştir.

Yedinci bölümde ise tezde yapılan çalışmalar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. DEMİRYOLU BİLEŞENLERİ VE ARIZALARI

Demiryolu ulaşımında hattı oluşturan bileşenlerin sağlam bir şekilde kurulması güvenlik ve konfor açısından oldukça önemlidir. Demiryolu hattını oluşturan birçok bileşen mevcuttur. Ray, travers, ray bağlantısı ve balast demiryolu hattını oluşturan en önemli bileşenlerdir. Şekil 2.1'de demiryolu hattını oluşturan bileşenler genel bir şekil üzerinde verilmiştir.



Şekil 2.1. Demiryolu hattının genel bileşenleri

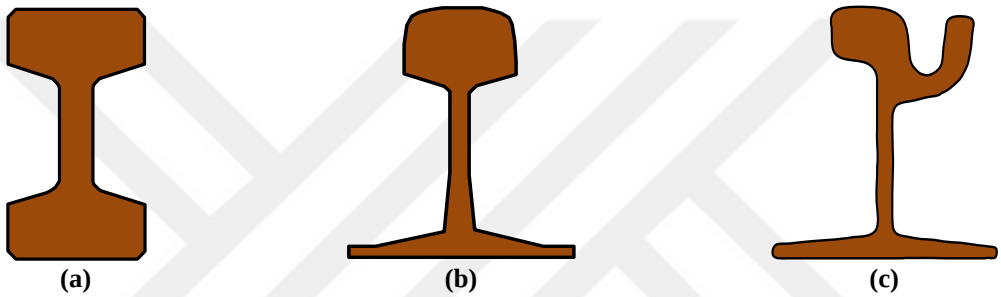
2.1. Demiryolu bileşenleri

Bir demiryolunda; 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.

2.1.1. Ray

Üzerinde demir yolu araçlarının hareket etmesini sağlayan ve tekerlekleri kılavuzlayan, ayrıca dingillerden gelen kuvvetleri traverslere aktaran, dökme çelikten yapılmış üstyapı malzemesine ray denir. Raylar mantar, gövde ve taban olmak üzere üç bölümden oluşur.

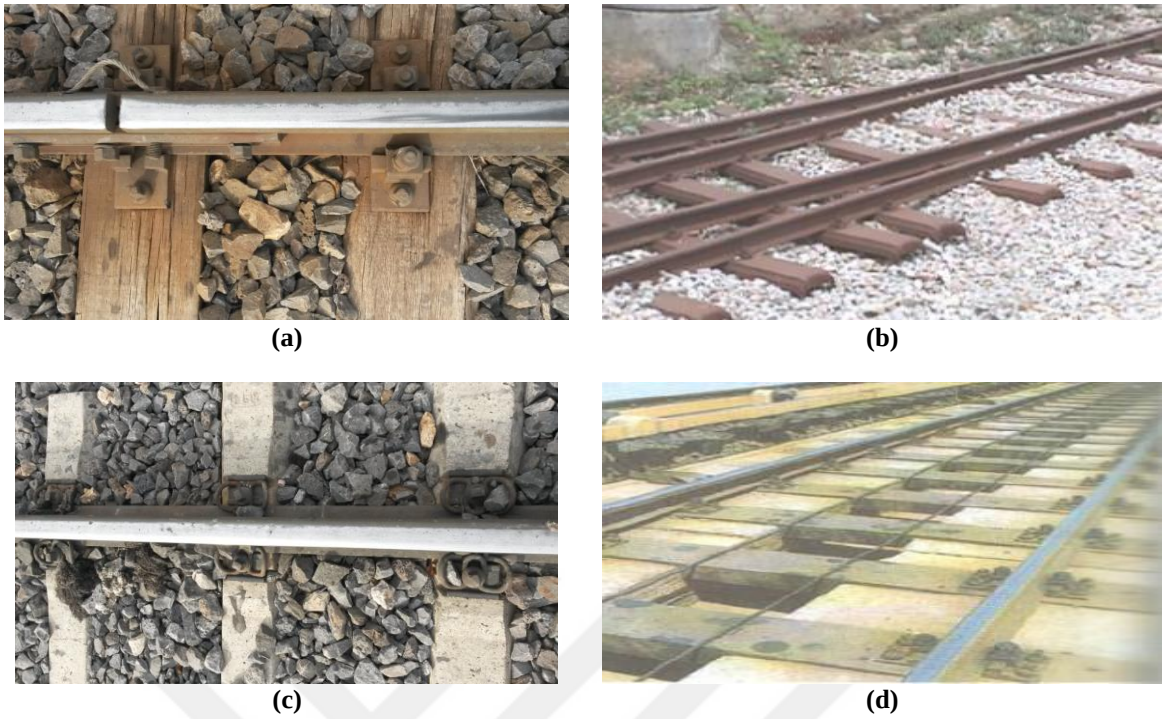
Raylar profillerine göre; S 39, S 46, 49 E1, 60 E1 şeklinde isimlendirilir. Şekillerine göre raylar; çift mantarlı raylar ve patenli (vinyol) tipi raylardır. Patenli raylar; oluklu patenli ve tek mantarlı patenli raylar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Demiryolu sisteminde kullanılan ray çeşitlerine ait görüntüler Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Demiryolu rayları **(a)** Çift mantarlı ray **(b)** Tek mantarlı patenli ray **(c)** Oluklu patenli ray

2.1.2. 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. Ahşap traversler, eski imal edilen konvansiyonel hatlarda, konvansiyonel hatlardaki makaslarda ve çelik köprülerde kullanılmaktadır. Demir traversler, çelik malzeme ile yapılmış olan traverslerdir. Demir traversler günümüzde artık kullanılmamaktadır. Beton traversler, içinde 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 daha yaygındır. Çelik köprüler haricinde bütün hatlarda kullanılmaktadır. Plastik traversler, balastlı ve balastsız raylı sistemlerde, tünel içinde beton tabanda ve metroların açık hatlarında, köprü ve viyadüklerde çelik yuva içinde doğrudan kullanılmaktadır. Demiryolu hattında kullanılan travers türlerine ait görüntüler Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Demiryolu travers türleri **(a)** Ahşap travers **(b)** Demir travers **(c)** Beton travers **(d)** Plastik travers

2.1.3. Balast

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. Demiryolu hattında kullanılan balast görüntüleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

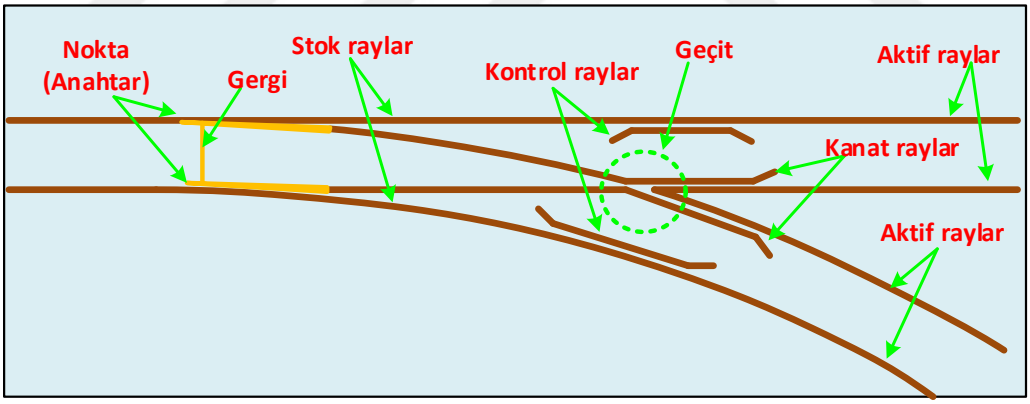


Şekil 2.4. Demiryolunda balast görüntüleri

2.1.4. Makas

Demiryolu üzerinde hareket eden demir yolu araçlarının bir raydan diğer bir raya geçmesini sağlayan yol değiştirme aparatlarına "makas" denir. Makas sistemlerinde demir yolu araçlarının yol değiştirmesi, makasların Switch (anahtar) kısmının insan veya elektrik gücü ile hareketinin sağlanması ile gerçekleştirilmektedir. Her makasın bir doğru yolu ve bir sapan yolu vardır. Konvansiyonel hatlardaki makasların traversleri ahşaptır. Tali yollara geçişleri sağlayan sapan yolun üzerinde bulunan kurbun yarıçapı r=300m, basit makasların maksimum uzunluk standardı 34.20m'dir. Hızlı tren hatlarındaki makasların traversleri beton olup tali yollara geçişleri sağlayan sapan yolun üzerinde bulunan kurbun yarıçapı r=1500m, basit makasların maksimum uzunluk standardı 72 m civarındadır.

Demiryollarında trafiğin kontrol edilebilmesi ve bir hattın birden fazla tren tarafından kullanılabilmesi için makas geçişleri mevcuttur. Makas geçişleri sayesinde bir hattan gelen tren diğer bir hatta kolaylıkla geçiş yapabilmektedir. Şekil 2.5'te örnek bir makas geçiş sistemi ve bileşenleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Örnek bir makas geçiş sistemi ve bileşenleri

2.1.5. Bağlantı Malzemeleri

Rayları, raylara ve traverslere bağlayan, üst yapıya gelen kuvvetleri elastik biçimde karşılayarak azaltan cebire, krapo, ergo, bulon, tirfon ve selet gibi küçük malzemelere bağlantı malzemeleri denir.

Rayların birbirine bağlandığı yolun ek yerlerine conta denir. Contalar yolun en zayıf ve kolay arızalanan yerleridir. Bu noktalarda ray kırılmalarını önlemek, bakım masraflarını azaltmak amacıyla ray kaynağı yapılır.

Raylar birbirlerine alüminotermit veya elektrik direnç kaynağı (yakma alın kaynağı) yöntemleri ile kaynaklanır. Çeşitli boylardaki rayların kaynak yapılarak en az 300 m uzunluğa getirilmesine UKR (uzun kaynaklı ray) denir. Hiç conta olmayan sürekli kaynaklı raylara da SKR denir.

Contalarda iki ray ucu arasında bir miktar aralık bırakılır. Buna genleşme aralığı yani imbisat payı denir. Bu aralıklar raylar ısındıkça kapanır soğudukça açılır.

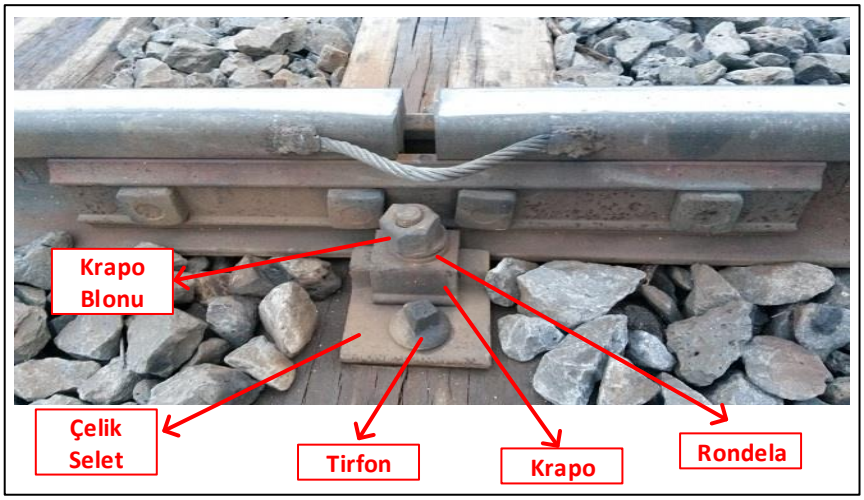
Rayı raya bağlayan bağlantı malzemeleri; cebire, cebire blonu ve rondela (yaylı halka) olarak adlandırılır. Rayı raya bağlayan malzemelerin verildiği görüntü Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Rayı raya bağlayan malzemeler **(a)** Örnek görüntü **(b)** Bağlantının farklı açıdan görünümü

Bağlantı malzemeleri; çelik selet, tirfon, krapo, krapo blonu, rondela, ergo olup son yıllarda daha fazla esnek olması nedeniyle "HM" tipi bağlantı sistemi de kullanılmaya başlanmıştır.

"HM" tipi bağlantıda; gergi kıskacı, açı kılavuzu, ara plastik selet, tirfon ve besleme rondelası bulunur. Rayı traverse bağlayan malzemelerin verildiği görüntü Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Rayı traverse bağlayan bağlantı malzemeleri

2.2. Demiryolu Ray Arızaları

Demiryollarında birçok nedenden dolayı ray bileşenlerinde arızalar oluşmaktadır. Bu arızaların oluşmasının en büyük nedeni rayda oluşan gerilmelerdir. Demiryolu hattında bulunan rayların eğilmesi, kayması, tekerlek ile rayın teması, termal durumlar ve metal yorulması gibi birçok nedenden dolayı ray arızası oluşmaktadır [117-123]. Ray üzerinde genel olarak hasarlı ray, çatlak ray ve kırık ray olmak üzere üç farkı arıza türü bulunmaktadır. Ray boyunca herhangi bir yerinde oluşan ve rayın kırılmasına neden olabilecek yapısal bozukluklara çatlak ray denir. İki veya daha fazla parçaya ayrılmış raylara kırık ray denir. Çatlak veya kırık ray türüne girmeyen, fakat çoğunlukla ray yüzeyinde oluşan arızalara hasarlı ray denir.

Ray arızaları, genel olarak ray üzerinde üç farkı bölgede oluşmaktadır. Ray uç bölgesi, ray kaynak bölgesi ve bu bölgelerin dışında kalan diğer bölgelerde arıza oluşma ihtimali oldukça yüksektir [124]. Ray arızalarının sınıflandırılması için birkaç yöntem bulunmaktadır. Genel olarak, ray mantarı yüzeyinde meydana gelen arızalar ve rayın diğer kısmında meydana gelen iç arızalar olmak üzere iki türdür. Ray mantarı yüzeyinde oluşan arızalar, demiryolu hattının trafik yoğunluğu ve trenin yükünün artmasıyla meydana gelmektedir. Rayın diğer kısımlarında meydana gelen iç arızalar ise daha çok üretim ve kaynak sırasında meydana gelen hatalardan dolayı oluşmaktadır [125].

Demiryollarında oluşan ray kusurları, Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) tarafından UIC 712 R kodu ile yayınlanmıştır. Bu arıza kodu ile ray arızasının konumu, türü gibi birçok bilgi edinilmektedir. Ray arızalarının türünü belirten üç veya dört basamaklı

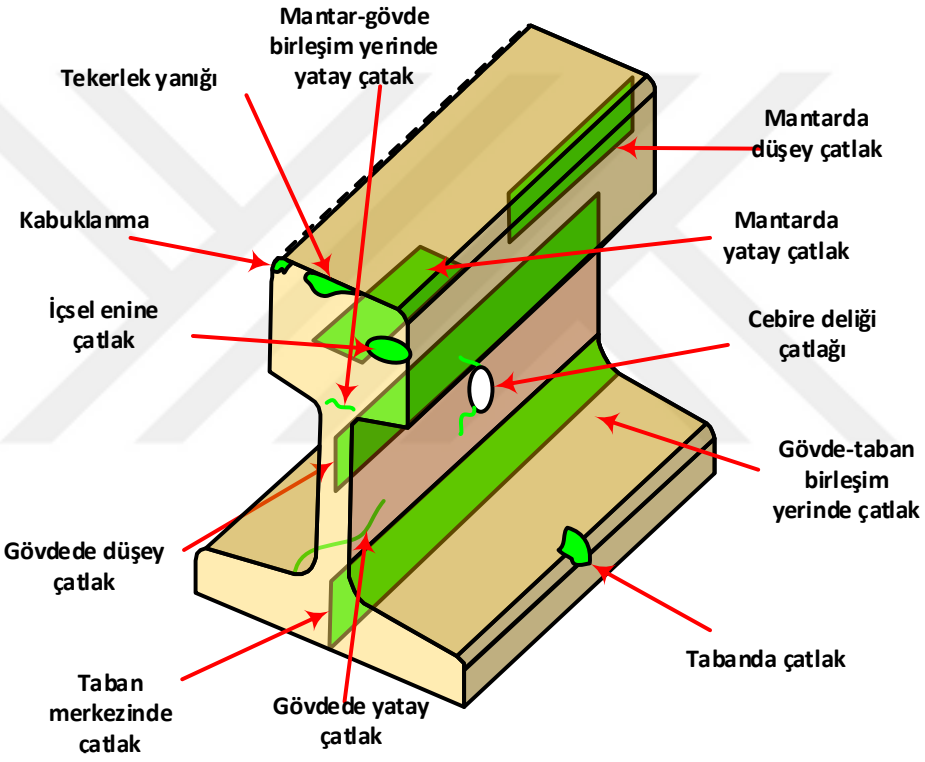
rakamdan oluşan kodlar verilmiştir. Bu kodlara bakılarak ray arızasının hangi bölgede oluştuğu ve arıza türünün ne kolaylıkla olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 2.1'de genel olarak bilinen ray arızaları ve UIC kodları verilmiştir.

Tablo 2.1. Genel olarak bilinen ray arızalarına ait UIC kodları

	Ray Arızaları	**Arızanın ray sonunda görülmesinde UIC kodu**	**Arızanın diğer bölgelerde görülmesinde UIC kodu**
1	Ray mantarında oluşan oval boşluklar,	111	211
2	Ray mantarında oluşan yatay çatlaklar,	112	212
3	Ray mantarında oluşan düşey çatlaklar,	113	213
4	Ray mantarında oluşan kısa dalga boylu ondülasyonlar,	2201	2201
5	Ray mantarında oluşan uzun dalga boylu ondülasyonlar,	2202	2202
6	Ray mantarında oluşan yanal aşınmalar,	2203	2203
7	Ray mantarında oluşan düşey aşınmalar,	2204	2204
8	Yuvarlanma yüzeyinin kabuklanması,	2221	2221
9	Ray mantarında iç köşe kabuklanması,	2222	2222
10	Ray mantarında oluşan kılcal çatlak,	2223	2223
11	Ray mantarında oluşan tekerlek yanığı,	2251 / 2252	2251 / 2252
12	Ray mantarı yüzeyinde oluşan çökmeler,	227	227
13	Ray mantar-gövde birleşim yerinde oluşan yatay çatlaklar,	1321	2321
14	Ray gövde-taban birleşim yerinde oluşan yatay çatlaklar,	1322	2322
15	Ray gövdesinde oluşan düşey çatlaklar,	133	233
16	Ray gövdesinde ve tabanında oluşan korozyon,	134 / 154	234 / 254
17	Ray gövdesinde oluşan çapraz çatlaklar,	135	135
18	Ray tabanında düşey çatlaklar,	153	253
19	Alüminotermit kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak,	422	422
20	Alüminotermit kaynak kesitinde oluşan enine çatlak,	421	421
21	Yakma alın kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak,	412	412
22	Yakma alın kaynak kesitinde oluşan enine çatlak,	411	411
23	Elektrik ark kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak,	432	432
24	Elektrik ark kaynak kesitinde oluşan enine çatlaktır,	431	431

Ray arızaları, rayın kaynak bölgelerinin dışında oluşan arızaları içermektedir. Bu arızalar, ray profili üzerinde, ray mantarında, gövdesinde veya tabanında meydana gelmektedir. Genellikle arızaların oluştuğu bölgeler, ray mantarı ve ray yüzeyidir. Literatürdeki çalışmalarda görme tabanlı yöntemler kullanılarak; ray mantarında oluşan

oval boşluklar, ray mantarında oluşan yatay çatlaklar, ray mantarında oluşan düşey çatlaklar, ray mantarında oluşan kısa dalga boylu ondülasyonlar, ray mantarında oluşan uzun dalga boylu ondülasyonlar, ray mantarında oluşan yanal aşınmalar, ray mantarında oluşan düşey aşınmalar, yuvarlanma yüzeyinin kabuklanması, ray mantarında iç köşe kabuklanması, ray mantarında oluşan kılcal çatlak, ray mantarında oluşan tekerlek yanığı ve ray mantarı yüzeyinde oluşan çökme arızaları tespit edilebilmektedir. Görme tabanlı yöntemler ile yaklaşık 12 farklı ray arızası türü tespit edilebilmektedir. Şekil 2.8'de örnek bir ray üzerinde sıklıkla oluşabilecek arızalar gösterilmiştir [117].



Şekil 2.8. Örnek bir ray üzerinde sıklıkla oluşan arızalar [117].

2.2.1. Ray Mantarında Oluşan Oval Boşluklar

Ray yüzeyinin 10-15mm altında meydana gelen yüzey altı arızalarıdır. Bu tür arızalar üretim sırasında meydana gelir ve ağır çalışma koşullarında daha da büyür. Ray üretim aşamasında ray çeliğinde oluşan hidrojen kalıntılarından dolayı bu arıza türü oluşmaktadır. Ayrıca ray mantarındaki içsel kusurdan, çatlaklardan ve kaynak işleminde oluşan hatalardan dolayı oval boşluklar oluşmaktadır [124, 125]. Ağır çalışma koşullarında artan bu arıza türü zamanla çatlayarak ray yüzeyinde görülmektedir. Çatlakların artmasıyla

birlikte rayın kırılma olasılığı artmaktadır. Oval boşluk arızaları, çatlak veya kırılmaya neden olmadığı sürece tespit edilemezler. Bu arıza türü rayın üretimi sırasında oluştuğu için ray üzerinde birden fazla oluşabilir. Bu durumda ağır yük altında rayın birden fazla bölgede kırılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle oval boşluk arızalarının ilerlemesi oldukça tehlikelidir. Şekil 2.9'da ray mantarında oluşan oval boşluk arızasına ait örnek görüntü verilmiştir [124].



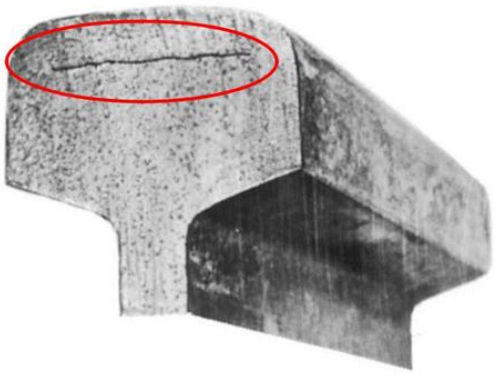
Şekil 2.9. Ray mantarında oluşan oval boşluk arızasına ait örnek görüntü

Rayda oluşan oval boşluklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Ray mantarında görsel olarak tespit edilen oval boşluklar kameralar kullanılarak da tespit edilebilir. Oval boşluk arızasının ilerlemesi durumunda en kısa sürede ray bölgesinin değiştirilmesi gerekmektedir [126]. Oval boşluk arızaları ray sonlarında görülürse UIC 111 kodu ile gösterilir. Ray sonları dışındaki diğer bölgelerde görülürse UIC 211 kodu ile gösterilmektedir.

2.2.2. Ray Mantarında Oluşan Yatay Çatlaklar

Ray mantarında oluşan yatay çatlaklar, üretim hatalarından dolayı meydana gelmektedir. Üretim sırasında yabancı madde kalıntıları ve segregasyon sonucunda ray mantarında yatay çatlaklar meydana gelmektedir. Ray mantarı içinde herhangi bir yerde oluşan yatay çatlak zamanla yüzeye paralel olacak şekilde artmaktadır. Yatay çatlaklar bazen düşey çatlaklarla birlikte oluşmaktadır. Bu durumlarda çatlaklar derine inerek enine çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Yatay çatlağın ilerlemesi durumunda ray

sonlarında ezilme veya ray mantarında genişleme görülmektedir. Ray mantarındaki çatlağın büyümesi kırılma olarak da adlandırılır [120-124]. Şekil 2.10'da ray mantarında oluşan yatay çataklara ait örnek görüntü verilmiştir [124].



Şekil 2.10. Ray mantarında oluşan yatay çataklara ait örnek görüntü [124].

Ray mantarında oluşan yatay çatlak arızaları, görsel muayene veya ultrasonik yöntemlerle tespit edilebilmektedir. Ray mantarındaki yatay çatlağın ilerlemesi durumunda erken müdahale yapılarak çatlak olan bölge hemen kesilmelidir. Eğer kusurlu ray kısmı değiştirilmezse daha büyük arızalara ve kazalara yol açabilir [126]. Ray mantarında oluşan yatay çatlak arızası rayın sonlarında UIC 112 kodu ile ray sonları dışında diğer bölgelerde görülürse UIC 212 kodu ile ifade edilmektedir.

2.2.3. Ray Mantarında Oluşan Düşey Çatlaklar

Ray mantarında oluşan düşey çataklar, yatay çatlaklar kadar kritik bir arıza türüdür. Düşey çatlaklarda yatay çatlaklar gibi üretim sırasındaki bazı hatalardan dolayı meydana gelmektedir. Ray mantarında oluşan düşey çatlaklar zamanla ray mantarını paralel bir şekilde iki parçaya ayırmaktadır. Düşey çatlaklar ray mantarının üst bölgesine ulaştığında siyah bir çizgi olarak görülmektedir. Zamanla bu çizgi genişleyerek ray mantarının genişlemesine ve ray mantarının parçalanmasına neden olmaktadır. Bazı durumlarda düşey çatlaklar artarak ray mantarı ile gövde birleşimine kadar ilerlemektedir. Şekil 2.11'de ray mantarında oluşan düşey çataklara ait örnek görüntü verilmiştir [124].



(a) **(b)**

Şekil 2.11. Ray mantarında oluşan düşey çatlaklara ait örnek görüntü

Ray mantarında oluşan çatlaklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Düşey çatlakların ray yüzeyinde belirmesi durumunda kameralar kullanılarak çatlak tespiti yapılabilmektedir. Ray mantarında oluşan düşey çatlakların büyümesi durumunda ağır yüklerde ray mantarının parçalanmasına neden olmaktadır. Bu durumda demiryolu aracının raydan çıkması gibi büyük kazalar oluşabilmektedir. Bu nedenle ray mantarında oluşan düşey çatlaklar fazla büyümeden tespit edilerek gerekli bakım çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ray mantarında oluşan düşey çatlaklar ray sonlarında görülürse UIC 113, diğer bölgelerde görülürse UIC 213 kodu ile temsil edilmektedir.

2.2.4. Ray Mantarında Oluşan Kısa Dalga Boylu Ondülasyon

Ray mantarındaki ondülasyon arızaları; aşınma, yorulma veya ray metalinin plastik akması sonucunda oluşmaktadır. Ondülasyonlar genellikle ray arızalarında birinci seviye arıza teşkil etmezler. Fakat ray ömrünü kısaltır, ray bağlantı elemanlarını gevşetir ve balastın bozulmasına neden olurlar. Ayrıca yolcuların konforlu ve güvenli bir şekilde seyahat etmelerini engellemektedir. Kısa dalga boylu ve uzun dalga boylu olmak üzere iki çeşit ondülasyon arızası vardır [125]. Ray yüzeyinde oluşan kısa dalga boylu ondülasyon arızasına ait örnek görüntü Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Ray yüzeyinde oluşan kısa dalga boylu ondülasyon görüntüsü [124].

Ray yüzeyinde oluşan kısa dalga boylu ondülasyon, trafik yükünden dolayı meydana gelmektedir. Genellikle hafif yüklü trenler olan yolcu trenlerinin kullanımı sırasında oluşmaktadır. Özellikle trenin kalkış sırasındaki hızlanma hareketi veya durma sırasındaki frenleme hareketinden kaynaklanmaktadır. Ondülasyonlar, ray yüzeyi üzerinde periyodik bir şekilde oluşmuş parlak tepeler ve siyah çukurlardan oluşmaktadır. Ondülasyonların dalga boyları 3cm ile 8cm, derinliği ise 0.2 mm ile 0.3 mm arasında değişmektedir [118,124]. Bu tür arızalar görsel muayene ve kameralar kullanılarak tespit edilebilmektedir. Kısa dalga boylu ondülasyon arızaları UIC 2201 kodu ile ifade edilmektedir. Ondülasyon arızaları ray taşlaması işlemi uygulanarak giderilmektedir [127].

2.2.5. Ray Mantarında Oluşan Uzun Dalga Boylu Ondülasyon

Uzun dalga boylu ondülasyonlar, trafik yükleri nedeniyle meydana gelmektedir. Genellikle yük taşımacılığı yapan trenlerin kullandığı demiryolu hattında ortaya çıkmaktadır. Uzun dalga boylu ondülasyonlar tekerlek ile rayın teması sırasında aşırı yüksek gerilme sonucunda ray metalinin plastik akmasından dolayı oluşmaktadır. Plastik akmasına neden olan etkenler; yüksek tekerlek yükleri, yüksek tren hızları, ray kaynakları ile cebireli ray bağlantılarındaki düşük noktalar ve tekerlek ile ray profillerinin birbirine uymamasıdır. Şekil 2.13'te ray yüzeyinde oluşan uzun dalga boylu ondülasyon arızasına ait örnek bir görüntü verilmiştir [118].



Şekil 2.13. Ray yüzeyinde oluşan uzun dalga boylu ondülasyon görüntüsü [6].

Uzun dalga boylu ondülasyon arızası UIC 2202 kodu ile ifade edilmektedir. Bu arıza türü ray yüzeyinde sağlam profile göre daha belirgin ve inişli çıkışlı çökmeler ile karakterize edilmektedir. Bu tür ondülasyonlarda ray yüzeyindeki tepe be çukur bölgelerinde parlaklık farklılığı yoktur. Uzun dalga boylu ondülasyonların dalga boyları 8cm ile 30cm, derinliği 0.1mm ile 2mm arasında değişmektedir. Bu tür kusurlar görsel muayene veya kameralar kullanılarak tespit edilebilmektedir.

2.2.6. Ray Mantarında Oluşan Yanal Aşınma

Yanal aşınma trafik yükleri nedeniyle raydaki metal kaybı ile oluşmaktadır. Ray mantarında oluşan yanal aşınma UIC 2203 kodu ile temsil edilmektedir. Ray mantarında oluşan yanal aşınmaya neden olan etkenler; kurp yarıçapı, rayın metalürjik yapısı, ray yağlama, trenin dingil yükü, demiryolu hattının trafik yoğunluğu ve demiryolu hattını kullanan trenin hızıdır. Ray mantarındaki yanal aşınma, yatay kurplarda ve tekerlek budeninin dış rayın iç köşesine temas etmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Ray hattının oluşturduğu viraja kurp denilmektedir. Ray mantarında oluşan yanal aşınmalar hat bakımına zarar verebilecek seviyeye gelmişse ray arızası oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca yanal aşınmanın artması ise ray profilini zayıflayarak rayın kırılmasına neden olmaktadır. Ray mantarında oluşan yanal aşınmaya ait örnek görüntü Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Ray mantarında oluşan yanal aşınma arızasına ait örnek görüntü [124].

Ray mantarında oluşan yanal aşınma arızası görsel muayene veya ray aşınmasını ölçebilen çeşitli cihazlar ile tespit edilebilmektedir. Ayrıca lazer veya sayısal kameralar kullanılarak ray mantarında oluşan yanal aşınmalar tespit edilebilmektedir. Ray aşınma arızaları belirli zaman aralıklarında muayene edilmelidir. Eğer aşınma artmışsa ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir [120-124]. Eğer erken müdahale yapılmazsa trenin raydan çıkması gibi birçok kazanın oluşmasına neden olmaktadır.

2.2.7. Ray Mantarında Oluşan Düşey Aşınma

Ray mantarında oluşan düşey aşınma da yanal aşınma gibi demiryolu hattındaki trafik yüklerinden dolayı oluşmaktadır. Düşey aşınma arızası UIC 2204 kodu ile ifade edilmektedir. Ray hattında oluşan düşey aşınma zamanla artarak rayın kırılmasına yol açmaktadır. Ray mantarındaki düşey aşınma arızası görsel muayene veya ray aşınmasını ölçen çeşitli cihazlar kullanılarak tespit edilmektedir. Ayrıca kamera kullanılarak görüntü işleme yöntemleri ile birlikte tespit edilebilmektedir. Ray hattındaki düşey aşınmalar önemli ölçüde artmışsa demiryolu hattındaki kazaların engellenmesi için ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir [124]. Ray mantarında oluşan düşey aşınma arızasına ait görüntü Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15. Ray mantarında oluşan düşey aşınma arızasına ait görüntü [124]

2.2.8. Ray Yüzeyinin Kabuklanması

Ray mantarında oluşan yüzey kabuklanması diğer arızalar gibi trafik yükünden dolayı oluşmaktadır. Ray mantarının yorulmasıyla oraya çıkmaktadır. Bu arızalar, ray yüzeyinde oluştuğu için ray çeliğinin yapısı arızanın oluşmasında oldukça etkilidir. Rayın üretim aşamasında oksit kalıntılar ve kalıntı gerilmeleri yüzey kabuklanmasına neden olur [124,125]. Ray yüzeyinde kabuklanma oluşmadan önce yuvarlanma yüzeyi dalgalı bir şekilde deforme olmaktadır. Bu deforme zaman içinde artarak kabuklanmaya neden olmaktadır. Şekil 2.16'da ray kabuklanmasına ait örnek görüntü verilmiştir.



Şekil 2.16. Ray yüzeyindeki kabuklanma arızasına ait örnek görüntü

Ray yüzeyinde oluşan kabuklanma arızaları zamanla ilerleyerek ray yüzeyinde metal parçaların kopmasına neden olur. Kabuklanma arızaları genellikle görsel muayene veya ultrasonik yöntemler kullanılarak tespit edilmektedir. Ayrıca son zamanlarda arıza tespiti için kullanılan kameralar ile kabuklanma arızaları tespit edilmektedir. Ray yüzeyinde oluşan kabuklanma arızaları UIC 2221 kodu ile ifade edilmektedir.

2.2.9. Ray Mantarında İç Köşe Kabuklanması

Ray mantarında iç köşe kabuklanması UIC 2222 kodu ile ifade edilmektedir. Ray hattını kullanan trenlerin trafik yüklerinden dolayı oluşan bir arıza türüdür. İç köşe kabuklanması başlangıç aşamasındayken, ray mantarında rastgele aralıklı dağılmış siyah noktalar olarak görülmektedir. Bu siyah noktalar zamanla artarak ray yüzeyinin iç köşesinde çatlaklar oluşturur daha sonra da bu çatlaklar kabuklanmayı oluşturur. Bazı bölgelerde oluşan iç kabuklanmalar oldukça yoğundur. Bu aşamada ray yüzeyi kullanılmaya devam ederse ray metalinin akması veya yerel çökmelere neden olmaktadır. Ray mantarında iç köşe kabuklanmasına ait örnek görüntü Şekil 2.17'de verilmiştir [118].



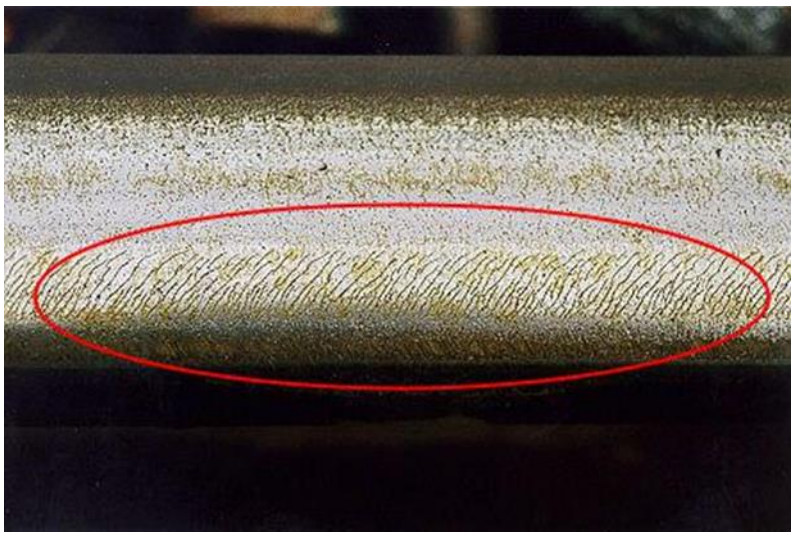
Şekil 2.17. Ray mantarında iç köşe kabuklanmasına ait örnek görüntüler

Ray mantarındaki iç köşe kabuklanması genellikle tekerlek ile ray arasındaki yüksek temastan dolayı oluşmaktadır. Yatay kurpların yüksek kotlu dış raylarında iç köşe kabuklanmaları yaygın olarak görülmektedir. Kurplardaki yüksek kotlu dış raylarda tekerlek ile ray arasında yüksek temas gerilmeleri oluşmaktadır. Bu arıza türü diğer arıza türlerinde de olduğu gibi görsel muayene, ultrasonik yöntemler veya kameralar kullanılarak tespit edilebilmektedir. Bu tür arızalardan dolayı sürekli gözlem altında

tutulmalıdır. Arıza boyutunun ilerlemesi durumunda ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir [124].

2.2.10. Ray Mantarında Oluşan Kılcal Çatlaklar

Ray mantarında oluşan kılcal çatlaklar genellikle kurplarda dış rayın iç köşesinde görülen arıza türüdür. Bu arıza türü UIC 2223 kodu ile ifade edilmektedir. Demiryolu hattında kurplarda dış rayın iç kısımlarında tekerlek ile ray arasında yüksek temas gerilimi oluştuğundan bu bölgelerde arızaların görülme ihtimali oldukça yüksektir. Ray mantarında meydana gelen kılcal çatlakların oluşumunu; tekerlek yükleri, hat geometrisi, aracın boji karakteristiği, tekerlek ile ray arasındaki düşey düzensizlikler, raya verilen dever oranı ve tekerlek ile rayın yarıçapları etkilemekledir. Kılcal çatlaklar rayların iç köşelerinde düzenli veya düzensiz aralıklarla görülmektedir. Ayrıca rayların kaynak bölgelerinde de kılcal çatlaklar oluşabilmektedir. Kılcal çatlaklar genel olarak dört sınıfta incelemektedir. Hafif seviye kılcal çatlaklarda en uzun çatlağın boyu 10 mm'den küçüktür. Orta seviye kılcal çatlakların uzunluğu 10 mm ile 19 mm arasındadır. Ciddi seviye kılcal çatlakların uzunluğu 20 mm ile 29 mm'dir. Çok ciddi seviye kılcal çatlaklar ise 30 mm'den daha uzundur. Ray mantarında oluşan kılcal çatlakların ilerlemesi durumunda ray kırılmaları meydana gelmektedir [118-125]. Şekil 2.18'de ray yüzeyinde oluşan kılcal çatlaklara ait örnek görüntü verilmiştir [118].



Şekil 2.18. Ray mantarının iç köşesinde oluşan kılcal çatlak görüntüsü [118].

Kılcal çatlaklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilirken kameralar kullanılarakta tespit edilebilmektedir. Kılcal çatlakların büyümesi durumunda ray kırılmalarına neden olabilecek kadar büyük arızalar oluşturabilmektedir. Ray yüzeyinde oluşan kılcal çatlaklar tespit edilerek sürekli gözetim altında tutulması gerekmektedir. Kılcal çatlakların fazla olduğu bölgelerde ilerleyen zamanlarda ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir [126].

2.2.11. Ray Mantarında Oluşan Tekerlek Yanığı

Ray mantarında oluşan tekerlek yanığı, ray yüzeyinde tekil olarak görülmüş ise UIC 2251, tekrarlı olarak görülüş ise UIC 2252 kodu ile ifade edilmektedir. Tekil olarak oluşmuş tekerlek yanığı demiryolu hattındaki trafik yüklerinden kaynaklanmaktadır. Hareket halindeki trenin tekerleğinin ray yüzeyi üzerinde kayması sonucunda ray yüzeyinde bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabaka ray mantarında yatay veya enine oluşabilmektedir. Tabakanın yatay yönde oluşması durumunda yerel kabuklanma arızası oluşmaktadır. Bu durumda aşırı trafik yükleri altında kabuklanma arızası derine doğru ilerlemez ama ray mantarında çökme meydana gelir. Tabakanın enine oluşmasında ise ray gövdesine karşı oluşan iç arızaların oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür iç arızalar ray mantarı üzerinde çökme oluşturmaktadır.

Ray mantarı üzerinde meydana gelen tekrarlı tekerlek yanığı arızası, trafik yükleri nedeniyle oluşmaktadır. Demiryolu araçlarının harekete başladığı, fren yaptığı veya tekerlek kaymasının tekrarlı olarak yapıldığı konumlarda oluşama ihtimali yüksektir. Tekrarlı tekerlek yanığının enine büyümesi özellikle soğuk havalarda rayın çatlamasına neden olmaktadır. Bu tür arızalar genellikle istasyon bölgelerinde oluşmaktadır. Şekil 2.19'da ray yüzeyinde oluşan tekerlek yanığı kusuru görülmektedir [124].

Bu tür arızalar görsel muayene, ultrasonik yöntemler ve kameralar kullanılarak arıza tespiti yapılmaktadır. Ray yüzeyinde oluşan hafif derecede tekerlek yanığı arızası taşlanarak giderilmelidir. Erken tespit edilip giderilmediği zaman daha büyük arızalara sebep olabilmektedir. Bu durumda ray kesitinin değiştirilmesi gibi büyük bir iş yükü ortaya çıkmaktadır [124].



Şekil 2.19. Ray yüzeyinde oluşan tekrarlı tekerlek yanığı görüntüsü

2.2.12. Ray Mantarı Yüzeyinde Çökme

Ray mantarında yüzeyinde oluşan çökme arızası, ray yüzeyinde oluşan metal yorulma ile başlamaktadır. Ray yüzeyindeki çökme arızası, öncü çatlak ve artçıl çatlak olmak üzere iki çatlak türünden oluşmaktadır. Öncü çatlak, demiryolu hattında trafik yönünde ilerlerken artçıl çatlak ise trafik yönüne ters yönde ilerlemektedir. Artçıl çatlak öncü çatlaktan daha hızlı ilerler. Bu arıza türü demiryolu hattında tekerlek ile ray arasındaki temas bölgesinin genişlemesi ile oluşmaktadır. Ray mantarındaki çökme kusurları genellikle dairesel çatlaklar içeren karanlık noktalar ile birlikte görülmektedir. Daha sonra bu çatlaklar ilerleyerek çökme kusurları oluşmaktadır. Ayrıca ondülasyon oluşan bölgelerde de çökme arızaları görülebilir. Çökme arızaları demiryolu hattında ray yüzeyinde çok sayıda ve rastgele olarak bulunmaktadır. Çökme arızalarının daha da ilerlemesi ray kırılmalarına neden olmaktadır. Çökme arızaları genellikle ray yüzeyinin orta kısmında ve orta dereceli yatay kurpların dış rayın iç köşesinde çatlaklar ile birlikte görülmektedir [124,125]. Bundan dolayı çökme arızaları ray yüzeyi çökmesi ve iç köşe çökmesi olarak iki türlü oluşmaktadır. Şekil 2.20'de ray yüzeyinde oluşan çökme arızasına ait örnek görüntü verilmiştir [118].



Şekil 2.20. Ray yüzeyinde çökme arızası görüntüleri

Ray yüzeyinde oluşan çökme arızası UIC 227 kodu ile ifade edilmektedir. Bu arıza türü görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Ayrıca kameralar kullanılarak tespit edilebilecek bir arıza türüdür. Çökme arızasının ilerlemesi durumu olukça tehlikeli olup ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir [124].

2.2.13. Ray Mantar-Gövde Birleşim Yerinde Yatay Çatlak

Ray mantarı ile gövde arasında oluşan yatay çatlaklar genellikle üretim sırasındaki hatalarından kaynaklanmaktadır. Mantar ile gövde birleşim yerindeki yatay çatlaklar ray sonlarında görülmüş ise UIC 1321 kodu ile ifade edilir. Eğer bu arıza ray sonları dışındaki diğer bölgelerde görülmüş ise UIC 2321 kodu ile ifade edilmektedir. Ray mantarı ile gövde birleşim yerindeki yatay çatlağın daha da ilerlemesi durumunda ray mantarı gövdeden ayrılır ve rayda parçalanmalar oluşur [124]. Ray mantarı ile gövde birleşimindeki yatay çatlak arızasına ait örnek görüntü Şekil 2.21'de verilmiştir.

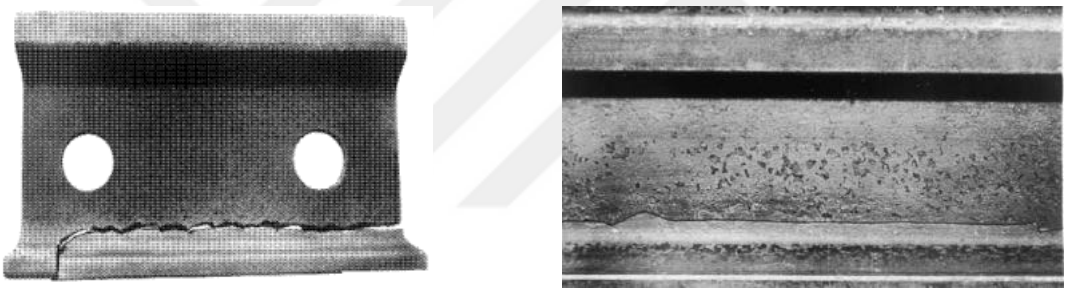


Şekil 2.21. Ray mantarı ile gövde birleşim yerindeki yatay çatlak arızası görüntüleri

Bu arıza türü bazen karayolu bazen de demiryolu hemzemin geçitlerinde de ortaya çıkmaktadır. Rayda görsel muayene ve ultrasonik yöntemler kullanılarak bu arıza türü tespit edilebilmektedir.

2.2.14. Ray Gövde-Taban Birleşim Yerinde Yatay Çatlak

Ray gövde ile tabanı arasındaki yatay çatlaklar genellikle üretim sırasında oluşan hatalardan dolayı meydana gelmektedir. Arızanın ilerlemesi durumunda ray gövdesi ile tabanı arasında kırılmalar oluşarak birbirinden ayrılmaktadır. Bu arıza türü ray sonlarında görülmüş ise UIC 1322 kodu ile ray sonları dışında diğer bölgelerde görülmüş ise UIC 2322 kodu ile ifade edilmektedir. Şekil 2.22'de ray gövdesi ile tabanı arasında oluşan yatay çatlak arızasına ait örnek görüntü verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 2.22. Ray gövdesi ile tabanı arasındaki yatay çatlak görüntüsü [124] **(a)** UIC 1322 **(b)** UIC 2322.

Ray gövdesi ile tabanı arasındaki çatlaklar görsel muayene yada ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Arızanın tespit edilmesi durumunda ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir.

2.2.15. Ray Gövdesinde Oluşan Düşey Çatlak

Ray gövdesinde oluşan düşey çatlaklar üretim sırasındaki hatalardan dolayı oluşmaktadır. Bu arıza türü ray sonlarında görülmüşse UIC 133, diğer bölgelerde görülmüşse UIC 233 kodu ile ifade edilmektedir. Üretim sırasında ray gövdesinde oluşan büzülme boşluklarından dolayı düşey çatlaklar oluşmaktadır. Düşey çatlakların ilerlemesi durumunda ray gövdesinde şişme meydana gelmektedir ve ray kırılmalarına yol

açmaktadır. Ray gövdesinde oluşan düşey çatlaklara ait örnek görüntü Şekil 2.23'te verilmiştir [124].



(a) **(b)**

Şekil 2.23. Ray gövdesinde oluşan düşey çatlak görüntüsü [124] **(a)** UIC 133 **(b)** UIC 233.

Ray gövdesinde oluşan düşey çatlaklar görsel muayene veya ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Çatlakların artması durumunda kırılmalara neden olacağından ray kesiti değiştirilmelidir [124].

2.2.16. Ray Gövdesinde ve Tabanında Korozyon

Ray gövdesinde oluşan korozyon arızaları ray sonlarında görülmesi durumunda UIC 134, diğer bölgelerde görülmesi durumunda UIC 234 kodu ile ifade edilmektedir. Ray tabanında oluşan korozyon arızaları ise ray sonlarında görülmesi durumunda UIC 154, diğer bölgelerde görülmesi durumunda UIC 254 kodu ile ifade edilmektedir. Oluşan korozyon arızaları, demiryolu hattındaki trafik yüklerinden dolayı meydana gelmektedir. Tüneller, hemzemin geçitleri gibi özel hat bölgelerinde korozyon oluşumu diğer bölgelere oranla daha fazladır. Korozyonlar zamanla oluşarak ray gövde ve tabanında paslanmaya neden olmaktadır. Paslanma sonucunda ray gövde ve taban kalınlığı giderek incelmektedir. Bu incelmeden dolayı ray gövde ve tabanında kırılmalar oluşabilir. Şekil 2.24'te ray tabanında oluşan korozyon arızasına ait örnek görüntü verilmiştir.



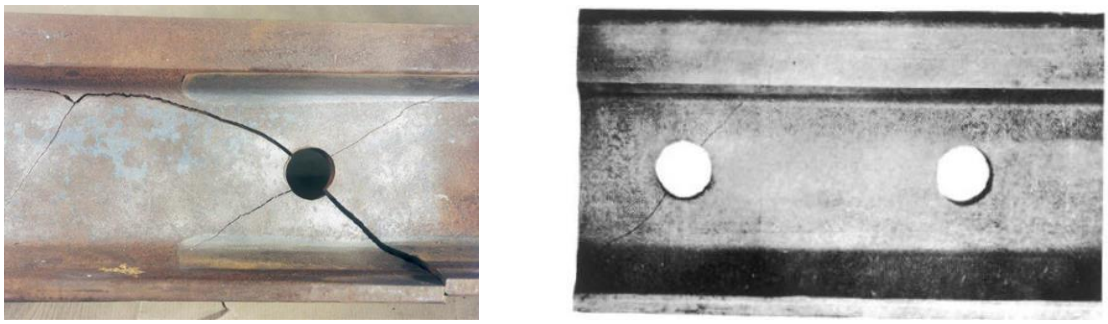
(a) **(b)**

Şekil 2.24. Ray tabanında oluşan korozyon arızası görüntüsü [124] **(a)** UIC 234 **(b)** UIC 254

Ray gövdesinde ve tabanında oluşan korozyon arızaları görsel muayene yöntemleri ile tespit edilmektedir.

2.2.17. Ray Gövdesinde Oluşan Çapraz Çatlaklar

Ray gövdesinde oluşan çapraz çatlaklar demiryolundaki trafik hattından dolayı oluşmaktadır. Bu arıza türü UIC 135 kodu ile ifade edilmektedir. Bu çatlaklar ray sonlarında cebire delikleri çevresinde çapraz olarak başlayarak rayın kırılmalarına neden olmaktadır. Ray gövdesinde oluşan çapraz çatlak arızasına ait görüntü Şekil 2.25'te verilmiştir.

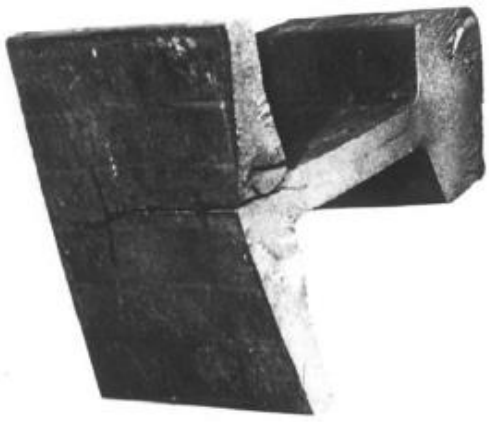


Şekil 2.25. Ray gövdesinde çapraz çatlak kusuru görüntüleri [124].

Ray gövdesinde oluşan bu arızalar, çoğunlukla cebire deliklerinin açılma kalitesine bağlıdır. Bu arıza türü ultrasonik yöntemler ve görsel muayene ile tespit edilmektedir.

2.2.18. Ray Tabanında Oluşan Düşey Çatlak

Ray tabanında oluşan düşey çatlaklar, üretim sırasındaki hatalardan dolayı oluşmaktadır. Bu arıza türü ray sonlarında görülmesi durumunda UIC 153, diğer bölgelerde görülmesi durumunda UIC 253 kodu ile ifade edilmektedir. Ray üretim aşamasında ray tabanının alt ve orta kısımlarında küçük çizikler oluşarak zamanla demiryolu hattındaki trafik yükleri altında düşey çataklara dönüşmektedir. Bu çatlaklar soğuk havalarda ve aşırı yük altında aniden kırılmaktadır. Birden fazla bölgede kırılmalar meydana geldiğinde ray tabanında boşlular oluşmaktadır. Şekil 2.26'da ray tabanında oluşan düşey çatlak arızasına ait örnek görüntü verilmiştir [124].



Şekil 2.26. Ray tabanında oluşan düşey çatlaktan dolayı oluşan kırık [124].

Bu tür çatlakların en kötü yanı ise aynı dökümden üretilen çoğu rayda görülebilmektedir. Ray tabanında oluşan bu çatlaklar görsel muayene ile tespit edilmektedir. Ray tabanında oluşan düşey çatlakların tespit edilmesi durumunda ray kesitinin değiştirilmesi gerekmektedir. Tespit edilmemesi veya değiştirilmemesi durumunda ray tabanında kırıklar oluşarak demiryolunda kazalara yol açabilir.

2.2.19. Alüminotermit Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak

Demiryolu hattında bazı bölgelerde rayların uçları birbirine kaynak edilerek bağlanmaktadır. Kaynak bölgelerinde birçok arıza türü oluşmaktadır. Kaynak edilen noktanın 10 cm uzaklığına kadar olan alan kaynak bölgesi olarak isimlendirilir. Bu bölgede oluşan herhangi bir arıza kaynak arızası olarak adlandırılmaktadır. Ray uçlarının birbirine

birleştirildiği alüminotermit ray kaynaklarında, yakma alın kaynaklarında ve elektrik ark kaynaklarında görülen arızaları içermektedir. Kaynak yapımı sırasında ortaya çıkan yetersiz ergime ve yabancı cisimler gibi bazı nedenlerden dolayı kaynak işlemi istenilen kaliteye ulaşmayabilir. Böyle durumlarda ray hattının yorulması durumunda kaynak bölgelerinde çatlaklar ve kırılmalar oluşmaktadır.

Alüminotermit kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak arızaları UIC 422 kodu ile ifade edilmektedir. Bu arıza türünün ortaya çıkmasının en büyük sebebi, kaynak işleminde önce rayların uçlarının yeniden kesilmemesidir. Alüminotermik kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlaklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilebilmektedir.

2.2.20. Alüminotermit Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak

Alüminotermik kaynak kesitinde oluşan enine çatlaklar üretim sırasında oluşan gözenekli yapılar, cüruf gibi yabancı maddeler ve hizalama hatalarından dolayı oluşmaktadır. Bu arıza türü UIC 421 kodu ile ifade edilmektedir. Görsel muayene ve ultrasonik yöntemlerle bu arıza türü tespit edilmektedir.

2.2.21. Yakma Alın Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak

Yakma alın kaynağında ise kaynak yapılacak rayların uç kısımları kesilerek yüzeyi temizlenmektedir. Isıtma işleminin ardından rayların uçları erime sıcaklığına geldiğinde belirli bir basınçla birbirine kaynak edilirler. Bu arıza türü, yakma alın kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak ve yakma alın kaynak kesitinde enine çatlak olmak üzere iki çeşittir.

Kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlak arızası UIC 412 kodu ile ifade edilmektedir. Bu arıza türü kaynağın gövde kısmında oluşmakta ve raylarda yukarı veya aşağı yönde ilerleyerek kırılmalara neden olmaktadır. Görsel muayene ve ultrasonik yöntemler kullanılarak yakma gövdesinde oluşan yatay çatlaklar tespit edilmektedir. Çatlakların tespit edilmesi durumunda kaynaklı bölgenin kesilip yeniden kaynak edilmesi gerekmektedir.

2.2.22. Yakma Alın Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak

Yakma alın kaynak kesitinde oluşan enine çatlak arızası UIC 411 kodu ile ifade edilmektedir. Bu arıza türünde çatlak, rayın mantar veya taban bölgesinde başlayıp enine doğru ilerlemektedir. Bu çatlakların erken tespit edilememesi durumunda kaynak bölgelerinde kırılmalar oluşmaktadır. Oluşan çatlaklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler kullanılarak tespit edilmektedir.

2.2.23. Elektrik Ark Kaynak Gövdesinde Oluşan Yatay Çatlak

Yakma alın kaynağı ve alüminotermit kaynağının yapılması mümkün olmayan bölgelerde, rayların birleştirilmesi için elektrik ark kaynağı yöntemi uygulanmaktadır. Elektrik ark kaynağı yapılmadan önde ray uçları belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Elektrik ark kaynağı kusurları, kaynak gövdesinde yatay çatlaklar ve kaynak kesitinde enine çatlaklar olmak üzere iki türdür [124].

Bu arıza türü UIC 432 kodu ile ifade edilmektedir. Genellikler ray uçlarının kaynak öncesinde kesilmediği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Ray uçlarının kesilmemesi durumunda yapılan kaynak işlemi istenilen başarıya ulaşmamaktadır. Elektrik ark kaynak gövdesinde oluşan yatay çatlaklar görsel muayene ve ultrasonik yöntemler ile tespit edilmektedir. Tespit edilen yatay çatlaklara müdahale edilmemesi durumunda rayda kırılmalar oluşarak kazalara neden olmaktadır.

2.2.24. Elektrik Ark Kaynak Kesitinde Oluşan Enine Çatlak

Elektrik ark kaynak gövdesinde oluşan enine çatlaklar UIC 431 kodu ile ifade edilmektedir. Genellikle kaynağın dış yüzeyinde görülen çatlak türdür. Bu arıza türü diğer arıza türleri gibi görsel muayene ve ultrasonik yöntemlerle tespit edilebilmektedir.

2.3. Ray Bağlantı Elemanları Arızası

Ray bağlantı elemanları, rayların travers üzerinde sabitlenmesini sağlayan araçlardır. Ray bileşenlerinin gevşemesi veya yerinden çıkması durumunda rayların sabitlenmesi

zorlaşmaktadır. Ray bileşen arızalarını temsil eden örnek görüntüler Şekil 2.27'de verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 2.27. Bağlantı bileşeni arızaları **(a)** Bağlantı elemanının çıkması **(b)** Bağlantı elemanının gevşemesi

Şekil 2.27'de ki gibi ray bileşenlerinde oluşan arızaların erken teşhisi demiryolu hattının güvenliği için önemlidir. Bu çalışmada hem ray yüzeyinde oluşan arızalar hem de ray bileşenlerinde oluşan arızalar tespit edilmektedir.

2.4. Ray Arızaları Tespit Yöntemleri

Demiryolu hattında, ray ve diğer bileşenlerde birçok arıza türü oluşmaktadır. Bu arızalar erken tespit edilip gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Sorunun erken tespit edilmemesi durumunda ise arızalar büyüyerek ray kırılmaları gibi daha büyük arızalara neden olmaktadır. Ray kırılması durumu, trenin raydan çıkması gibi büyük kazaların oluşmasına neden olmaktadır. Demiryolunda oluşan arızaların bakımı sırasında demiryolu ulaşımı aksamaktadır. Bu sebeple hem maddi hem de manevi kayıplar oluşmaktadır. Demiryolu altyapısında durum izleme ve arıza tespiti için temaslı ve temassız birçok yöntem mevcuttur. Raylarda uygulanan muayene yöntemleri genel olarak aşağıda verilmiştir.

- Ultrasonik yöntemi,
- Girdap akımları yöntemi,
- Radyografi yöntemi,
- Sıvı penetrant yöntemi,
- Manyetik indüksiyon yöntemi,
- Görme tabanlı yöntemler.

Bu yöntemler rayların muayenesi ve arızaların tespiti için kullanılan tahribatsız yöntemlerdir. Tahribatsız yöntemler; muayene sırasında ray hattına herhangi bir zarar verilmemesidir.

2.4.1. Ultrasonik Yöntemi

Ultrasonik yöntemlerde, ray üzerine ultrasonik dalgalar gönderilip yansıyan dalgalar izlenerek arıza tespiti yapılmaktadır. Cihaz üzerinde dalgaların gönderilmesi ve yansıyan dalgaların alınması için problar kullanılmaktadır. Ultrasonik yöntemler, yüksek frekanslı ses dalgaları ile gerçekleştirilmektedir. Ultrasonik yöntemler; geçiş yöntemi, rezonans yöntemi ve darbe yankı yöntemi olmak üzere üç çeşittir. Geçiş yönteminde, bir verici ve bir alıcı prob kullanılmaktadır. Muayene edilecek malzemenin bir yüzeyine verici prob, diğer yüzeyine alıcı prob yerleştirilerek uygulanmaktadır. Arızalı malzemelerde, arızanın türüne ve büyüklüklerine göre ekranda sinyaller oluşmaktadır. Rezonans yönteminde, rezonansı elde etmek için dalgalar sürekli gönderilir. Dalgaların zayıflaması dikkate alınarak muayene yapılır. Darbe yankı yönteminde ise, tek taraftan verici ve alıcı olarak çalışan proba ses demeti gönderilir. Gönderilen ses demetinde biri ön cidar ve diğeri arka cidar yankısına ait iki sinyal elde edilir. Eğer ray içerisinde bir arıza varsa iki sinyal arasında hata sinyali oluşmaktadır. Bu yöntem en yaygın kullanılan ultrasonik yöntemidir. Şekil 2.28'de rayların manuel olarak ultrasonik yöntemle muayene edilmesine ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.28. Rayların manuel olarak ultrasonik yöntemle muayene edilmesi [128].

2.4.2. Girdap Akımları Yöntemi

Bu yöntem elektrik iletkenliği olan tüm metaller üzerinde uygulanabilmektedir. Muayene işlemi için üreteç, test bobini ve bir gösterge kullanılmaktadır. Üreteç manyetik alanı oluşturan bobine AC akımı vermektedir. Bobine gelen elektrik raylara yaklaştırıldığında rayların içerisinde girdap akımları indüklenir. Malzemenin içerisindeki girdap akımları ayrı bir manyetik alan oluşturmaktadır. Gösterge olarak isimlendirilen okuma cihazı, manyetik alan içerisindeki süreksizliği tespit ederek raylarda arıza tespiti yapmaktadır. Girdap akımları yöntemi, yüzey ve yüzeye yakın süreksizliklerin tespit edilmesi için en uygun yöntemdir. Bu yöntem ile raylar içerisindeki çatlaklar ve korozyon gibi arızalar tespit edilebilmektedir. Demiryolu hattında girdap akımları yöntemi kullanılarak, rayların muayene edilmesine ait görüntü Şekil 2.29'da verilmiştir [129].

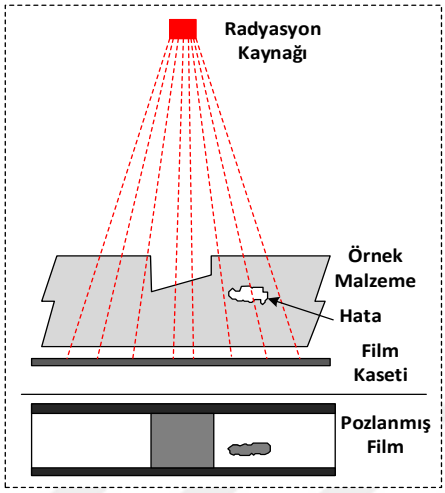


Şekil 2.29. Demiryolu hattında rayların girdap akımları yöntemi ile muayene edilmesi [129]

2.4.3. Radyografi Yöntemi

Radyografi yöntemi ile muayene edilecek malzeme, bir cihazdan çıkan *x* ve gama ışınları ile ışınlanır. Radyasyon, malzeme içerisinden geçerken malzemenin özelliğine bağlı olarak belirli oranda yutulmaktadır. Kalan radyasyon ilerleyerek malzemenin arka yüzeyine yerleştirilen filme ulaşmaktadır. Böylece ray veya başka bir metal içerisinde oluşabilen arızalar bu yöntem kullanılarak tespit edilmektedir. Bu yöntem, oldukça hassas

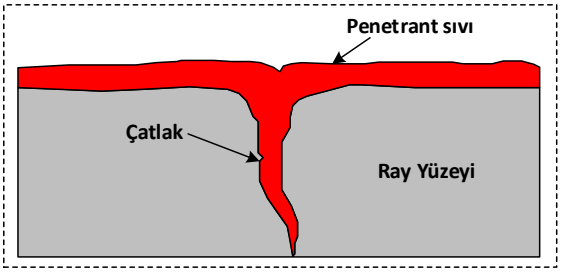
bir ölçüm yöntemi olması ve ölçüm sonuçlarının kaydedilmesi nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 2.30'da radyografi yönteminin temel yapısı verilmiştir [130].



Şekil 2.30. Radyografi yönteminin temel yapısı [131]

2.4.4. Sıvı Penetrant Yöntemi

Sıvı penetrant yöntemi ile metalik veya metalik olmayan tüm malzemelerdeki yüzey arızaları tespit edilmektedir. Bu yöntem ile yüzey arızalarının tespit edilebilmesi için yüzeyin açık olması gerekmektedir. Yöntem uygulanırken yüzeyde yağ, kir ve pas gibi atık maddelerin bulunmaması gerekmektedir. Temiz bir yüzeye penetrant sıvısı uygulanarak 5 ile 30 dakika arası beklenmektedir. Bu süreye penatrant süresi denmekte ve penetrantın türüne göre bekleme süresi değişmektedir. Bekleme işleminin ardından penetrant sıvısı, geliştirici adlı madde ile yüzeye geri çekilmektedir. Böylece incelenen yüzeydeki arızalar görünür hale gelmektedir [131]. Penetrant sıvısının uygulanmasına ait görüntü Şekil 2.31'de verilmiştir [131].



Şekil 2.31. Penetrant sıvısının uygulanması

2.4.5. Manyetik İndüksiyon Yöntemi

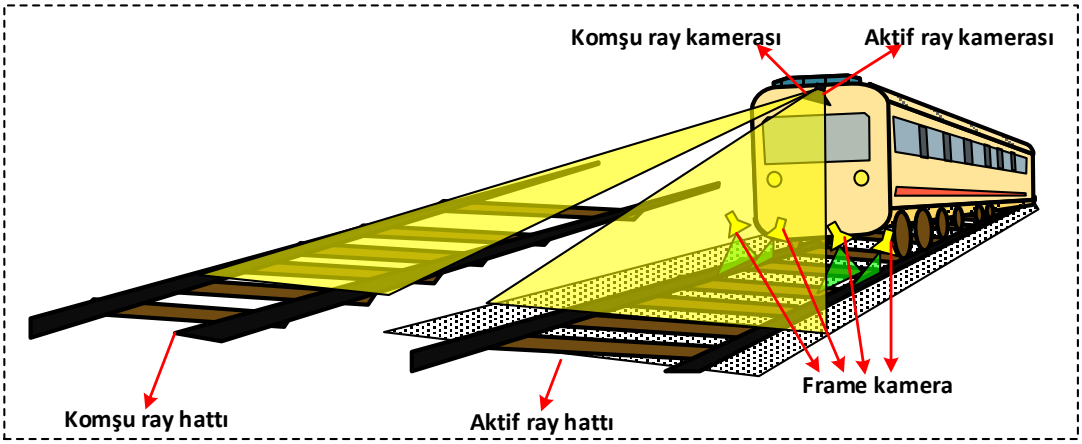
Manyetik indüksiyon yönteminin bir diğer adı manyetik akı sızıntısı yöntemidir. Bu yöntemde manyetik akı sızıntısı sensörleri bünyesinde daimi mıknatıslar veya DC elektromıknatısları bulunmaktadır. Bunlar ölçümü yapılacak metali soyma noktasına kadar manyetize etmektedir. Manyetik akı çizgileri, malzemeye metal fırçalar veya hava yoluyla iletilmektedir. Eğer malzemede bir arıza varsa, manyetik akı çizgileri kusura yakın bölgede dışarı doğru sızıntı yapmaktadır. Algılama sensörleri kaçak manyetik alanı tespit etmekte ve arızanın durumu hakkında bilgi vermektedir. Şekil 2.32'de manyetik indüksiyon ve ultrasonik test aracına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 2.32. Manyetik indüksiyon ve ultrasonik test aracına ait görüntü [132]

2.4.6. Görme Tabanlı Yöntemler

Kamera yöntemi son yıllarda geliştirilen yöntemlerde biridir. Test araçlarının tepesine ve önüne sabitlenen kameralar ile demiryolu hattındaki arızalar tespit edilmektedir. Kameralardan alınan görüntüler, bir bilgisayar veya gömülü kart üzerinde görüntü işleme yöntemleri kullanılarak işlenmektedir. Gerekli işlemlerin sonucunda raylarda bulunan aşınma, çatlak, ondülasyon ve kırılma gibi birçok arıza tespit edilmektedir. Bu yöntem görüntü işlemlerinin hızına göre demiryolu hattında kolayca uygulanmaktadır. Uygulanması sırasında, demiryolu hattında ulaşım aksaması gibi istenmeyen durumlar oluşmamaktadır. Bu sebeple daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 2.33'te kamera yöntemini kullanan örnek bir demiryolu aracı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.33. Görme tabanlı yöntem kullanan örnek demiryolu aracı

3. KARMAŞIK BULANIK OTOMATALAR

Bulanık otomata ve karmaşık bulanık otomata kavramları uygulama alanlarına göre klasik bulanık sistemlerden daha avantajlıdır. Klasik bulanık sistemlerde kullanılacak veriler ilk olarak bulanıklaştırılmaktadır. Bulanık veriler bir kural tablosu ile çıkarsama yapıldıktan sonra durulaştırılmaktadır. Bulanık otomata da ise bulanık sistem çıkışını bir otomata ile ilişkilendirerek sonuçların daha anlamlı olması sağlanmaktadır. Karmaşık bulanık sistemler zamansal veya mekânsal periyodiklik durumlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Karmaşık bulanık sistemlerde, üyelik fonksiyonları karmaşık düzlem üzerinde oluşturulmaktadır. Karmaşık bulanık sistemlerde üyelik fonksiyonları gerçek veri seti kullanılarak da oluşturulabilmektedir. Bu durum karmaşık bulanık sistemleri klasik bulanık sistemlerden ayıran özelliklerden biridir. Fakat karmaşık bulanık sistemlerin uygulama alanları klasik bulanık mantığa göre daha özeldir. Karmaşık bulanık sistemler periyodik durumlarda kullanılırsa avantajlı olmaktadır. Karmaşık bulanık otomatada ise karmaşık bulanık mantık çıkışını bir otomata ile ilişkilendirerek kullanılmaktadır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, bulanık mantık, sonlu durum otomata, bulanık otomata, karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata kavramları açıklanmıştır. Bulanık mantık, bulanık otomata, karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata için örnek uygulamalar geliştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.1. Sonlu Durum Makineleri ve Otomatalar

Makine teorisi, bilgisayar sistemlerinin ve bunların ilişkili dillerinin ve yazılımlarının geliştirilmesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olmuştur. Ayrıca biyoloji, biyokimya, psikoloji ve diğer çeşitli bilim alanlarında da uygulamalar bulunmaktadır [133].

Bir altılı tanımlama grubu $M=(Q,X,Y,f,g,s)$ sonlu durum makinesi olarak adlandırılmaktadır. Eğer Q, X ve Y sonlu boş olmayan kümeler ise $f:QxX\to Q$, $g:QxX\to Y$ ve $s\in Q$'dur.

Q'nun elemanları durumlar olarak ifade edilir. X ve Y'nin elemanları sırasıyla giriş ve çıkış sembollerini ifade etmektedir. F ve g fonksiyonları sırasıyla durum geçiş ve çıkış fonksiyonlarını ifade etmektedir. S durumu ise başlangıç durumunu ifade etmektedir.

Örnek: $Q=\{q_0,q_1\}$, $X=\{a,b\}$ ve $Y=\{0,1\}$ olsun. Tanımlı fonksiyon $f:QxX\to Q$, $g:QxX\to Y$ Tablo 3.1'de verildiği gibidir.

Tablo 3.1. Durum geçiş ve çıkış fonksiyonları

	F		g	
Q/X	a	b	a	b
q_0	q_0	q_1	0	1
q_1	q_1	q_1	1	0

Bu duruma göre $M=(Q,X,Y,f,g,q_0)$ bir sonlu durum makinesidir. Tablo 3.1'in yorumlaması aşağıda verilmiştir.

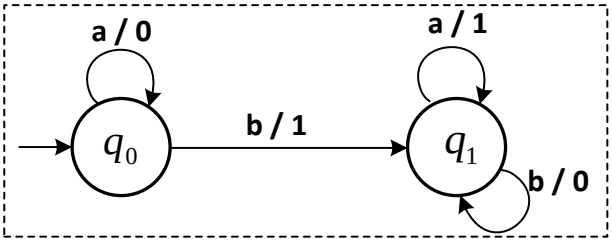
$f(q_0,a)=q_0$ $\quad g(q_0,a)=0$

$f(q_0,b)=q_1$ $\quad g(q_0,b)=1$

$f(q_1,a)=q_1$ $\quad g(q_1,a)=1$

$f(q_1,b)=q_1$ $\quad g(q_1,b)=0$

Gelecek durum ve çıkış fonksiyonları ayrıca bir geçiş diyagramı tarafından tanımlanabilmektedir. Yukarıda verilen sonlu durum makinesi için geçiş diyagramını Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Örnek bir sonlu durum makinesi için geçiş diyagramı

Geçiş diyagramının graf teorisinde diagraph olarak adlandırıldığı bilinmektedir. Köşeler durumlara karşılık gelmektedir. Başlangıç durumu bir ok ile gösterilmektedir. Eğer sonlu durum makinesi q durumundaysa, x girişi y çıkışına gidiyorsa ve a q' durumuna hareket ediyorsa, a yönlendirilmiş kenarı q köşesinden q' köşesine çizilmektedir ve x/y olarak etiketlenmektedir.

$M = (Q, X, Y, f, g, q)$ bir sonlu durum makinesi olsun. M için bir giriş string'i X üzerinde bir dizgidir. M için çıkış string'i $y_1 ... y_n$ olup, giriş string'i $x = x_1 ... x_n$ ifadesine karşılık gelmektedir. Eğer $q_0 ... q_n \in Q$ durumları mevcut ise, aşağıda verilen ifade elde edilebilmektedir.

$$q_0 = q$$

$$q_i = f(q_{i-1}, x_i) \qquad for \quad i = 1,...,n_i$$

$$y_i = g(q_{i-1}, x_i) \qquad for \quad i = 1,...,n$$

Şekil 3.1'de sonlu durum makinesi için bir giriş dizisine karşılık gelen tanımlanmış çıkış dizisi *aababba*'dır.

Başlangıç olarak q_0 durumunda başlanır. a sembolü girilir ve 0 çıkışı verilir. Durum q_0 olur. a sembolü tekrar giriş olarak verilir ve tekrar q_0 durumundadır. Bir sonraki adımda b sembolü verilir, 1 çıkışı üretilir ve makine b durumuna gider. Bu işlem son a sembolü verilene kadar devam eder ve çıkış dizisi olarak 0011001 elde edilir.

Bir sonlu durum otomata sonlu durum makinesinin özel bir türüdür. Dillerle olan ilişkisi nedeniyle özel ilgi görmektedir [133].

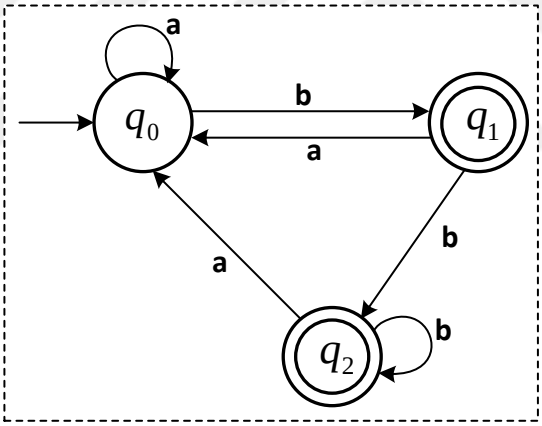
Bir sonlu durumlu otomat $A = (Q, X, Y, f, g, s)$ sonlu durumlu bir makinedir, öyle ki, çıkış sembolleri Y 'nin $\{0,1\}$ olduğu ve mevcut durumun son çıkışı belirlediği bir durumdur. Son çıkışın 1 olduğu bu durumları kabul eden durumlardır.

Sonlu durum makinesi A 'nın geçiş diyagramı Tablo 3.2'de tanımlanmaktadır. Başlangıç durumu q_0 'dır. A bir sonlu durum otomatıdır ve kabul edilen durumların kümesi $\{q_1, q_2\}$'dir.

Tablo 3.2. Sonlu durum otomatın geçiş tablosu

	f		g	
Q/X	a	b	a	b
q_0	q_0	q_1	0	1
q_1	q_0	q_2	0	1
q_2	q_0	q_2	0	1

Tablo 3.2'de geçiş tablosu verilen sonlu durum otomatın geçiş diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Bir geçiş diyagramı tarafından tanımlanan sonlu durum makinesi eğer çıkış sembollerinin kümesi $\{0,1\}$ ise ve her durum q için q'ya gelen tüm kenarlar aynı çıkış etiketine sahipse bir sonlu durum otomatıdır. Bir sonlu durumlu otomatın geçiş diyagramı, genellikle çifte daire içinde kabul eden durumlarla ve çıkış sembolleri çıkarılmadan çizilmektedir.



Şekil 3.2. Örnek bir sonlu durum otomatın geçiş diyagramı

3.2. Bulanık Mantık ve Bulanık Otomatalar

Bulanık küme teorisi, ilk olarak 1965 yılında Calfornia üniversitesinde Azerbeycanlı Prof. Lotfi A.Zadeh tarafından ortaya çıkarılmıştır [134]. Ortaya çıkmasıyla birlikte birçok alanda kullanılmaya başlamış ve günümüzde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bulanık mantık model tabanlı bir yöntemdir. Bulanık mantıkta bir sistemin davranışlarını modellemek için bir matematiksel modele ihtiyaç duymamaktadır. Çünkü bulanık mantıkta

modeller dilsel değişkenlere göre oluşturulmaktadır. Tam bir matematiksel modeli olmayan sistemlerin tanımlanmasında bulanık mantık kullanılması oldukça avantajlıdır [135].

3.2.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık insanın günlük hayatta nesnelere verdiği üyelik değerlerini taklit eder. Klasik küme kuramında bir değişken 0 veya 1 değerlerini alırken bulanık küme kuramında bir değişken 0 ile 1 arasında sonsuz sayıda değer almaktadır [136-138]. Örneğin açık havaya çıkan bir insan havanın kaç derece olduğunu bilemez. Ama havayı çok sıcak, sıcak, soğuk ve çok soğuk gibi dilsel ifade edebilir. Klasik kümelerdeki soğuk-sıcak gibi ikili değişkenler, bulanık mantıkta biraz soğuk, biraz sıcak gibi esnek niteleyicilerle yumuşatılarak gerçek dünyaya benzetilmektedir.

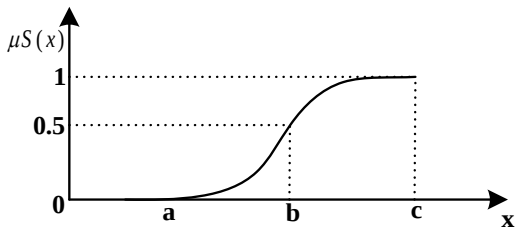
Bulanık mantık denetleyicisi, herhangi bir $x \in X$ 'e [0,1] kapalı aralığında bir üyelik derecesi belirler. Bir X uzayında tanımlı bulanık A kümesi, [0,1] aralığında değerler alan $\mu(x)$ üyelik fonksiyonuyla ifade edilir ve denklem 3.1'de ki gibi $\overline{A}$ simgesi ile gösterilir.

$$\overline{A} = \{(x, \mu(x) \mid x \in X)\} \quad \textbf{(3.1)}$$

Bulanık kümeler, X uzayının elemanları x ile üyelik fonksiyonu olarak adlandırılan $\mu(x)$'in oluşturduğu düzenlenmiş çiftler kümesinden oluşur. Bulanık mantık yaklaşımının temeli, üyelik işlevlerinden meydana çıkarılan dilsel değişkenlerin oluşturduğu girişleri karar verme sürecinde kullanmasıdır. Bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyonları genellikle üçgen, yamuk ve gaussian tipindedir. Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.3'te verilmiştir.

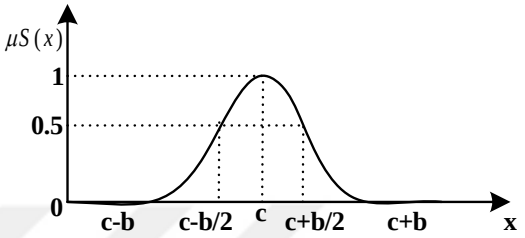
Kesin kümelerde olduğu gibi bulanık kümelerde de küme işlemleri uygulanmaktadır. A ve B gibi iki bulanık kümenin birleşimi, bu kümelerin üyelik değerlerinin maksimum değerine eşittir. $C = A \cup B$ ifadesi denklem 3.2'de ki gibi tanımlanır.

$$\mu S(x,a,b,c)=\begin{cases}0 & x\le a\\ 2\left(\dfrac{x-a}{c-a}\right) & a\le x\le b\\ 1-2\left(\dfrac{x-c}{c-a}\right) & b\le x\le c\\ 1 & x\ge c\end{cases}$$



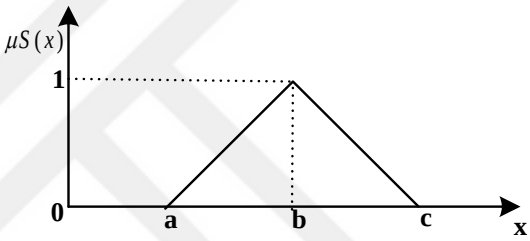
(a)

$$\mu S(x,b,c)=\begin{cases}S(x,c-b,c-b/2,c) & x\le c\\ 1-S(x,c,c+b/2,c+b) & x\ge c\end{cases}$$



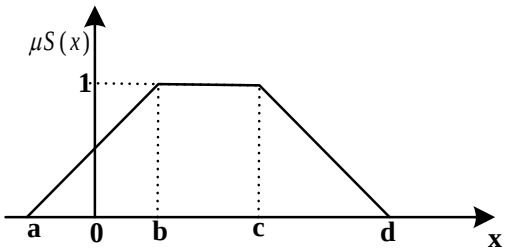
(b)

$$\mu S(x,a,b,c)=\begin{cases}0 & x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a} & a\le x\le b\\ \dfrac{c-x}{c-b} & b\le x\le c\\ 0 & x>c\end{cases}$$



(c)

$$\mu S(x,a,b,c,d)=\begin{cases}0, & x<a\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a\le x\le b\\ 1, & b\le x\le c\\ \dfrac{d-x}{d-c}, & c\le x\le d\\ 0, & x>d\end{cases}$$



(d)

Şekil 3.3. Bulanık mantıkta yaygın kullanılan üyelik fonksiyonları **(a)** Sigmoidal fonksiyon **(b)** Pi fonksiyonu **(c)** Üçgensel üyelik fonksiyonu **(d)** Yamuk üyelik fonksiyonu

$$\mu_C(x)=\max\left[\mu_A(x),\mu_B(x)\right] \qquad \textbf{(3.2)}$$

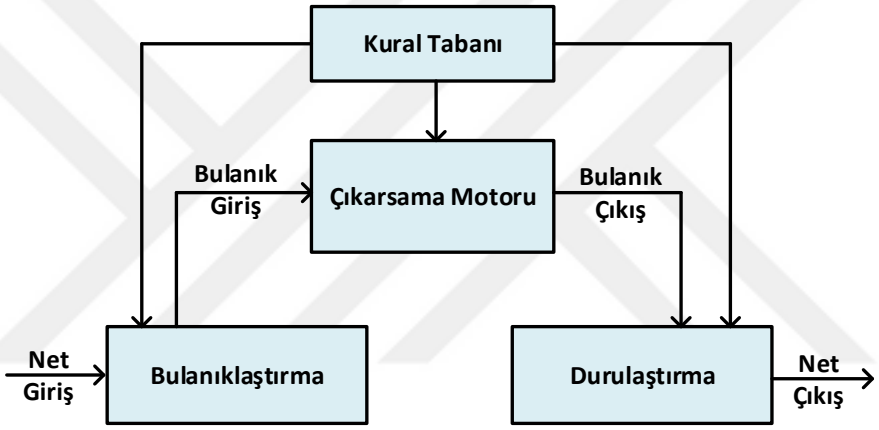
A ve B gibi iki bulanık kümenin kesişimi, bu kümelerin üyelik değerlerinin minimum değerine eşittir. $C=A\cap B$ ifadesi denklem 3.3'te ki gibi tanımlanır.

$$\mu_C(x)=\min\left[\mu_A(x),\mu_B(x)\right] \qquad \textbf{(3.3)}$$

Bulanık bir A kümesinin tümleyeni, üyelik fonksiyonunu 1'e tamlayan kümedir. A kümesinin tümleyeni denklem 3.4'te verilmiştir.

$$\mu_{A^{-1}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \textbf{(3.4)}$$

Bulanıklaştırma sonucunda elde edilen dilsel değişkenler kural tablosu ile birlikte kullanılarak bulanık sonuçlar elde edilmektedir. Bulanık sonuçlar durulaştırılarak sayısal sonuçlar elde edilmektedir. Bulanık mantık yaklaşımının genel gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir.

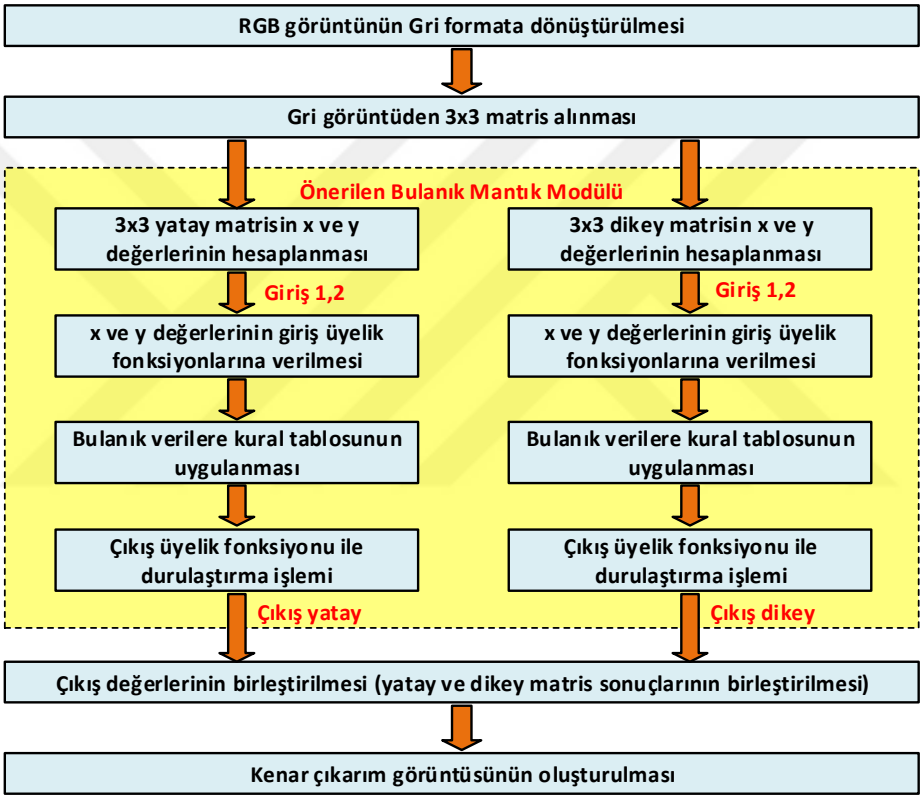


Şekil 3.4. Bulanık mantık yaklaşımının genel gösterimi

Durulaştırma işleminde sayısal sonuçlar elde edilmektedir. Bu aşamada en çok kullanılan yöntemlerden biri ağırlık merkezi yöntemidir. Bulanık çıkış sonucunda çıkış fonksiyonunda oluşan son şeklin ağırlık merkezi matematiksel olarak hesaplanmaktadır. Ağırlık merkezi yöntemi Mandani yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Mandani bulanık çıkarımda iki boyutlu bir şeklin ağırlık merkezi hesaplanabilmektedir. Bir başka yöntem olan Sugeno bulanık çıkarım yöntemi de Mandani yöntemine benzerdir. Sugeno yöntemi, bulanık küme yerine giriş değişkenleri için matematiksel bir fonksiyon kullanmaktadır. Hesaplamalarda, matematiksel analizlere uyumlu olması ve kolay uyarlanabilir yöntemlerle kullanılabilmesi Sugeno yönteminin avantajlarından bazılarıdır.

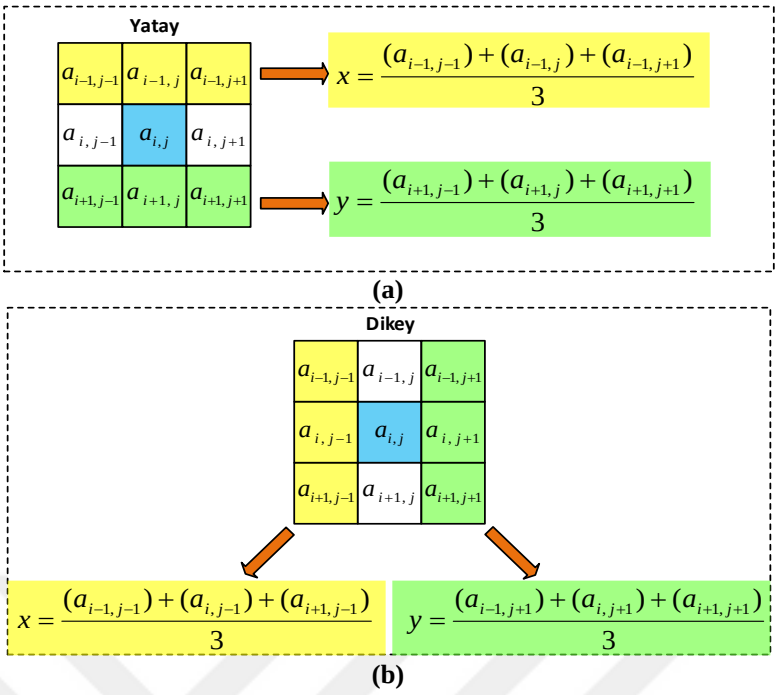
3.2.2. Bulanık Mantık Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi

Bu çalışmada, bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yöntemi geliştirilmiştir. Farklı görüntüler üzerinde önerilen yöntem uygulanarak bulanık mantık ile kenar çıkarım sonuçları elde edilmiştir. Kenar çıkarım görüntüleri Canny ve Sobel kenar çıkarım yöntemi ile karşılaştırılarak benzerlik oranı hesaplanmıştır. Bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yönteminin akış şeması Şekil 3.5'te verilmiştir.



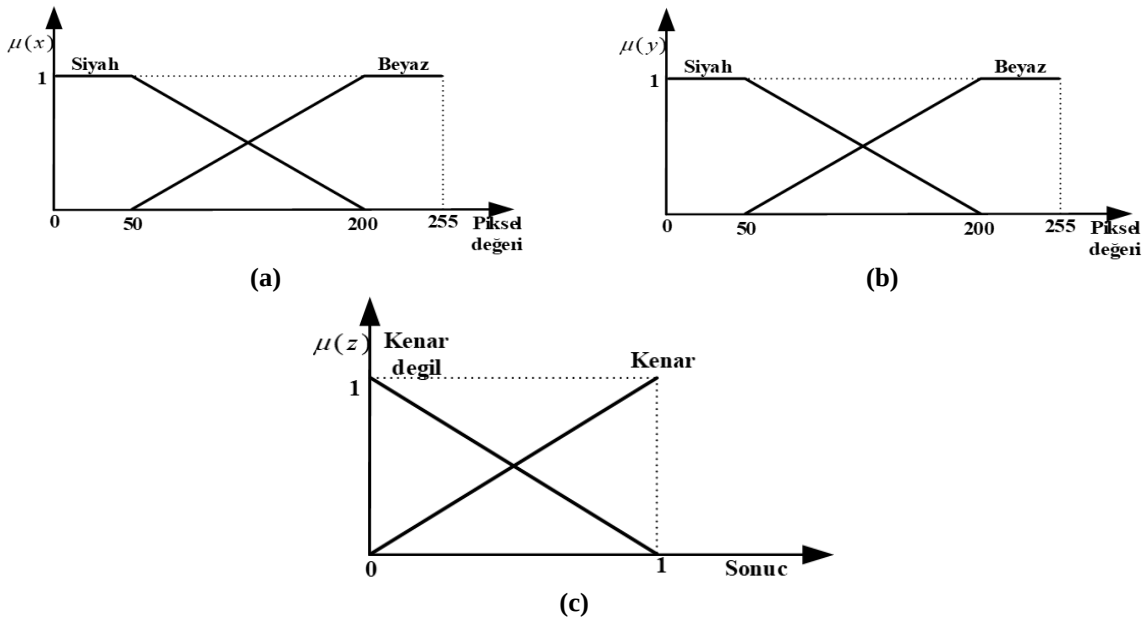
Şekil 3.5. Bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yöntemi

Şekil 3.5'te verilen akış şemasında öncelikle 240×180 piksel boyutundaki RGB görüntü gri görüntüye dönüştürülmektedir. Kenar çıkarımının başlangıcı için gri görüntü üzerinde 3×3 boyutunda matrisler alınarak bu matrisler üzerinde yatay ve dikey hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi gri görüntüden alınan 3×3 boyutundaki matristen yatay için iki (x) ve (y), dikey için iki (x) ve (y) değer elde edilmektedir.



Şekil 3.6. Gri görüntüden alınan 3 × 3 boyutundaki matrisler **(a)** Yatay hesaplama **(b)** Dikey hesaplama

Yatay ve dikey yönde yapılan hesaplamalarda elde edilen (x) ve (y) değerleri iki girişli bulanık sisteme verilmektedir. Önerilen yöntemde geliştirilen iki girişli bir çıkışlı bulanık sistemin üyelik fonksiyonları Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Önerilen yöntemde kullanılan üyelik fonksiyonları **(a)** Giriş üyelik fonksiyonu **(b)** Giriş üyelik fonksiyonu **(c)** Çıkış üyelik fonksiyonu

Görüntü üzerindeki yatay kenarları tespit etmek için 3×3 yatay matriste hesaplanan (x) değeri $\mu(x)$ giriş üyelik fonksiyonuna, (y) değeri ise $\mu(y)$ giriş üyelik fonksiyonuna verilmektedir. (x) ve (y) değerleri için elde edilen $\mu(x)$ ve $\mu(y)$ bulanık değerler Tablo 3.3'te verilen kural tablosu ile kullanılmaktadır. Görüntü üzerindeki dikey kenarların tespit edilmesi için de 3×3 dikey matrisleri kullanılmaktadır. Dikey matrislerden elde edilen (x) ve (y) değerleri giriş üyelik fonksiyonlarına verilerek bu değerler bulanıklaştırılmaktadır. Elde edilen bulanık değerlerden Tablo 3.3'te verilen kural tablosu kullanılarak çıkarsama yapılmaktadır.

Tablo 3.3. Önerilen kural tablosu

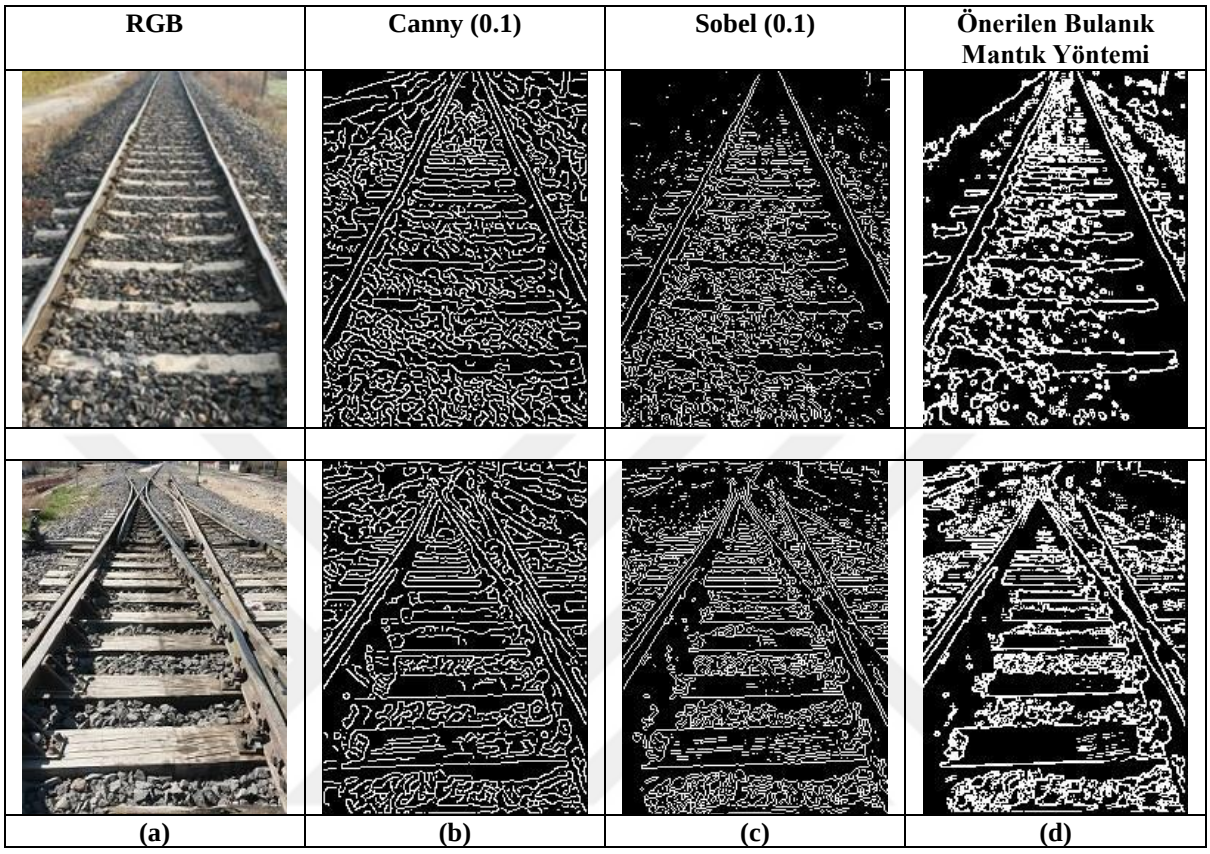
		$\mu(y)$	
		Siyah (0)	**Beyaz (1)**
$\mu(x)$	**Siyah (0)**	Kenar değil	Kenar
	Beyaz (1)	Kenar	Kenar değil

Tablo 3.3'te görüldüğü gibi $\mu(x)$ ve $\mu(y)$ bulanık girişlerinde (siyah) ve (beyaz) iki üyelik derecesi vardır. Bu üyelik derecelerine göre çıkarsama yapılmaktadır. Çıkarsama sonucunda elde edilen yatay ve dikey sonuçlar ayrı ayrı Şekil 3.7.c'de verilen çıkış üyelik fonksiyonuna verilmektedir. Çıkış üyelik fonksiyonunda elde edilen Yatay ve dikey matris sonuçları denklem 3.5 kullanılarak birleştirilmektedir.

$$z=\sqrt{\left(z_yatay^2\right)+\left(z_dikey^2\right)} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Denklem 3.5'te verilen "z_yatay" değeri çıkış üyelik fonksiyonunda çıkan yatay matris değerini, "z_dikey" değeri ise dikey matris değerini ifade etmektedir. Denklem 3.5 sonucunda elde edilen "z" değeri Şekil 3.6'da verilen yatay ve dikey matrislerin $a_{i,j}$ değerini temsil etmektedir. Eğer z değeri 0.5'ten büyük ise $a_{i,j}$ değeri "1", 0.5'ten küçük ise $a_{i,j}$ değeri "0" olmaktadır. Bu işlem görüntü üzerindeki tüm matrislere uygulandığında görüntünün kenar çıkarımı yapılmaktadır. Böylece bulanık mantık kullanılarak görüntü

üzerinde kenar çıkarımı yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Önerilen yöntem için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları **(a)** RGB görüntü **(b)** Canny kenar çıkarımı (0.1) **(c)** Sobel kenar çıkarımı (0.1) **(d)** Önerilen bulanık mantık tabanlı kenar çıkarımı

3.2.3. Bulanık Otomatalar ve Ayrık Olay Sistemleri

Bulanık otomatanın ilk tanımını 1969 yılında Wee yapmıştır [139]. Santos [140], genel bir otomata formülasyonu verirken maximin ve minimax otomatayı tanımlamıştır. Maximin otomata, özel durumlar olarak hem deterministik hem de deterministik olmayan otomatayı kapsayacak şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca, durum geçiş fonksiyonu ve maximin otomatanın ilk dağılımı, bulanık kümelerin üyelik derecesi olarak yorumlanmıştır [141-146].

A maximin otomatanın bir sistemi iken $A = \{U, S, \mu^*, F, \mu_h\}$ 'dır. Burada U boş olmayan sonlu durum girdilerini, S boş olmayan sonlu durum kümelerini, $\mu^* : SxN \to [0,1]$ durumların geçiş fonksiyonlarını $n \in N$ (doğal sayılar kümesi), ifade

etmektedir. F son durum kümesi, S 'nin bir alt kümesidir. $\mu_h : SxN \to [0,1]$ başlangıç değerini ifade etmektedir.

Bir sonlu bulanık durum makinesi $N = (Q, \Sigma, \mu)$ üçlüsünden oluşmaktadır. Burada Q ve Σ boş olmayan sonlu kümeler ve μ ise $QxSxQ$ ($\mu : QxSxQ \to [0,1]$)'nun bulanık alt kümesidir. Bu ifade sadece bulanık geçiş fonksiyonunu içermekte, bulanık başlangıç ve son durumları içermemektedir.

Bir bulanık sonlu durum otomata $M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ beşlisinden oluşmaktadır. Burada Q boş olmayan sonlu durumlar kümesini, Σ boş olmayan sonlu giriş semboller kümesini ifade etmektedir. Bulanık alt kümesinden $\mu : QxSxQ \to [0,1]$ bulanık geçiş fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyondur. i değeri Q 'nun bulanık alt kümesidir. $i : Q \to [0,1]$ başlangıç durumların bulanık alt kümesi olarak adlandırılmaktadır. f değeri Q 'nun bulanık alt kümesidir. $f : Q \to [0,1]$ son durumların bulanık alt kümesi olarak adlandırılmaktadır. Açıkçası, $M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ ise bu bir bulanık sonlu durum otomata, $N = (Q, \Sigma, \mu)$ ise bulanık sonlu durum makinelerdir. Bulanık sonlu durum otomatalar ile ilişkili bulanık sonlu durum makineler N olarak adlandırılmaktadır.

$M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$'yi bir bulanık sonlu durum otomata olarak ele aldığımızda, bulanık alt kümesi $\mu^* : QxS^*xQ \to [0,1]$ olan ve bütün $p, q \in Q, \quad a \in \Sigma, \quad x \in \Sigma^*$ değerleri için denklem 3.6'da ki gibi tanımlanmış ve genişletilmiş bulanık geçiş fonksiyonudur.

$$\mu\ (p, \lambda, q) = \begin{cases} 1, & eger \quad p = q \\ 0, & eger \quad p \neq q \end{cases}$$
$$\mu^*(p, xa, q) = \vee\{\mu^*(p, x, r) \wedge \mu(r, a, q) \quad | \quad r \in Q\} \qquad \textbf{(3.6)}$$

$M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ bulanık sonlu durum otomatada tanımlı olsun. $x \in \Sigma^*$, x eğer M tarafından tanınırsa denklem 3.7'de ki formül elde edilmektedir.

$$\deg M(x) = \vee\{\{i(p) \wedge \mu^*(p, x, q) \wedge f(q) \quad | \quad q \in Q\} \quad | \quad p \in Q\} > 0 \qquad \textbf{(3.7)}$$

$M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ bulanık sonlu durum otomatada tanımlı olsun. $x \in \Sigma^*$, x eğer $p, q \in Q$ varsa $i(p) \wedge \mu^*(p, x, q) \wedge f(q) > 0$ gibi bir durum tanınmaktadır.

$M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ bir bulanık sonlu durum otomata iken $L(M) = \{x \in \Sigma^* \mid \deg M(x) > 0\}$ olsun. Burada $L(M)$ 'yi bulanık sonlu durum otomatada M 'de tanımlı bir dil olarak adlandırılmaktadır.

Bir deterministik bulanık sonlu durum otomatası $M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ beşlisinden oluşmaktadır. Burada bir $s_0 \in Q$ değeri vardır. $i(s_0) > 0$ iken s_0 başlangıç durumu olarak tanımlanır. $\mu : Qx\Sigma xQ \to [0,1]$ ve eğer $\forall q \in Q, a \in \Sigma, \mu(q, a, p) > 0$ ve $\mu(q, a, p') > 0$ $p, p' \in Q$ ise μ , $Q \in \Sigma$ içinde bir bulanık fonksiyondur.

$\forall x \in \Sigma^*$ burada $q_x \in Q$ gibi benzersiz değer vardır. Burada $\mu^*(s_0, x, q_x) > 0$ ve $F = \{q \in Q \mid f(q) > 0\}$ olarak kabul edelim. F , M 'nin sonlu durumların kümesi olarak adlandırılır.

Her $M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ bulanık sonlu durum otomata için bir deterministik M_d bulanık sonlu durum otomata oluşturabilir. $L(M_d) = L(M)$.

$M = (Q, \Sigma, \mu, i, f)$ tarafından kabul edilen bulanık dil Σ^* 'nin bir alt kümesidir. L_M $\Sigma^* \to [0,1]$ denklem 3.8'de ki gibi belirtilir.

$$L_M(x) = \vee\{\{i(p) \wedge \mu^*(p, x, q) \wedge f(q) \mid q \in Q\} \mid p \in Q\} \qquad \textbf{(3.8)}$$

Bulanık bir alt küme olan L , $\Sigma^* \to [0,1]$, Σ üzerinde bir bulanık dil olarak adlandırılır. Σ üzerinde L bulanık dili, $L_M = L$ gibi aynı bulanık dil tarafından kabul edilen M bulanık sonlu durum otomata var ise bu durum bulanık düzenli dil olarak adlandırılır.

Bulanık bir geçiş diyagramı olarak adlandırılan graf aşağıdaki gibi bulanık sonlu durum otomata ile ilişkilendirilmektedir. Grafın köşe noktaları bulanık sonlu durum otomatanın durumlarına karşılık gelmektedir. Geçiş aşamasında p 'den p 'ye bir a/m etiketli geçiş vardır. p 'nin her durumu başlangıç ve son değerlere sahiptir. Daha basite indirmek için i ve f fonksiyonları kullanılmaktadır.

Örnek: $Q=\{q_1,q_2,q_3\}$, $\Sigma=\{a,b\}$ ve $\mu: Qx\Sigma xQ\to[0,1]$ iken $M=(Q,\Sigma,\mu,i,f)$ olsun.

$\mu(q_1,a,q_1)=0.8$

$\mu(q_1,a,q_2)=0.8$

$\mu(q_1,b,q_1)=1$

$\mu(q_1,b,q_2)=0.6$

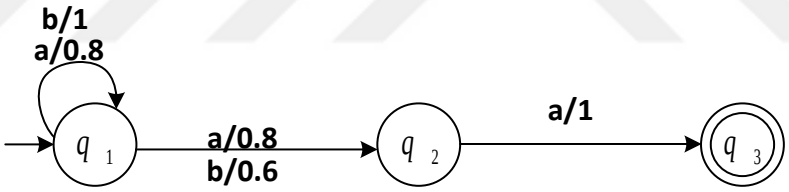
$\mu(q_2,b,q_3)=1$

0 (sıfır) olan üyelik değerleri ihmal edilmiştir.

$i: Q\to[0,1],\ i(q_1)=1,\ i(q_2)=i(q_3)=0$

$f: Q\to[0,1],\ f(q_1)=f(q_2)=0,\ f(q_3)=1$

$$L_M(x)=\begin{cases}0.8, & eger \quad x\in\{a,b\}^*aa\\ 0.6, & eger \quad x\in\{a,b\}^*ba\\ 0, & diger\end{cases}$$



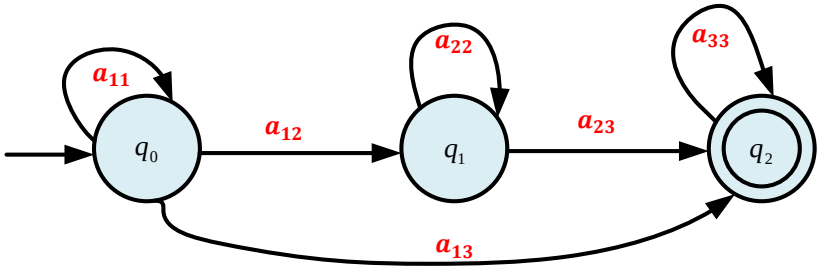
Şekil 3.9. Bulanık otomata için örnek geçiş diyagramı

Otomata ayrık olay sistemlerinin dinamiklerini modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Dinamik sistemler genel olarak fark veya diferansiyel denklemler ile tam olarak gösterilemeyen ve eş zamanlı olarak gerçekleşmeyen olayların oluşması ile durumu değişen sistemlerdir [20]. Genelde bir ayrık olay sistemi sonlu otomata ile ifade edilir. Sonlu bir otomata ise beş parametreye sahiptir [21]. Bu parametreler denklem 3.9'da verilmiştir.

$$M=\{Q,\Sigma,\delta,q_0,F\} \tag{3.9}$$

Denklem 3.9'da Q ayrık durumların kümesini ve Σ değişkeni durumlar arasındaki geçişlerin kümesini gösterir. Denklemdeki δ değeri geçiş haritalanmasını, q_0 başlangıç

durumunu ve F ise son durumu gösterir. Şekil 3.10'da otomata ile ilgili bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.10. Otomata ile ayrık bir olay sistemin modellenmesi

Şekil 3.10'da verilen otomata sisteminde başlangıç durumu q_0 'dır. Ayrık durumlar kümesi denklem 3.10'da durumlar arası geçiş kümesi ise denklem 3.11'de verilmiştir.

$$Q = \{q_0, q_1, q_2\} \tag{3.10}$$

$$\Sigma = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}, a_{33}\} \tag{3.11}$$

Bu otomata için başlangıç durumu $q_0 = [1 \quad 0 \quad 0]$ ile gösterilebilir. Herhangi bir zamanda sistem üç durumdan birinde olabilir. Otomatanın farklı durumları arasındaki geçişler herhangi bir olayın gerçekleşmesine bağlıdır [20]. Bir olay genel olarak geçiş matrisi ile ifade edilir. Denklem 3.12'de a_{11}, a_{12} ve a_{23} geçişleri için matrisler verilmiştir.

$$a_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \; a_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Eğer sistem başlangıçta $q_1 = [0 \quad 1 \quad 0]$ durumunda ise ve a_{23} geçişi olursa bir sonraki durum denklem 3.15'teki gibi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.13)}$$

Ayrık olay sistemleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmasına rağmen bazı problemlerde keskin geçişler mümkün olmamaktadır. Bu tür durumlarda bulanık otomata kullanılmaktadır. Bazı problemler için bulanık durumlar ve geçişler tanımlanmıştır. Keskin geçişler yerine kullanılan, [0,1] aralığında değer alan bu durum ve geçişler, bulanık otomata olarak isimlendirilir [147-151]. Bulanık otomata da sistem farklı üyelik dereceleri ile aynı anda birden fazla durumda olabilir. Bulanık otomatada herhangi bir t anında $q_0=0.6$, $q_1=0.3$ ve $q_2=0.1$ olabilir. Herhangi bir t anında a_{12} geçiş matrisi denklem 3.14'te verilmiştir.

$$a_{12}=\begin{bmatrix}0 & 0.6 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.14)}$$

a_{12} geçiş matrisine göre q_0 ve q_1 durumuna geçiş denklem 3.15'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix}0.6 & 0.3 & 0.1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}0 & 0.6 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0.36 & 0\end{bmatrix} \quad \textbf{(3.15)}$$

Bulanık otomatının genel tanımlanması aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

• Bulanık durumlar $\overline{Q}$ ile ifade edilir. Her bir durumun üyelik derecesi $\mu(\overline{Q})$ [0,1] aralığında bir değerdir.

• Giriş kümesinin her bir elemanı [0,1] aralığında bir üyelik derecesine sahip olup $\mu(a_{i,j})$ ile gösterilir.

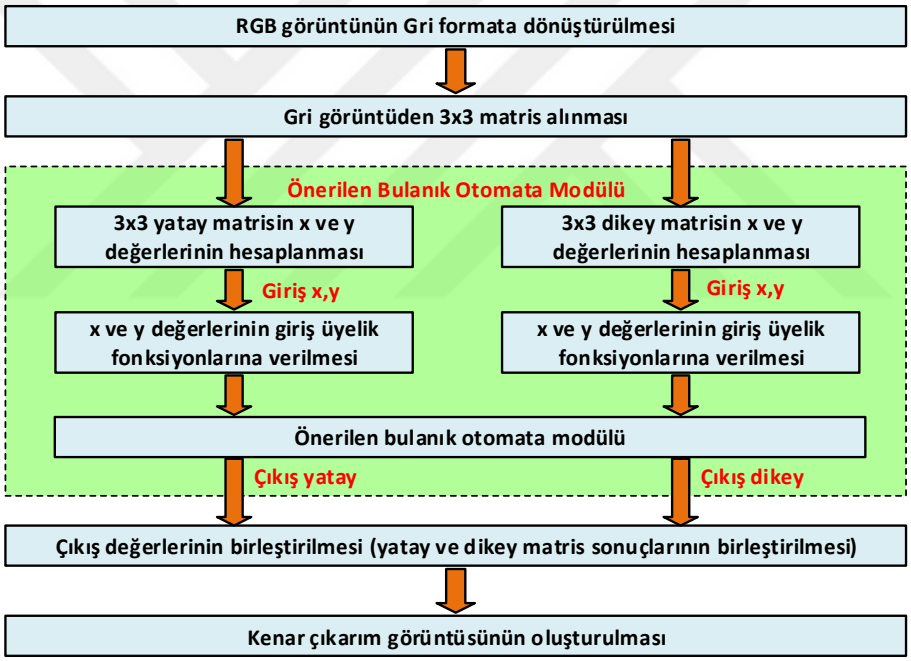
• Durumlar arası geçişler $\mu(\overline{\delta})$ ile ifade edilir. Geçiş üyelik derecesi iki durum arasında gerçekleşen bir olay ile ifade edilir.

• Başlangıç ve son durum sonlu durum otomata'ya benzer biçimde ifade edilir.

Bulanık otomatada ölçüm hatası ile ilgili eşik değer, her bir durum ve geçiş üyelik fonksiyonu bir uzman tarafından belirlenir.

3.2.4. Bulanık Otomata Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi

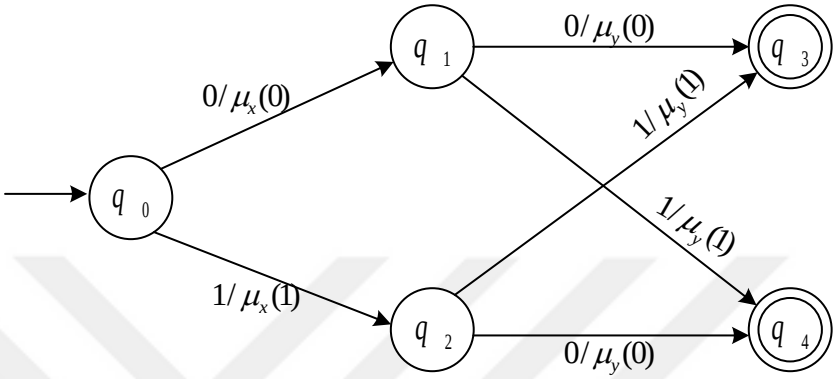
Bu çalışmada, bulanık otomta tabanlı kenar çıkarım yöntemi geliştirilmiştir. Farklı görüntüler üzerinde önerilen yöntem uygulanarak bulanık mantık ile kenar çıkarım sonuçları elde edilmiştir. Kenar çıkarım görüntüleri Canny ve Sobel kenar çıkarım yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Önerilen bulanık otomata tabanlı kenar çıkarım yönteminin akış şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Bulanık otomata tabanlı kenar çıkarım yöntemi

Şekil 3.11'de verilen akış şemasında öncelikle 240×180 piksel boyutundaki RGB görüntü gri görüntüye dönüştürülmektedir. Kenar çıkarımının başlangıcı için gri görüntü üzerinde 3×3 boyutunda matrisler alınarak bu matrisler üzerinde yatay ve dikey hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi gri görüntüden alınan 3×3 boyutundaki matristen yatay için iki (x) ve (y), dikey için iki (x) ve (y) değer elde edilmektedir.

Yatay ve dikey yönde yapılan hesaplamalarda elde edilen (x) ve (y) değerleri iki girişli bulanık sisteme verilmektedir. Önerilen yöntemde kullanılan giriş üyelik fonksiyonları Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu çalışmada önerilen bulanık otomata yapısı Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Önerilen bulanık otomata yapısı

Şekil 3.12'de verilen bulanık otomata yapısında, "0" geçişleri Siyah, "1" geçişleri Beyaz kümesini ifade etmektedir. Görüntü üzerindeki yatay kenarları tespit etmek için 3×3 yatay matriste hesaplanan (x) değeri $\mu(x)$ giriş üyelik fonksiyonuna, (y) değeri ise $\mu(y)$ giriş üyelik fonksiyonuna verilmektedir. (x) ve (y) değerleri için elde edilen $\mu(x)$ ve $\mu(y)$ bulanık değerler, önerilen otomata yapısına verilerek çıkışlar elde edilmiştir. Bulanık otomata sonucunda elde edilen "z_yatay" değeri çıkış üyelik fonksiyonunda çıkan yatay matris değerini, "z_dikey" değeri ise dikey matris değerini ifade etmektedir. Çıkış üyelik fonksiyonunda elde edilen "z_yatay"ve "z_dikey"sonuçları denklem 3.16 kullanılarak birleştirilmektedir.

$$z = \begin{cases} 1 & Eger(z_yatay) \geq 0.5 veya (z_dikey) \geq 0.5 \\ 0 & Degilse \end{cases} \quad \textbf{(3.16)}$$

Denklem 3.16 sonucunda elde edilen z değeri Şekil 3.6'da verilen yatay ve dikey matrislerin $a_{i,j}$ değerini temsil etmektedir.

Önerilen yöntemi adım adım uygulamak için yatay matris için (x)=95 ve (y)=140 değerini verelim. Bulanıklaştırma işleminde (x) değeri için $\mu_x(0)=0.3$, $\mu_x(1)=0.7$ ve (y) değeri için $\mu_y(0)=0.6$, $\mu_y(1)=0.4$ olarak hesaplanmaktadır. Burada, $\mu_x(0)=0.7$ değeri (x) giriş üyelik fonksiyonunun siyah değerini, $\mu_x(1)=0.3$ değeri (x) giriş üyelik fonksiyonunun beyaz değerini ifade etmektedir. $\mu_y(0)=0.6$ değeri (y) giriş üyelik fonksiyonunun siyah değerini, $\mu_y(1)=0.4$ değeri (y) giriş üyelik fonksiyonunun beyaz değerini ifade etmektedir. Elde edilen bulanık değerler otomata da şu şekilde tanımlanmaktadır.

$Q=\{q_0,q_1,q_2,q_3\}$, $\Sigma=\{0,1\}$ ve $\mu: Qx\Sigma xQ\rightarrow[0,1]$ iken $M=(Q,\Sigma,\mu,i,f)$ olsun.

$\mu(q_0,0,q_1)=0.7$

$\mu(q_0,1,q_2)=0.3$

$\mu(q_1,0,q_3)=0.4$

$\mu(q_1,1,q_4)=0.6$

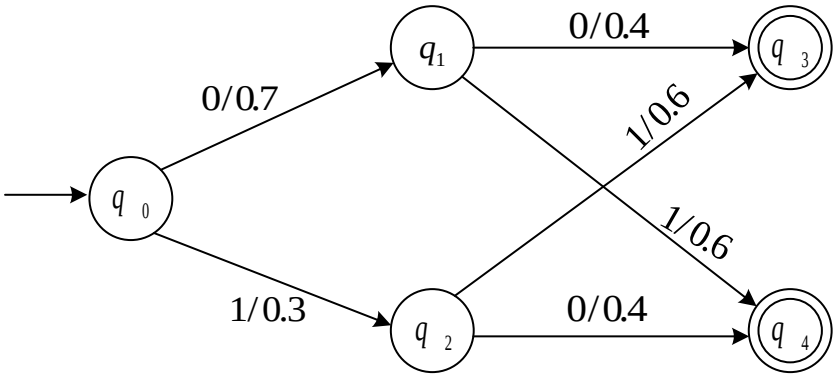
$\mu(q_2,0,q_4)=0.4$

$\mu(q_2,1,q_3)=0.6$

$i: Q\rightarrow[0,1]$, $i(q_0)$

$f: Q\rightarrow[0,1]$, $f(q_3), f(q_4)$

Yukarıda verilen örneğin bulanık otomata geçiş diyagramı Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Bulanık otomata geçiş diyagramı

Şekil 3.13'te verilen bulanık otomata geçiş diyagramının geçiş tablosu Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Önerilen bulanık otomatanın geçiş tablosu

		Bir sonraki durum				
		q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
Mevcut durum	q_0	-	$0/0.7$	$1/0.3$	-	-
	q_1	-	-	-	$0/0.4$	$1/0.6$
	q_2	-	-	-	$1/0.6$	$0/0.4$
	q_3	-	-	-	-	-
	q_4	-	-	-	-	-

Önerilen geçiş tablosu sonucunda aşağıdaki işlemler yapılmaktadır.

$\mu(q_0,0,q_1) \wedge \mu(q_1,0,q_3) = 0.7 \wedge 0.4 = 0.4$

$\mu(q_0,0,q_1) \wedge \mu(q_1,1,q_4) = 0.7 \wedge 0.6 = 0.6$

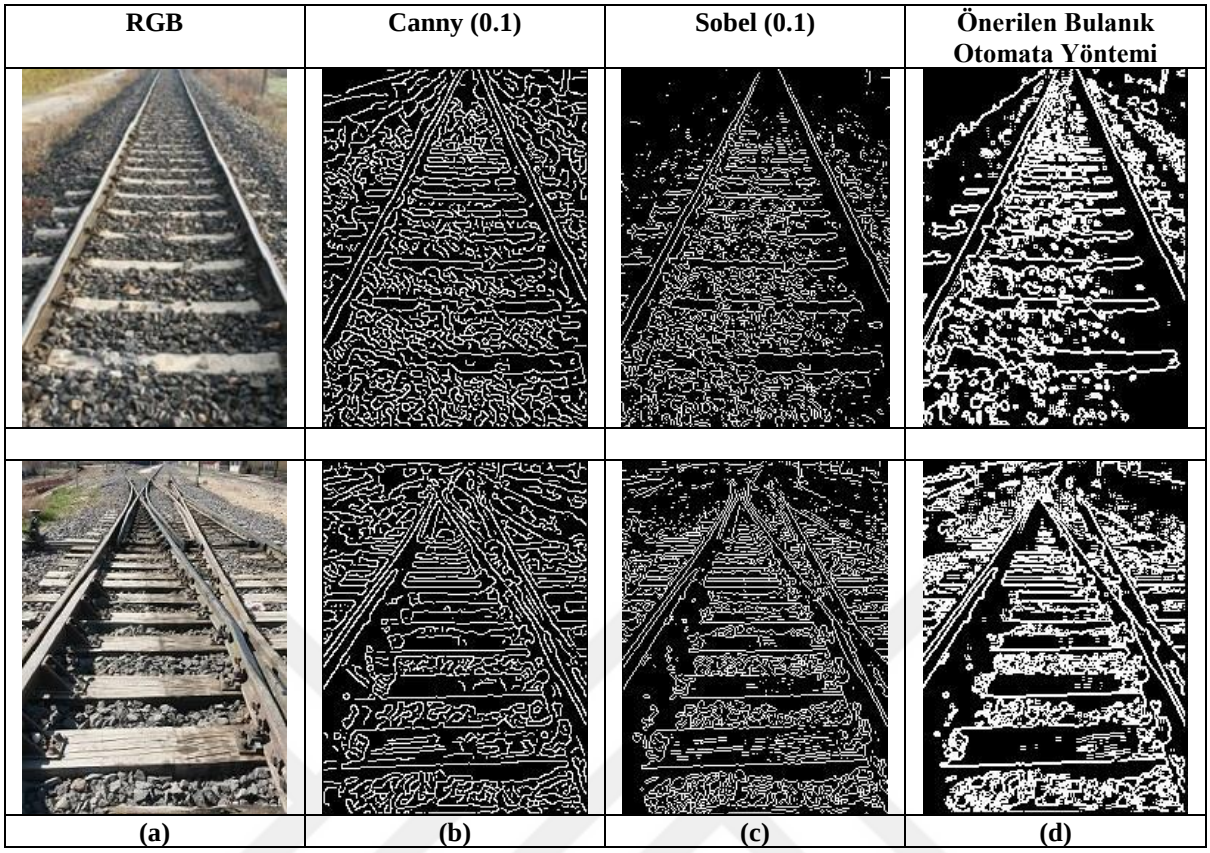
$\mu(q_0,1,q_2) \wedge \mu(q_2,0,q_4) = 0.3 \wedge 0.4 = 0.3$

$\mu(q_0,1,q_2) \wedge \mu(q_2,1,q_3) = 0.3 \wedge 0.6 = 0.3$

$0.4 \vee 0.6 \vee 0.3 \vee 0.3 = 0.6$

Yapılan işlemler sonucunda q_4 durumu 0.6 olarak hesaplanmıştır. Burada q_3 durumu kenar olmayan sonucu, q_4 durumu ise kenar sonucunu ifade etmektedir. Yatay matris için bulanık otomata sonucu 0.6 oranda kenardır.

Örnekte verilen işlem görüntü üzerindeki tüm matrislere uygulandığında görüntünün kenar çıkarımı yapılmaktadır. Böylece bulanık otomata kullanılarak görüntü üzerinde kenar çıkarımı yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Önerilen yöntem için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları **(a)** RGB görüntü **(b)** Canny kenar çıkarımı (0.1) **(c)** Sobel kenar çıkarımı (0.1) **(d)** Önerilen bulanık otomata tabanlı kenar çıkarımı

Bulanık mantık ve bulanık otomata ile elde edilen kenar çıkarım sonuçları Canny kenar çıkarım sonuçları karşılaştırılırken görüntü eşleştirme yapılmıştır. İki görüntü arasındaki piksel değerleri karşılaştırarak Canny kenar çıkarım yöntemine ne kadar benzer oldukları hesaplanmıştır. Bu benzerlik oranı Tablo 3.5'te başarı oranı olarak verilmiştir.

Tablo 3.5. Önerilen bulanık mantık ve bulanık otomata ile kenar çıkarım işleminin başarı oranı

Canny eşik değeri	**Başarı oranı (%)**	
	Bulanık mantık	**Bulanık otomata**
0.1	76.2	76.7
0.3	79.4	80.2
0.5	81	80.6
0.7	82.2	81.7

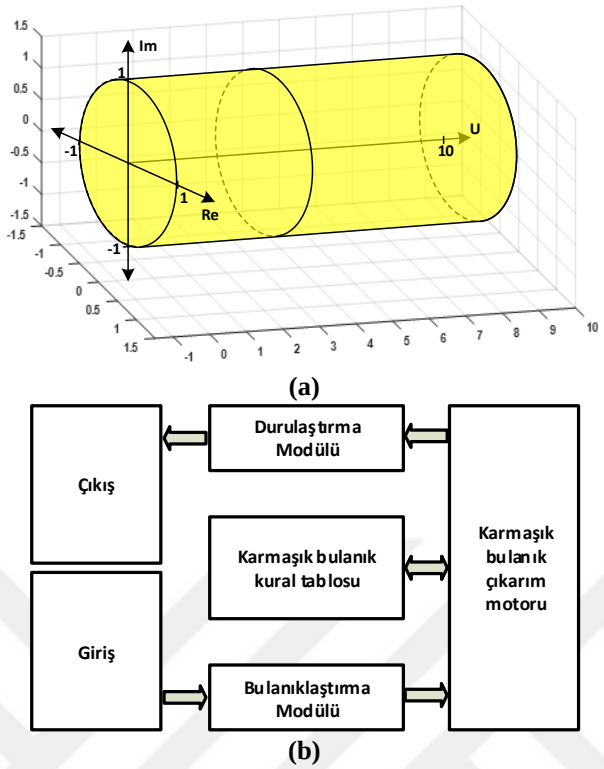
3.3. Karmaşık Bulanık Mantık ve Karmaşık Bulanık Otomatalar

Karmaşık bulanık kavramı bulanık mantıktan türetilen bir yöntemdir. Bulanık mantık kavramı, matematiksel bir modeli temsil etmede oldukça başarılı bir yöntemdir. Bulanık mantık, insanın karar verme süreçlerini taklit eden sistemleri oluşturmak için kullanılan doğal bir yöntemdir. Bulanık çıkarsama kuralları, bulanık dilbilimcilerin girdilerini bulanık dilbilim çıktılarına eşleşmektedir. Bulanık mantık yapısında dört temel bölüm vardır. Bulanıklaştırma bölümünde, giriş değerleri üyelik fonksiyonu yardımıyla bulanık değerlere dönüştürülür. Bilgi tabanı bölümü, kural tablosunun yer aldığı ve verilerin saklandığı bölümdür. Çıkarım bölümünde, girişler ve kurallar kullanılarak bulanık sonuçlar elde edilir. Durulaştırma bölümünde ise bulanık sonuçlar sayısal değerlere dönüştürülür.

3.3.1. Karmaşık Bulanık Mantık

Karmaşık bulanık sistem, Karmaşık bulanık kümelerle ifade edilen bir mantık sistemidir [152-158]. Bu, Karmaşık bulanık kümelere dayanan geleneksel bulanık mantığın genelleştirilmesidir. Karmaşık bulanık yapısı, Tip-1 bulanık kümelerle benzemektedir. Karmaşık bir bulanık sistem, bağlantı, bölme ve tamamlayıcı operatörlerin belirli seçimleri ile tanımlanabilir [152]. Çıkarsama kuralları geleneksel bulanık mantık gibi oluşturulmuştur. Karmaşık bulanık kümeler, karmaşık değerli üyelik işlevleriyle karakterize edilmektedir. Geleneksel bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları [0,1] aralığında iken Karmaşık bulanık sistemde sanal düzlemdeki birim çemberine kadar uzanır. Kümedeki üyeliği karmaşık bir sayı olarak tanımlamak için bir yöntem sağlamaktadır. Karmaşık sayıların ve karmaşık bulanık kümelerin özellikleri, geleneksel bulanık mantığa göre avantajlıdır.

Karmaşık bulanık kümeler, bulanık sistemler teorisinde yeni bir gelişmedir. Burada üyelik değerleri karmaşık düzlemin birim çemberinde çizilen karmaşık sayılardır. Karmaşık bulanık kümenin tanımı, bir kümedeki üyeliğin, etkili bir şekilde iki boyutlu bir kavram haline dönüştüren karmaşık bir sayı ile tanımlanmasıdır. Şekil 3.15.a'da, tipik bir Karmaşık bulanık kümesi, Şekil 3.15.b'de ise Karmaşık bulanık sistemin mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Karmaşık bulanık kümesi ve mimarisi **(a)** Karmaşık bulanık kümeler **(b)** Karmaşık bulanık sistemin mimarisi [152].

Karmaşık bulanık sistemin mimarisi, Şekil 3.15.b'de gösterilmiştir ve dört bölümden oluşmaktadır. Karmaşık bulanık sistem mimarisi geleneksel bulanık mantığa çok benzerdir. Bulanıklaştırma bölümü girişleri bulanıklaştırmaktadır. Bulanık Çıkarsama, bulanık girdi kümelerini bulanık çıktı kümelerine eşlemek için karmaşık bir bulanık kural tabanı kullanır. Ayrı kuralların karmaşık bulanık çıktıları, tek bir karmaşık bulanık çıktı seti üretmek üzere birleştirilir. Durulaştırma bölümünde ise her zamanki gibi net bir sonuç üretmektedir. Karmaşık bulanık mantıkta durulaştırma yapılırken bazı yaklaşımlarda tüm faz terimleri ihmal edilmekte ve yalnızca çıktı setinin genlik terimi kullanılmaktadır. Karmaşık bulanık mantıkta sadece genlik terimi kullanılarak geleneksel bulanık mantıktaki durulaştırma işlemine benzetilmektedir.

Bulanık kümelerde, sırasıyla $R_{[0,1]}$ ve $C_{[0,1]}$ reel ve karmaşık sayılar kümesi olsun [156]. Reel aralık $R_{[0,1]} = \{a \in R: \quad 0 \le a \le 1\}$ ve karmaşık aralık $C_{[0,1]} = \{c \in C: \quad |c| \le 1\}$ şeklindedir. Bir z karmaşık sayısı iki decartes koordinat ve polar koordinat olmak üzere iki farklı şekilde ifade edilmektedir. Bir karmaşık sayının decartes gösterimi denklem 3.17 ve polar gösterimi denklem 3.18'de verilmiştir.

$$z = x + j.y \quad \textbf{(3.17)}$$

$$z = r e^{j.\omega} \quad \textbf{(3.18)}$$

Karmaşık bulanık sistemde her iki denklem kullanılarak tanımlanabilmektedir. Denklem 3.17 ve denklem 3.18 arasında denklem 3.19'da ki şekilde bir ilişki vardır.

$$x = r.\cos(\omega), \quad y = r.\sin(\omega) \quad \textbf{(3.19)}$$

U bir söylem evreni olsun, U 'da tanımlı $\tilde{A}$ karmaşık ifadenin üyelik fonksiyonu $\mu\tilde{A}$ 'dır. $\mu\tilde{A}$ üyelik fonksiyonunun polar gösterimi denklem 3.20'de tanımlanmıştır.

$$\mu\tilde{A} : U \to C_{[0,1]}, u \mapsto r(u).e^{j.\omega(u)} \quad \textbf{(3.20)}$$

Denklem 3.20'de $r(u)$ değeri U 'dan $R_{[0,1]}$ 'ye tanımlı gerçek bir değerdir. $\omega(u)$ ise periyodik fonksiyondur. $r(u)$ değeri $\mu\tilde{A}$ 'nın modül kısmı iken $\omega(u)$ değeri ise faz kısmını ifade etmektedir. U 'da tanımlı $\tilde{A}$ karmaşık ifadenin üyelik fonksiyonunun decartes gösterimi denklem 3.21'de verilmiştir.

$$\tilde{A} = \left\{ \langle u, x(u) + j.y(u) \rangle : |x(u)|, |y(u)| \in R_{[0,1]} \quad x^2(u) + y^2(u) \le 1 \right\} \quad \textbf{(3.21)}$$

Karmaşık değerli üyelik derecelerinde tanıtılan faz bölümü, Karmaşık bulanık kümeler üzerinde işlemlerin tanımlanması oldukça zordur. Bu nedenle faz bölümü sınırlandırılarak işlemler somut hale getirilmektedir. Genellikle literatürdeki çalışmalarda faz bölümü 2π ile sınırlandırılmıştır [156]. Normal şartlarda faz bölümünün bir sınırı yoktur. Çalışmalarda işlem kolaylığı olması açısından faz bölümü sınırlandırılmıştır.

Karmaşık değerli üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında ölçeklendirme yapılmaktadır. U ve $c \in C_{[0,1]}$ üzerinde $\tilde{A}$ karmaşık bulanık bir küme olsun. $\tilde{A}$ 'nın c 'ye göre ölçekli çarpımı U 'dan $C_{[0,1]}$ 'ye bir eşlemesi f_c olup herhangi bir $u \in U, \quad f_c(u) = c.\tilde{A}(u)$ için ".", karmaşık sayıların normal ürünüdür. Ölçeklendirme f_c , açıkça U üzerinde bir karmaşık bulanık kümede sıkıştırma ve döndürme işlemlerinin bir kombinasyonudur. c bir

reel sayı olduğunda f_c, $\tilde{A}$ anlamında $|f_c| \le |\tilde{A}|$'nın bir sıkıştırmasıdır. c bir karmaşık sayı olduğunda $|c| = 1$ olur ve f_c, $\tilde{A}$ 'nın rotasyonudur. c kompleks bir sayı ve $\tilde{A}$ kompleks bulanık kümelerin ürünlerinin ölçeklenmesini göstermek için $c\Theta\tilde{A}$ kullanılır. $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ..., \tilde{A}_n$, U üzerinde karmaşık bulanık kümeler dizisi olduğunu varsayalım. Bu karmaşık bulanık kümelerin toplamı U 'dan C 'ye bir ölçekleme s 'dir, Böylece herhangi bir $u \in U$ için denklem 3.22 geliştirilmiştir.

$$s(u) = \sum_{i=1}^{n} \tilde{A}_i(u) = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i(u) \right) + j.\left(\sum_{i=1}^{n} y_i(u) \right) \quad \textbf{(3.22)}$$

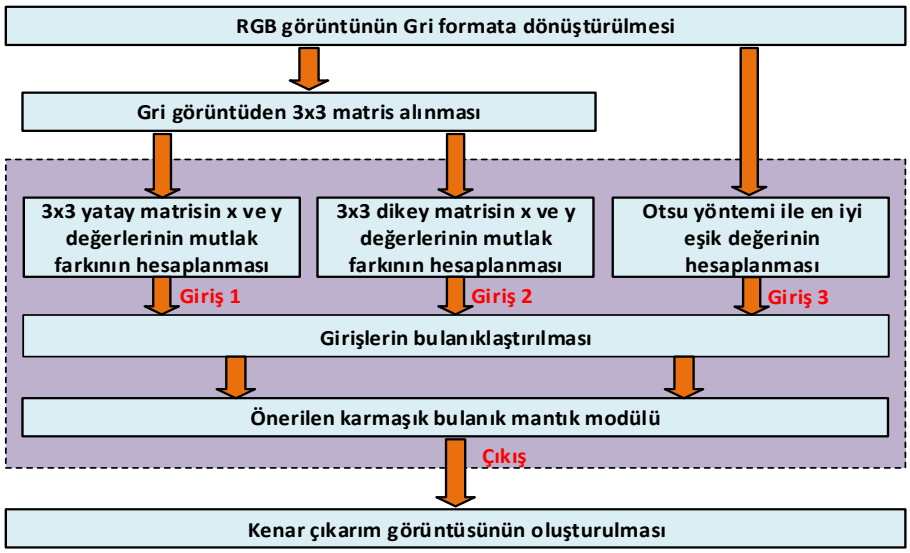
$s(u)$ karmaşık bir bulanık küme olmaması için $C_{[0,1]}$'de karmaşık bir sayı olmamalıdır. s 'i karmaşık bulanık kümeler yapmak için, her $s(u)$ modülünün kısıtlanması uygulanır. Bu nedenle kısıtlanmış vektör toplamı tanımlanır. $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ..., \tilde{A}_n$, U üzerinde karmaşık bulanık kümeler olsun [156]. Kısıt vektör-toplamı $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, ..., \tilde{A}_n$, herhangi bir $u \in U$ için U 'dan C 'ye bir ölçekleme v 'dir. $v(u)$ denklem 3.23'te verilmiştir.

$$v(u) = \min\left\{1, \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i(u) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} y_i(u) \right)^2}\right\}.e^{j.\arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i(u)}{\sum_{i=1}^{n} x_i(u)} \right)} \quad \textbf{(3.23)}$$

Burada $\arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i(u)}{\sum_{i=1}^{n} x_i(u)} \right)$ fazının esas bir argümandır.

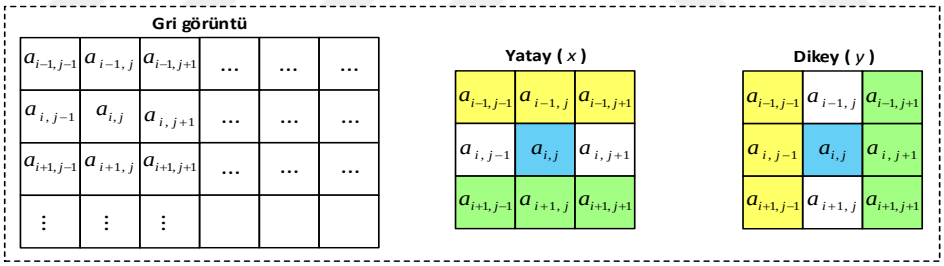
3.3.2. Karmaşık Bulanık Mantık Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi

Bu çalışmada, karmaşık bulanık mantık tabanlı kenar çıkarım yöntemi önerilmiştir. Karmaşık bulanık mantık tabanlı yöntemin akış şeması Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi üç girişli bir karmaşık bulanık yöntemi geliştirilmiştir. Öncelikle renkli görüntü gri görüntüye dönüştürülmüştür. Gri görüntü üzerinde Şekil 3.17'de verilen 3 3 boyutunda matrisler alınarak yatay ve dikey yönde hesaplama yapılmaktadır.



Şekil 3.16. Önerilen karmaşık bulanık mantık tabanlı yöntemin akış şeması

Şekil 3.17'de görüldüğü gibi gri görüntü üzerinde 3×3 boyutunda matrisler alınarak özellik çıkarımı yapılmaktadır. Yatay yönde hesaplama için denklem 3.24, dikey yönde hesaplama için denklem 3.25 kullanılmıştır.



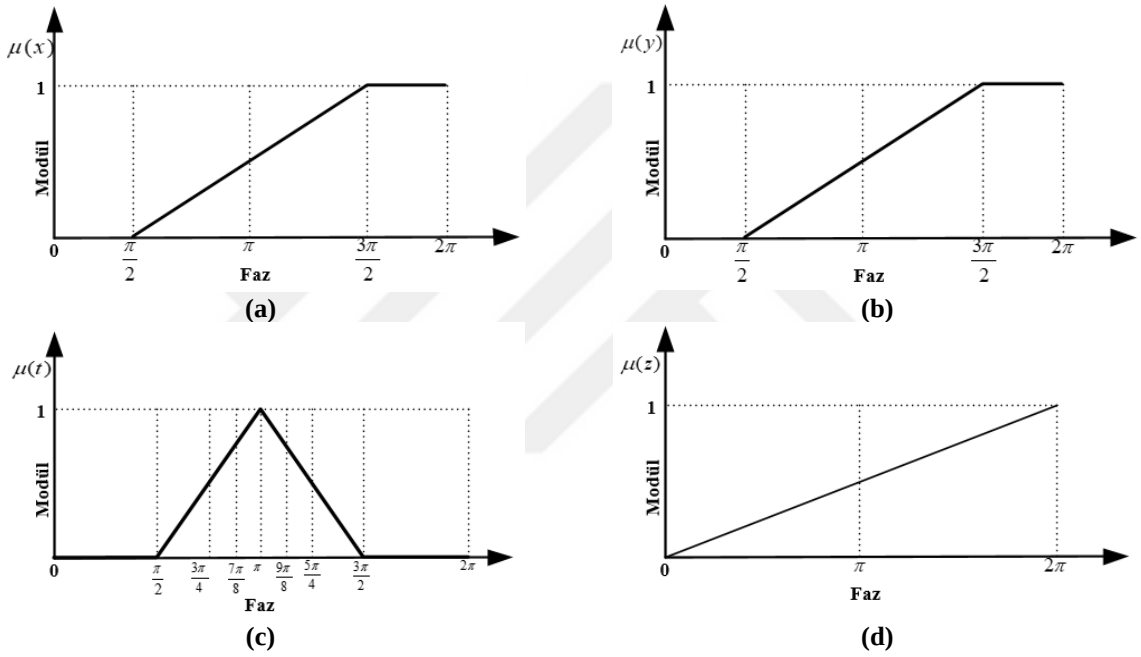
Şekil 3.17. Gri görüntü üzerinde yatay ve dikey hesaplama

$$x = \left| \frac{(a_{i-1,j-1}) + (a_{i-1,j}) + (a_{i-1,j+1})}{3} - \frac{(a_{i+1,j-1}) + (a_{i+1,j}) + (a_{i+1,j+1})}{3} \right| \quad \textbf{(3.24)}$$

$$y = \left| \frac{(a_{i-1,j-1}) + (a_{i,j-1}) + (a_{i+1,j-1})}{3} - \frac{(a_{i-1,j+1}) + (a_{i,j+1}) + (a_{i+1,j+1})}{3} \right| \quad \textbf{(3.25)}$$

Denklem 3.24 ve denklem 3.25 kullanılarak gri görüntü üzerinde kenar çıkarımı için yatay yönünde x ve dikey yönde y değerleri hesaplanmıştır. x ve y değerleri karmaşık bulanık sistemin girişine verilmektedir. x ve y değerleri 0-255 aralığında değer almaktadır. x ve y değerleri Şekil 3.18.a ve Şekil 3.18.b'de verilen giriş üyelik

fonksiyonlarında kullanılmaktadır. Şekil 3.18.a ve Şekil 3.18.b'de verilen üyelik fonksiyonlarında 0-255 piksel değeri aralığı $0-2\pi$ ile temsil edilmektedir. Böylece x ve y değerleri karmaşık düzlemde gösterilmektedir. Şekil 3.18.c'de verilen giriş üyelik fonksiyonu ise görüntüdeki parlaklık derecesini ifade etmektedir. Şekil 3.18.c'de verilen üyelik fonksiyonlarında 0-24 saat aralığı $0-2\pi$ ile temsil edilmektedir. Kenar çıkarımı yaparken görüntüdeki parlaklık derecesi sonuçları etkilemektedir. Bu nedenle günün farklı zamanları için görüntüdeki parlaklık derecesi dikkate alınarak kenar çıkarımı yapılmaktadır.



Şekil 3.18 Önerilen yöntemde kullanılan üyelik fonksiyonları **(a)** Giriş üyelik fonksiyonu **(b)** Giriş üyelik fonksiyonu **(c)** Giriş üyelik fonksiyonu **d)** Çıkış üyelik fonksiyonu

Bu çalışmada görüntüdeki parlaklık derecesini ölçerken Otsu yöntemi kullanılmıştır. Otsu yöntemi, görüntüdeki piksel değerlerine bakarak en iyi bölütleme için bir eşik değer hesaplamaktadır. Sabah ve akşam saatlerinde eşik değer düşük iken öğlen saatlerinde eşik değer yüksektir. Görüntüdeki parlaklık kenar çıkarımı için önemli bir etkidir. Bu nedenle görüntüdeki parlaklık derecesi için Şekil 3.18.c'de ki üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Çıkış için Şekil 3.18.d'de verilen çıkış üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Şekil 3.18'de verilen üyelik fonksiyonların oluşturulması için sırasıyla denklem 3.26, denklem 3.27, denklem 3.28 ve denklem 3.29 kullanılmıştır.

$$r_x(\omega)=\begin{cases}0, & \omega\in\left[0,\ \frac{\pi}{2}\right]\\ \frac{\omega-\pi/2}{\pi}, & \omega\in\left[\frac{\pi}{2},\ \frac{3\pi}{2}\right]\\ 1.0, & \omega\in\left[\frac{3\pi}{2},\ 2\pi\right]\end{cases} \quad \textbf{(3.26)}$$

$$r_y(\omega)=\begin{cases}0, & \omega\in\left[0,\ \frac{\pi}{2}\right]\\ \frac{\omega-\pi/2}{\pi}, & \omega\in\left[\frac{\pi}{2},\ \frac{3\pi}{2}\right]\\ 1.0, & \omega\in\left[\frac{3\pi}{2},\ 2\pi\right]\end{cases} \quad \textbf{(3.27)}$$

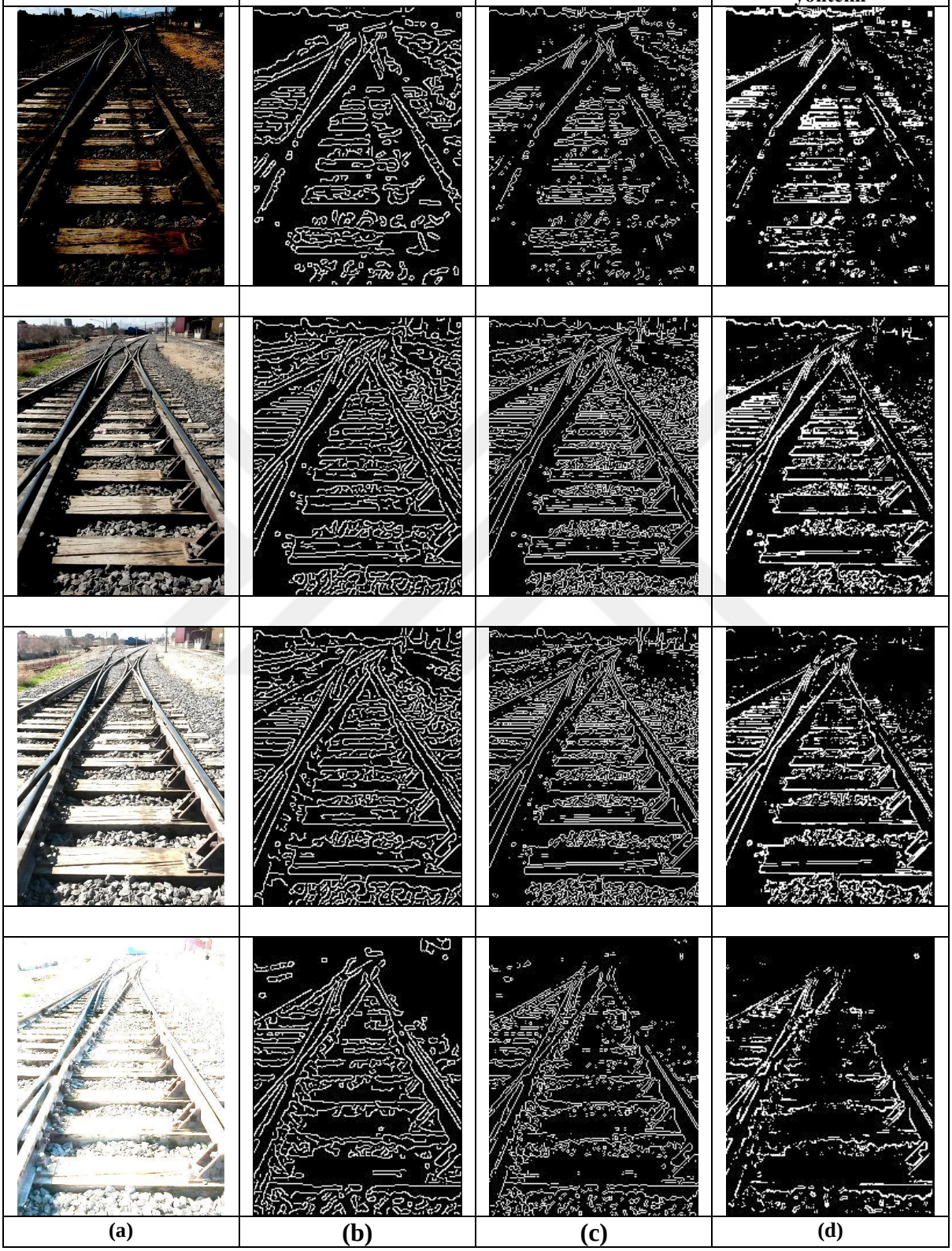
$$r_t(\omega)=\begin{cases}0, & \omega\in\left[0,\ \frac{\pi}{2}\right]\\ \frac{\omega-\pi/2}{\pi/2}, & \omega\in\left[\frac{\pi}{2},\ \pi\right]\\ \frac{\omega-\pi}{\pi/2}, & \omega\in\left[\pi,\ \frac{3\pi}{2}\right]\\ 1.0, & \omega\in\left[\frac{3\pi}{2},\ 2\pi\right]\end{cases} \quad \textbf{(3.28)}$$

$$r_z(\omega)=\begin{cases}\frac{w}{2\pi} & \omega\in[0,\ 2\pi]\end{cases} \quad \textbf{(3.29)}$$

Önerilen yöntemde girişler bulanıklaştırılarak Tablo 3.6'da verilen kural tablosuna verilmektedir. Elde edilen çıkarsamalar çıkış üyelik fonksiyonuna verilerek sonuçlar elde edilmektedir. "KD" kenar değil, "K" ise kenar anlamındadır. Karmaşık bulanık mantık için gün içerisinde belirli zamanlarda alınmış görüntüler kullanılarak kenar çıkarımı yapılmaktadır. Kullanılan görüntüler ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.19'da verilmiştir. Örnek değerler için önerilen yöntemde elde edilen sonuçlar Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu

	$\mu(x)$	$\omega\in[0,\ \pi]$	$\omega\in[0,\ \pi]$	$\omega\in[\pi,\ 2\pi]$	$\omega\in[\pi,\ 2\pi]$
$\mu(t)$	$\mu(y)$	$\omega\in[0,\ \pi]$	$\omega\in[\pi,\ 2\pi]$	$\omega\in[0,\ \pi]$	$\omega\in[\pi,\ 2\pi]$
$\omega\in\left[\frac{\pi}{2},\ \frac{3\pi}{4}\right]$		KD	K	K	KD
$\omega\in\left[\frac{3\pi}{4},\ \frac{7\pi}{8}\right]$		KD	K	K	K
$\omega\in\left[\frac{7\pi}{8},\ \pi\right]$		KD	K	K	K
$\omega\in\left[\pi,\ \frac{9\pi}{8}\right]$		KD	K	K	K
$\omega\in\left[\frac{9\pi}{8},\ \frac{5\pi}{4}\right]$		KD	K	K	K
$\omega\in\left[\frac{5\pi}{4},\ \frac{3\pi}{2}\right]$		KD	K	K	KD



Şekil 3.19. Önerilen karmaşık bulanık mantık yöntemi için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları **(a)** RGB görüntü **(b)** Canny kenar çıkarımı **(c)** Sobel kenar çıkarımı **(d)** Önerilen karmaşık bulanık mantık yöntemi ile kenar çıkarımı

Tablo 3.7. Örnek görüntüleri ile karmaşık bulanık sonucunun incelenmesi

Eşik değer	Yatay (x) değer	Dikey (y) değer	Parlaklık derecesi $\mu(t)$	Yatay $\mu(x)$	Dikey $\mu(y)$	Çıkış $\mu(z)$	Sonuç
66	57	71	$0{,}33e^{j.0{,}66}$	$0{,}04e^{j.0{,}54}$	$0{,}14e^{j.0{,}64}$	$0{,}33e^{j.0{,}66}$	KD
93	63	162	$0{,}46e^{j.0{,}73}$	$0{,}081e^{j.0{,}58}$	$0{,}74e^{j.1{,}24}$	$0{,}74e^{j.1{,}24}$	K
140	134	97	$0{,}7e^{j.0{,}85}$	$0{,}56e^{j.1{,}06}$	$0{,}31e^{j.0{,}81}$	$0{,}7e^{j.1{,}06}$	K
188	146	186	$0{,}94e^{j.0{,}97}$	$0{,}64e^{j.1{,}14}$	$0{,}9e^{j.1{,}4}$	$0{,}94e^{j.1{,}4}$	K
121	129	193	$0{,}6e^{j.0{,}8}$	$0{,}52e^{j.1{,}02}$	$0{,}95e^{j.1{,}45}$	$0{,}95e^{j.1{,}45}$	K
80	185	84	$0{,}4e^{j.0{,}7}$	$0{,}9e^{j.1{,}4}$	$0{,}22e^{j.0{,}72}$	$0{,}9e^{j.1{,}4}$	K

3.3.3. Karmaşık Bulanık Otomata

Zadeh [134] bulanık kümelerin teorisini açıkladıktan sonra Wee [159] bulanık otomata konseptini geliştirmiştir. Otomata hem teori hem de uygulama bakımından uzun bir geçmişe sahiptir. Ayrık uzaylar üzerindeki genel hesaplama sistemlerinin temel özelliklerini oluşturmaktadır. Geleneksel otomata spektrumunda (örnek: deterministik sonlu otomata, deterministik olmayan sonlu otomata, olasılıklı otomata ve bulanık sonlu otomata), deterministik sonlu durum otomatalar farklı alanlarda en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bulanık otomata bu tür sistemlerde belirsizliği ele alması için sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır. Ayrıca, diğer matematiksel araçlar tarafından kolayca elde edilmeyen problemler için kullanılabilmektedir. 2004 yılında Doostfatemeh ve diğ. [162] bulanık otomata kavramını genişleterek genel bulanık otomata kavramını ortaya çıkarmışlardır.

$C^* = \left\{c + di : c, d \in [0,1], i = \sqrt{-1}\right\}$ olmak üzere X 'in karmaşık bulanık bir alt kümesi olan μ, X 'in C^*'de ki bir fonksiyonudur. Eğer μ X 'in karmaşık bulanık bir alt kümesi ise $|\mu|$ X 'in bir bulanık alt kümesidir. Eğer $\mu(x) = c + di$ ise Θ, $\mu(x)$ 'in bir argümenti ve $r = \mu(x) = \sqrt{c^2 + d^2}$ iken $\mu(x) = r.\exp(i\Theta)$ 'dir.

Boş olmayan bir X kümesi için $\tilde{P}(x)$ X 'de ki karmaşık alt kümelerini göstermektedir. Σ bir küme olsun. Σ sözcük, Σ cinsinden sonlu bir eleman dizisinin ürünüdür. Σ^*, Σ üzerindeki tüm sözcüklerin kümesidir. $l(x)$'in uzunluğu $x \in \Sigma^*$'deki harflerin sayısıdır. O halde $l(\wedge)$=0'dır.

Bir karmaşık bulanık sonlu durum otomata altı parametreden oluşmaktadır. $\tilde{F}(Q,\Sigma,R,Z,\delta,w)$ şeklinde gösterilmektedir. Burada Q sonlu durumlar kümesini, Σ giriş sembollerinin sonlu kümesini, R , $\tilde{F}$ 'ın başlangıç durumunu, Z sonlu durumun çıkış sembollerini ifade etmektedir. $\delta : Qx\Sigma xQ \to C^*$ bir giriş sembolü üzerine bir durumu (mevcut durum) başka bir duruma (bir sonraki durum) eşlemek için kullanılan ve $w : Q \to Z$ çıkış fonksiyonu olan karmaşık bulanık geçiş fonksiyonlarıdır. a_k girişi üzerinden durum q_i (mevcut durum) durumunda q_j'ye (sonraki durum) geçiş $\delta(q_i, a_k, q_j)$ ile gösterilmektedir. Her $\delta(q_i, a_k, q_j)$ ile ilişkili olarak $[0,1]$ aralığında geçişin ağırlığı olarak adlandırılan bir üyelik değeri vardır. $\tilde{F}$ kümesinin tüm geçişleri Δ ile gösterilmiştir. $\tilde{F}$ genel karmaşık bulanık otomatası $\tilde{F}(Q,\Sigma,\tilde{R},Z,w,,\tilde{\delta},F_1,F_2)$ sekiz parametreden oluşmaktadır. Burada; Q sonlu durumlar kümesidir ve $Q = \{q_1, q_2, ..., q_n\}$ şeklinde ifade edilmektedir. Σ sonlu giriş sembollerinin kümesidir ve $\Sigma = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$ şeklinde gösterilir. $\tilde{R}$ bulanık başlangıç durumlar kümesidir. Z sonlu çıkış semboller kümesidir ve $Z = \{b_1, b_2, ..., b_k\}$ ile ifade edilmektedir. $w : Q \to Z$ çıkış fonksiyonudur. $\tilde{\delta} : (Qx[0,1])x\Sigma xQ \to C^*$ artırılmış geçiş fonksiyonudur. $F_1 : [0,1]x[0,1] \to [0,1]$ üyelik atama fonksiyonudur. $F_2 : [0,1]^* \to [0,1]$ çoklu üyelik çözümleme fonksiyonudur.

$F_1(\mu, |\delta|)$ fonksiyonu μ ve $|\delta|$ olmak üzere iki parametre içermektedir. Burada μ bir öncü fonksiyon üyelik değer iken $|\delta|$'da bir geçiş fonksiyonunun ağırlığıdır. Bu tanımda durum q_i'den q_j'ye gerçekleşen süreç a_k ile temsil edilmekte ve denklem 3.30'da ki gibi ifade edilmektedir.

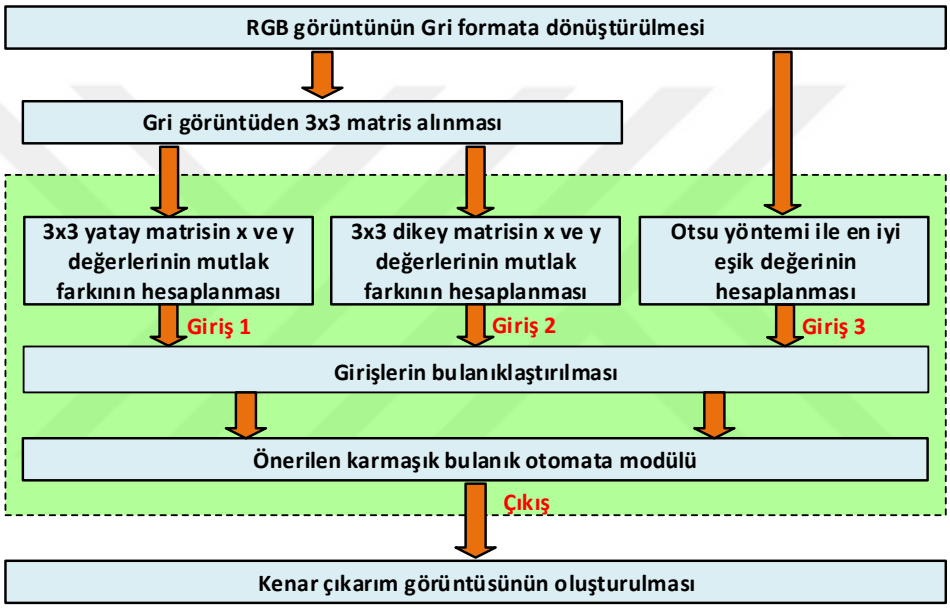
$$\mu^{t+1}(q_j) = \left| \tilde{\delta}\left(\left(q_i, \mu^t(q_i) \right), a_k, q_j \right) \right| = F_1\left(\mu^t(q_i), \left| \delta\left(q_i, a_k, q_j \right) \right| \right) \qquad \textbf{(3.30)}$$

Θ değeri $\delta(q_i, a_k, q_j)$'nin argümenti iken $\tilde{\delta}\left(\left(q_i, \mu^t(q_i) \right), a_k, q_j \right) = \mu^{t+1}(q_j) \exp(i\Theta)$'dır. Bu $t+1$ zamanındaki q_j durumunun üyelik değerlerinin t zamanda q_i değerinin üyelik

değeri ve geçiş ağırlığı kullanılarak F_1 fonksiyonu tarafından hesaplandığı anlamına gelmektedir.

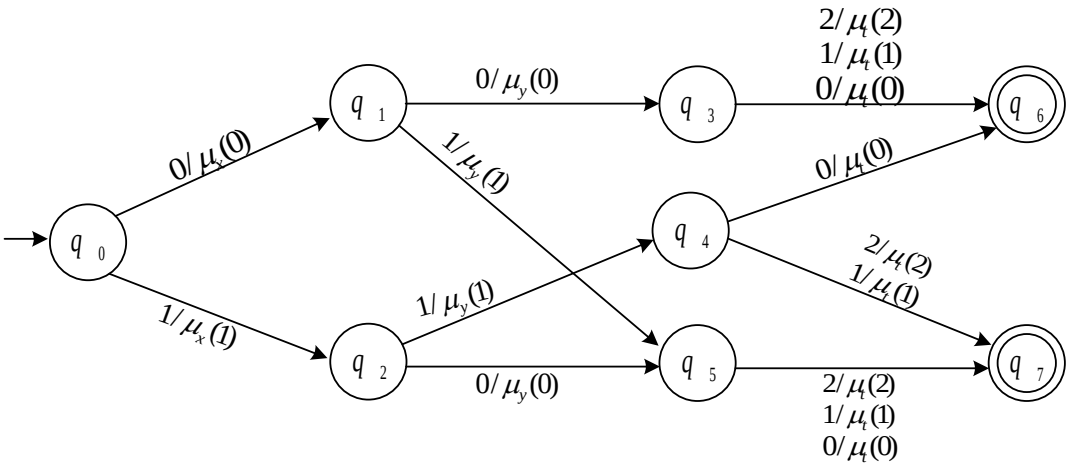
3.3.4. Karmaşık Bulanık Otomata Tabanlı Kenar Çıkarım Yöntemi

Bu çalışmada karmaşık bulanık otomata tabanlı kenar çıkarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen üç girişli yöntemin akış şeması Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Önerilen karmaşık bulanık otomata yönteminin akış şeması

Önerilen yöntemde RGB görüntü gri görüntüye dönüştürülerek işlem yapılmaktadır. Gri görüntü üzerinde 3×3 boyutunda matrisler alınmaktadır. Bu matrisler üzerinde yatay ve dikey yönde değerler elde edilmektedir. Denklem 3.24 ve denklem 3.25 kullanılarak gri görüntü üzerinde kenar çıkarımı için yatay yönünde x ve dikey yönde y değerleri hesaplanmıştır. x ve y değerleri karmaşık bulanık otomatanın girişine verilmektedir. x ve y değerleri 0-255 aralığında değer almaktadır. x ve y değerleri Şekil 3.18.a ve Şekil 3.18.b'de verilen giriş üyelik fonksiyonlarında kullanılmaktadır. Ayrıca görüntüdeki parlaklık derecesinin dikkate alınması için Şekil 3.18.c'de verilen giriş üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı

Şekil 3.21'de verilen karmaşık bulanık otomata yapısında $\mu(x)$ ve $\mu(y)$ için "0" geçişi $\omega \in [0,\ \pi]$ aralığını, "1" geçişi $\omega \in [\pi,\ 2\pi]$ aralığını ifade etmektedir. $\mu(t)$ için "0" geçişi $\omega \in \left[\frac{\pi}{2},\ \frac{3\pi}{4}\right]$ ile $\omega \in \left[\frac{5\pi}{4},\ \frac{3\pi}{2}\right]$ aralıklarını, '1' geçişi $\omega \in \left[\frac{3\pi}{4},\ \frac{7\pi}{8}\right]$ ile $\omega \in \left[\frac{9\pi}{8},\ \frac{5\pi}{4}\right]$ aralıklarını ve "2" geçişi ise $\omega \in \left[\frac{7\pi}{8},\ \pi\right]$ ile $\omega \in \left[\pi,\ \frac{9\pi}{8}\right]$ aralıklarını ifade etmektedir. Görüntü üzerindeki yatay kenarları tespit etmek için 3×3 yatay matriste hesaplanan (x) değeri $\mu(x)$ giriş üyelik fonksiyonuna, (y) değeri ise $\mu(y)$ giriş üyelik fonksiyonuna verilmektedir. Görüntüdeki parlaklık değeri ise $\mu(t)$ giriş üyelik fonksiyonuna verilmektedir. Önerilen yöntemi adım adım uygulamak için yatay matris için (x) =63, (y) =162 ve (t) =93 değerini verelim. Bulanıklaştırma işleminde (x) değeri için $\mu_x(0) = 0{,}081e^{\text{j.}0{,}58}$, (y) değeri için $\mu_y(1) = 0{,}74e^{\text{j.}1{,}24}$ ve (t) değeri için $\mu_t(0) = 0{,}46e^{\text{j.}0{,}73}$ olarak hesaplanmaktadır.

Elde edilen bulanık değerler otomata da şu şekilde tanımlanmaktadır.

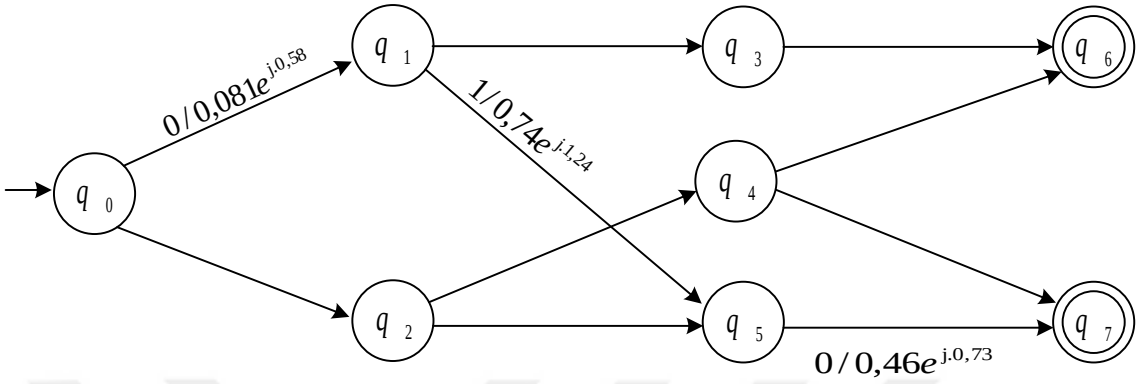
$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7\}$, $\Sigma = \{0,1,2\}$ ve $\mu : Qx\Sigma xQ \to [0,1]$ iken $\tilde{F}(Q, \Sigma, R, Z, \delta, w)$ olsun

$\mu(q_0, 0, q_1) = 0{,}081e^{\text{j.}0{,}58}$

$\mu(q_1, 1, q_5) = 0{,}74e^{\text{j.}1{,}24}$

$\mu(q_5, 0, q_7) = 0{,}46e^{\text{j.}0{,}73}$

Yukarıda verilen örneğin karmaşık bulanık otomata geçiş diyagramı Şekil 3.22'de verilmiştir.



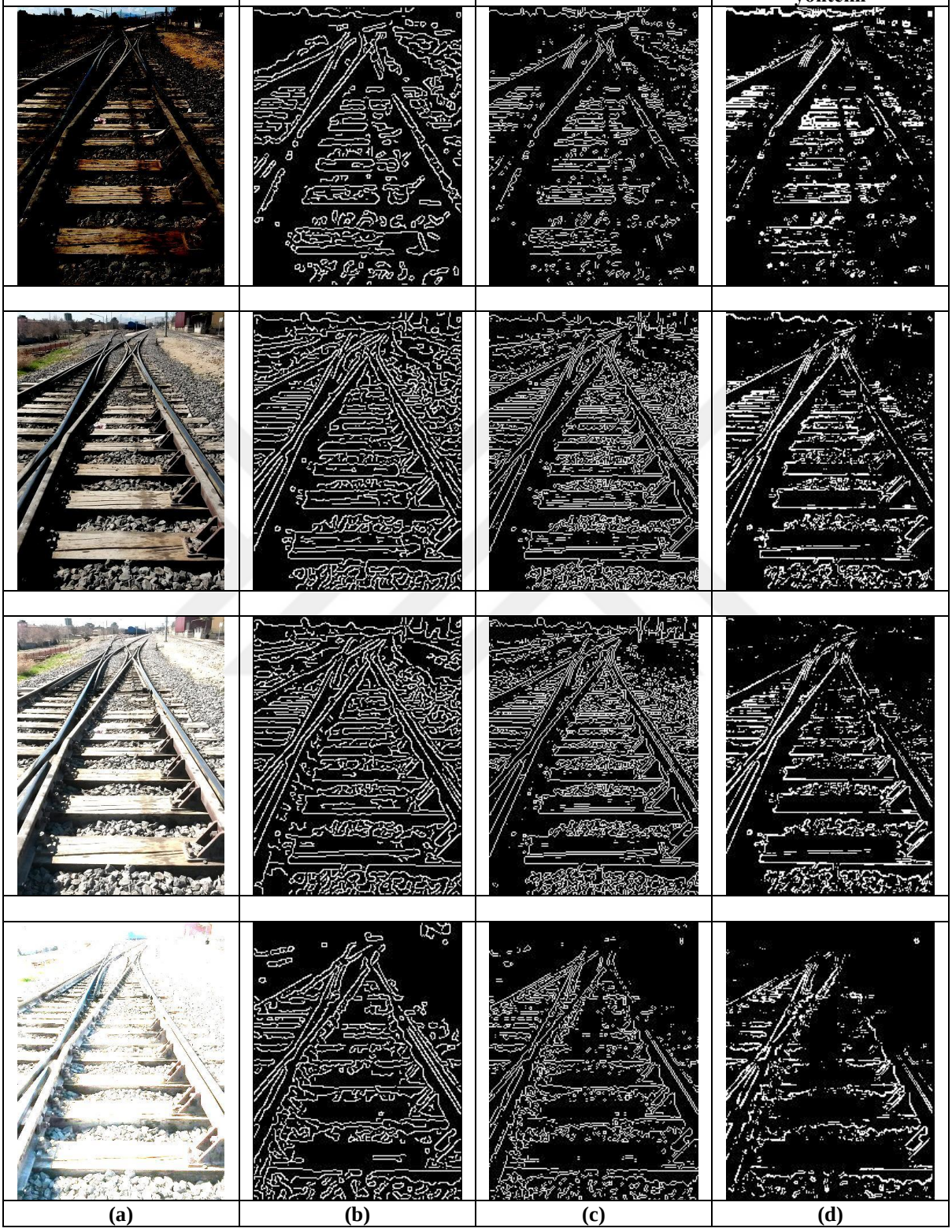
Şekil 3.22. Karmaşık bulanık otomata geçiş diyagramı

Önerilen geçiş diyagramı sonucunda aşağıdaki işlem yapılmaktadır.

$$\mu(q_0,0,q_1) \vee \mu(q_1,1,q_5) \vee \mu(q_5,0,q_7) = 0{,}081e^{j.0{,}58} \vee 0{,}74e^{j.1{,}24} \vee 0{,}46e^{j.0{,}73} = 0{,}74e^{j.1{,}24}$$

Yapılan işlemler sonucunda q_7 durumu $0{,}74e^{j.1{,}24}$ olarak hesaplanmıştır. Burada q_6 durumu kenar olmayan sonucu, q_7 durumu ise kenar sonucunu ifade etmektedir.

Örnekte verilen işlem görüntü üzerindeki tüm matrislere uygulandığında görüntünün kenar çıkarımı yapılmaktadır. Böylece karmaşık bulanık otomata kullanılarak görüntü üzerinde kenar çıkarımı yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Önerilen karmaşık bulanık otomata yöntemi için kullanılan örnek görüntüler ve sonuçları **(a)** RGB görüntü **(b)** Canny kenar çıkarımı **(c)** Sobel kenar çıkarımı **(d)** Önerilen karmaşık bulanık otomata yöntemi ile kenar çıkarımı

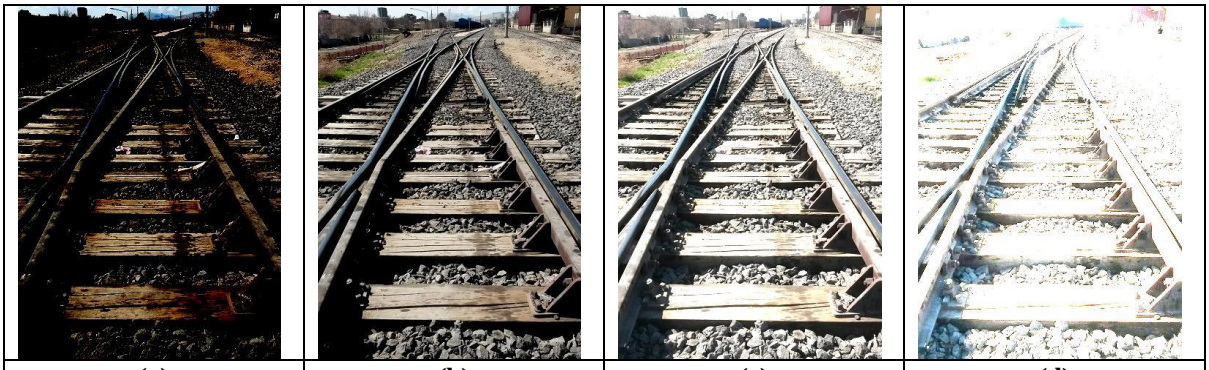
Karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata ile elde edilen kenar çıkarım sonuçları Canny kenar çıkarım sonuçları karşılaştırılırken görüntü eşleştirme yapılmıştır. İki görüntü arasındaki piksel değerleri karşılaştırarak Canny kenar çıkarım yöntemine ne kadar benzer oldukları hesaplanmıştır. Bu benzerlik oranı Tablo 3.8'de başarı oranı olarak verilmiştir.

Tablo 3.8. Önerilen karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata ile kenar çıkarımın başarı oranı

Canny eşik değeri	**Eşik değer**	**Başarı oranı (%)**	
		Karmaşık bulanık mantık	**Karmaşık bulanık otomata**
0.1	66	71.5	70,7
0.3	93	80.4	79,6
0.5	140	79.7	80,1
0.7	188	73.2	72,7

3.4. Bölüm Değerlendirmesi

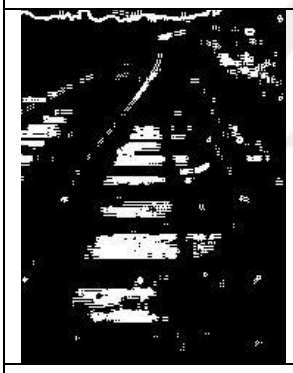
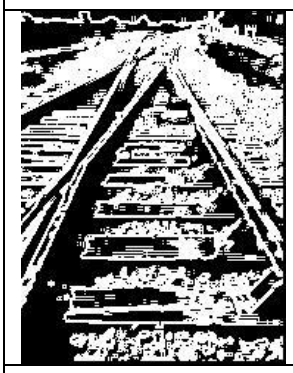
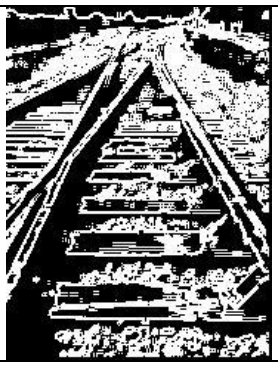
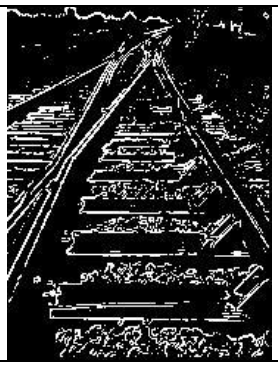
Tez çalışmasının bu bölümünde bulanık mantık, bulanık otomata, karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata kavramları açıklanmıştır. Açıklanan dört kavramın birbirinden farkı uygulama sonuçları ile gösterilmiştir. Bulanık mantık, bulanık otomata, karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomatanın farklarının gösterilmesi için kenar çıkarım uygulaması geliştirilmiştir. Uygulamada alınan sonuçlar Canny ve Sobel kenar çıkarım algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen uygulamaların karşılaştırılması için Şekil 3.24'te verilen örnek görüntüler kullanılmıştır.

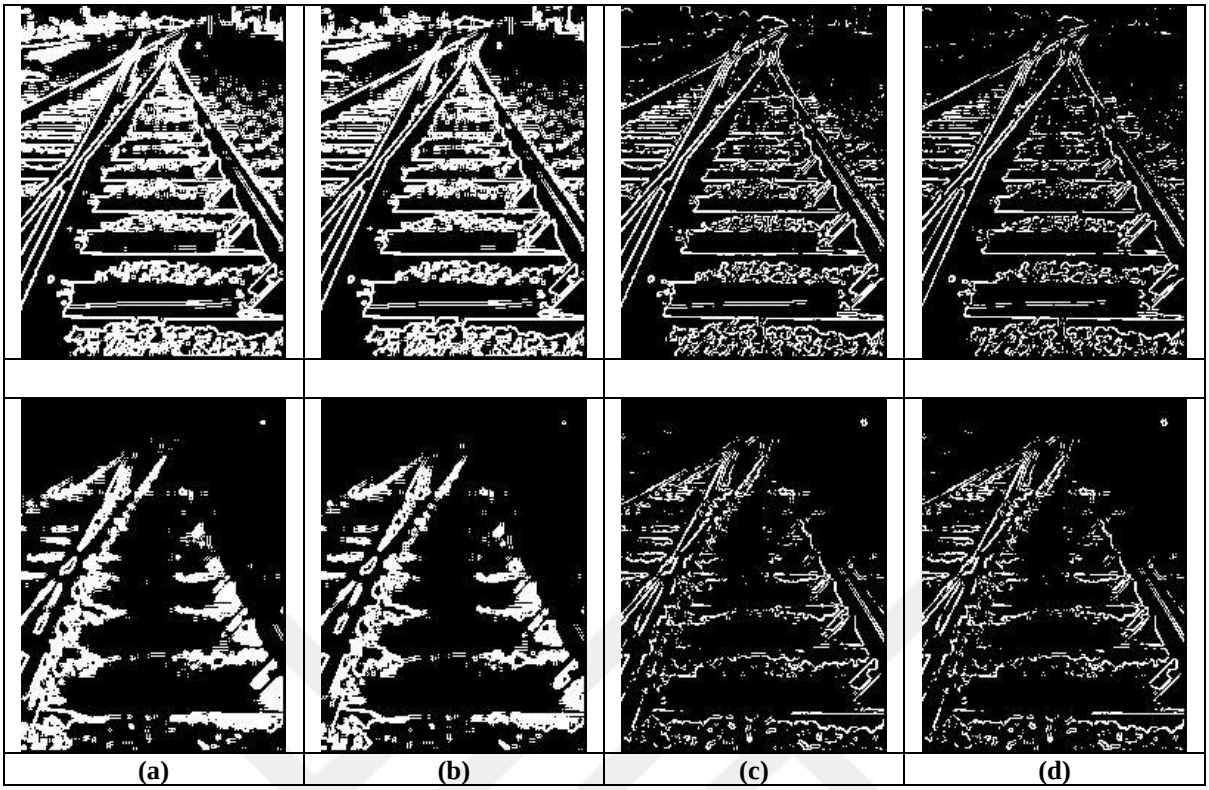


(a)	**(b)**	**(c)**	**(d)**

Şekil 3.24. Uygulamaların karşılaştırılması için kullanılan örnek görüntüler **(a)** Eşik değer = 66 **(b)** Eşik değer = 93 **(c)** Eşik değer = 140 **(d)** Eşik değer = 188

Şekil 3.24'te verilen örnek görüntüler kullanılarak elde edilen bulanık mantık yönteminin sonuçları Şekil 3.25.a'da, bulanık otomata yönteminin sonuçları Şekil 3.25.b'de verilmiştir. Önerilen bulanık mantık ve bulanık otomata yöntemleri incelendiğinde sonuçların aynı olduğu görülmektedir. Sonuçların aynı olmasının nedeni, bulanık mantıkta geliştirilen kural tablosu ve çıkış üyelik fonksiyonun bulanık otomataya uyarlanmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomatanın sonuçlarının da Şekil 3.25.c ve Şekil 3.25.d'de aynı olduğu görülmektedir. Bulanık mantık ile karmaşık bulanık mantık karşılaştırıldığında karmaşık bulanık mantığın daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Aynı şekilde bulanık otomata ile karmaşık bulanık otomata karşılaştırıldığında karmaşık bulanık otomatanın daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun nedeni ise görüntüdeki parlaklık parametresinin kullanılmasıdır.

Önerilen bulanık mantık yöntemi	**Önerilen bulanık otomata yöntemi**	**Önerilen karmaşık bulanık mantık yöntemi**	**Önerilen karmaşık bulanık otomata yöntemi**
			
			



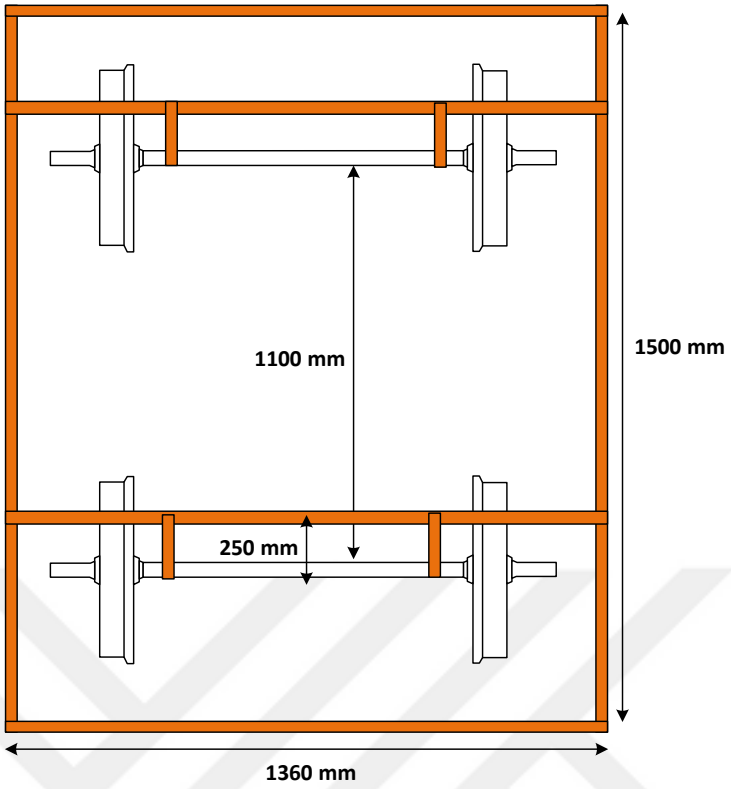
Şekil 3.25. Örnek görüntüler için elde edilen sonuçlar **(a)** Önerilen bulanık mantık yöntemi **(b)** Önerilen bulanık otomata yöntemi **(c)** Önerilen karmaşık bulanık mantık yöntemi **(d)** Önerilen karmaşık bulanık otomata yöntemi

4. ÖNERİLEN RAY BİLEŞEN TESPİT YÖNTEMLERİ

Tezin bu bölümünde ray bileşenlerinin tespit edilmesi ve durum izleme için iki farklı yöntem önerilmiştir. Öncelikle deney aracı oluşturularak istenilen görüntülerin alınabilmesi için bir ortam geliştirilmiştir. Birinci yöntemde, ray bileşenlerinin tespiti ve durum izleme için karar ağacı tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Demiryolu hattından iki kamera ile alınan görüntüler üzerinde, Canny kenar çıkarım ve Hough dönüşümü algoritması kullanılarak özellik çıkarımı yapılmaktadır. Elde edilen özelikler bir karar ağacına verilerek demiryolunda ray ve travers tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyi üzerinde durum izleme yapılmaktadır. İkinci yöntemde ise, ray yüzey ve bileşenleri için Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Demiryolu hattına kurulan dört kamera ile görüntü alınmıştır. Alınan görüntülerde bağlantı bileşenlerinin tespiti için bir şablon görüntü PSO algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Tespit edilen ray yüzeyi ve bileşenleri üzerinde durum izleme yapılmıştır.

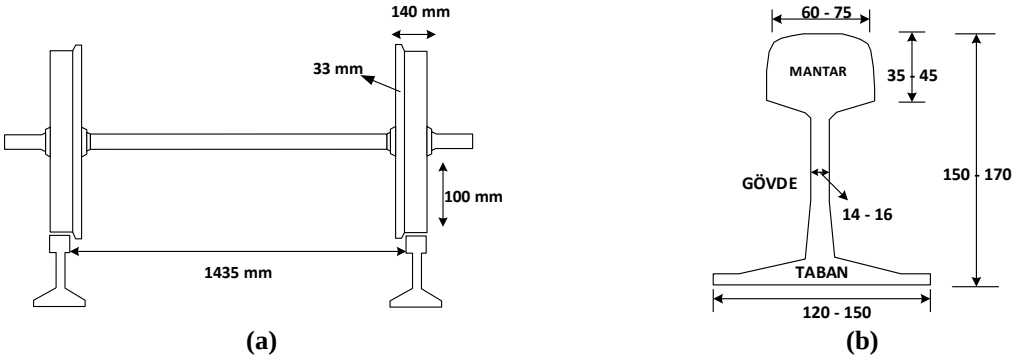
4.1. Deney Aracının Geliştirilmesi ve Görüntü Alma Ortamının Oluşturulması

Bu tez kapsamında deneysel verilerin alınması için bir deney aracı oluşturulmuştur. Oluşturulan deney aracı demiryolu hattı üzerinde kolay hareket edebilir ve kullanışlı yapıdadır. Deney aracı üzerine frame kameralar yerleştirilerek demiryolu hattı gerçek zamanlı izlenmektedir. Deney aracının oluşturulması için öncelikle demiryolu hattının yapısı incelenmiştir. Deney aracı oluşturulmadan önce demiryolu hattının ölçüleri dikkate alınarak bilgisayar ortamında basit bir çizimi yapılmıştır. Deney aracının bilgisayar ortamındaki çizimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney aracının bilgisayar ortamındaki çizimi

Deney aracının en önemli bileşenleri tekerlekleridir. Bundan dolayı tekerleklerinin yapılmasında demiryolu rayının ölçüleride dikkate alınmıştır. Gerçek bir demiryolu tekerinin ve rayın ölçüleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Gerçek bir demiryolu tekerinin ve rayın ölçüleri **(a)** İki ray arası mesafe ve teker ölçüleri **(b)** Rayın ölçüleri

Şekil 4.2'de verilen ölçüler dikkate alınarak deney aracı oluşturulmuştur. Deney aracının görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Oluşturulan deney aracı görüntüsü

Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi oluşturulan deney aracının tekerleri demiryolu hattında kolayca hareket edebilecek yapıdadır. Bu araç demiryolu hattı üzerine yerleştirilerek test edilmiştir. Demiryolu aracının demiryolu hattı üzerine yerleştirilmiş görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

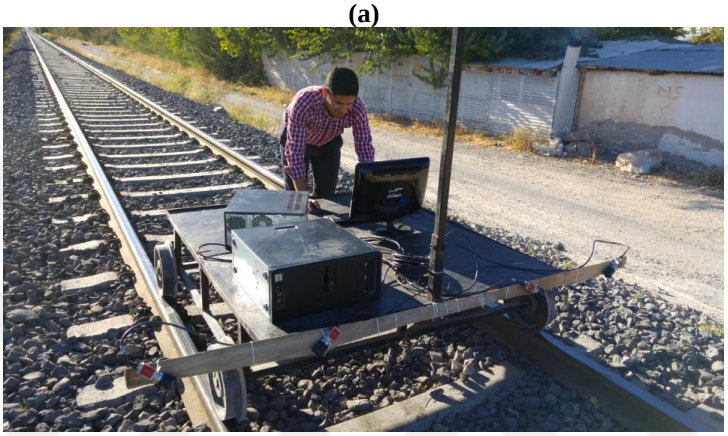


Şekil 4.4. Demiryolu aracının demiryolu hattı üzerine yerleştirilmiş görüntüleri

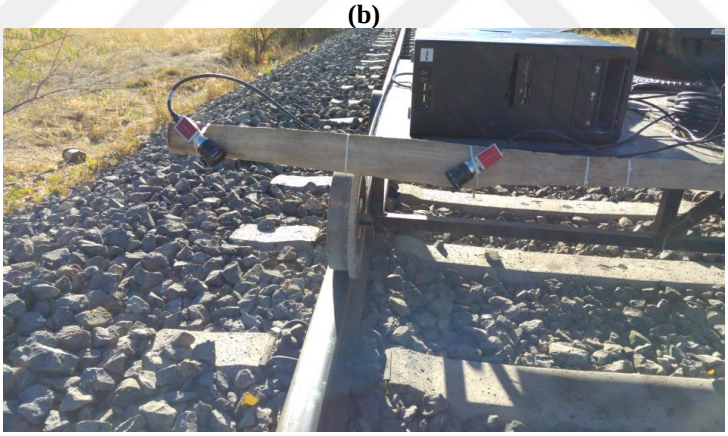
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere demiryolu aracı hat üzerinde test edilmiştir. Demiryolu aracının ölçüleri hat üzerine uygun bir şekilde yapıldığı için kolaylıkla hareket etmektedir. Demiryolu aracı üzerine Frame kameralar, Frame Grabber kartı, Bilgisayar ve UPS yerleştirilerek demiryolu hattına ait görüntüler izlenmektedir. Deney aracı üzerine kurulan kamera ve diğer malzemeler Şekil 4.5'te verilmiştir.



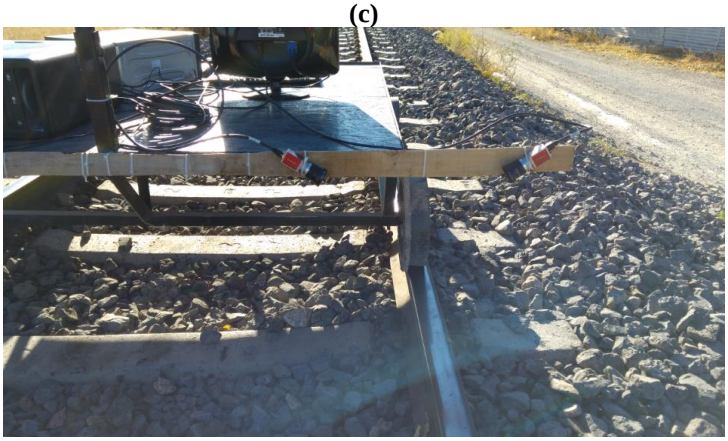
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.5. Deney aracı üzerine kurulan kamera ve diğer malzemeler

Tablo 4.1. Frame kamera, Lens, Frame Grabber kartına ait genel özellikler

Ürün Adı	Parametreleri	Özelikleri
Frame Kamera	Marka	Allied Vision
	Model	Mako G-032B/C
	Çözünürlük	658(h) ×492(v)
	Çerçeve Oranı	102 fps
	Sensör Türü	CCD
	Kamera kapağı (Shutter) Tipi	Global
	Sensör Boyutu	1/3 inç
	Lens Yuvası	C mount
	Arayüz	GigE
Frame Kamera Lensi	Marka	Ricoh
	Model	FL-HC0416X-VG
	Odak Lensi	Sabit
	Odak Uzunluğu	4.2 mm
	Diyafram açıklığı	1:1.6
	Format, Boyutu	1/2, 1/3 inç format
	Arka Odak Uzunluğu	10.42 mm
	Lens Yuvası	C mount
	Minimum Nesne Uzaklığı	0.2 m
Frame Grabber Kartı	Marka	Adlink
	Model	PCIe-GIE64+
	Port Sayısı	4
	Desteklenen Formatlar	IEEE 1588, IEEE 802.3af
	Veri Transfer Oranı	1000 Mb/s
	Bağlantı Noktası	PCI-Express

4.2. Ray Bileşenlerinin Tespiti ve Durum İzlemesi için Karar Ağacı Tabanlı Bir Yaklaşım

Demiryolu ulaşımı uzun yıllardır kullanılan önemli bir ulaşım türüdür. Özellikle maliyet ve güvenlik açısından diğer türlere göre daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca, teknolojinin de gelişmesiyle yolcu ve yük taşımacılığında giderek önemi daha da artmaktadır. Kullanımı giderek artan demiryollarının güvenlik ve bakım çalışmaları da aynı oranda önem teşkil etmektedir. Özellikle ray durumu izleme ve ray bileşenlerinin sağlıklı bir şekilde kullanımına devam edebilmesi rayların güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Geleneksel yöntemlerde bu işlemler genellikle insan gücüne dayalı bir şekilde sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemler hem maliyet hem de sağlıklı sonuçlar almak açısından bazı dezavantajlara sahiptir [163]. Son yıllarda teknolojideki gelişmeler bu alanda da yeni yöntemler üretmeyi sağlamıştır. Bilgisayar ve elektronik donanımların maliyetlerinin

düşmesi ve gelişen yazılım teknikleri ile beraber bu alandaki çalışmaların etkili sonuçlar vermesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, bilgisayar görmesi tabanlı bileşen tespiti ve durum izleme yöntemi önerilmektedir. Çalışmada, bir trenin alt kısmına yerleştirilen kameralar görüntü toplama amacıyla kullanılmaktadır. Kameralar, ray bileşenlerini görecek şekilde monte edilmiştir. Elde edilen görüntüler üzerinde yine görüntü işleme metotları kullanılarak bileşen tespiti yapılmaktadır. Daha sonra bir sınıflandırma algoritması ile birlikte bu bileşenlerin ayrımı sağlanmaktadır. Her iki yöntem kullanılarak bir tren seyir halinde iken ray bileşenlerinin tespiti yapılmaya çalışılmaktadır. Çalışma sonunda gerçek ortamdan alınan görüntüler kullanılarak deneyler yapılmıştır ve elde edilen sonuçları çalışmanın geçerliliğini doğrulamaktadır.

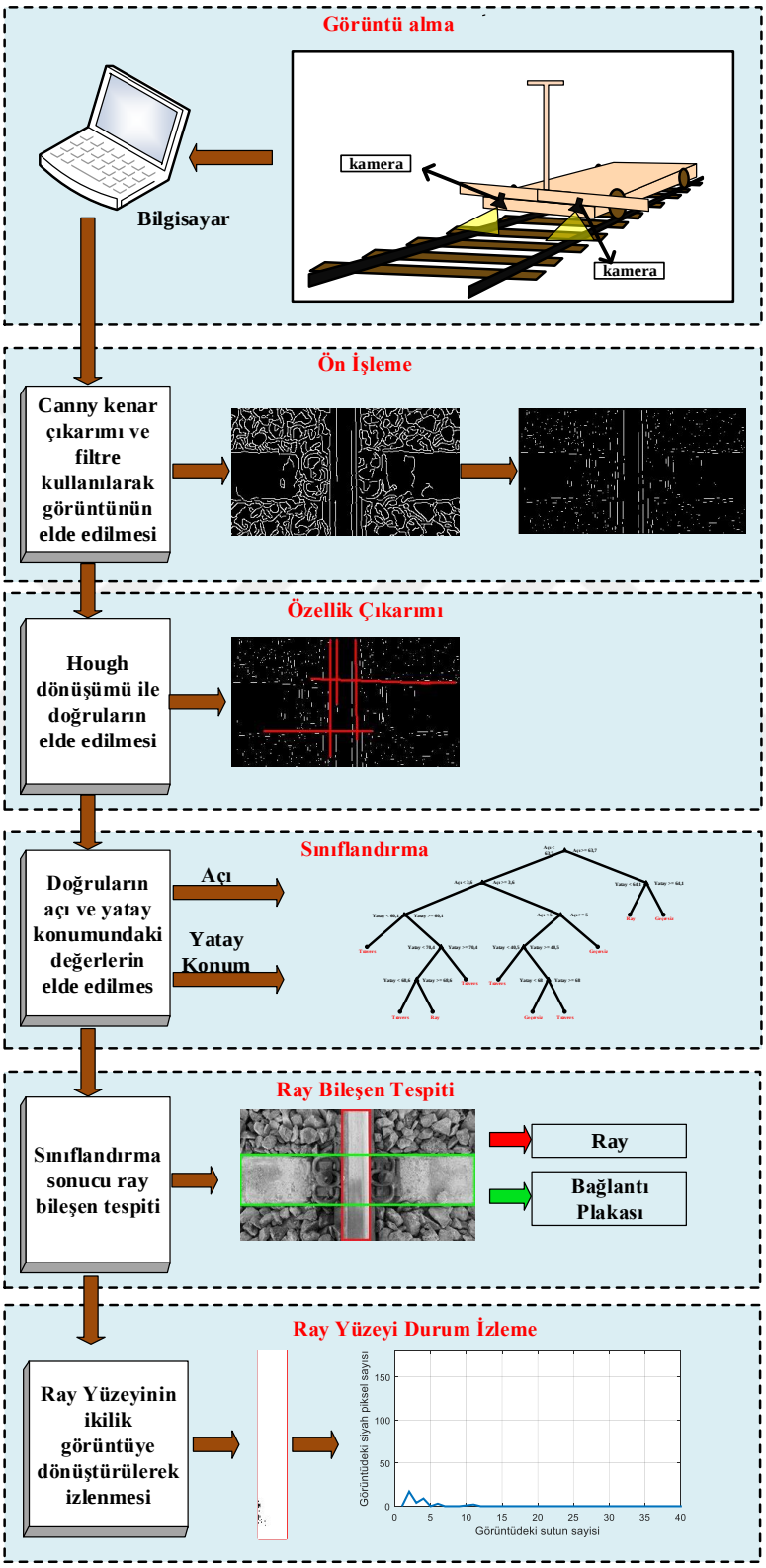
4.2.1. Önerilen Yöntem

Kullanılan deneysel yapı ile elde edilen görüntüler üzerinde kenar çıkarımı yapılmıştır. Elde edilen görüntüden doğrular tespit edilerek, her bir doğru için açı değerleri ve yatay eksendeki değerleri kullanılarak veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesinden karar ağacı oluşturarak görüntüdeki doğruların sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Sınıflandırma sonucunda demiryolu bileşen tespiti yapılmaktadır. Literatürde demiryolu bileşen tespiti birçok farklı yöntem kullanılarak tespit edilmiştir [116]. Bu çalışmada geliştirilen ray bileşen tespiti yaklaşımı Şekil 4.6'da verilmiştir.

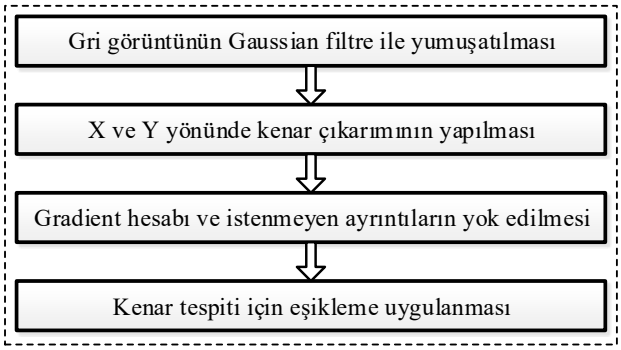
Şekil 4.6'da görüldüğü gibi özellik çıkarımı için Canny kenar çıkarım algoritması kullanılmıştır. Kenar çıkarımı sonucunda Hough dönüşümü ile doğrular tespit edilerek doğruların açı ve yatay eksendeki konumları hesaplanmıştır. Elde edilen özellikler karar ağacı ile birlikte kullanılarak ray bileşenleri tespit edilmiştir.

Bu çalışmada özellik çıkarımı adımında kullanılan Canny kenar çıkarım yöntemi, kenar çıkarım algoritmaları içerisinde yaygın kullanılan algoritmadır [165]. Bir görüntüde bulunan kenarlar, kenar bölgelerinde bulunan piksel değerlerinin ani değişmesi olarak tanımlanmaktadır. Kenar çıkarım yöntemleri görüntü işleme uygulamalarında özellik çıkarımı için oldukça önemlidir [166, 3]. Canny kenar çıkarım algoritması çok aşamalı olarak gerçekleşen bir kenar çıkarım algoritmasıdır ve diğer kenar çıkarım algoritmalarına

göre daha iyi sonuç vermektedir [167]. Canny kenar çıkarım algoritmasının genel akış şeması Şekil 4.7'de verilmektedir.



Şekil 4.6. Ray bileşen tespiti için önerilen yaklaşım



Şekil 4.7. Canny kenar çıkarım algoritmasının akış şeması [165].

Şekil 4.7'de verilen Canny kenar çıkarım algoritmasının akış şemasında dört temel adım bulunmaktadır. Gri görüntünün Gaussian filtreleme ile yumuşatılması adımında öncelikle görüntü gri formata dönüştürülmektedir. Renkli bir görüntünün matrislerinin gri formatı görüntü matrislerine dönüştürülmesi denklem 4.1'de verilmektedir.

$$f(i,\ j) = R(i,\ j) \times 0{,}299 + G(i,\ j) \times 0{,}587 + B(i,\ j) \times 0{,}114 \quad \textbf{(4.1)}$$

Denklem 4.1'de kullanılan $f(i,\ j)$ gri seviyeli görüntü matrisini, $R(i,\ j)$ red görüntü matrisini, $G(i,\ j)$ green görüntü matrisini ve $B(i,\ j)$ blue görüntü matrisini ifade etmektedir. Bir görüntünün gri görüntüye dönüştürülmesinin en önemli nedeni boyutu küçültmektir. Renkli görüntüde üç matris var iken gri görüntüde bir matris bulunmaktadır. Böylece işlemler daha hızlı yapılmaktadır.

Elde edilen gri formattaki görüntüye gaussian filtresi uygulanarak görüntüde yumuşatma işlemi yapılmaktadır. Gauss filtresinde 5 × 5 boyutunda bir gaussian maskesi kullanılmaktadır. Gaussian maskesi denklem 4.2'de verilmektedir.

$$Fg = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \times \frac{1}{159} \quad \textbf{(4.2)}$$

Gaussian filtre uygulanarak görüntü yumuşatma işlemi yapılmıştır. Canny yöntemi, kenar çıkarım yöntemlerinden en iyi sonuç veren algoritmadır. Canny kenar çıkarımı yönteminin ilk adımlarından birisi görüntüyü yumuşatmaktır. Görüntünün yumuşatılması

için Gauss filtresi kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde Gauss maskesinin farklı boyutlarda olabileceği görülmektedir. Canny kenar çıkarım yönteminde Gauss maskesinin boyutu 5×5 boyutundadır. Bu nedenle bu çalışmada da 5×5 boyutunda Gauss maskesi kullanılmıştır. Bu işlemin ardından görüntünün X ve Y yönünde kenar çıkarımı yapılmaktadır. Bu aşamada Sobel matrisleri kullanılarak X ve Y yönünde kenar çıkarımı yapılmaktadır. Bu adımda kullanılan *Sx* ve *Sy* Sobel matrisleri denklem 4.3'te verilmektedir.

$$Sx = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Sy = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

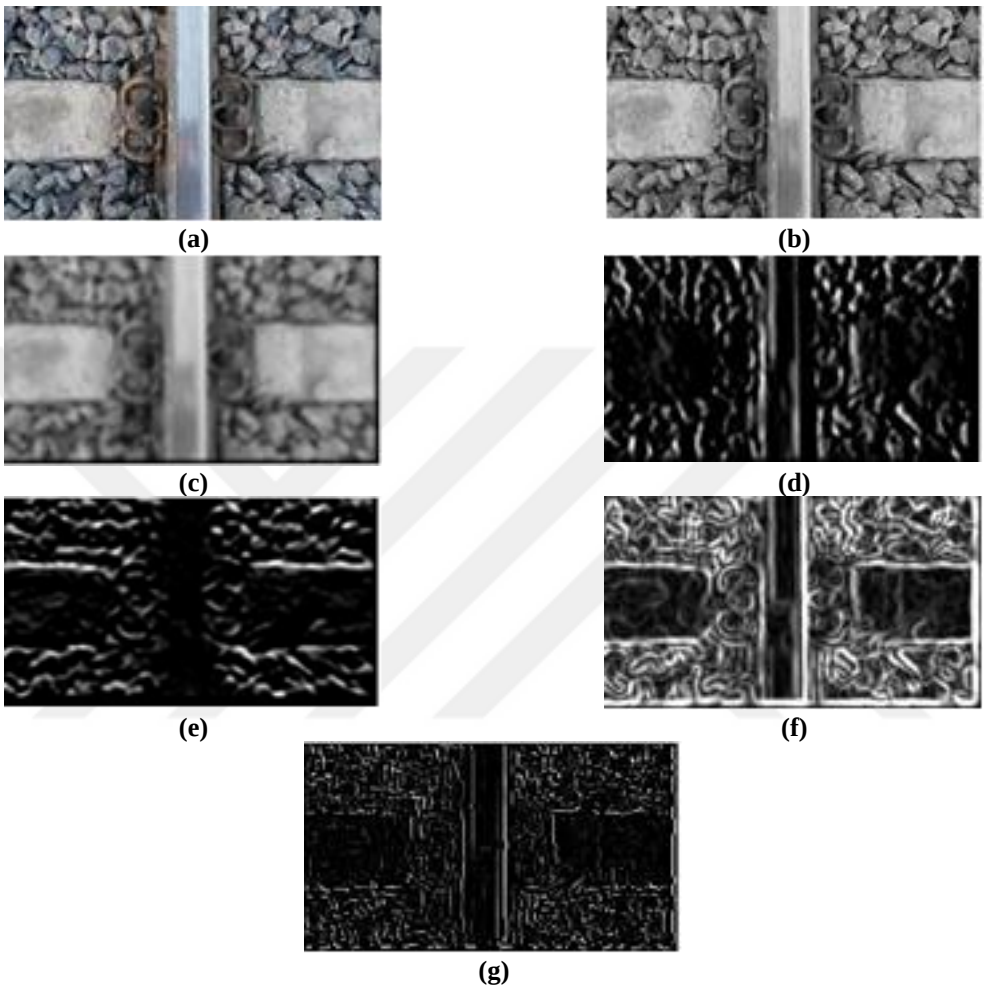
Denklem 4.3'te verilen *Sx* ve *Sy* matrislerinin kullanım amacı yumuşatılmış görüntü üzerinde ani renk değişimi olan bölgelerin çıkartılmasıdır. *Sx* maskesi X eksenindeki kenar çıkarımını, *Sy* maskesi ise Y ekseninde kenar çıkarımı yapmıştır. Bu iki maskeleme sonucunda oluşan iki matrisin tek bir matris haline dönüştürülmesi için gradient büyüklüğü hesaplanır. Gradient büyüklüğü hesaplanarak belirli açı sınırlamalarına göre görüntü oluşturulmaktadır. Her piksel için hesaplanan gradient büyüklüğü denklem 4.4'te verilmektedir.

$$G(i,j) = \sqrt{Gx(i,j)^2 + Gy(i,j)^2} \tag{4.4}$$

Denklem 4.4'te her piksel için gradient büyüklüğü hesaplandıktan sonra kenar çıkarım matrisi elde edilmiştir. Bu işlemin sonucunda birçok gereksiz kenar pikseli oluşmaktadır. İstenilmeyen yöndeki kenarların yok edilmesi için her pikselin açı değeri denklem 4.5'te ki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha(i,j) = \tan^{-1}\frac{Gy(i,j)}{Gx(i,j)} \tag{4.5}$$

Denklem 4.5'te hesaplanan açı değerlerinden özel açı olmayanlar kullanılmayarak istenmeyen ayrıntılar yok edilmektedir. Bu çalışmada örnek bir görüntü için denklem 4.1 ile 4.5 arasındaki denkleler sırasıyla uygulanarak sonuçlar Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Canny kenar çıkarım adımların örnek görüntüde uygulanması **(a)** Orijinal görüntü **(b)** Gri görüntü **(c)** Gaussian görüntü **(d)** X yönünde kenar çıkarımı **(e)** Y yönünde kenar çıkarımı **(f)** XY yönünde kenar çıkarımı **(g)** Özel açılara göre kenar çıkarım sonucu

Kenar çıkarımı işleminden sonra görüntüde bulunan doğruları elde etmek için Hough dönüşümü kullanılmaktadır. Hough dönüşümü genellikle kenar çıkarımı yöntemleriyle birlikte kullanılarak görüntü üzerinde geometrik modellerin tespit edilmesinde kullanılmaktadır [167]. Hough dönüşümü, kenar bilgisi elde edilmiş imgeler üzerine uygulanmaktadır [168]. Yöntem imge uzayındaki bilgiyi parametre uzayına taşıyarak şekil bulma problemini bir yoğunluk bulma problemine dönüştürür. Hough dönüşümü, şekli tespit edebilmek için görüntü üzerindeki noktaların yan yana veya bağlantılı olmalarını

gerektirmemektedir. Önerilen yöntemde kullanılan Hough dönüşümünün sözde kodu Şekil 4.9'da verilmektedir.

```
Image ← İkilik görüntü kenar çıkarımı görüntüsü
Sutun ← Image'nin piksel genişliği
Satir ← Image'nin piksel yüksekliği
  for i=1:Sutun
    for j=1:Satir
      if (Image(i,j) bir kenar çıkarım pikseli ise)
        for θ=0:θ_max
          r = Sutun*cos(θ) + Satir*sin(θ)
          r = round(r)
          H(θ,r) =H(θ,r)+1
        end
      end
    end
  end
```

Şekil 4.9. Hough dönüşümün sözde kodu [167]

Şekil 4.9'da verilen Hough dönüşümün sözde kodunda öncelikle kenar çıkarım sonucunda elde edilmiş ikilik tabanlı bir görüntü kullanılmaktadır. Düz doğrular denklem 4.6'da ki gibi ifade edilmektedir.

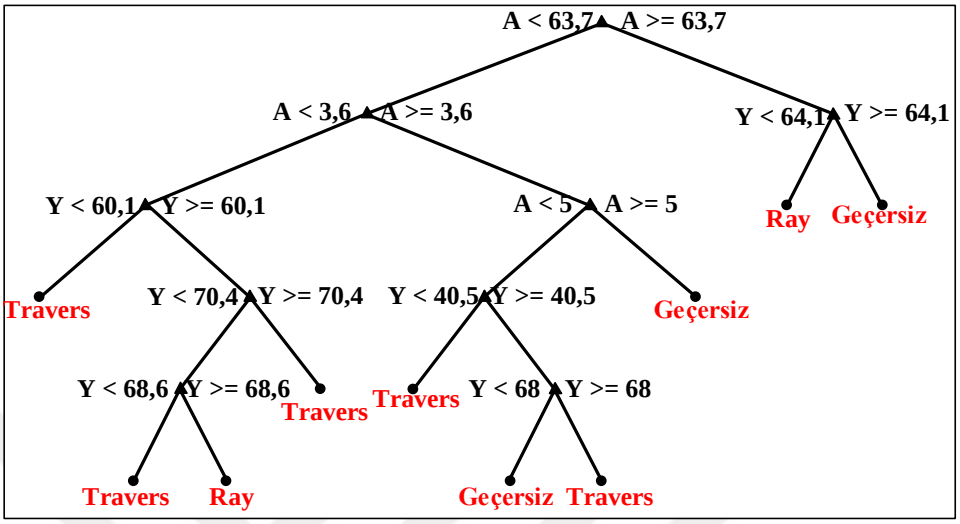
$$y = mx + n \tag{4.6}$$

Bu denklemde herhangi bir düz doğruyu belirtmek için iki parametreye sahiptir. Bu parametreler eğim (m), ve kesişim noktası (n)'dir. Düz doğrular parametre uzayında bir nokta (m,n) olarak gösterilir. Düz doğrular koordinat sistemine dönüştürülerek denklem 4.7'de ki gibi gösterilmektedir.

$$r = x\cos(\theta) + y\sin(\theta) \tag{4.7}$$

Bu denklemde orijine en yakın vektör (r,θ) çifti ile gösterilmektedir. Önerilen demiryolu bileşen tespiti yönteminde, Hough dönüşümü ile görüntüdeki doğrular tespit edilmiştir. Tespit edilen doğrulardan özellik çıkarımı yapılarak her doğru için açı ve yatay eksendeki konum değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan açı ve konum değerleri oluşturulan karar ağacına verilmektedir. Karar ağaçları günümüzde sınıflandırma işlemlerinde yaygın

olarak kullanılmaktadır [25, 116, 172]. Önerilen ray bileşen tespiti yöntemi için geliştirilen karar ağacı yapısı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Karar ağacı yapısı (**A:** Açı, **Y:** Yatay)

Bir karar ağacı, büyük sayıda veriye sahip bir kümede küçük karar verme kuralları kullanarak verilerin dağılımlarını basite indirgemesini ve bu dağılımın basit adımlarla gösterilmesini sağlar. Karar ağacı modeli sayesinde karara ulaşma sürecinde içerisinde hangi faktörlerin göz önüne alınması gerektiği ve bu faktörlerin ne gibi değerler ürettiği süreç boyunca izlenebilmektedir. Büyük veri tabanlarında tutulan veriler, karar ağaçları yardımıyla kolay analiz edilebilir, yorumlanabilir ve sonuç çıkarılabilir bir hale getirilmektedir. Karar ağaçları genellikle; bir sınıfa ait olabilecek elemanın belirlenmesi, yeni olayların kategorilere ayrılması, gelecekte olması muhtemel bir olayın tahmini, sebep-sonuç arasındaki ilişkinin tanımlanması gibi analiz çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır.

Karar ağaçlarındaki önemli konulardan biri, karar ağacının dallanma yapısının hangi kriterlere göre yapılacağıdır. Bu dallanma kriterlerinin her biri için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu çalışmada C4.5 algoritması kullanılarak dallanma yapısı oluşturulmuştur. C4.5 algoritması entropi tabanlıdır. Entropi denklemi denklem 4.8'de verilmiştir.

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2(p_i) \qquad \textbf{(4.8)}$$

Denklem 4.8'de n birbirinden bağımsız üretilen veri sayısıdır. $a_1, a_2, a_3, ..., a_n$ Her verinin üretim olasılığı, p_i 'dir. C4.5 algoritması, ID3 algoritmasının genişletilmiş halidir. ID3 algoritmasının tüm özelliklerini içerir. ID3 algoritması, karar ağaçlarında sınıflandırma işlemini yapmak amaçlı geliştirilmiş matematiksel bir algoritmadır. Dallanmaları belirleyen bir nitelik seçim ölçüsüdür. T, hedef niteliği ve X, hedef niteliği olmayan bir nitelik ise; T, X'e bağlı olarak $T_1, T_2, T_3, ..., T_n$ alt kümelerine ayrılırsa, T'nin bir elemanının sınıfını belirlemek için gerekli bilgi, T_i 'nin herhangi bir elemanının sınıfının belirlenmesinde gerekli olan bilginin ağırlıklı ortalamasıdır. T'nin sınıfını belirlemek için bilgi miktarı denklem 4.9'da verilmiştir.

$$H(X,T) = \sum_{i=1}^{n} \frac{|T_i|}{T} H(T_i) \quad \textbf{(4.9)}$$

Bilgi kazancı ise, sahip olunan orijinal bilgi ile parçalanma sonrasında elde edilen bilginin farkı olarak belirtilir. Kazanç denklemi denklem 4.10'da verilmiştir.

$$Kazanc(X,T) = H(T) - H(X,T) \quad \textbf{(4.10)}$$

Bu işlemin amacı, en yüksek bilgi kazancına sahip parçayı elde etmektir. Bilgi kazancı ölçütü, bazı durumlarda işlem yapmamız için işe yaramayabilir. Bu gibi durumlar için bölünme bilgisi kavramı ortaya çıkmıştır. Bilgi kazancının bir çeşit normalizasyon işlemidir. Bu işlem denklem 4.11'de verilmiştir.

$$H(P_X, T) = -\sum_{i=1}^{k} \frac{|T_i|}{T} * \log_2\left(\frac{|T_i|}{|T|}\right) \quad \textbf{(4.11)}$$

Bu değer, *T* veri kümesinin, *X* nitelik işleminin *k* parçaya bölünmesiyle oluşan bilgiyi sunmaktadır. Bilgi kazancından farklıdır. Aynı bölüme bağlı elde edilen sınıfa uygun bilgiyi ölçer. Kazanç oranı denklem 4.12'de verilmiştir.

$$Kazanc_orani(X,T) = \frac{Bi\lg i_kazanci(X,T)}{Bolunme_bi\lg isi(X,T)} \quad \textbf{(4.12)}$$

Maksimum kazanç oranına sahip nitelik bölme niteliği olarak kullanılır. ID3 algoritmasında kullanılan veriler nominal değerlerdi ve sayısal değerlerle işlem yapılamıyordu. C4.5 algoritmasında ise bu duruma çözüm sunulmuştur.

Bu işlem için öncelikle verilen sayısal eğitim verileri için eşik değeri bulunur. Bunun için tüm veriler sıralanır ve $\{v_i, v_2, ..., v_n\}$ haline getirilir. Bu sıralama iki eşit parçaya ayrılır. $\{v_1, ..., v_i\}$ ve $\{v_{i+1}, ..., v_n\}$ şeklini alır. Bu işlem sonucunda eşik değeri denklem 4.13'te verilmiştir.

$$t_i = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad \textbf{(4.13)}$$

Eşik değer bulunduktan sonra, verilen sayısal eğitim verileri nominal hale getirilir:

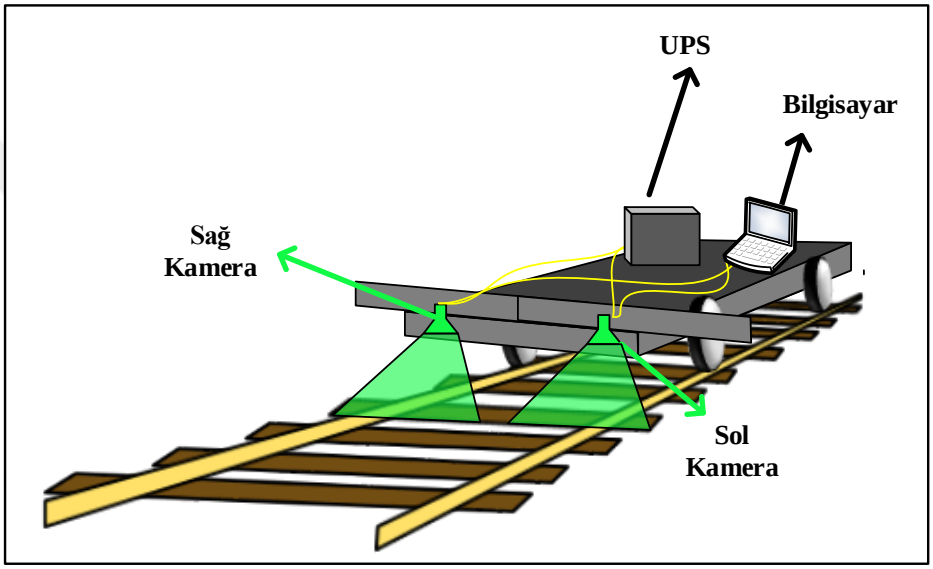
- $v_i < t_i$ şartına uyan veriler, "küçük"
- $v_i \geq t_i$ şartına uyan veriler ise, "büyük eşit" şeklinde yeni değerlere sahip olur.

Bu çalışma için elde edilen doğruların açı değerinin pozitif ya da negatif olması sonucu değiştirmediği için açının mutlak değeri alınarak kullanılmıştır. Ayrıca doğrunun yatay eksendeki konumunu hesaplamak için doğrunun yatay eksendeki orta noktası kullanılır. Farklı görüntü boyutlarında da kullanılabilmesi için doğrunun konumu 0 ile 100 arasında normalize edilmektedir.

Görüntüde ki doğrular için elde edilen bu özellikler kullanılarak Şekil 4.5'te ki gibi karar ağacı oluşturulmuştur. Daha sonra görüntülerden elde edilen tüm doğrular için sınıflandırma yapılmaktadır. Sınıflandırma sonucunda bir doğru ray veya traversi temsil edebilir. Ray ve traversi temsil etmeyen doğrular ise geçersiz doğrular olarak belirlenmektedir. Daha sonra tespit edilen ray doğruları kullanılarak ray yüzeyi elde edilmektedir. Elde edilen ray yüzeyine ikili dönüşüm yapılarak ray yüzeyindeki arızalar tespit edilmektedir.

4.2.2. Deneysel Sonuçlar

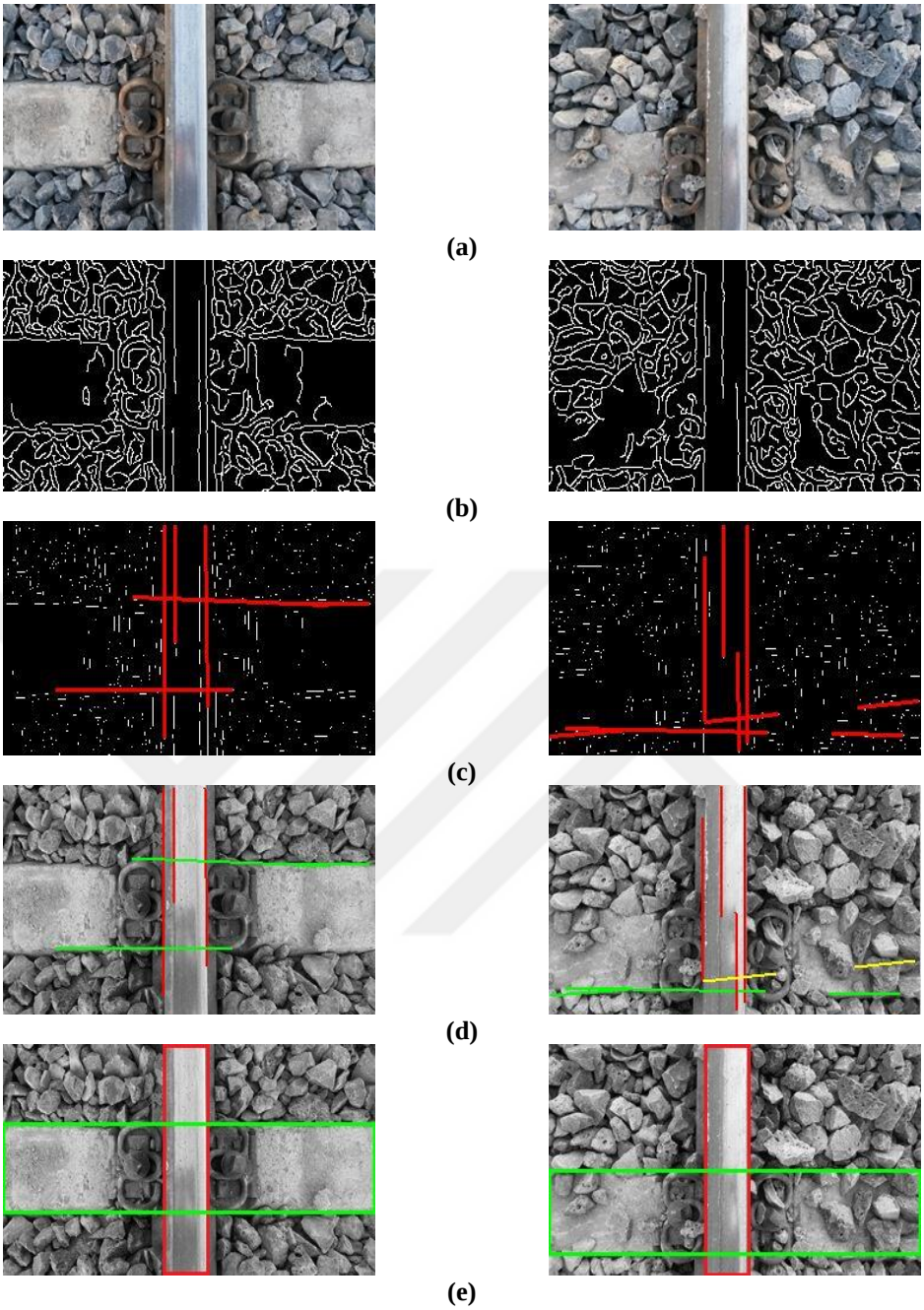
Bu çalışmada deneysel verilerin elde edilmesi için bir deney aracı kullanılmıştır. Deney aracının önüne sabitlenen iki kamera ile ray bileşenlerine ait videolar alınmıştır. Bu videolar üzerinde önerilen yöntem uygulanarak görüntüdeki ray bileşenleri tespit edilmiş ve ray yüzeyinde oluşan arızalar izlenmiştir. Bu çalışmada deneysel düzeneği anlatan model yapı Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Önerilen yöntemde geliştirilen deneysel düzenek

Ray bileşen tespiti için önerilen yöntemde iki kamera kullanılmıştır. Bu kameralardan biri sağ raya diğeri ise sol raya ait görüntüler elde etmektedir. Sağ ve sol kameralardan alınan görüntüler kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Beton traverse sahip demiryolu hattından alınan görüntüler ve bu görüntülerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de verilmiştir.

Şekil 4.12'de ki sonuçlar incelendiğinde demiryolu bileşenlerinin başarılı bir şekilde tespit edildiği görülmektedir. Önerilen yöntemin başarı oranını, demiryolu hattında bulunan balastların yoğunluğu etkilemektedir. Balastların yoğun olması, görüntüdeki traverslerin tespit edilmesine engel olmaktadır.



Şekil 4.12. Beton traverse ait bir demiryolundan alınan örnek görüntüler **(a)** Normal görüntü **(b)** Kenar çıkarım sonucunda elde edilen görüntü **(c)** Maske sonucunda Hough dönüşümü ile doğruların tespit edilmesi **(d)** Doğruların sınıflandırılması **(e)** Demiryolu bileşenlerinin tespit edilmesi

Şekil 4.12.a'da verilen ilk görüntüde balastların travers yüzeyini kapatmadığı, ikinci görüntüde ise balastların travers yüzeyinin görülmesine engel olduğu görülmektedir. Demiryolu hattında bazı bölgelerde balastların yoğunluğu nedeniyle traverslerin hiç görülmediği saptanmıştır. Bu durum, önerilen yöntemin başarı oranını etkilemektedir.

Tablo 4.2'de demiryolu bileşen tespiti ve ray yüzeyi izleme için farklı balast yoğunluğundaki doğruluk oranları verilmiştir.

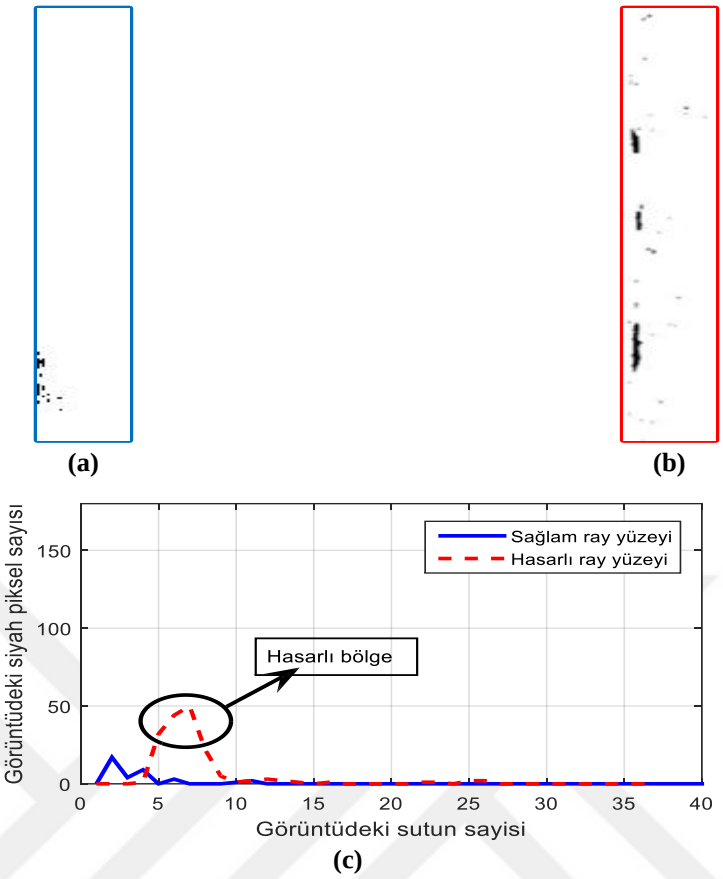
Tablo 4.2. Demiryolu bileşen tespiti ve ray yüzeyi izleme için farklı durumlardaki doğruluk oranları

Yöntem	Travers Yüzeyindeki Balast Yoğunluğu	Doğruluk Oranı (%)
Demiryolu bileşen tespiti	Yok	87.6
	Az	82.9
	Çok	68.3

Tablo 4.2'de görüldüğü gibi travers yüzeyindeki balast yoğunluğu önerilen yöntemin doğruluk oranını etkilemektedir. Görüntülerde tespit edilen ray yüzeyi çıkarılıp binary dönüşüm ile birlikte kullanılarak ray yüzeyi incelenmektedir. Ray yüzeyi görüntülerinde binary dönüşümü için bir eşik değer belirlenmiştir. Bu eşik değer kullanılarak gri görüntü siyah beyaz görüntüye dönüştürülmektedir. Elde edilen sonuçlarda siyah pikseller arızalı bölgeyi göstermektedir. Şekilde 4.13'te iki ray yüzeyi görüntüsü için sonuçlar verilmiştir.

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere örnek ray yüzeyi görüntüleri incelenerek sağlam veya hasarlı olduğu belirlenmiştir. Karar ağacı kullanılarak tespit edilen ray yüzeyi görüntüsü bir eşik değer ile ikili görüntüye dönüştürülmüştür. Şekil 4.13.a ve Şekil 14.3.b'deki görüntülerde her bir sütunun satırlarındaki siyah piksel sayısı hesaplanarak Şekil 4.13.c'de ki grafik elde edilmiştir. Her bir sütunda ki toplam siyah piksel sayısı, ray yüzeyindeki hasarın derecesini ifade etmektedir. Önerilen yöntemde, eşik değeri 40 olarak belirlenmiştir. Eşik değerini aştığı zaman hasarlı ray yüzeyi olarak sonuç vermektedir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde ray yüzeylerinde oluşan arızaların bir kısmının temel görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilebildiği görülmüştür [114, 69]. Önerilen yöntemin çalışma performansı Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3'te bileşen tespiti, ray yüzey ve demiryolu hattı yön tespiti aşamaları için çalışma zamanı ve görüntü boyutları verilmiştir. Tablo 4.3'te verilen literatürlerin çalışma zamanları ve görüntü boyutları dikkate alındığında önerilen yöntemin başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. Örnek görüntüler üzerinde ray yüzeyinin incelenmesi **(a)** Sağlam ray yüzeyi görüntüsü **(b)** Hasarlı ray yüzeyi görüntüsü **(c)** Görüntülerdeki her bir sütunundaki siyah piksel sayısı

Tablo 4.3. Önerilen yöntemin performansı ve literatür ile karşılaştırılması

Yöntem	Çalışma zamanı (ms)	Standart sapma (ms)	Görüntü boyutu (piksel)
Önerilen ray bileşen tespit yöntemi	166.4	4.11	640×360
Önerilen ray yüzey izleme yöntemi	50.4	2.01	80×360
Ray yüzey arıza tespiti [112]	1064.6	2.3	640×480
Ray bileşen pozisyon tespiti [170]	274.0	4.1	512×832
Ray bileşen tanıma [170]	91.0	1.8	512×832
Ray bileşen tespiti [171]	120.0	2.5	320×240
Ray yüzey tespiti [66]	100.0	1.7	220×220

Bu çalışmada deney aracı kullanılarak görüntülerin alındığı ve test yapıldığı vurgulanmıştır. Kameraların demiryolu hattında gördükleri alanın büyüklüğü ve önerilen yöntemin hızı dikkate alınarak deney aracının hızı hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda deney aracı 36 km/h hızla hareket ederken sorunsuz bir şekilde durum izleme yaptığı görülmüştür. Ayrıca önerilen algoritmanın çalıştığı bilgisayardan daha iyi bir bilgisayar

kullanılırsa 36 km/h'dan daha hızlı harekette başarıyla çalışılabilir. Önerilen yöntem normal özelliklere sahip kullanıcı bilgisayarı üzerinde çalıştırılmıştır. Bu çalışmada bilgisayar yerine yüksek özellikli endüstriyel bilgisayar kullanılırsa önerilen yöntemin çalışma hızı 100 km/h'a kadar artabilir. Böylece demiryolunda durum izleme ve arıza tespiti yapılırken ulaşım aksamaz. Khan et al önerdiği yöntemin hızının 10mph olduğunu söylemiştir [164]. Li ve diğ. çalışmasının 10 mph olduğunu vermiştir [33]. Ying ve diğ. önerdiği metot tren üzerinde uygulandığında 16 km/h hızında çalışabildiğini belirtmiştir [25]. Önerilen yöntem literatürden hızlıdır. Deney aracına sabitlenen kamera ve bilgisayar demiryolu araçlarının üzerine sabitlenerek kullanılabilir. Demiryolu aracı ulaşım sırasında sürekli çalışarak ray hattı ve bileşenleri izlenebilir. Böylece oluşabilecek arızalar erken tespit edilerek olası kazalar engellenebilir. Sonuç olarak önerilen yöntemin demiryolu hattı üzerinde sorunsuz çalıştığı ve başarılı bir şekilde durum izleme yaptığı görülmektedir.

4.3. Ray Bileşenleri için PSO Tabanlı Arıza Tespit Yaklaşımı

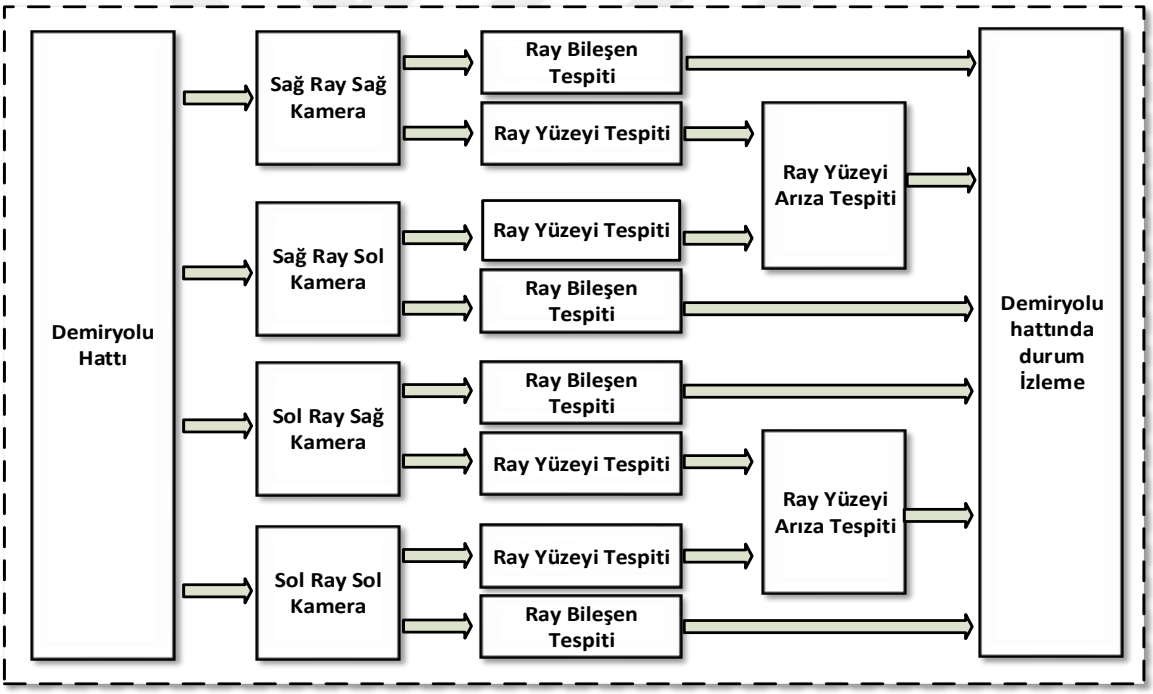
Demiryolu ulaşımı uzun yıllardır kullanılan önemli bir ulaşım türüdür. Son yıllarda demiryolu araçlarının hızlanması, ulaşım kalitesinin ve güvenliğinin artmasıyla birlikte popüler bir ulaşım türü haline gelmiştir. Ulaşım güvenliğinin sürekli olarak sağlanması için demiryolu hattındaki bileşenlerin belirli aralıklarla izlenmesi gerekmektedir [173]. Demiryolu bileşenleri genel olarak iki farklı şekilde izlenmektedir. Temaslı izleme yöntemi için geliştirilen yapılar genellikle yavaş olup demiryolu bileşenleri ile temas halinde olması gerekmektedir [2]. Bu yöntemler günümüzde tercih edilmemekte ve bunun yerine temassız durum izleme yöntemleri tercih edilmektedir [38, 3, 174]. Bu yöntemlerde kullanılan kameralar ile demiryolu hattı temassız bir şekilde izlenmekte, geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile demiryolu hattında oluşan arızalar tespit edilmektedir. Bu tür yöntemler daha hızlı çalışarak iş yükünü azaltmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen algoritmalar ile demiryolu hattı izlenmektedir. Kullanılan dört kamera ile demiryolu hattında ray yüzeyi ve bileşenlerin tespiti yapılarak ray yüzeyinde oluşan arızaların büyüklükleri hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar birleştirilerek durum izleme ve demiryolu hattına ait çıkarımlar yapılmaktadır. Geliştirilen yöntemde, temel görüntü işleme yöntemleri, görüntü eşleştirme ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmaları kullanılmıştır. Demiryolu bileşeni ve ray yüzeyini temsil eden şablon

görüntüler kullanılarak kameradan alınan görüntüler ile eşleştirilmiştir. Ray yüzeyi eşleştirilirken şablon görüntü tüm görüntü üzerinde taranır ve korelasyon katsayısı yüksek olan bölge ray yüzeyi olarak tespit edilir. Demiryolu bileşenleri tespit edilirken parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır. Literatürde ki çalışmalar incelenerek önerilen yöntem ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Önerilen Yöntem

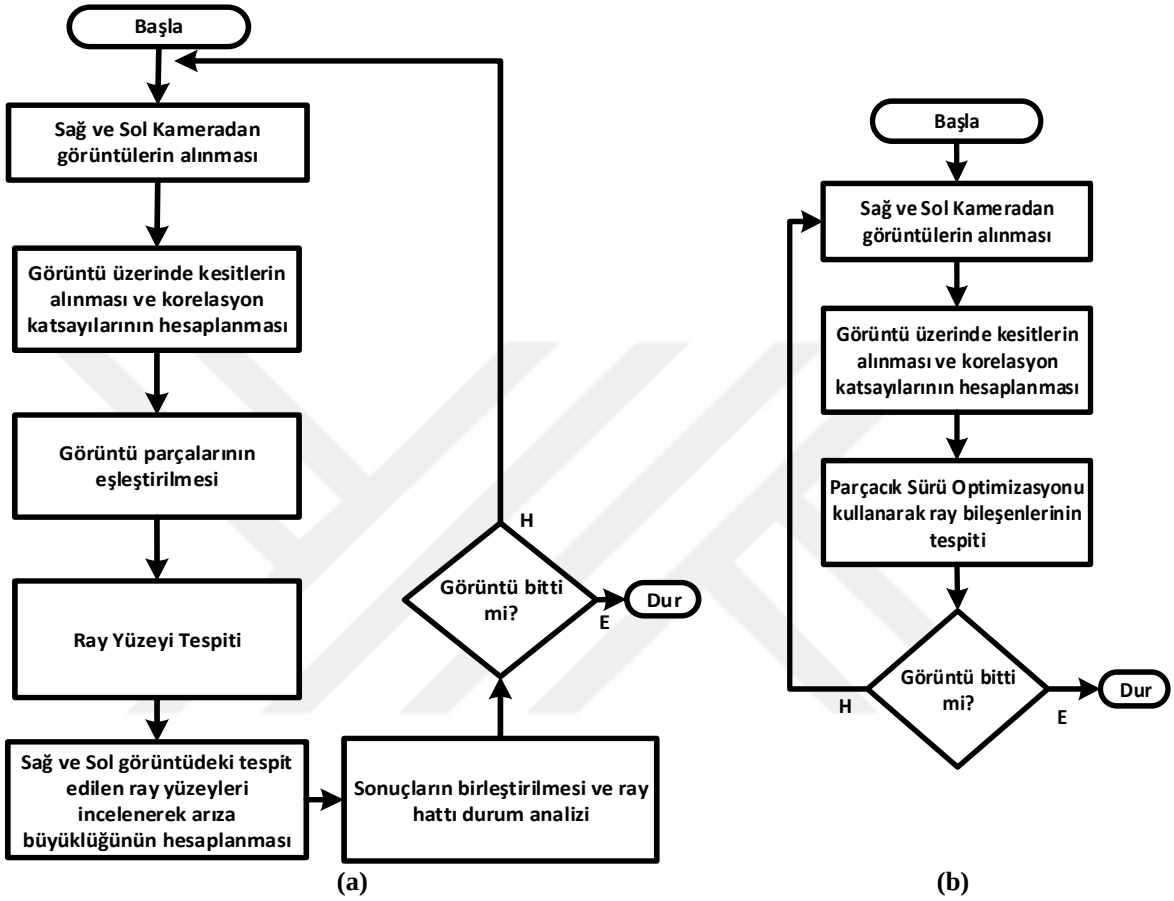
Bu çalışmada görüntü işleme yöntemleri kullanılarak demiryolu bileşenleri tespit edilmektedir. Tespit edilen ray yüzeyi ve bağlantı elemanlarında oluşan arızalar teşhis edilerek durum izleme yapılmıştır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Önerilen yöntemin blok şeması

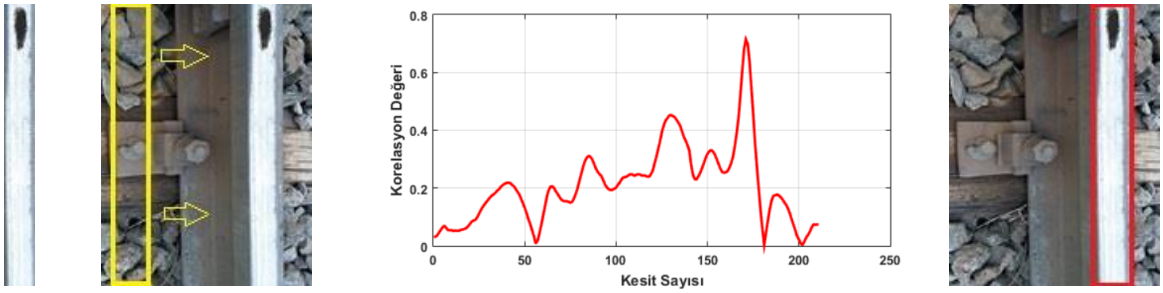
Şekil 4.14'te verilen blok şemasında demiryolu hattından dört kamera ile görüntüler alınmıştır. Her kameradan alınan görüntü için ray yüzeyi tespiti yapılmaktadır. Sağ ve sol raylara ait sağ ve sol kameralardan tespit edilen ray yüzeyleri dikkate alınarak görüntüler birleştirilmekte ve birleştirilen görüntü üzerinde ray yüzeyi arıza tespiti yapılmaktadır. Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak ray bileşen tespiti de yapılmaktadır. Elde edilen

sonuçlar birleştirilerek demiryolu hattında durum izleme yapılmaktadır. Ray yüzey arızalarının tespiti ve demiryolu bileşen tespiti için önerilen yöntemin akış şeması Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Önerilen yöntemin akış şemaları **(a)** Ray yüzeyi tespiti yöntemi **(b)** Ray bileşen tespiti yöntemi

Şekil 4.15.a'da sağ ve sol kameralardan alınan görüntüler üzerinde kesitler alınarak her bir kesit ile şablon ray yüzeyi görüntüsünün korelasyon katsayısı hesaplanmaktadır. Korelasyon sayısı en yüksek olan kesit ray yüzeyini temsil etmektedir. Böylece korelasyon katsayısı kullanılarak görüntü eşleştirme yapılmaktadır. Korelasyon katsayısı görüntü eşleştirmede alan tabanlı yöntemler olarak bilinmektedir [175]. Görüntü eşleştirme yapılırken gri değerler arasında maksimum korelasyon aranır. Bunun için bir arama penceresi diğer görüntü üzerinde taranır. Önerilen yöntemde ray yüzeyi tespiti için şablon görüntünün kameradan alınan görüntü üzerinde taranması Şekil 4.16'da verilmiştir.



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Şekil 4.16. Demiryolu görüntüsüne korelasyon katsayısı kullanılarak ray yüzeyinin tespit edilmesi **(a)** Şablon görüntü **(b)** Demiryolu görüntüsü **(c)** Alınan her kesit için hesaplanan korelasyon değerini gösteren grafik **(d)** Görüntü üzerinde ray yüzeyinin tespit edilmesi

Önerilen yöntemde kullanılan 30×320 boyutundaki ray yüzeyi şablon görüntüsü Şekil 4.16.a'da verilmiştir. Şablon görüntü, Şekil 4.16.b'de ki 240×320 boyutundaki demiryolu görüntüsünden alınan 30×320 boyutundaki kesitler ile eşleştirilmektedir. Bu işlem görüntü üzerindeki son piksele kadar tekrarlanır. Şekil 4.16.c'de tüm görüntü üzerindeki kesitlerin korelasyon değerini veren grafik görülmektedir. Eşleştirme işleminin ardından korelasyon değeri en yüksek olan kesit ray yüzeyi olarak tespit edilmektedir. Tespit edilen ray yüzeyi görüntüsü Şekil 4.16.d'de verilmiştir.

Korelasyon işlemi yapılırken M ve N görüntü matrislerini inceleyerek birbirleri ile olan benzerliklerinin bulunması için yapılan işlem denklem 4.14'te verilmiştir.

$$r = \frac{\sigma_{TS}}{\sigma_{TS}} = \frac{\sum_{i=1}^{R}\sum_{j=1}^{C}(g_T(i,j)-\bar{g}_T)(g_S(i,j)-\bar{g}_S)}{\left(\sum_{i=1}^{R}\sum_{j=1}^{C}\left((g_T(i,j)-\bar{g}_T)\right)^2 \sum_{i=1}^{R}\sum_{j=1}^{C}\left((g_S(i,j)-\bar{g}_S)\right)^2\right)^{1/2}} \quad \textbf{(4.14)}$$

Denklem 4.14'te verilen; r korelasyon katsayısı, σ_I ve σ_S şablon ve arama penceresindeki gri değerlerin standart sapması, σ_{IS} arama pencerelerindeki gri değerlerin kovaryansı, g_I ve g_S şablon ve arama penceresindeki gri değerler, $\bar{g}_I$, $\bar{g}_S$ ortalama gri değerler, R ve C arama penceresindeki satır ve sütun sayılarını ifade etmektedir. Bu çalışmada amaç fonksiyonu korelasyon katsayısının (r) maksimum olmasıdır. İki görüntü arasında korelasyon katsayısı 1'e ne kadar yakın olursa benzerliği de o kadar çok olur.

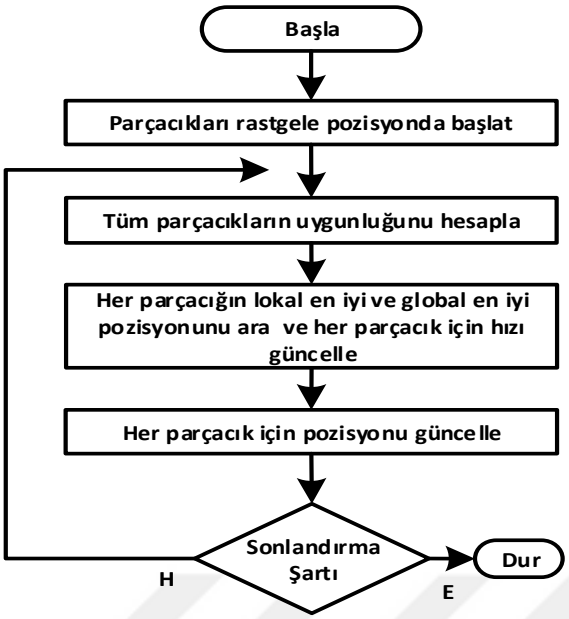
Demiryolu bileşen tespitinde bir şablon görüntü kullanılarak kameradan alınan görüntüdeki kesitlerle karşılaştırılmaktadır. Demiryolu bileşen tespitinde şablon görüntünün tüm görüntü üzerinde taranması yerine parçacık sürü optimizasyonu tercih

edilmiştir. Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak daha hızlı sonuç elde edilmektedir. Bu algoritma kuş, balık ve diğer sürülerinin hareketlerinden esinlenerek doğrusal olmayan problemlere optimal sonuçlar bulmak için kullanılan popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir [176-179]. Parçacık sürü optimizasyonu, optimum ya da optimuma yakın çözüm bulmak için önce her biri aday çözümü sunan bireyler oluşturur. Bir sürü *D*-boyutlu arama uzayında hareket eden *N* tane parçacıktan oluşmaktadır. *i*. parçacığın *t* anındaki pozisyonu herhangi bir arama ya da optimizasyon problemi için parçacığın kalitesini değerlendirmede kullanılır ve aday çözüm ya da çözümleri temsil eder. $x_i(t)= (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{iD})$ ile temsil edilir. Burada $x_{i,n}(t) \in [l_n, u_n]$, $1 \leq n \leq N$ l_n ve u_n sırayla *n*. boyutun alt ve üst sınırlarını gösterir. Her bir parçacık arama boyunca kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona doğru ayarlarken, bir önceki tecrübesinden de yararlanır. Yani pozisyonunu iki faktöre göre ayarlar: $p_{i,j} = (p_{i1}, p_{i2}, \ldots, p_{iD})$ şeklinde gösterilen kişisel en iyi pozisyonu (*peniyi*) ve $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \ldots, p_{gD})$ şeklinde gösterilen tüm sürüdeki en iyi pozisyon (*geniyi*). *t*. iterasyondaki hızı $v_i(t) = (v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{iD})$ ile gösterilir ve $v_{imax} = (v_{imax1}, v_{imax2}, \ldots, v_{imaxD})$ ile sınırlandırılır. Parçacığın bir sonraki hız ve pozisyonu denklem 4.15 ve denklem 4.16'ya göre hesaplanır.

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1 r_{1,j}(t)\left(peniyi_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)\right) + c_2 r_{2,j}(t)\left(geniyi_i(t) - x_{i,j}(t)\right) \quad \textbf{(4.15)}$$

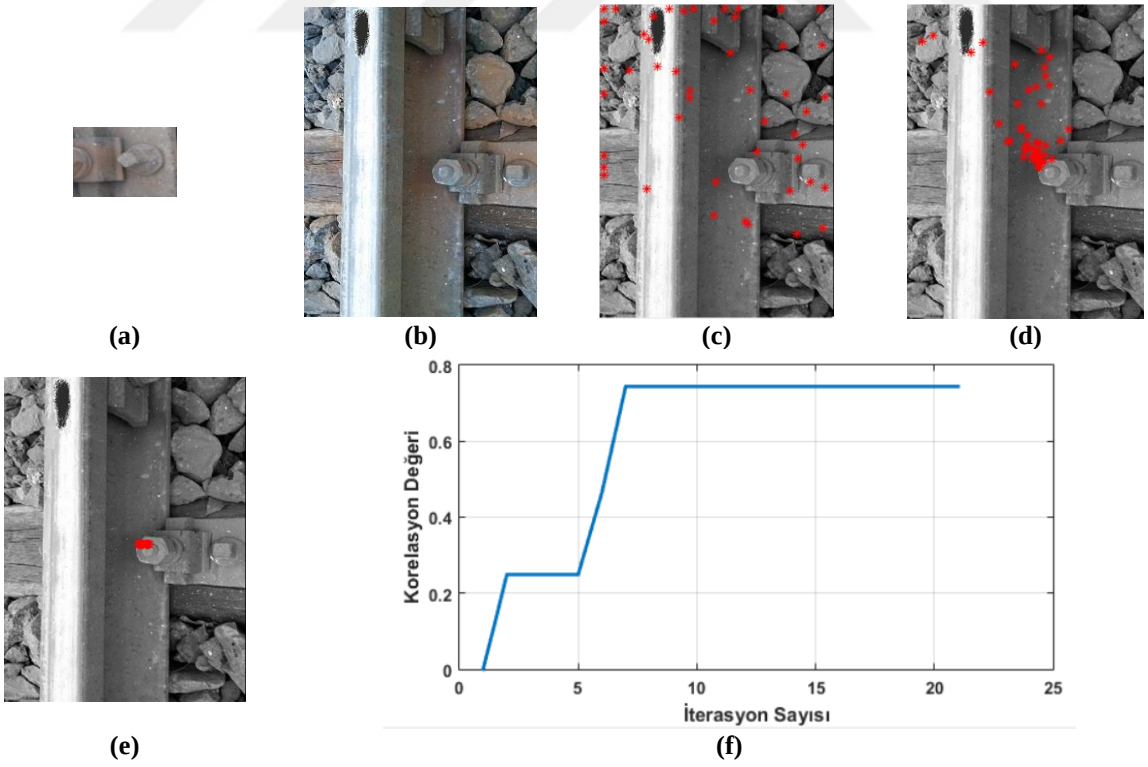
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad \textbf{(4.16)}$$

Algoritma iki bağımsız gelişigüzel diziyi kullanır, $r_1 \sim U(0, 1)$ ve $r_2 \sim U(0, 1)$. Ayrıca c_1 ve c_2 katsayıları $0 < c_1, c_2 \leq 2$ öğrenme faktörleridir. Burada $w \in [0.8, 1.2]$ atalet ağırlığıdır ve orijinal parçacık sürü optimizasyonu hız güncelleme denklemi $w = 1$'dir. Atalet ağırlığı, bir önceki hızın ne kadarının bir önceki zaman adımından tutulacağını gösterir. Parçacık sürü optimizasyonun temel adımlarını gösteren akış diyagramı Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. PSO'nun akış diyagramı

Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak örnek bir görüntü üzerinde bağlantı bileşen tespiti aşamaları Şekil 4.18'de verilmiştir.

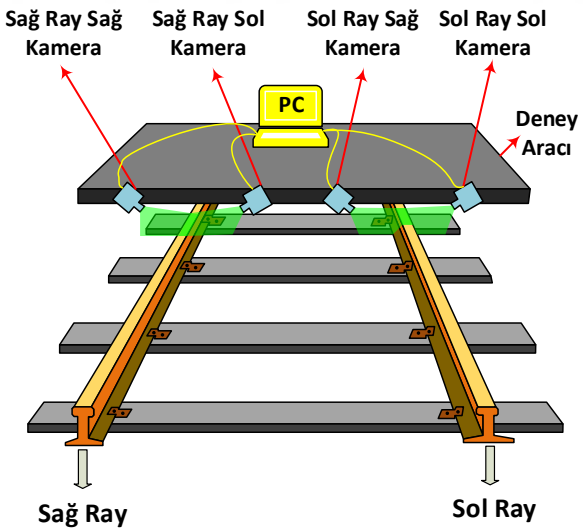


Şekil 4.18. Parçacık sürü optimizasyonu kullanılarak demiryolu bileşen tespiti **a)** Şablon görüntü **b)** Kameradan alınan görüntü **c)** 1. İterasyon **d)** 6. İterasyon **e)** 10. İterasyon **f)** Parçacık sürü optimizasyonu ile 20 iterasyonda korelasyon değerlerini gösteren grafik

Şekil 4.18'de kameradan alınan örnek bir görüntü üzerinde parçacık sürü optimizasyonu ile demiryolu bileşen tespitinin aşamaları verilmiştir. Şekil 4.18.a' da eşleştirme yapmak için kullanılan 90×75 boyutundaki şablon görüntü verilmiştir. Kameradan alınan 240×320 boyutundaki görüntü Şekil 4.18.b'de verilmiştir. Şekil 4.18.c, Şekil 4.18.d ve Şekil 14.18.e'de parçacık sürü optimizasyonunda iterasyon süresince elde edilen sonuçlar verilmiştir. 20 iterasyon sonucunda korelasyon değerini gösteren grafik Şekil 4.18.f'de verilmiştir.

4.3.2. Deneysel Sonuçlar

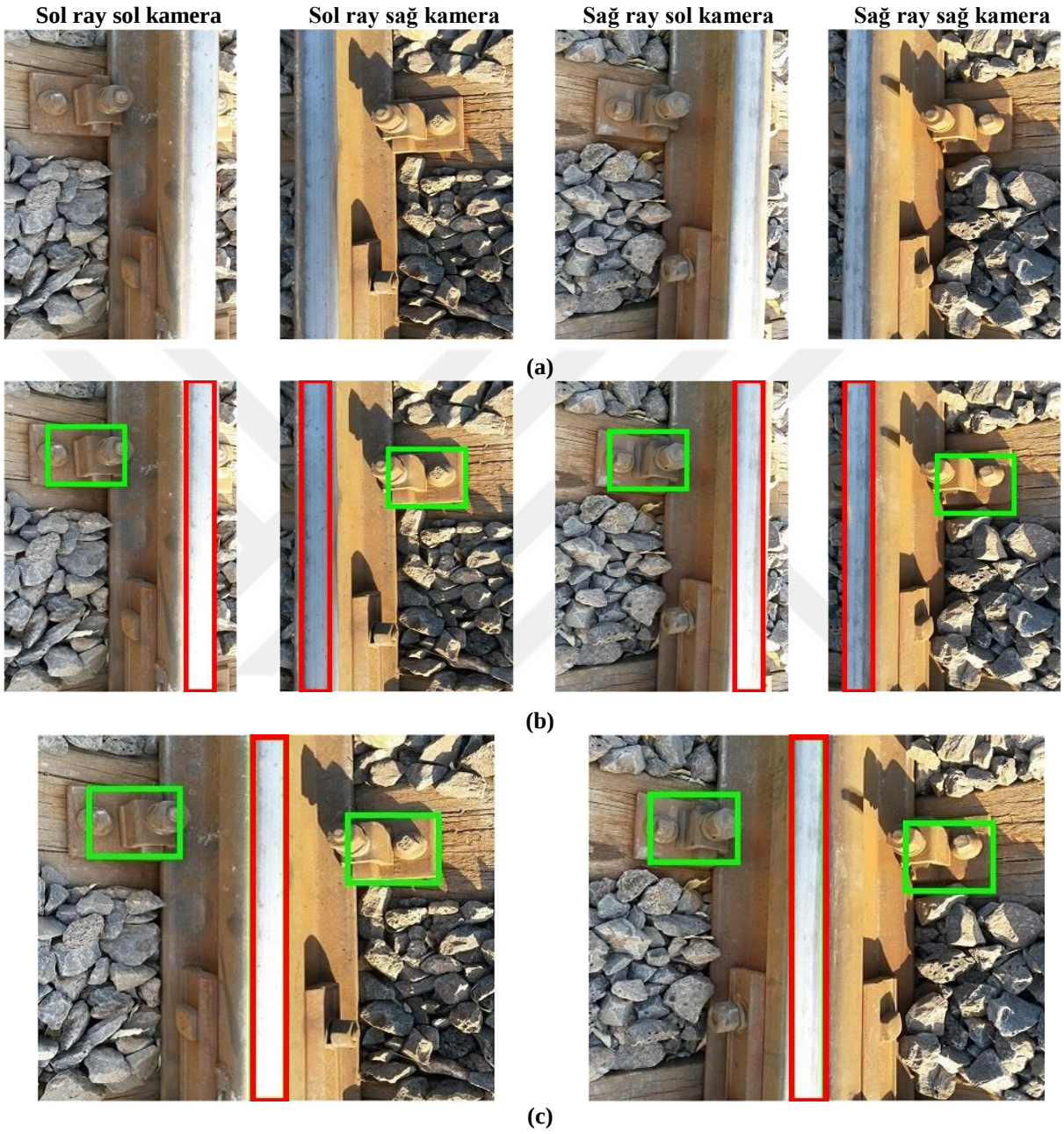
Bu çalışmada, demiryolu hattında görüntü alımı için geliştirilen görüntü alma aracı kullanılarak testler yapılmıştır. Bilgisayar ortamında geliştirilen yöntemin sonuçlarının elde edilmesi için görüntü alma aracının üzerine dört frame kamera yerleştirilerek gerçek zamanlı görüntüler alınmıştır. Önerilen yöntemde demiryolu görüntülerinin alınmasında kullanılan görüntü aracı ve deneysel yapı Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Görüntü alımında kullanılan deneysel yapı

Şekil 4.19'da deneysel yapıda görüldüğü gibi dört kamera 45°'lik açılarla görüntü alma aracının üzerine sabitlenmiştir. Kameralar bir bilgisayara bağlanarak görüntü aktarımı yapılmaktadır. Alınan görüntüler önerilen yöntem ile işlenerek demiryolu hattı için durum izleme sonuçları elde etmektedir. Önerilen yöntem ahşap ve beton traverse sahip olan iki

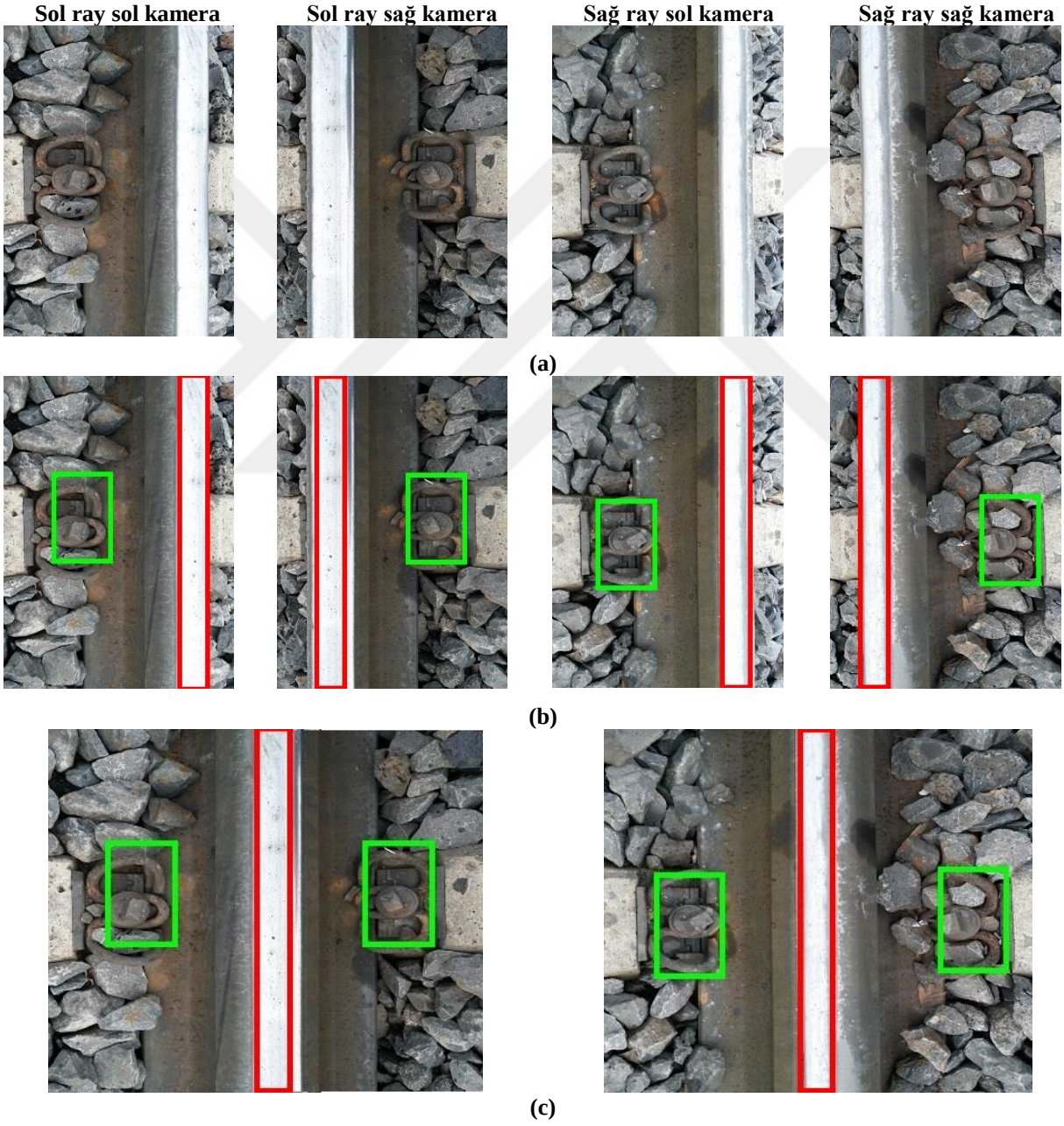
farklı demiryolu hattı üzerinde test edilmiştir. Ahşap traverse sahip olan demiryolu hattından alınan örnek görüntüler ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Ahşap traverse sahip olan demiryolu hattından alınan görüntüler ve bu görüntülere önerilen yöntemin uygulanması **(a)** Dört kameradan alınan görüntüler **(b)** Görüntüler üzerinde ray yüzeyi ve demiryolu bileşenlerinin tespit edilmesi **(c)** Ray yüzeyleri dikkate alınarak görüntülerin birleştirilmesi

Şekil 4.20.a'da dört kameradan alınan demiryolu görüntüleri görülmektedir. Alınan görüntüler sol ray sol kamera, sol ray sağ kamera, sağ ray sol kamera ve sağ ray sağ

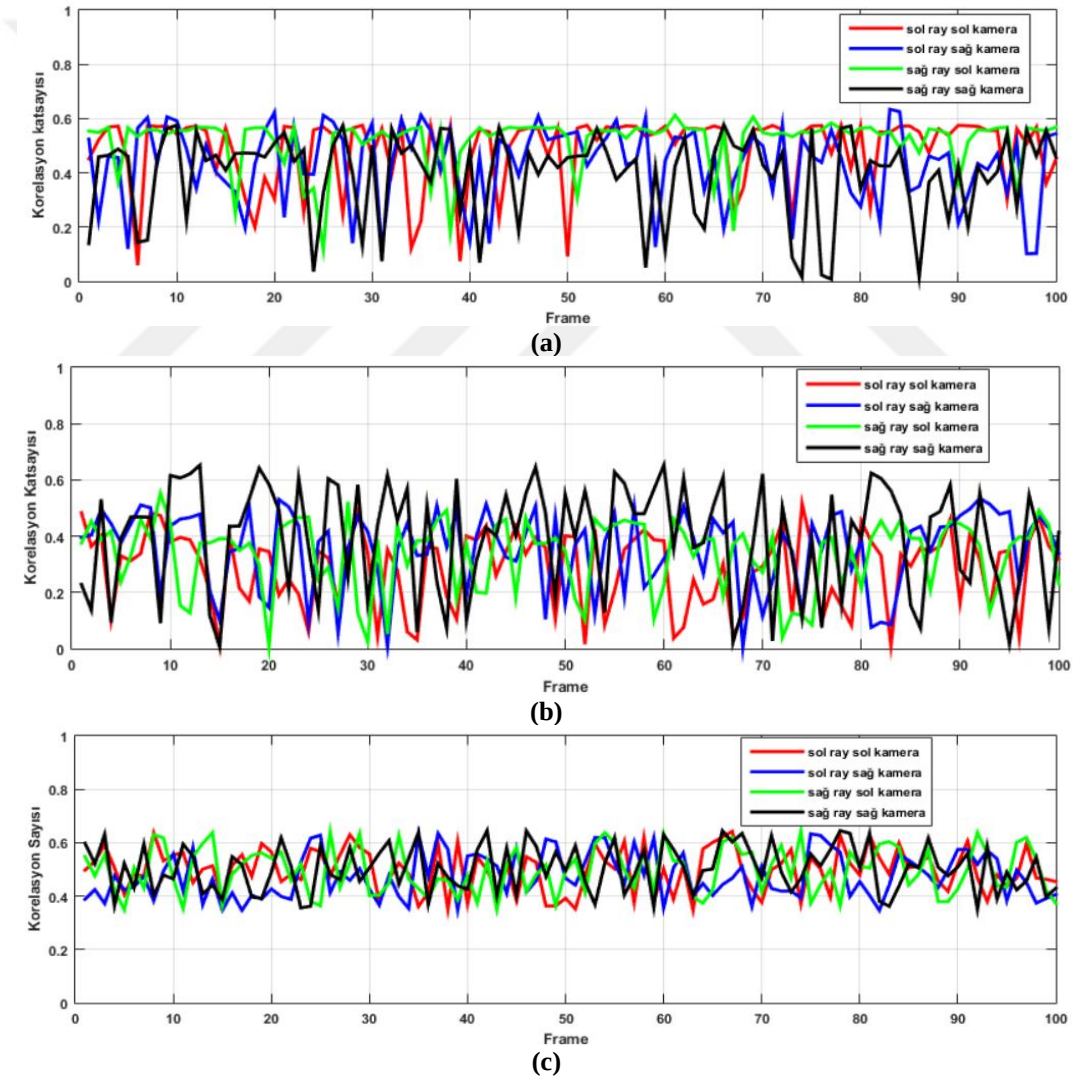
kameradan alınarak elde edilmiştir. Bu görüntüler üzerinde önerilen yöntem uygulanarak Şekil 4.20.b'de ki gibi demiryolu bileşenleri ve ray yüzeyleri tespit edilmiştir. Daha sonra ray yüzeyleri dikkate alınarak görüntüler birleştirilmiştir. Sağ ve sol ray yüzeyleri gri görüntüden ikilik renk dönüşümü yapılarak ray yüzeylerinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. Önerilen yöntem beton traverse sahip olan demiryolu hattında da test edilmiştir. Test işlemi sırasında alınan örnek görüntüler Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Beton traverse sahip olan demiryolu hattından alınan görüntüler ve bu görüntülere önerilen yöntemin uygulanması **(a)** Dört kameradan alınan görüntüler **(b)** Görüntüler üzerinde ray yüzeyi

ve demiryolu bileşenlerinin tespit edilmesi **(c)** Ray yüzeyleri dikkate alınara görüntülerin birleştirilmesi

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilen görüntülerde bağlantı bileşenleri farklıdır. Şekil 4.20'de ahşap traverste "K" tipi bağlantı şekli ve malzemeleri kullanılmıştır. Şekil 4.21'de ise "HM" tipi bağlantı şekli ve malzemeleri kullanılmıştır. Ahşap ve beton traverse sahip olan demiryolu hatları için bağlantı bileşen tespitinde farklı şablonlar kullanılmıştır. Şekil 4.22'de 100 frame boyunca hem ahşap hem de beton traversli demiryolu hattındaki bağlantı bileşeni tespiti için korelasyon değerleri ve ray yüzey tespiti için korelasyon değerlerini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.22. Ahşap, beton traverslere sahip demiryolu için bağlantı bileşeni tespiti ve ray yüzeyi için korelasyon değerleri **(a)** Ahşap traverse ait demiryolu hattı bağlantı bileşen tespiti korelasyon değeri **(b)** Beton traverse ait demiryolu hattı bağlantı bileşen tespiti korelasyon değeri **(c)** Ray yüzeyine ait korelasyon değeri

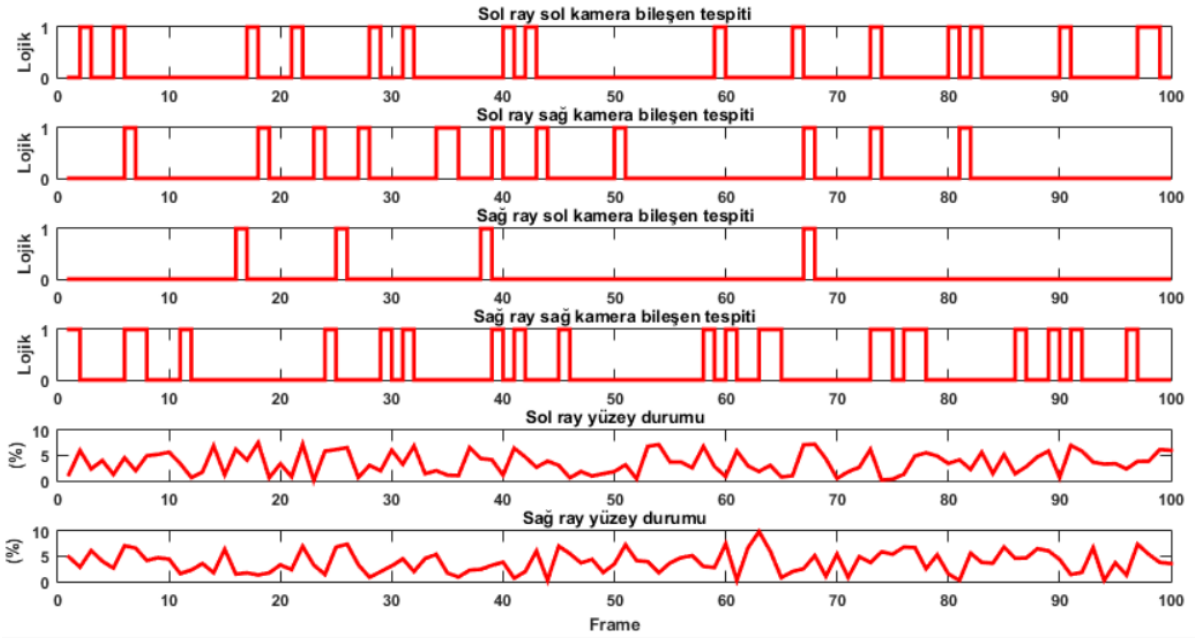
Şekil 4.22.a'da ahşap traverse sahip demiryoluna ait bağlantı bileşeni tespitinde elde edilen korelasyon değerleri verilmiştir. Dört kameradan alınan 100 frame görüntü için korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde beton travers için de Şekil 4.22.b'de ki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca ray yüzeyi tespitinde de elde edilen korelasyon değerleri Şekil 4.22.c'de verilmiştir. Şekil 22'de ki grafikler incelendiğinde korelasyon değerlerinin 0 ile 0.8 arasında değiştiği görülmektedir. Önerilen yöntemde bağlantı bileşeni ve ray yüzeyi tespiti işlemi için bir eşik değer belirlenmiştir. Eşik değerinin yüksek veya düşük olması önerilen yöntemin başarı oranını etkilemektedir. Tablo 4.4'te ahşap ve beton traverste bağlantı bileşeni ayrıca ray yüzey tespiti için eşik değer tablosu verilmiştir.

Tablo 4.4. Bağlantı bileşen ve ray yüzeyi tespitinde eşik değerlerine göre başarı oranının değişimi

		Başarı Oranı (%)	
	Eşik değer	**Ortalama**	**Standart Sapma**
Ahşap travers eşik değer tablosu	0.2	89.4	3.16
	0.3	79.4	3.65
	0.4	63.4	3.27
	0.5	52.8	4.36
Beton travers eşik değer tablosu	0.2	80.1	3.2
	0.3	73.8	3.7
	0.4	62.2	3.7
	0.5	41.0	4.9
Ray yüzeyi Tespiti eşik değer tablosu	0.2	98.1	1.3
	0.3	92.3	2.9
	0.4	82.5	3.5
	0.5	52.5	4.1

Tablo 4.4'de görüldüğü gibi eşik değeri ne kadar küçük seçilirse başarı oranı o kadar artmaktadır. Eşik değerinin 0.2 olarak belirlenmesi demek korelasyon değeri 0.2 den büyük ise tespit işlemi yapılmış demektir. Önerilen yöntem için eşik değer 0.4 olarak seçilmiştir. Eşik değer 0.4 olarak seçildiğinde ahşap travers için bağlantı elemanı tespiti %63.4 başarı, beton travers için bağlantı elemanı tespiti %62.2 başarılı ve ray yüzey tespiti için %82.5 başarılıdır. Bağlantı bileşen tespiti yapılırken balastlar travers üzerinde bulunduğundan ve çevre koşullarından oldukça fazla etkilendiğinden dolayı başarı oranı ray yüzey tespitinden daha düşüktür. Eşik değeri uygulandığında bağlantı bileşen tespiti için "Lojik 1" bağlantı bileşeni tespit edilememiştir, "Lojik 0" ise bağlantı bileşeni tespit edilmiştir anlamına gelmektedir. Durum izleme yapılırken ray yüzeyleri ikilik tabanlı görüntüye dönüştürülerek görüntüdeki siyah piksellerin sayısı ile görüntüdeki toplam piksellerin sayısı oranlanarak

arıza oranı elde edilmektedir. Önerilen yöntemde sonuçların birleştirilmesi ve durum izleme için elde edilen sonuçlar Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Sonuçların birleştirilmesi ve durum izleme

Şekil 4.23'da sol ray sol kamera bileşen tespitinde 100 frame görüntü için 16 adet tespit edilemeyen bağlantı bileşeni, 84 adet tespit edilen bağlantı bileşeni bulunmuştur. Sol ray sağ kamera bileşen tespiti için tespit edilmeyen bağlantı bileşen sayısı 12 adet, sağ ray sol kamera için 4 adet sağ ray sağ kamera için de 22 adet tespit edilemeyen bağlantı bileşeni mevcuttur. Ayrıca tespit edilen ray yüzeylerinin her bir framedeki ray yüzeyi arıza oranı Şekil 4.23'te görülmektedir. Sol ray yüzey durumu ve sağ ray yüzey durumu grafiklerinde 100 frame boyunca oluşan ray yüzey arızaları %0 ile %10 aralığındadır. Bu değerler ray yüzeyinde aşırı arızaların olmadığını ve ray yüzeyinin sağlam olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, önerilen yöntem Intel i7 işlemcili 2.00 GHz hızında 8 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda test edilmiştir. Bağlantı bileşen tespiti ve ray yüzeyi için önerilen yöntemin çalışma süreleri Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Bağlantı bileşen tespiti ve ray yüzeyi için önerilen yöntemin çalışma süreleri

Yöntem	Ortalama süre (ms)	Standart sapma (ms)
Bağlantı bileşen tespiti yöntemi	313.39	2.26
Ray yüzey tespit yöntemi	113.76	2.07
Bağlantı bileşen tespiti yöntemi ve ray yüzey tespit yöntemi	427.15	2.16

4.4. Bölüm Değerlendirmesi

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, travers ve bağlantı bileşenlerinin üzerindeki balastlardan dolayı ray bileşen tespiti yapmak zahmetli bir süreçtir. Bu çalışmada ray bileşen tespiti için iki çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk çalışmada, ray yüzey ve travers tespiti için karar ağacı tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yaklaşımda, bir görüntü için ray bileşen tespiti yaklaşık 164.4 ms'de ray yüzey izleme ise 50 ms'de yapılmaktadır. Önerilen yöntemin başarısı yaklaşık %79 olarak hesaplanmıştır. İkinci çalışmada ise ray yüzey ve bağlantı bileşeni için PSO tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Demiryolu hattında, dört kamera kullanılarak her adım için dört görüntü alınmaktadır. Alınan görüntüler üzerinde görüntü eşleştirme yapılarak PSO algoritması ile ray yüzeyi ve bağlantı bileşeni tespit edilmiştir. Çalışmanın test edilmesi için 100 adet ahşap traverse sahip ray hattı 100 adet de beton traverse sahip ray hattı görüntüsü kullanılmıştır. Bağlantı bileşen tespitini yaklaşık 313 ms'de, ray yüzey tespitini ise yaklaşık 113 ms'de yapmaktadır. Önerilen bu çalışmanın başarı oranı yaklaşık %70 olarak hesaplanmıştır.

5. ÖNERİLEN RAY YÜZEYİ İZLEME VE ARIZA TEŞHİS YÖNTEMLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, ray yüzeyi izleme ve arıza teşhisi için iki yaklaşım önerilmiştir. Birinci yaklaşımda, makas geçişleri ve ray yüzeyi tespiti yapılarak ray yüzeylerinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. Önerilen yöntemde dört frame kamera kullanılmaktadır. Kameralardan alınan görüntüler eş zamanlı işlenerek özellik çıkarımı yapılmaktadır. Görüntü üzerinde her bir sütun için oto korelasyon değeri hesaplanarak öznitelik sinyali elde edilmektedir. Öznitelik sinyali üzerinde sinyal işleme yapılarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Özellik çıkarımının ardından ray yüzeyi ve makas tespit edilmektedir. Elde edilen ray yüzeyi görüntüleri incelenerek ray yüzeyinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. İkinci yaklaşımda ise demiryolu ray yüzeylerinde oluşan arızaların tespiti ve sınıflandırılması için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde görüntü işleme teknikleri kullanılarak ray yüzeyi tespit edilmiştir. Ray yüzeyinde özellik çıkarımı ile arıza tespiti yapılmaktadır. Ayrıca bulanık mantık kullanılarak arızanın türü belirlenmektedir.

5.1. Oto Korelasyon Tabanlı Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi

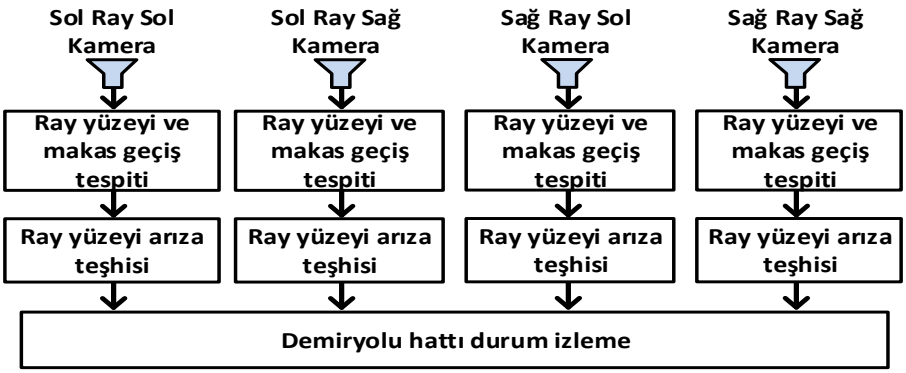
Demiryolu araçlarında ve ray hattında yapılan teknolojik yenilikler sayesinde, insanlar demiryolu ulaşımını daha çok kullanmaya başlamıştır. Böylelikle demiryolu araçlarının sayısı artmıştır. Şehir içi ve şehirlerarası ulaşımlarda birden fazla tren bir ray hattını kullanabilmektedir. Demiryolu trafiğinin kontrol edilmesi, birden fazla trenin tek bir ray hattını kullanarak ulaşımı sağlaması oldukça önemlidir. Bu işlemler için demiryolu hattında makas geçişleri mevcuttur. Makas geçişleri, bir veya birden fazla ray hattını birbirine bağlayarak, trenlerin hatlar arası geçişlerini sağlamaktadır. Makas geçişleri demiryolu hattı için çok önemlidir [180]. Demiryolu bileşenlerinde oluşabilecek bir arıza büyük kazalara neden olabilmektedir. Ayrıca ulaşımı aksatmakta, maddi kayıplar oluşabilmektedir. Demiryolu bileşenlerinde oluşabilecek arızaların erken teşhis edilip bakım onarımı yapılarak, kazaların, ulaşım aksamasının ve maddi kayıpların önüne geçilebilmektedir.

Bu çalışmada, demiryolu makas geçişi tespiti ve ray yüzeyi tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeylerinde oluşan arızalar teşhis edilmektedir. Önerilen yöntemde dört adet

kamera kullanılarak demiryolu hattında görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler üzerinde oto korelasyon değeri hesaplanarak görüntülerden özellik çıkarımı yapılmıştır. Özellik çıkarımı sonucunda her bir görüntü için sinyal elde edilmiştir. Elde edilen sinyaller üzerinde basit sinyal işleme yöntemleri kullanılarak ray yüzeyi ve makas geçiş tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyleri ana görüntüden kesilerek ray yüzeyi arıza teşhisi yapılmaktadır. Ray yüzeyi görüntüsünde ise oto korelasyon değeri kullanılarak sinyal elde edilmektedir. Elde edilen sinyaller işlenerek ray yüzeyi durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen yöntem sinyal işleme tabanlı bir yöntem olduğu için görüntü işleme yöntemlerine göre oldukça hızlıdır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde genellikle görüntü işleme kullanılarak demiryolu hattında durum izleme ve arıza teşhisi yapılmıştır. Bu çalışmada ise kameradan alınan görüntüler doğrudan özellik çıkarımı yapılarak sinyale dönüştürülmektedir. Elde edilen sinyaller üzerinde sinyal işleme yöntemi geliştirilerek ray yüzey ve makas geçiş tespiti yapılmıştır. Ayrıca tespit edilen ray yüzeylerinde oluşan arızalar da tespit edilebilmektedir.

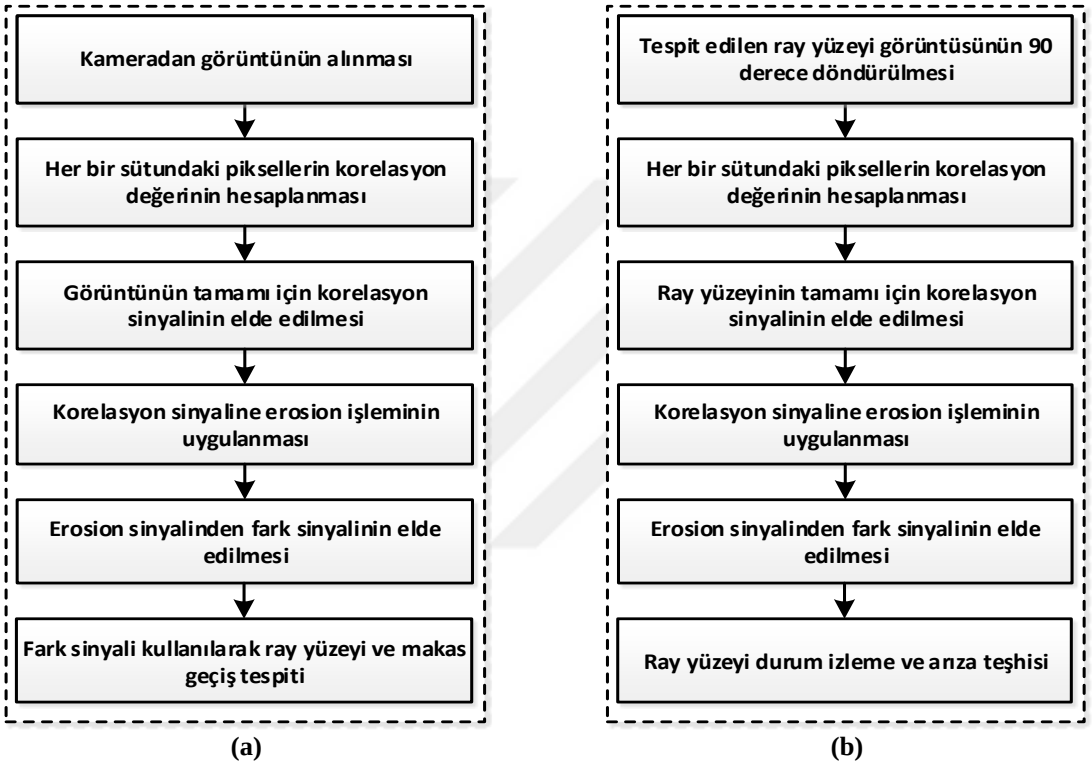
5.1.1. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde, dört adet çerçeve kamera kullanılarak görüntüler alınmıştır. Kullanılan kameralar yüksek fps (frame per second) özelliğine sahip kameralardır. Kameralardan alınan her bir görüntü için ray yüzeyi ve makas geçişi tespit yöntemi uygulanmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyi görüntülerinden ray yüzey arızası tespiti yapılmaktadır. Dört kameradan alınan görüntüler için sonuçlar çıkarılarak demiryolu hattı durum izlemesi yapılmaktadır. Önerilen yöntemin blok yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir.



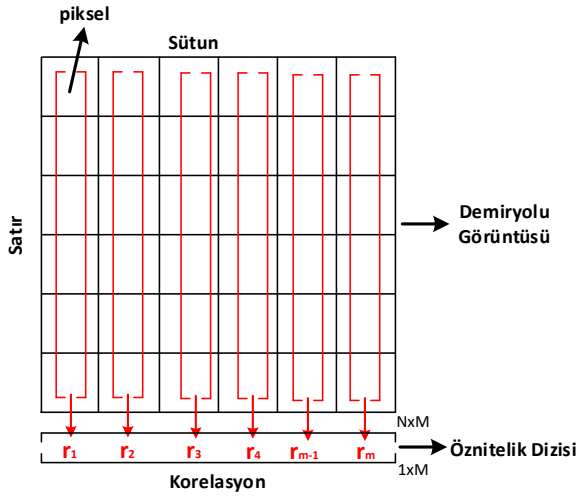
Şekil 5.1. Önerilen yöntemin blok şeması

Şekil 5.1'de verilen önerilen yöntemin blok şemasında dört adet kamera kullanılarak demiryolu ray görüntüleri elde edilmektedir. Önerilen yöntemin en büyük avantajlarından biri sinyal işleme tabanlı bir yöntem olmasıdır. Sinyal işleme tabanlı bir yöntem olduğu için oldukça hızlıdır. Böylece yüksek fps özelliğine sahip kameralar için kullanışlı bir algoritmadır. Ray yüzey ve makas geçiş tespit yönteminin akış şeması Şekil 5.2.a'da, ray yüzey arıza teşhis yönteminin akış şeması Şekil 5.2.b'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Önerilen yöntemin akış şeması **(a)** Ray yüzeyi ve makas geçişi tespiti **(b)** Ray yüzey arıza teşhisi

Önerilen yöntemde kameradan alınan görüntüler üzerinde oto korelasyon değerleri hesaplanarak bir sinyal elde edilmektedir. Şekil 5.3'te bir görüntüden oto korelasyon değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi verilmiştir.



Şekil 5.3. Görüntüden oto korelasyon değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi

Bir görüntüden öznitelik dizisi oluşturulurken Şekil 5.3'te ki gibi görüntüdeki her bir sütuna ait tüm satırlar kullanılarak o sütun için oto korelasyon değeri hesaplanmaktadır. Oto korelasyon görüntü üzerindeki tekrarlı yapıları inceleyen bir yöntemdir [181]. Oto korelasyon değerinin hesaplanması denklem 5.1'de verilmiştir.

$$r_i(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-\tau-1} x(t+\tau)x(t) \tag{5.1}$$

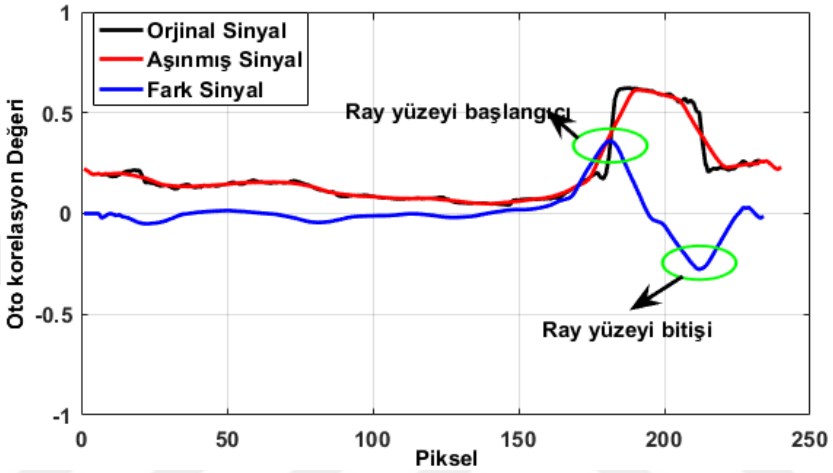
N toplam örnek sayısını yani her sütundaki toplam satır sayısını, *t* zamanı, *Γ* zamandaki kaydırma değerini, *x* normalize edilmiş sinyal değerini ve *r* ise oto korelasyon değerini göstermektedir. Görüntü üzerinde her bir sütundaki tüm satırlar tek boyutlu bir dizi olarak kullanılır. $r_i(\tau)$ değeri *(i=1, 2, 3,.., M)* her sütun için hesaplanır. Böylece oto korelasyon işlemi, görüntü üzerine uygulanarak öznitelik sinyali elde edilmiştir. Öznitelik sinyalinde gürültülerin yok edilmesi ve sinyalin daha iyi düzenlenmesi için aşınma işlemi uygulanmaktadır. Aşınma işlemi denklem 5.2'de verilmiştir.

$$x(t) = (x(t-2) + x(t-1) + x(t) + x(t+1) + x(t+2))/5 \tag{5.2}$$

Aşınma işleminin ardından ray yüzey ve makas tespiti için fark sinyali elde edilmektedir. Fark sinyali elde edilirken denklem 5.3 kullanılmıştır.

$$x(t) = |x(t+7) - x(t-7)| \quad \textbf{(5.3)}$$

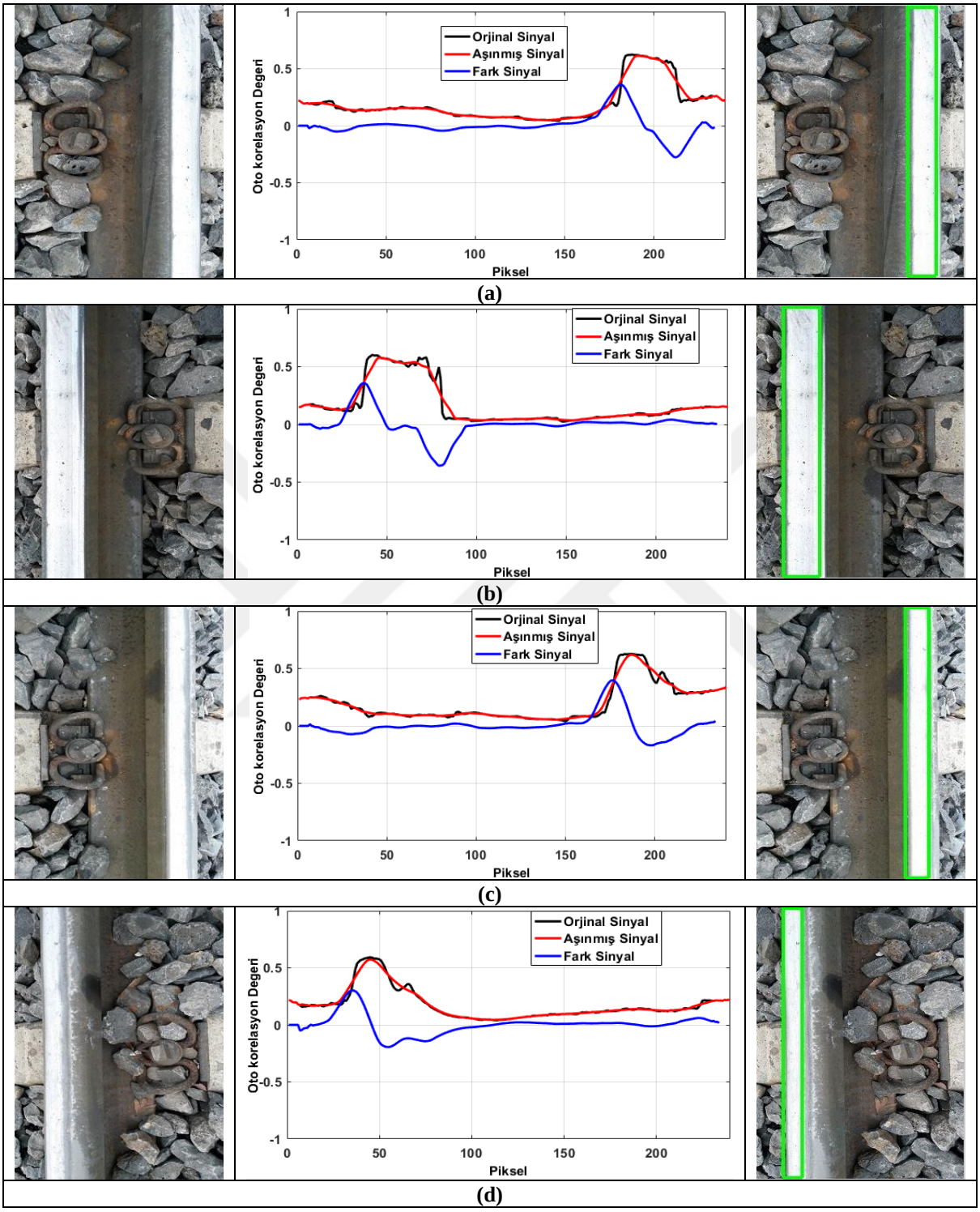
Fark sinyali elde edildikten sonra, sinyalde pozitif yönde oluşan tepe noktaları ray yüzeyi başlangıcı negatif yönde oluşan tepe noktası ise ray yüzeyi bitişi olarak adlandırılmaktadır. Örnek bir görüntüden elde edilen öznitelik sinyali, aşınma sinyali ve fark sinyali Şekil 5.4'te verilmiştir.



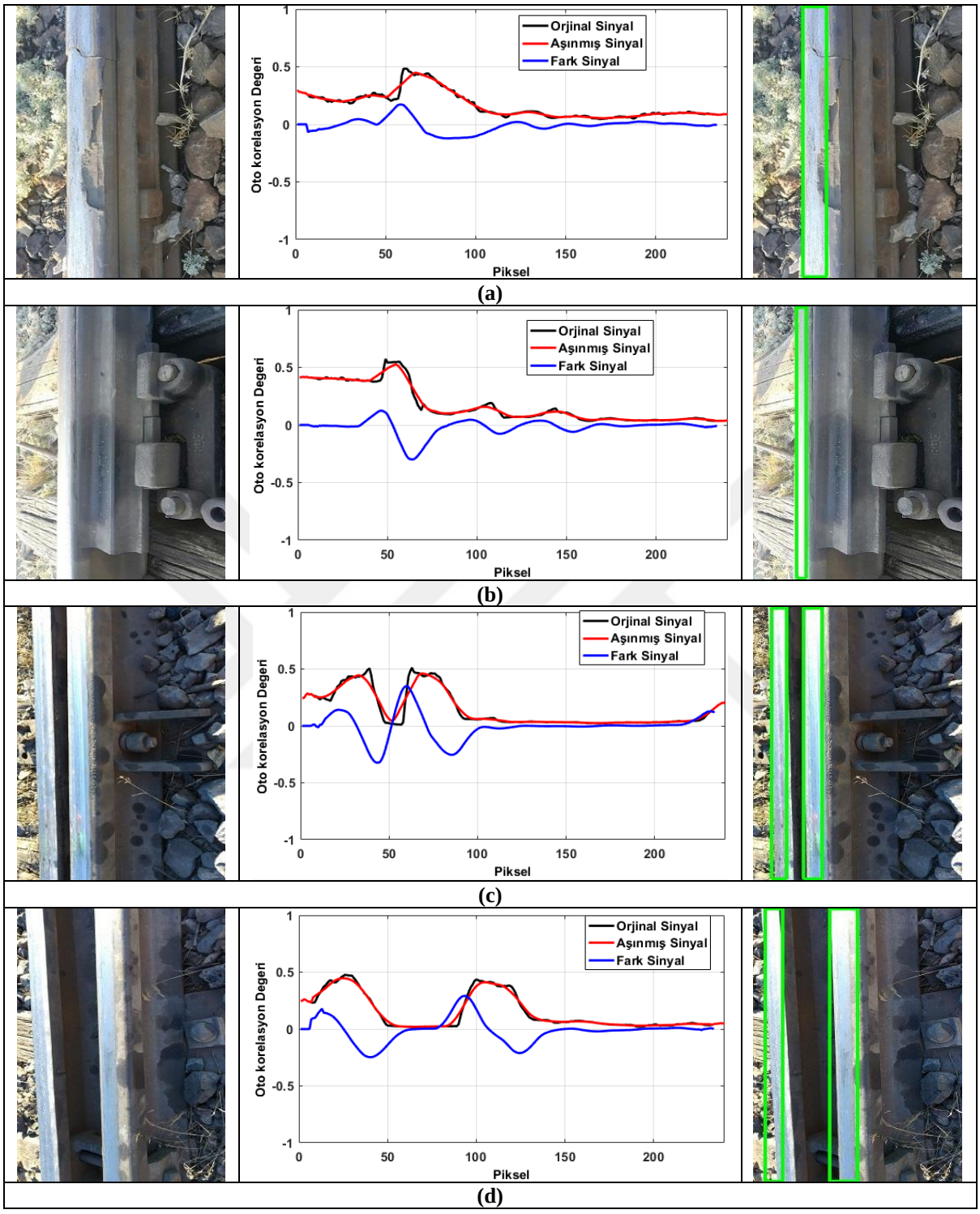
Şekil 5.4. Örnek bir görüntüden elde edilen sinyaller ve ray yüzeyinin tespit edilmesi

5.1.2. Deneysel Sonuçlar

Ray yüzeyi ve makas geçiş tespiti yöntemi demiryolu hattında gerçek zamanlı çalıştırılarak test edilmiştir. Dört adet kameradan alınan örnek görüntüler Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5'te verilen görüntüler beton travese sahip demiryolundan elde edilmiştir. Şekil 5.5.a,b,c ve d'de görüldüğü üzere dört görüntüde de doğru bir şekilde ray yüzeyi tespit edilmiştir. Her bir görüntüye ait oto korelasyon değeri hesaplanarak öznitelik sinyalleri elde edilmiştir. Elde edilen bu sinyaller üzerinde sinyal işleme yapılarak fark sinyali elde edilmiştir. Fark sinyalinde oluşan pozitif ve negatif yönde artışın tepe noktaları arası ray yüzeyini ifade etmektedir. Önerilen yöntemde makas geçişi tespiti yapılırken sinyalde ki tepe noktaları dikkate alınmaktadır. Görüntü üzerinde eğer birden fazla ray yüzeyi tespit edilmiş ise makas geçişi olduğu bilinmektedir. Şekil 5.6'da ahşap traverse sahip demiryolu hattında farklı çerçevelerden alınan görüntüler üzerinde makas tespiti yapılmaktadır.



Şekil 5.5. Dört kameradan alınan örnek görüntüler ve elde edilen sonuçlar **(a)** Sol ray sol kamera **(b)** Sol ray sağ kamera **(c)** Sağ ray sol kamera **(d)** Sağ ray sağ kamera

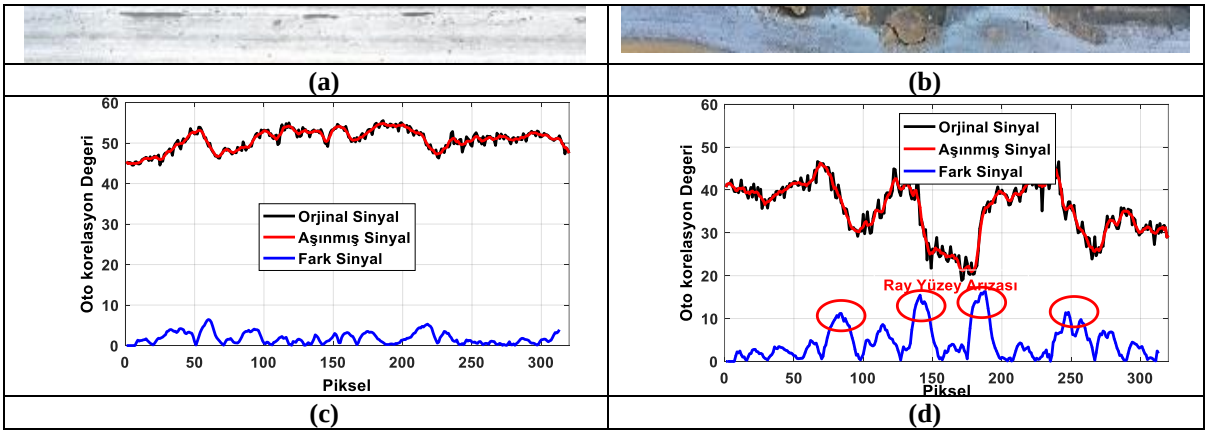


Şekil 5.6. Ahşap traverse sahip demiryolu hattında makas tespiti örneği **(a)** 1780. Çerçeve **(b)** 1900.Çerçeve **(c)** 2130. Çerçeve **(d)** 2300. Çerçeve

Şekil 5.6'da farklı çerçevelerden alınan görüntüler üzerinde makas geçişi tespit edilmiştir. Şekil 5.6.a'da normal bir demiryolu hattı görüntüsü bulunmaktadır. Henüz makas geçiş bölgesine varılmamıştır. Şekil 5.6.b'de ise tam makas geçiş bölgesine yaklaşıldığı görüntüde fark edilmektedir. Ancak iki ray net olarak görülmemekte, sadece ana ray görülmektedir. Şekil 5.6.c'de makas geçiş bölgesindedir. İki ray kolaylıkla tespit edilmiştir. İki ray birbirine oldukça yakındır. Şekil 5.6.d'de ise makas geçiş bölgesidir. Makas geçişi başarıyla tespit edilmiştir. İki ray arası mesafenin arttığı görülmektedir.

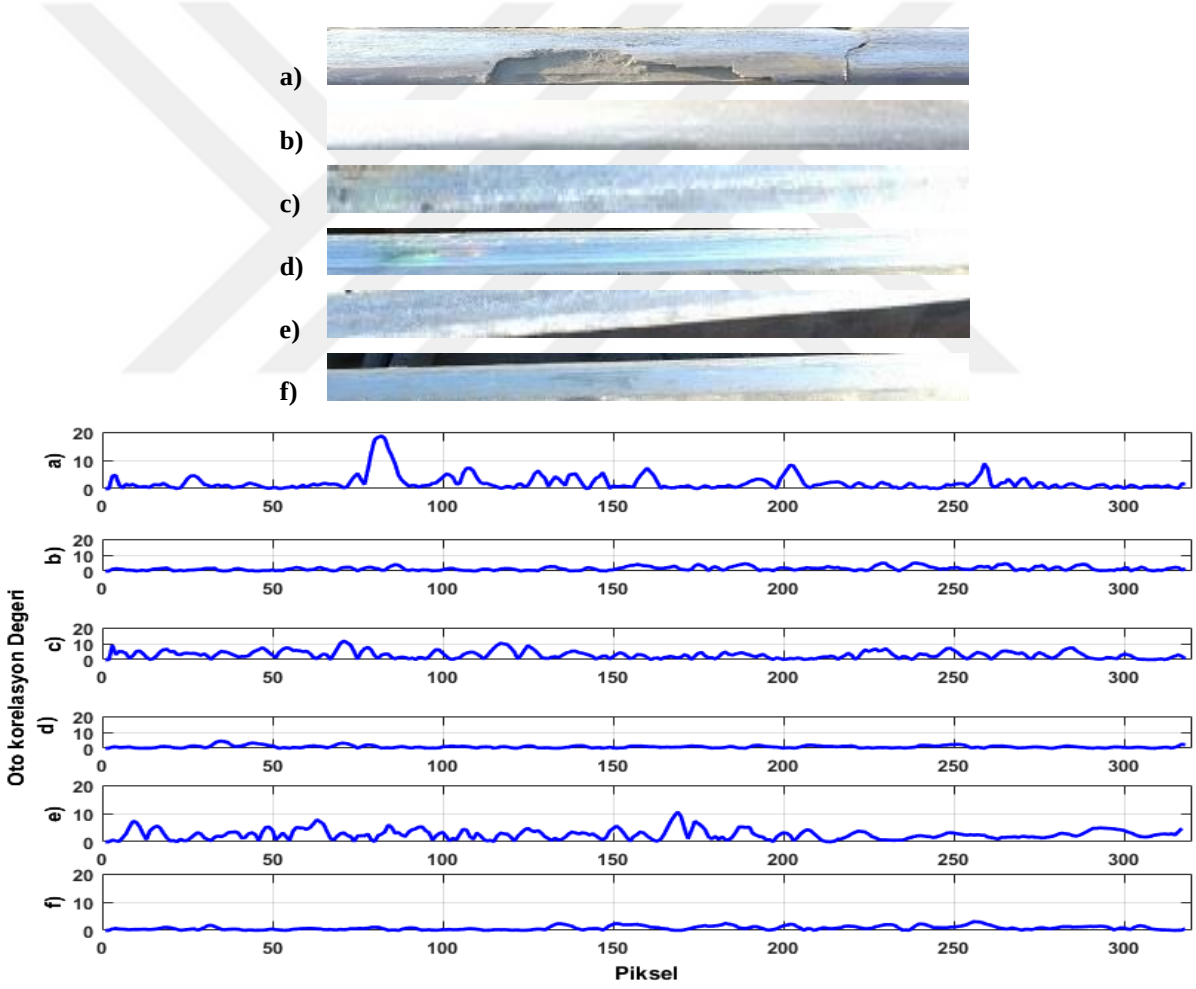
Ray yüzeyi tespiti yönteminde ray yüzeyi bölgesi tespit edildikten sonra görüntüden kesilip alınmaktadır. Alınan görüntü 90° döndürülerek ray yüzeyi arıza teşhis algoritması ile birlikte kullanılmaktadır. Ray yüzeyi arıza teşhis yöntemi ile ray yüzey tespit yöntemi oldukça benzerdir. Ray yüzeyi görüntüsünün oto korelasyon değerleri hesaplanarak öznitelik sinyali elde edilmiştir. Elde edilen sinyal üzerinde aşınma yapıldıktan sonra fark sinyali elde edilmektedir. Fark sinyalinde oluşan tepe noktaları ray yüzeyi arızası olarak bilinmektedir. Tepe noktasının yüksekliği ise arızanın boyutunu göstermektedir. Şekil 5.7'da sağlam ve arızalı ray yüzeyi görüntüleri ve sonuçları verilmiştir.

Şekil 5.7.a'da verilen sağlam ray yüzeyi görüntüsüne ait sonuçlar Şekil 5.7.c'de verilmiştir. Sinyalde de görüldüğü üzere ani değişimler oluşmamıştır. Böylece ray yüzeyinin sağlam olduğu görülmektedir. Şekil 5.7.b'de verilen arızalı ray yüzeyi görüntüsüne ait sonuçlar Şekil 5.7.d'de verilmiştir. Şekil 5.7.d'de verilen sinyallerde üç noktada ani değişimlerden dolayı tepe noktası oluşmuştur. Tepe noktaları incelendiğinde görüntüde de aynı piksel aralığında arıza olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7. Sağlam ve arızalı ray yüzeyi görüntüleri ve sonuçları **(a)** Sağlam ray görüntüsü **(b)** Arızalı ray görüntüsü **(c)** Sağlam ray sinyali **(d)** Arızalı ray sinyali

Şekil 5.6'da verilen örnek görüntülerde tespit edilen ray yüzey görüntüleri Şekil 5.8'da kullanılarak ray yüzeyi durum izleme yapılmıştır. Şekil 5.8'de altı adet ray yüzeyi görüntüsü ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.8.a'da ray yüzeyi arızası olduğu görülmektedir. Şekil 5.8.a'ya ait grafiğe bakıldığında 50 ile 100 pikselleri arasında tepe noktası oluştuğu görülmektedir. Bu durum da Şekil 5.8.a'da ki görüntüde ray yüzeyi arızası olduğu görülmektedir. Diğer ray yüzeyi görüntüler ise sağlam görüntülerdir. Şekil 5.8.e ve Şekil 5.8.f'de verilen ray yüzey görüntüleri makas geçiş bölgesinde elde edildiğinden dolayı ray yüzeyi düz bir şekilde kesilip alınmamıştır. Fakat yine de ray yüzeyi durum izleme başarıyla yapılmış ve sağlam ray yüzeyi olduğu görülmüştür. Önerilen yöntemin çalışma performansı Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Örnek ray yüzeyi görüntüleri kullanılarak ray yüzeyi arıza teşhisi ve ray yüzeyi durum izleme yapılması

Tablo 5.1. Önerilen yöntemin çalışma performansı

	Ray yüzeyi ve makas tespiti ortalama (ms)	Ray yüzeyi ve makas tespiti standart sapma (ms)	Ray yüzeyi durum izleme ortalama (ms)	Ray yüzeyi durum izleme standart sapma (ms)
Kamera 1	11.16	0.77	7.84	0.19
Kamera 2	11.21	0.75	7.79	0.16
Kamera 3	11.09	0.78	7.92	0.22
Kamera 4	11.12	0.79	7.80	0.20
Ortalama	11.14	0.77	7.83	0.19

Tablo 5.1'den de görüldüğü üzere önerilen yöntem oldukça hızlı bir yöntemdir. Yapılan performans testi i5 işlemci 2.60 GHz, 8 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Dört adet kamera paralel çalıştırılarak her bir kameradan yaklaşık 60 fps görüntü alınmıştır.

5.2. Ray Yüzeyi Arıza Türünün Tespiti İçin Bulanık Mantık Tabanlı Bir Yöntem

Ray arızaları, genel olarak ray üzerinde üç farklı bölgede oluşmaktadır. Ray uç bölgesi, ray kaynak bölgesi ve bu bölgelerin dışında kalan diğer bölgelerde arıza oluşma ihtimali oldukça yüksektir [124]. Ray arızalarının sınıflandırılması için birkaç yöntem bulunmaktadır. Genel olarak, ray mantarı yüzeyinde meydana gelen arızalar ve rayın diğer kısmında meydana gelen iç arızalar olmak üzere iki türdür. Ray mantarı yüzeyinde oluşan arızalar, demiryolu hattının trafik yoğunluğuna, trenin yükünün artmasına bağlıdır. Rayın diğer kısımlarında meydana gelen iç arızalar ise daha çok üretim ve kaynak sırasında oluşan hatalardan dolayı oluşmaktadır [125].

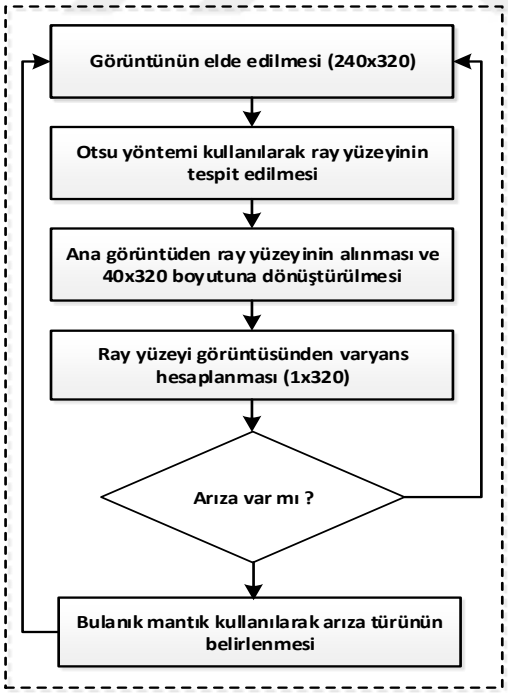
Demiryollarında oluşan ray kusurları, Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) tarafından UIC 712 R kodu ile yayınlanmıştır [124]. Bu arıza kodu ile ray arızasının konumu ve türü gibi birçok bilgi edinilmektedir. Ray arızalarının türünü belirten üç veya dört rakamdan oluşan kodlar verilmiştir. Bu kodlara bakılarak ray arızasının hangi bölgede oluştuğu ve arıza türünün ne olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, ray yüzeyinde oluşan arızalar tespit edilerek arıza türü belirlenmektedir. Ray yüzeyinde oluşan altı adet arıza türü görüntüsü kullanılmıştır. Öncelikle demiryolu görüntüsünden ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyinin tespit edilmesinde Otsu yöntemi kullanılmıştır. Görüntü üzerinde Otsu ile segmentasyon yapılarak ray yüzeyi tespit

edilmektedir. Daha sonra ray yüzeyi görüntüsünden özellik çıkarımı yapılarak arızalı ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi görüntülerinden varyans değerleri kullanılarak öznitelik sinyali elde edilmektedir. Öznitelik sinyalleri ile ray yüzeyinde arıza olup olmadığı tespit edilmektedir. Arızalı ray yüzey görüntülerine ait özellikler kullanılarak bulanık mantık ile arıza türü belirlenmektedir.

5.2.1. Önerilen Yöntem

Bu çalışmada, demiryolu ray yüzeylerinde oluşan arızaların tespiti için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Demiryolundan ray yüzey görüntüleri alınarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi tespiti işleminde Otsu segmentasyon yöntemi kullanılmaktadır. Elde edilen ray yüzey görüntüsündeki varyans değeri hesaplanarak sinyal elde edilmektedir. Bu sinyal dikkate alınarak ray yüzeyinde arıza olup olmadığı belirlenmektedir. Arızalı görüntülere ait varyans sinyallerinden özellik çıkarımı yapılarak arızanın türü belirlenmektedir. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Önerilen yöntemde kullanılan akış şeması

Demiryolundan elde edilen görüntüler üzerinde ray tespiti yapmak için Otsu yöntemi kullanılmaktadır. Otsu yöntemi görüntü işlemede yaygın olarak kullanılan bir

segmentasyon yöntemidir. Görüntü üzerinde piksellerin yoğunluğu dikkate alınarak segmentasyon yapılmaktadır [182, 183, 176]. Otsu yönteminde öncelikle K tane sınıf sayısı belirlenir. (K-1) tane eşik değeri belirlenerek görüntü pikseli K farklı sınıfa bölünmektedir. Her sınıfa karşılık gelen sıfırıncı ve birinci derecede momentleri hesaplanır. Bütün imgelerin yoğunluk ortalaması hesaplanır. Bu işlemler tekrar edilerek segmentasyon için en iyi eşik değerleri hesaplanmaktadır.

Otsu yönteminde, her sınıfa karşılık gelen sıfırıncı derecede momentleri denklem 5.4'te ki gibi hesaplanmaktadır.

$$\omega_k = \sum_{i \in C_k} P_i = \frac{1}{N} \sum_{i \in C_k} f_i \qquad for \quad k = 1,2,...,K \tag{5.4}$$

Denklem 5.4'te verilen f_i değeri i gri seviyesine sahip olan toplam piksel sayısını ifade etmektedir. N değeri ise görüntü üzerinde bulunan toplam piksel sayısıdır. Birinci derece momentleri ise denklem 5.5'te ki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_k = \frac{1}{\omega_k} \sum_{i \in C_k} iP_i = \frac{1}{N\omega_k} \sum_{i \in C_k} if_i \qquad for \quad k = 1,2,...,K \tag{5.5}$$

Bütün imgelerin yoğunluk ortalaması ise denklem 5.6'da verilmiştir.

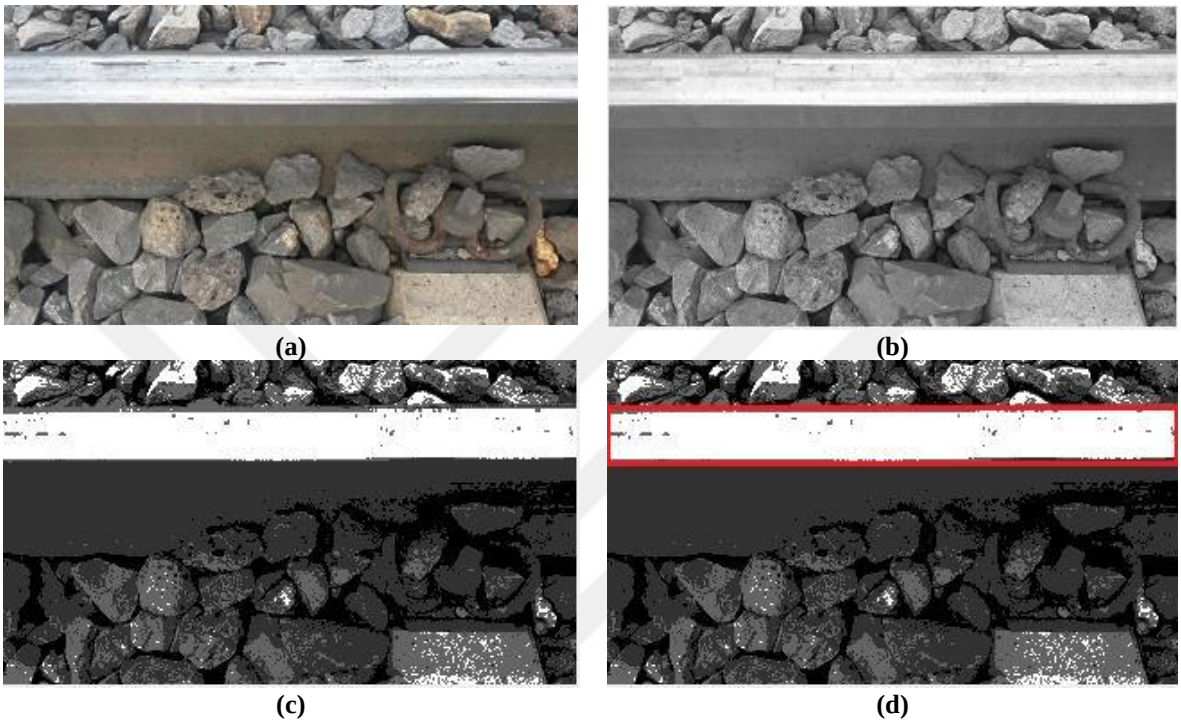
$$\mu = \sum_{k=1}^{K} \omega_k \mu_k \tag{5.6}$$

Son olarak, eşiklenmiş imgenin sınıflar arası değişimi denklem 5.7'de ki gibi tanımlanmıştır.

$$\sigma_B^2 = \sum_{k=1}^{K} \omega_k (\mu_k - \mu)^2 = \left(\sum_{k=1}^{K} \omega_k \mu_k^2 \right) - \mu^2 \tag{5.7}$$

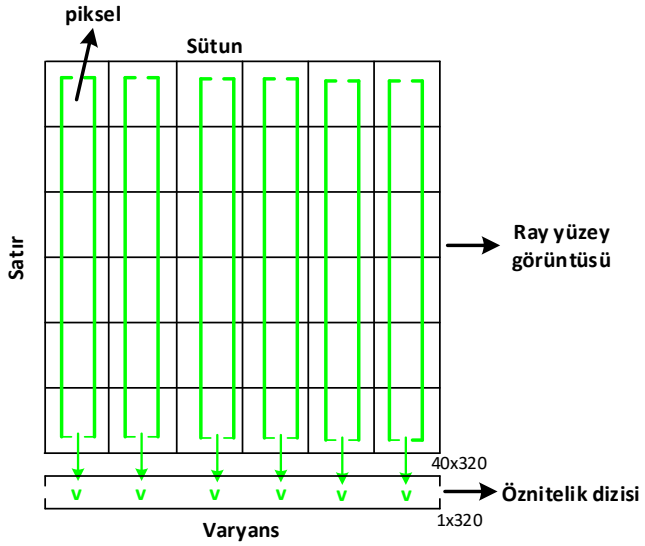
σ_B^2 değerini en büyük yapan eşik değerleri threshold işlemi için en uygun değerlerdir. Belirlenen eşik değerler görüntü üzerinde uygulanmaktadır.

Şekil 5.10.a'da verilen örnek demiryolu görüntüsüne Otsu yöntemi uygulanmıştır. K=4 belirlenerek dört tane sınıf belirlenmiştir. Buna göre üç tane eşik değeri hesaplanmıştır. T_1 =85, T_2 =135 ve T_3 =195 olarak hesaplanmıştır. Bu eşik değerlerine göre görüntü sınıflandırılarak Şekil 5.10.c'deki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 5.10. Örnek görüntü üzerinde Otsu yönteminin uygulanması **(a)** Normal demiryolu görüntüsü **(b)** Gri görüntü **(c)** Otsu sonucu elde edilen görüntü **(d)** Ray yüzeyinin tespit edilmesi

Şekil 5.10.d'de ray yüzeyi tespit edilirken beyaz piksellerin dikey eksendeki konumlarının ortalaması hesaplanarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Tespit edilen ray yüzeyi görüntüsü üzerinden varyans hesaplanmaktadır. Ray yüzeyi görüntü üzerinde varyans değerleri hesaplanarak bir sinyal elde edilmektedir. Şekil 5.11'de bir görüntüden varyans değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi verilmiştir.



Şekil 5.11. Görüntüden varyans değeri hesaplanarak öznitelik dizisinin elde edilmesi

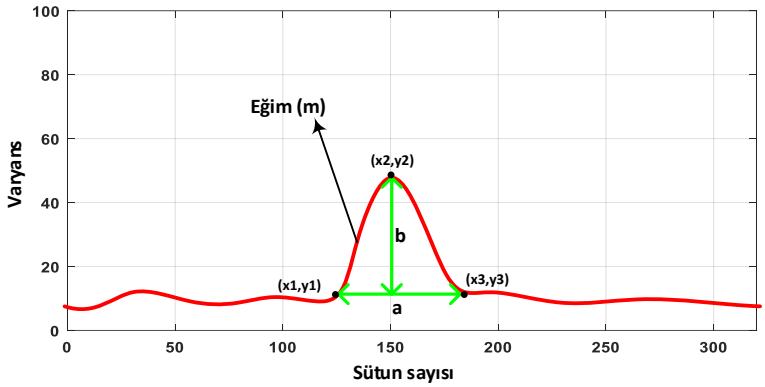
Bir görüntüden öznitelik dizisi oluştururken, Şekil 5.11'de ki gibi görüntüdeki her bir sütuna ait tüm satırlar kullanılarak o sütun için varyans değeri hesaplanmaktadır. Varyans, bir seri içindeki tüm sayıların, ortalaması ile farkları alınarak, karelerinin toplanması sonucunda ortalamasının hesaplanmasıdır. Varyans değerinin hesaplanması denklem 5.8'de verilmiştir.

$$V_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2 \qquad \textbf{(5.8)}$$

N bir sütundaki tüm satırların sayısı, V_x seri içindeki sayıların varyansını, X_i i'ninci piksel değeri ve $\bar{X}$ seri içindeki sayıların ortalamasını göstermektedir. Varyans işlemi görüntü üzerine uygulanarak öznitelik sinyali elde edilmiştir. Elde edilen öznitelik sinyalleri normalize edilerek 0 ile 100 değer aralığına dönüştürülmüştür. Öznitelik sinyalinde gürültülerin yok edilmesi ve sinyalin daha da düzenlenmesi için aşınma işlemi uygulanmaktadır. Aşınma işlemi denklem 5.2'de verilmiştir.

Elde edilen aşınma sinyalinde bulunan tepe noktaları arıza olarak belirlenmektedir. Arıza tespiti için sinyal üzerinde bir eşik değeri belirlenir. Eğer sinyaldeki tüm noktalar bu eşik değerinin altında ise sağlam değilse arızalı olarak ifade edilmektedir. Böylece sinyal üzerinde arıza tespiti yapılmaktadır. Arıza tespiti yapıldıktan sonra arızanın türünün belirlenmesi için sinyaldeki tepe noktaları dikkate alınmaktadır. Sinyal üzerinde tepe

noktalarına ait bilgiler alınarak yeni özellikler elde edilmektedir. Şekil 5.12'de örnek bir sinyal üzerinden yeni özelliklerin elde edilmesi verilmiştir.



Şekil 5.12. Örnek bir sinyal üzerinden yeni özeliklerin elde edilmesi

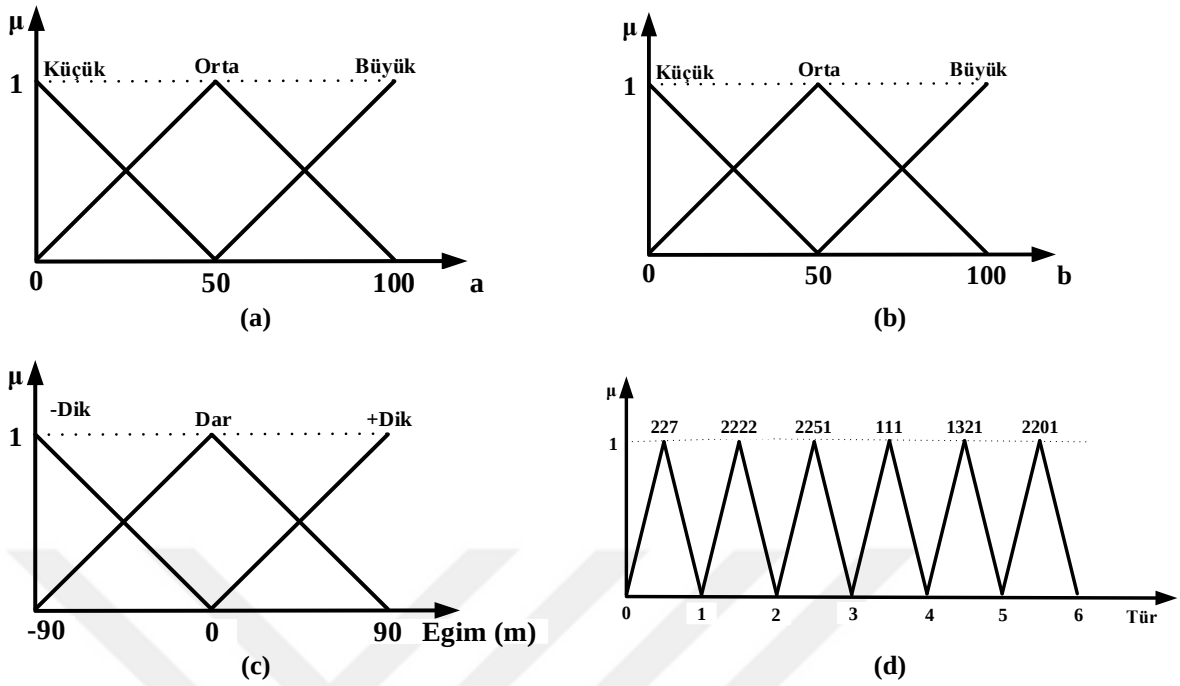
Şekil 5.12'de örnek bir sinyal üzerinde yeni özelliklerin elde edilmesi verilmiştir. Sinyal üzerinde oluşan pik noktaları görüntüdeki arızayı göstermektedir. Arızanın türünün belirlenmesi için Şekil 5.12'de gösterilen "a" , "b" ve "eğim (m)" değerleri alınarak bulanık mantık ile kullanılır. Bulanık mantık sonucunda arızanın türü belirlenmektedir. "a" değerinin hesaplanması için denklem 5.9, "b" değerinin hesaplanması için denklem 5.10 ve "eğim (m)" değerinin hesaplanması için denklem 5.11 kullanılmıştır.

$$a = \sqrt{(y3 - y1)^2 + (x3 - x1)^2} \tag{5.9}$$

$$b = y2 - \frac{(y3 - y1)}{2} \tag{5.10}$$

$$egim = m = \tan\alpha = \frac{y2 - y1}{x2 - x1} \tag{5.11}$$

"a" , "b" ve "eğim (m)" olmak üzere sinyal üzerinden üç özellik çıkarımı yapıldığı için üç adet giriş üyelik fonksiyonu, arızanın türünün belirlenmesi için bir adet çıkış üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları

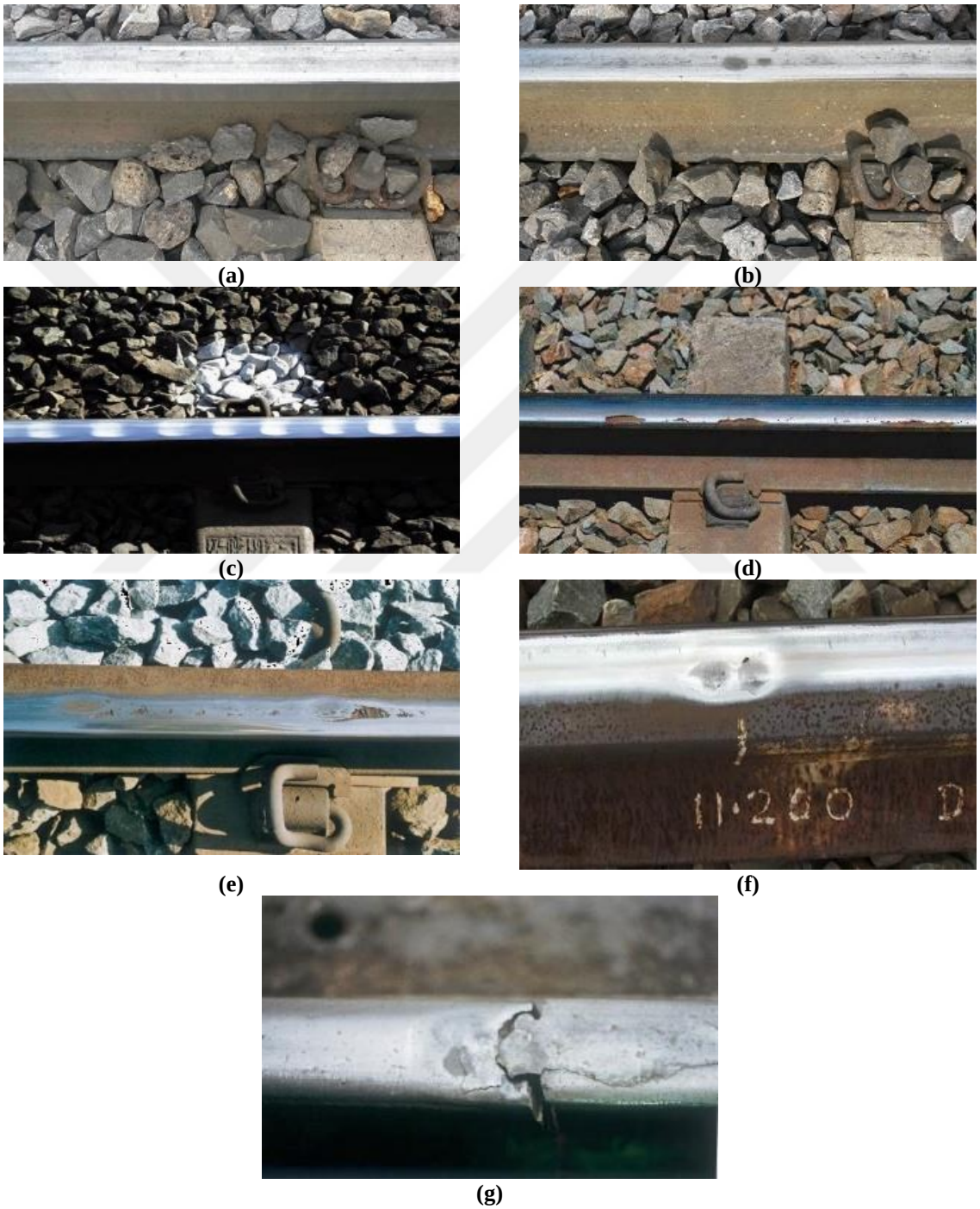
Şekil 5.13'te verilen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları için oluşturulan kural tablosu Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Önerilen kural tablosu

	Eğim (m)	**b**	**a**	**Tür**
1	-dik	Küçük	Küçük	2222
2	-dik	Küçük	Orta	2222
3	-dik	Küçük	Büyük	227
4	-dik	Orta	Küçük	2222
5	-dik	Orta	Orta	2222
6	-dik	Orta	Büyük	227
7	dar	Küçük	Küçük	111
8	dar	Küçük	Orta	2222
9	dar	Küçük	Büyük	2251
10	dar	Orta	Küçük	1321
11	dar	Orta	Orta	1321
12	dar	Orta	Büyük	1321
13	+dik	Küçük	Küçük	2201
14	+dik	Küçük	Orta	2201
15	+dik	Küçük	Büyük	2201
16	+dik	Orta	Küçük	2201
17	+dik	Orta	Orta	2201
18	+dik	Orta	Büyük	2201

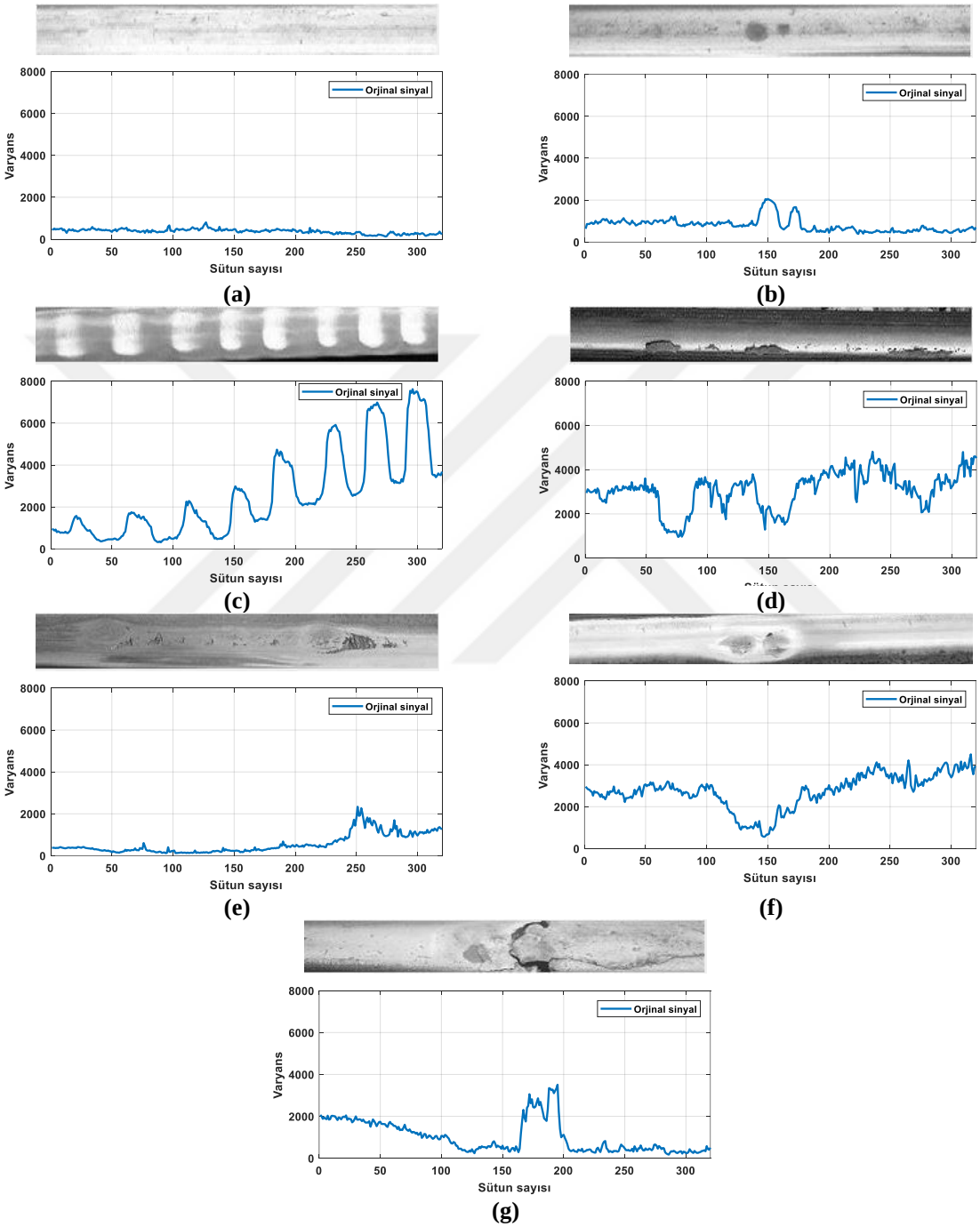
5.2.2. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada 6 farklı arıza türüne ait görüntüler kullanılarak arıza tespiti ve arıza türü tespiti yapılmıştır. Kullanılan demiryolu görüntüleri Şekil 5.14'te verilmiştir.



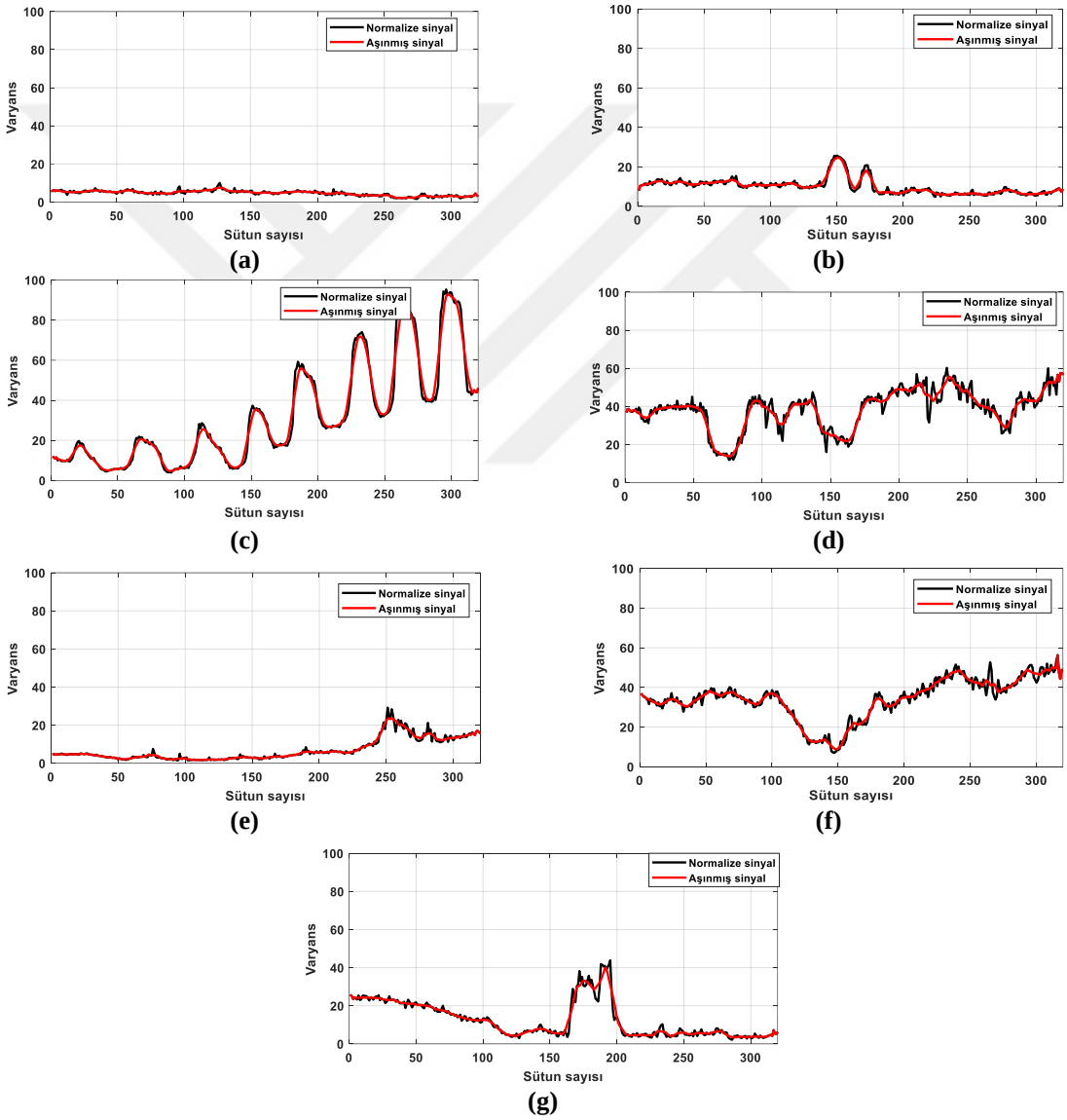
Şekil 5.14. Örnek görüntüler **(a)** Normal ray görüntüsü **(b)** Ray yüzeyinde aşınma (UIC 111) **(c)** Ondülasyon (UIC 2201) **(d)** Ray mantarında kabuklanma (UIC 2222) **(e)** Ray mantarında oluşan tekerlek yanığı (UIC 2251) **(f)** Ray yüzeyinde çökme (UIC 227) **(g)** Ray mantarında çatlak (UIC 1321)

Şekil 5.14'te verilen demiryolu görüntüleri üzerinde ray yüzeyi tespit edilmiştir. Ray yüzeyleri görüntü üzerinde kesilerek alınmıştır. Elde edilen ray yüzeyi görüntüleri ve varyans değerleri Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Ray yüzeyi tespiti ve varyans değerleri **(a)** Normal ray görüntüsü **(b)** Ray yüzeyinde aşınma (UIC 111) **(c)** Ondülasyon (UIC 2201) **(d)** Ray mantarında kabuklanma (UIC 2222) **(e)** Ray mantarında oluşan tekerlek yanığı (UIC 2251) **(f)** Ray yüzeyinde çökme (UIC 227) **(g)** Ray mantarında çatlak (UIC 1321)

Şekil 5.15'de ray yüzeylerine ait elde edilen varyans değerlerinde, arızalı bölgelerde tepe noktası oluştuğu görülmektedir. Sinyal değerleri belirlenen eşik değerin arasında ise sağlam, değil ise arızalı olarak tespit yapılmaktadır. Arızalı görüntülerden arıza türünün tespiti için, varyans değerleri üzerinde işlemler yapılmıştır. Öncelikle, varyans değerlerinden oluşan öznitelik sinyali normalize edilmiştir. Normalize edilen sinyale aşınma işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.15'te verilen öznitelik sinyallerinin normalize edilerek aşınma işlemi sonrası Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Öznitelik sinyalinin normalize ve aşınma işlemi **(a)** Normal ray görüntüsü **(b)** Ray yüzeyinde aşınma (UIC 111) **(c)** Ondülasyon (UIC 2201) **(d)** Ray mantarında kabuklanma (UIC 2222) **(e)** Ray mantarında oluşan tekerlek yanığı (UIC 2251) **(f)** Ray yüzeyinde çökme (UIC 227) **(g)** Ray mantarında çatlak (UIC 1321)

Şekil 5.16'da görüldüğü üzere varyans değerlerinden oluşturulan öznitelik sinyalleri normalize edilerek 0 ile 100 değer aralığına getirilmiştir. Ayrıca sinyallerdeki ani değişimlerin ve gürültülerin giderilmesi için aşınma işlemi uygulanmıştır. Bu sinyallerden elde edilen yeni özellikler, bulanık mantık ile kullanılarak arıza türü tespit edilmektedir. Şekil 5.16'da verilen sinyaller üzerinden "a", "b" ve "eğim (m)" değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bulanık mantık ile birlikte kullanılarak arıza türü belirlenmiştir. Tablo 5.3'te örnek görüntülerden elde edilen özellikler kullanılarak bulanık mantık sonucu verilmiştir.

Tablo 5.3. Örnek görüntülerden elde edilen özellikler kullanılarak bulanık mantık sonucu

Arıza türü	Egim (m)	b	a	Bulanık mantık sonucu	Başarı oranı
Ray yüzeyinde aşınma (UIC 111)	49	25	27	3.78	%92.0
Ondülasyon (UIC 2201)	71	52	35	5.21	%94.7
Ray mantarında kabuklanma (UIC 2222)	-47	12	41	2.76	%38.0
Ray mantarında tekerlek yanığı (UIC 2251)	31	21	53	3.52	%59.2
Ray yüzeyinde çökme (UIC 227)	-29	10	80	2.08	%50.4
Ray mantarında çatlak (UIC 1321)	48	40	47	4.29	%98.0

Tablo 5.3'te örnek ray görüntülerinde arıza türünün belirlenmesi için bulanık mantık sonuçları verilmiştir. Ray yüzeyinde aşınma, ondülasyon ve ray mantarında oluşan çatlakların tespiti oldukça başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Fakat ray mantarında kabuklanma, tekerlek yanığı ve ray yüzeyinde çökme arızalarının tespit oranı düşüktür. Arıza türünün belirlenmesinde başarı oranının artması için tasarlanan bulanık yapının üyelik fonksiyonları veya kural tablosu iyileştirilebilir. Bu yöntem için genel başarı oranı %72.05'tir. Bu yöntemde 500 adet görüntü için oluşturulan hata matrisi (Confusion Matris) Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Örnek görüntüler için hata matrisi

			Tahmini sınıflar						
				UIC Arıza Kodları					
			Sağlam	**227**	**2222**	**2251**	**111**	**1321**	**2201**
Gerçek sınıflar		**Sağlam**	200	0	0	0	0	0	0
	UIC Arıza Kodları	**227**	0	25	13	9	3	0	0
		2222	0	12	19	16	2	1	0
		2251	0	5	7	29	9	0	0
		111	0	0	0	0	46	4	0
		1321	0	0	0	0	1	49	0
		2201	0	0	0	0	0	3	47

5.3. Bölüm Değerlendirmesi

Oto korelasyon tabanlı yaklaşımında, dört adet kamera kullanılarak demiryolu ray yüzey ve makas tespiti yapılmaktadır. Tespit edilen ray yüzeyine ait durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen yöntemin en büyük avantajı hızlı olmasıdır. Bu çalışmada yüksek fps hızlarına sahip frame kameralar kullanılmıştır. Dört adet kameradan aynı anda görüntüler alınarak paralel bir şekilde işlenmiştir. Görüntüden oto korelasyon yöntemi kullanılarak öznitelik çıkarılmıştır. Elde edilen öznitelik sinyali üzerinde sinyal işleme yapılarak ray yüzey tespiti, makas tespiti, ray yüzeyi durum izleme ve arıza teşhisi yapılmıştır.

Bulanık mantık tabanlı durum izleme yaklaşımında, ray yüzeylerinde oluşan arızaların türü belirlenmektedir. Arıza türünün tespit edilebilmesi için demiryolu görüntüsünden ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyinin tespit edilmesinde Otsu yöntemi kullanılmıştır. Otsu yöntemi yaygın olarak kullanılan bir segmentasyon yöntemidir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinden varyans değerleri hesaplanarak öznitelik sinyalleri elde edilmiştir. Bu sinyaller üzerinden arıza tespiti yapılmaktadır. Öznitelik sinyallerinden özellik çıkarımı yapılarak bulanık mantık ile birlikte arıza türü tespit edilmektedir.

6. TERMAL GÖRÜNTÜ İŞLEME VE DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, termal görüntü işleme ve durum izleme için üç farklı yöntem önerilmiştir. Birinci yöntem, ray yüzey izleme ve termal görüntü işleme tabanlıdır. Ray yüzeyine ait termal görüntüler üzerinde Watershed segmantasyon yöntem kullanılarak ray yüzeyi tespit edilmiştir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinde piksel değerlerinin değişimleri gözlemlenerek arıza tespiti yapılmaktadır. İkinci yöntemde, demiryolu ray hattında durum izleme ve arıza tespiti için termografi tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde termal görüntüler üzerinde görüntü işleme ile özellik çıkarımı yapılmıştır. Ray hattında rayların birleşme noktalarında oluşan ısınmalar izlenmektedir. Karmaşık bulanık sistem ile mevsim koşulları dikkate alınarak ray birleşme noktaları izlenmektedir. Ray birleşme noktalarındaki anormal ölçümler tespit edilmektedir. Üçüncü yöntemde ise, ray yüzey durum izleme ve arıza tespiti için karmaşık bulanık otomata tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda termal görüntüler üzerinde görüntü işleme yapılmıştır. Termal görüntüler normal görüntülere göre çevre koşullarından daha az etkilendiği için yöntemin başarısını arttırmıştır. Önerilen yöntem ile ray yüzey arızaları ile ray birleşme noktaları birbirinden ayırt edilmektedir.

6.1. Ray Yüzey İzleme için Termal Görüntü İşleme Tabanlı Bir Yöntem

Bu çalışmada elektrikli demiryollarında ray yüzey arızalarının tespit edilebilmesi için termal görüntü işleme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Ray yüzeylerinden termal kamera kullanılarak görüntüler alınmıştır. Alınan termal görüntüler üzerinde Watershed segmantasyon yöntemi ile ray yüzeyi tespit edilmiştir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinde özellik çıkarımı yapılarak durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır. Bu çalışmanın en önemli katkısı termal görüntüler kullanılarak mevsim koşullarından etkilenmeden arıza tespiti yapılmasıdır. Literatürdeki yöntemlerde ray yüzey izleme için genellikle normal görüntüler kullanılmıştır. Normal görüntüler kullanıldığında çevre koşullarından fazlasıyla etkilendiğinden dolayı görüntü işlemede başarı oranı düşmektedir. Önerilen yaklaşımı

doğrulamak için deneysel veriler üzerinden yöntem uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar termal görüntülerin işlenmesinden elde edilen başarıyı ortaya koymuştur.

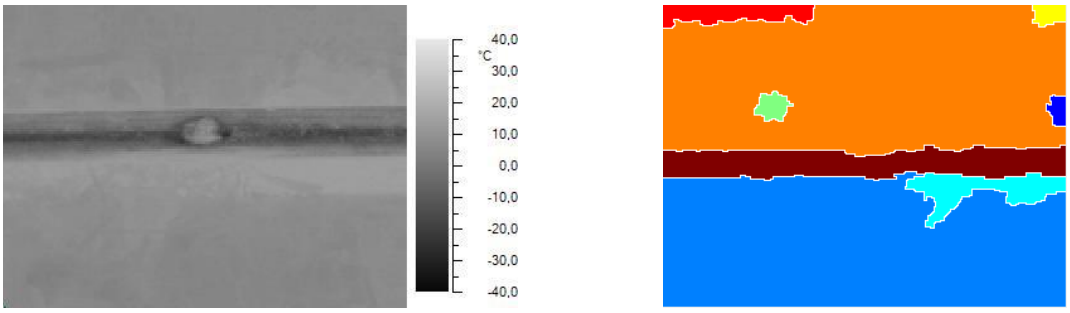
6.1.1. Önerilen Yöntem

Bu çalışmada, termal görüntüler kullanılarak ray yüzeyi durum izleme ve arıza tespiti için bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin genel mimarisi Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Önerilen yöntemin mimarisi

Şekil 6.1'de ki önerilen yöntemin mimarisinde, öncelikle termal kameradan görüntüler alınmıştır. Alınan termal görüntüler üzerinde görüntü segmantasyonu uygulanmıştır. Önerilen yöntemde görüntü segmantasyonu için Watershed algoritması kullanılmıştır. Watershed segmantasyon algoritması bölge çıkarım temeline dayanan bir görüntü işleme yöntemidir [6, 184]. Watershed yöntemi gri görüntüler üzerinde başarılı sonuç verebilen bir yöntemdir. Binary görüntüler üzerinde bu yöntemin uygulanması için öncelikle ikili görüntünün gri görüntüye dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu segmantasyon algoritması, görüntüdeki her bir gri değeri yükseklik olarak ifade eden bir topolojik yüzey gibi düşünülebilir. Eğer bu topolojik yüzeyin minimum noktasından su bastırılmaya başlanırsa öncelikle en düşük bölgeler su alacaktır. Böylece yüksek yerler ile düşük yerler iki farklı kümeye bölünmüş olurlar. Böylece görüntüdeki farklı renk aralıkları kümelenerek görüntü segmantasyonu yapılmaktadır. Şekil 6.2'te verilen termal görüntü üzerinde Watershed yöntemi uygulanarak elde edilen sonuç verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 6.2. Örnek bir termal görüntüye Watershed yönteminin uygulanması **(a)** Termal görüntü **(b)** Watershed segmantasyon sonucu

Şekil 6.2.b'de verilen Watershed segmantasyon sonucu kullanılarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi tespit edildikten sonra, ray yüzeyi izlenerek oluşan arızalar tespit edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan görüntünün boyutu 240×320 pikseldir. Tespit edilen ray yüzeyinin boyutu ise 30×320 pikseldir. Ray yüzeyi görüntüsünde durum izleme ve arıza tespiti yapmak için özellik çıkarımı yapılmıştır. 30×320 boyutundaki ray yüzeyi görüntüsünün her bir sütunu için satır değerlerinin ortalaması denklem 6.1'de ki gibi hesaplanmaktadır.

$$ozellik_dizisi(j) = \left(\sum_{i=1}^{30} image(i, j) \right) / 30, \qquad j = 1,2,3,\ldots,320 \tag{6.1}$$

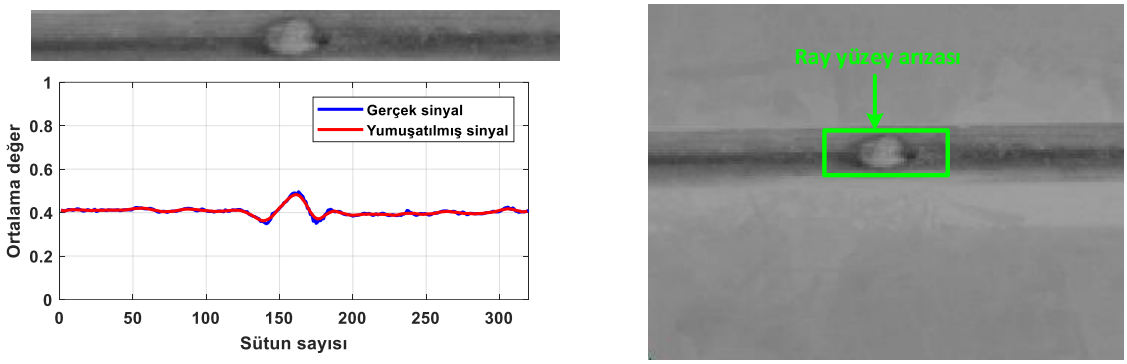
Böylece 1×320 boyutunda bir özellik dizisi elde edilmektedir. Bu özellik dizisinin değerleri denklem 6.2'de ki gibi 0-1 arasına normalize edilmektedir.

$$gercek_\sin yal(j) = ozelik_dizisi(j) / 255 \qquad j = 1,2,3,\ldots,320 \tag{6.2}$$

Normalize edilen özellik dizisi gerçek sinyal olarak adlandırılmaktadır. Gerçek sinyal denklem 6.3' de ki gibi yumuşatılmaktadır.

$$yumusatilmis_\sin yal(j) = \left(\sum_{j=j-2}^{j+2} gercek_\sin yal(j) \right) / 5 \qquad j = 3,\ldots,318 \tag{6.3}$$

Şekil 6.2.a'da verilen termal görüntü için ray yüzey tespiti ve ray yüzey izleme sonuçları Şekil 6.3'te verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 6.3. Örnek görüntü üzerinde ray tespiti ve durum izleme **(a)** Ray yüzeyi görüntüsünden gerçek ve yumuşatılmış sinyalin elde edilmesi **(b)** Ray yüzey durum izleme ve arıza tespiti

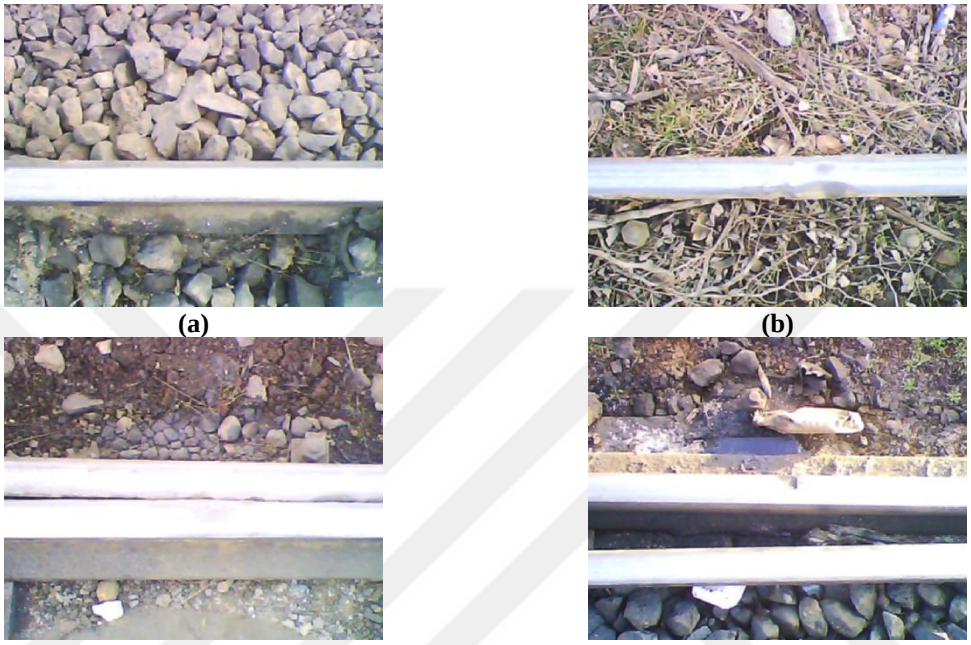
6.1.2. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, demiryolu hattında termal kamera kullanılarak görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler MATLAB ortamında geliştirilen yöntem ile birlikte kullanılarak sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada, önerilen yöntem Intel i5 işlemcili 2.00 GHz hızında 8 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda test edilmiştir. Termal görüntülerin alınması için NEC F30W model termal kamera kullanılmıştır. Bu termal kameranın temel özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

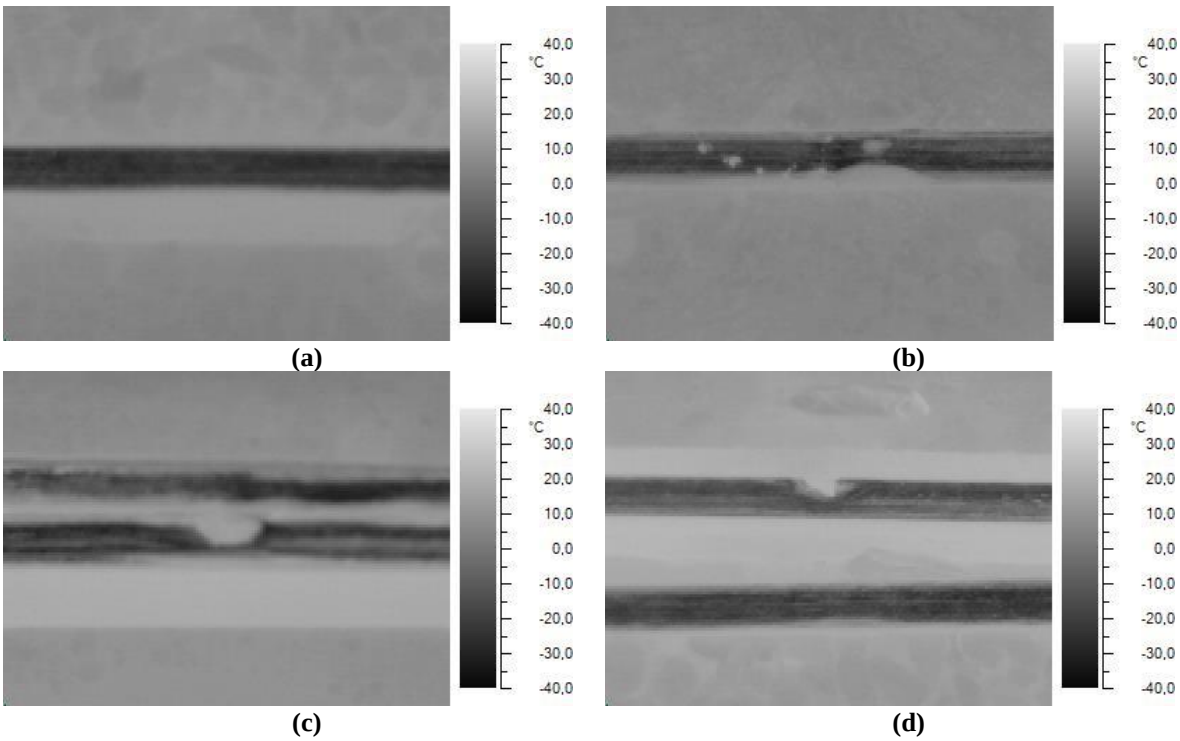
Tablo 6.1. Bu çalışmada kullanılan termal kameranın özellikleri

TEKNİK ÖZELLİKLER		**F30W**
Performans	**Ölçüm Aralığı**	-20°C ile 350°C
	Çözünürlük	0.2°C(30°C de) 0.1°C(S/N İyileştirme 30°C de)
	Termal Görüntü Piksel	160×120 Piksel
	Spektral Aralık	8-13µm
	Görüntü yenileme Hızı	8.5Hz
	Görüş Alanı	28° × 21°
	Spektral Çözünürlük	3.1mrad
Ölçüm Fonksiyonları	**Görünür Fotoğraf Çekme**	1.3 Mega Piksel
	Spotmetre	Merkez, Max/Min. Hareketli, ΔT
	Renk Paletleri	Rainbow, iris, brightness

Bu çalışmada kullanılan termal kamera aynı anda hem normal görüntü hem de termal görüntü alabilmektedir. Bu çalışmada dört adet görüntü kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan normal görüntüler Şekil 6.4'te, termal görüntüler ise Şekil 6.5'te verilmiştir.

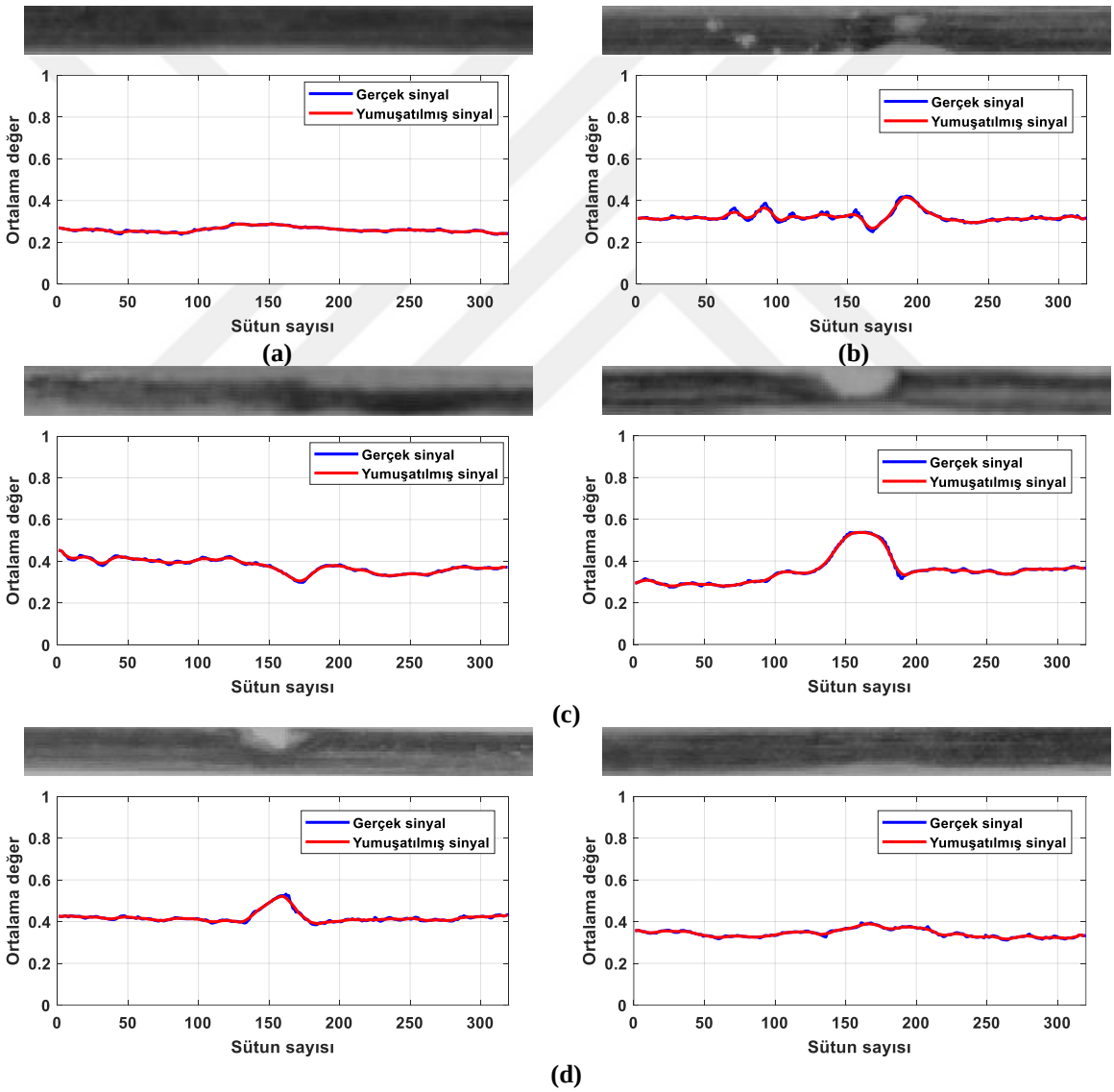


Şekil 6.4. Kameradan alınan normal görüntüler



Şekil 6.5. Kameradan alınan termal görüntüler

Şekil 6.5'da verilen termal görüntülerde siyah pikseller -40°, beyaz pikseller ise +40° ile ifade edilmektedir. Şekil 6.5.a'da sağlam ray görüntü, Şekil 6.5.b'de arızalı ray görüntüsü vardır. Şekil 6.5.c ve Şekil 6.5.d'de ki görüntüler makas geçiş bölgesinde alınmıştır. Bu görüntülerde iki ray vardır. Şekil 6.5'deki görüntüler üzerinde Watershed segmantasyon yöntemi uygulanarak Şekil 6.6'daki gibi ray yüzeyleri tespit edilmiştir. Tespit edilen ray yüzeyleri görüntüsü üzerinden özellik çıkarımı yapılarak ray durum izleme ve arıza tespiti yapılmıştır.



Şekil 6.6. Ray yüzey durum izleme ve arıza tespiti **(a)** Şekil 6.5.a'da ki görüntünün sonuçları **(b)** Şekil 6.5.b'de ki görüntünün sonuçları **(c)** Şekil 6.5.c'de ki görüntünün iki ray için sonuçları **(d)** Şekil 6.5.d'de ki görüntünün iki ray için sonuçları

Şekil 6.6'da görüldüğü üzere önerilen yöntemde makas geçişlerinde bulunan iki ray hattı içinde ray yüzeyi tespit edilmektedir. Şekil 6.6.a'daki ray yüzey görüntüsünün sağlam olduğu grafikte de görülmektedir. Şekil 6.6.b'deki ray yüzeyinde arıza olduğu grafikte görülmektedir. Şekil 6.6.c'de ana ray yüzeyi sağlam iken komşu ray yüzeyi arızalıdır. Şekil 6.6.d'de ana ray yüzeyi arızalı iken komşu ray yüzeyi görüntüsü sağlamdır. 1 frame görüntüden sonuçların elde edilmesi yaklaşık 105 ms'dir. Önerilen yöntem 500 adet görüntü için çalıştırılmış ve 473 görüntüde başarılı bir şekilde ray yüzeyi tespit edilmiştir. Önerilen yöntemin başarı oranı %94.6 olarak hesaplanmıştır.

6.2. Demiryollarında Kestirimci Bakım için Karmaşık Bulanık Sistem Tabanlı Termografi Yaklaşımının Geliştirilmesi

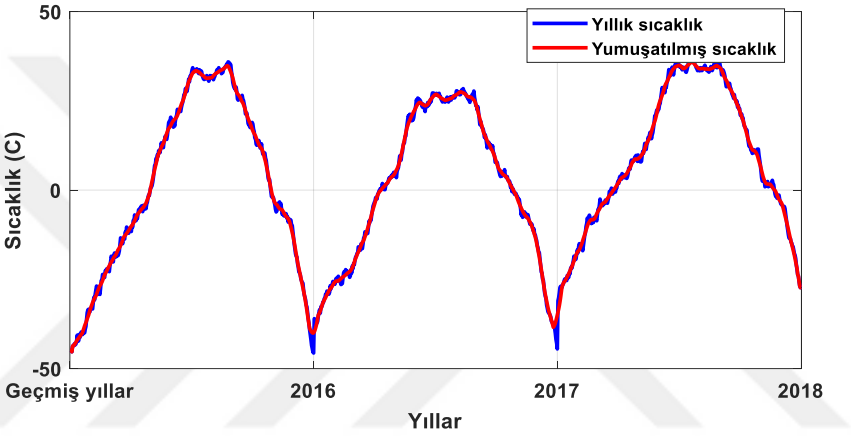
Demiryolu ulaşımı, tüm dünyada yaygın olarak kullanılan önemli bir ulaşım türüdür. Hem yolcu hem de kargo taşımacılığında düşük maliyetlidir. Elektrikli demiryolu araçlarının geliştirilmesiyle birlikte demiryolu araçları daha da popüler hale gelmiştir.

Bu çalışmada, elektrikli demiryollarında kestirimci bakım için Karmaşık bulanık sistem tabanlı bir termografi yaklaşımı önerilmektedir. Ray yüzeylerinden termal kamera ile alınan görüntüler kullanılmıştır. Bu çalışmanın temel katkısı, raylı sistemlerdeki kestirimci bakım yöntemleri mevsim koşullarına, çevre şartlarına, gün ışığına ve trenin hızı gibi özellikle periyodik etkilere bağlı olduğundan karmaşık bulanık yaklaşımının kullanılmasını gerektirmektedir. Çünkü literatür açısından bu özgün bir geliştirmedir. Literatürde, bazı çalışmalar olmakla beraber raylı sistemlerde termal görüntü işleme kullanılan gerçek zamanlı ve makul hızlarda etkili olan bir yöntem verilmemiştir. Bu özgün yaklaşımları doğrulamak için deneysel veriler üzerinden yöntem uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar önerilen hem karmaşık bulanık sistemin kullanım farklılığını ve performansını hem de termal görüntülerin işlenmesinden elde edilen performansı ortaya koymuştur.

6.2.1. Önerilen Yöntem

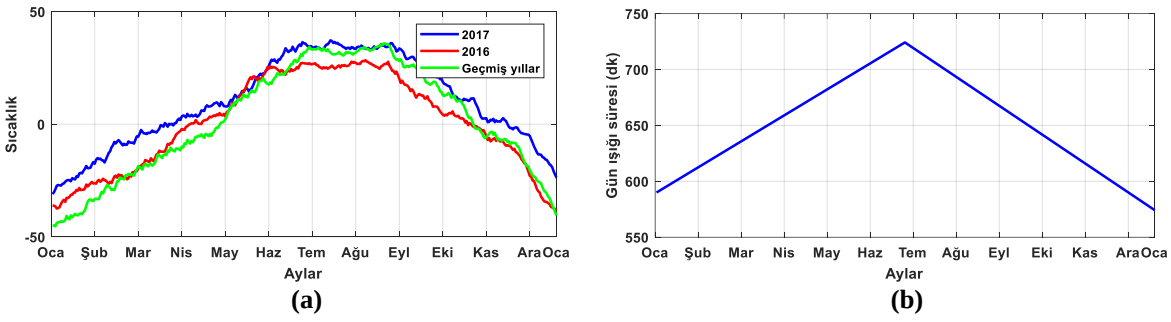
Bu çalışmada durum izleme ve arıza tespiti için termal görüntülerden elde edilen özellikler karmaşık bulanık sistem ile birlikte kullanılmaktadır. Karmaşık bulanık sistemin

kullanılmasındaki amaç termal görüntülerden elde edilen özelliklerin mevsim koşulları ile ilişkilendirilmesidir. Böylece daha başarılı bir şekilde durum izleme ve arıza tespiti yapılması planlanmıştır. Bu çalışmada ray hattı durum izleme için iki girişli bir çıkışlı karmaşık bulanık sistem geliştirilmiştir. Karmaşık bulanık sistemde birinci üyelik fonksiyonu yıllık sıcaklık değişimi, ikinci üyelik fonksiyonu ise yıllık gün ışığı süresidir. Birinci giriş üyelik fonksiyonunun oluşturulması için öncelikle bir ülkeye ait yıllık tahmini sıcaklık grafiği oluşturulmuştur. Tahmini verilerle oluşturulan yıllık sıcaklık grafiği Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Bir ülkeye ait tahmini verilerle oluşturulan yıllık sıcaklık grafiği

Şekil 6.7'de 2017, 2016 ve geçmiş yıllardan elde edilen üç yıllık sıcaklık grafiği verilmiştir. Bu grafik Türkiye'de ki hava sıcaklık ölçüleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Üç yıllık tahmini sıcaklık verileri her biri bir periyot oluşturacak şekilde Şekil 6.8.a'da verilmiştir. Karmaşık bulanık sistemin ikinci üyelik fonksiyonu olan yıllık gün ışığı grafiği Şekil 6.8.b'de verilmiştir.



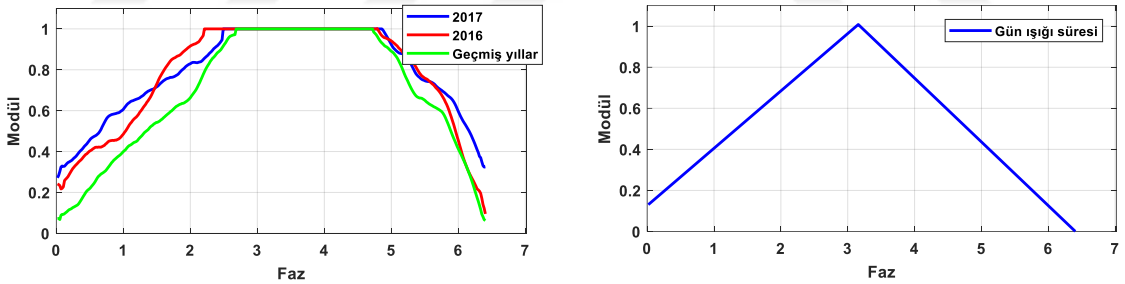
Şekil 6.8. Giriş üyelik fonksiyonları için kullanılan yıllık tahmini sıcaklık ve gün ışığı grafiği **(a)** Üç yıllık tahmini sıcaklık grafiği **(b)** Yıllık gün ışığı grafiği

Şekil 6.8'de verilen grafiklerin karmaşık bulanık sistemin giriş üyelik fonksiyonları olarak kullanılabilmesi için denklem 6.4 kullanılarak sıcaklık grafiği, denklem 6.5 kullanılarak gün ışığı grafiği karmaşık düzleme dönüştürülmektedir.

$$r(\omega)=\begin{cases}\dfrac{\omega}{2\pi/3}, & \omega\in\left[0,\ \dfrac{2\pi}{3}\right]\\ 1.0, & \omega\in\left[\dfrac{2\pi}{3},\ \dfrac{3\pi}{2}\right]\\ \dfrac{\omega-2\pi}{3\pi/2-2\pi}, & \omega\in\left[\dfrac{3\pi}{2},\ 2\pi\right]\end{cases} \qquad \textbf{(6.4)}$$

$$r(\omega)=\begin{cases}\dfrac{\omega}{\pi}, & \omega\in[0,\ \pi]\\ \dfrac{\omega-2\pi}{-\pi}, & \omega\in[\pi,\ 2\pi]\end{cases} \qquad \textbf{(6.5)}$$

Denklem 6.4 kullanılarak Şekil 6.9.a'da verilen karmaşık sıcaklık üyelik fonksiyonu, denklem 6.5 kullanılarak Şekil 6.9.b'de verilen gün ışığı Karmaşık üyelik fonksiyonu elde edilmiştir.



(a) **(b)**

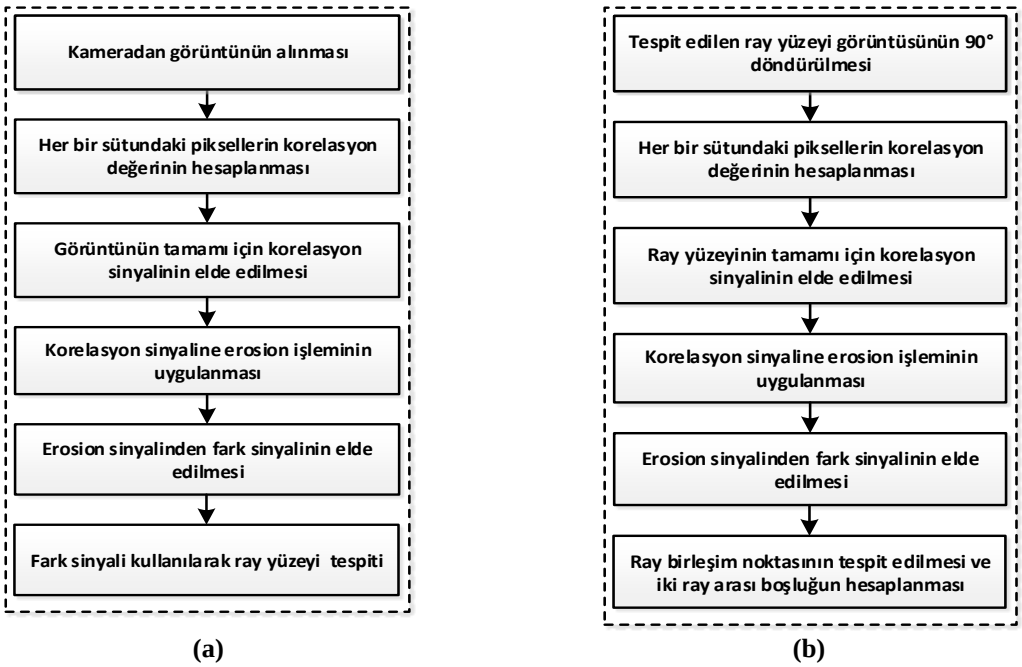
Şekil 6.9. Karmaşık giriş üyelik fonksiyonları **(a)** Karmaşık sıcaklık üyelik fonksiyonu **(b)** Karmaşık gün ışığı üyelik fonksiyonu

Şekil 6.9'da verilen Karmaşık giriş üyelik fonksiyonlarında modül 0 ile 1 aralığında, faz 0 ile 2π aralığında sınırlandırılmıştır. Karmaşık bulanık sistemler için normal şartlarda faz değerinin belirli bir sınırı yoktur. Bu çalışmada faz değerinin 2π ile sınırlandırılmasının nedeni hesaplama işlemlerinin basitleştirilmesidir. Genellikle, literatürde ki çalışmalarda da faz değeri sınırlandırılarak kullanılmıştır. Şekil 6.9'da verilen giriş üyelik fonksiyonlarına ait aylık değerler, modül ve faz değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Karmaşık giriş üyelik fonksiyonlarına ait aylık sıcaklık, gün ışığı, modül ve faz değerleri

Aylar	Yıllık sıcaklık (C) (2017)	Yumuşatılmış sıcaklık (C) (2017)	Yıllık Gün Işığı (dk)	Modül	Faz (π)
Ocak	-30.5	-30	590	0	0
Şubat	-16.7	-17.3	611.7	0.24	0.16
Mart	-6.8	-5.9	634.2	0.49	0.33
Nisan	1.8	1.8	656.7	0.75	0.5
Mayıs	8.3	8.4	679.2	1	0.66
Haziran	21.7	22.2	701.7	1	0.83
Temmuz	35.9	34.7	724.2	1	1
Ağustos	33.4	34.2	699.2	1	1.16
Eylül	34.3	34.6	674.2	1	1.33
Ekim	17.9	18.2	640.9	1	1.5
Kasım	1.1	1.5	615.9	0.66	1.66
Aralık	-21.6	-23.5	590.9	0.34	1.83
Ocak	-30.5	-30	590	0	2

Önerilen yöntemde termal kamera kullanılarak demiryolu ray hattı görüntüleri elde edilmektedir. Ray hattı görüntüsü üzerinde öncelikle ray yüzeyi tespit edilmektedir. Elde edilen ray yüzeyi kullanılarak ray birleşim noktaları tespit edilmektedir. Ray birleşim noktasındaki iki ray arası açıklık karmaşık bulanık yöntemi ile incelenmektedir. Bu çalışmada önerilen ray yüzey tespiti yöntemi ve ray birleşim noktası tespit yönteminin akış şeması Şekil 6.10'da verilmiştir.

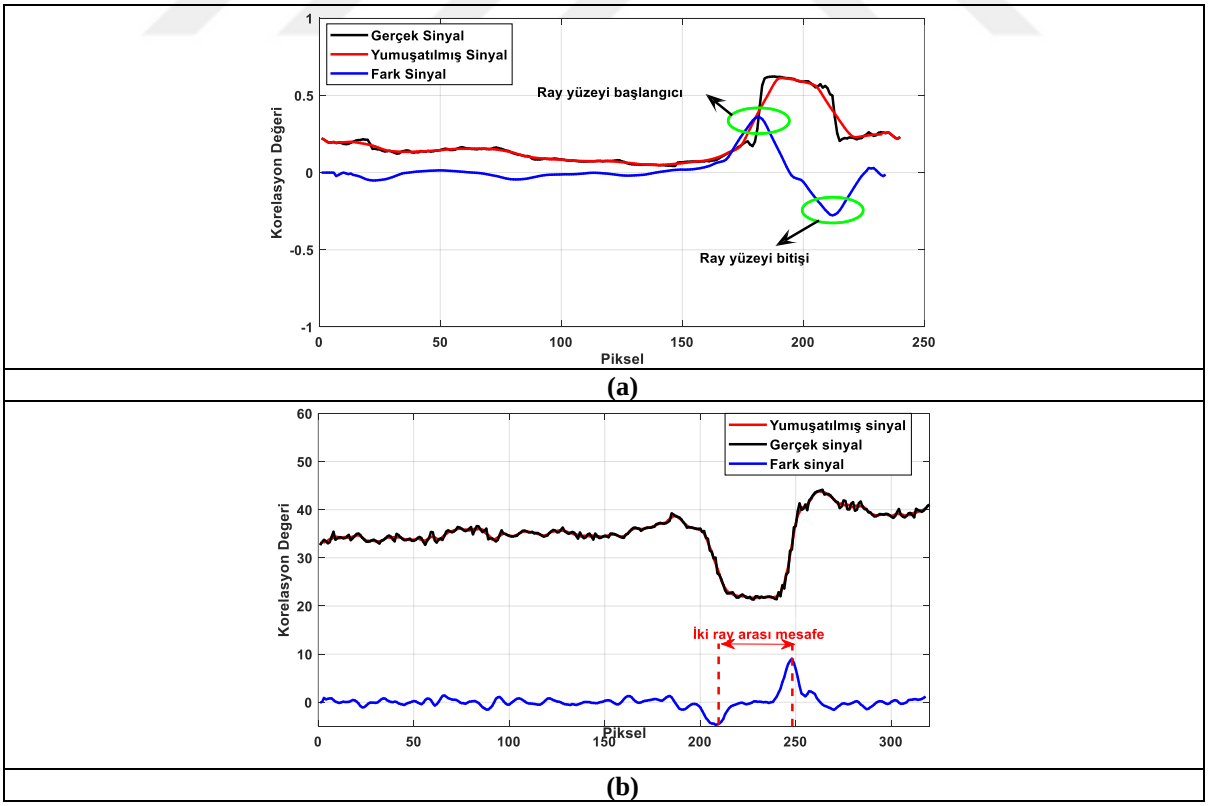


Şekil 6.10. Önerilen ray yüzey tespiti yöntemi ve ray birleşim noktası tespit yönteminin akış şeması **(a)** Ray yüzey tespiti **(b)** Ray birleşim noktası tespiti

Bu çalışmada termal görüntü üzerinden ray yüzey tespiti ve ray birleşim noktası tespiti için korelasyon tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Bir görüntüden öznitelik dizisi oluşturulurken termal görüntüdeki her bir sütuna ait tüm satırlar kullanılarak o sütun için korelasyon değeri hesaplanmaktadır. Korelasyon görüntü üzerindeki tekrarlı yapıları inceleyen bir yöntemdir [105, 109, 181]. Korelasyon değerinin hesaplanması denklem 5.1'de verilmiştir. Korelasyon işlemi görüntü üzerine uygulanarak öznitelik sinyali elde edilmiştir. Öznitelik sinyalinde gürültülerin yok edilmesi ve sinyalin daha da düzenlenmesi için yumuşatma işlemi uygulanmaktadır. Yumuşatma işlemi denklem 5.2'de verilmiştir.

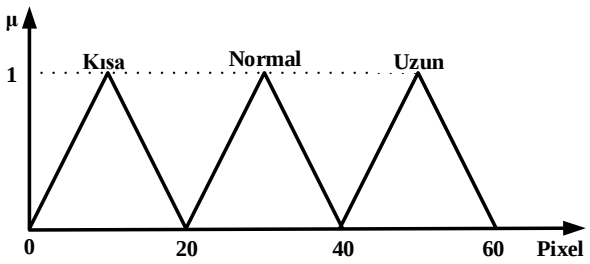
Yumuşatma işleminin ardından ray yüzey ve ray birleşim noktası tespiti için fark sinyali elde edilmektedir. Fark sinyali elde edilirken denklem 5.3 kullanılmıştır.

Fark sinyali elde edildikten sonra, sinyalde pozitif yönde oluşan tepe noktaları ray yüzeyi başlangıcı negatif yönde oluşan tepe noktası ise ray yüzeyi bitişi olarak adlandırılmaktadır. Örnek bir görüntüden elde edilen öznitelik sinyali, yumuşatılmış sinyal ve fark sinyali Şekil 6.11.a'da, ray birleşim noktasının hesaplanması Şekil 6.11.b'de verilmiştir.



Şekil 6.11. Örnek bir görüntüde ray yüzeyinin tespit edilmesi ve iki ray arası mesafenin ölçülmesi

Önerilen yöntemde iki ray arasındaki birleşim noktası tespit edilerek raylar arasındaki mesafe izlenmektedir. İki ray arasındaki mesafenin normal olup olmadığını ölçmek için Karmaşık giriş üyelik fonksiyonları ve çıkış üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu yöntem için önerilen çıkış üyelik fonksiyonu Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12. İki ray arası mesafenin izlenmesi için önerilen çıkış üyelik fonksiyonu

Şekil 6.12'de verilen çıkış üyelik fonksiyonu, Karmaşık giriş üyelik fonksiyonları ile birlikte kullanılarak çevre şartlarına göre iki ray arsındaki mesafe tahmin edilmektedir. Bu işlem için geliştirilen kural tablosu Tablo 6.3'de verilmiştir.

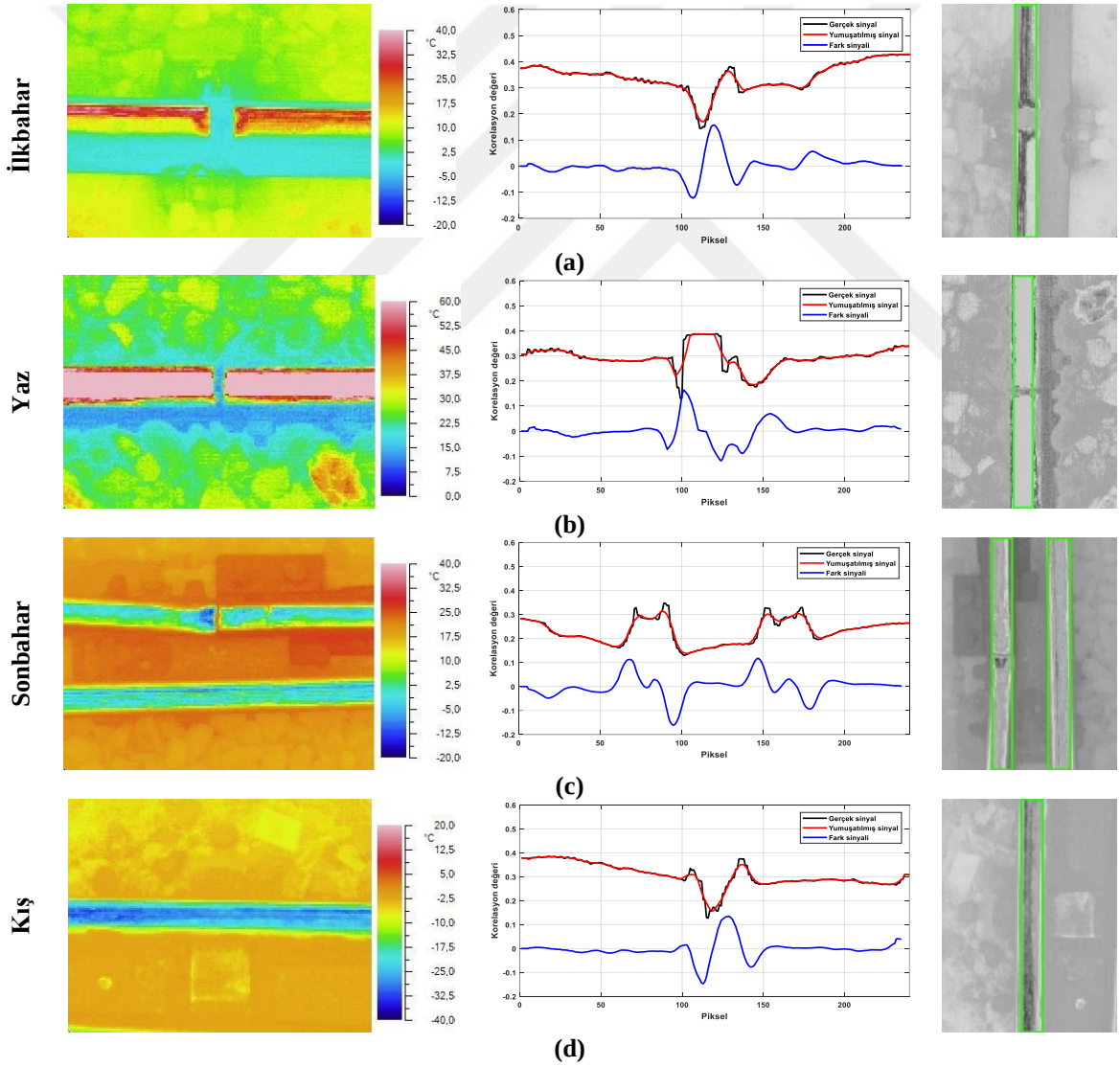
Tablo 6.3. Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu

Gün ışığı / Sıcaklık	$\omega \in \left[0, \ \frac{\pi}{2}\right]$	$\omega \in \left[\frac{\pi}{2}, \ \frac{3\pi}{2}\right]$	$\omega \in \left[\frac{3\pi}{2}, \ 2\pi\right]$
$\omega \in \left[0, \ \frac{\pi}{2}\right]$	Uzun	Normal	Uzun
$\omega \in \left[\frac{\pi}{2}, \ \pi\right]$	Normal	Kısa	Normal
$\omega \in \left[\pi, \ \frac{3\pi}{2}\right]$	Normal	Kısa	Normal
$\omega \in \left[\frac{3\pi}{2}, \ 2\pi\right]$	Uzun	Normal	Uzun

Tablo 6.3'teki kural tablosu karmaşık bulanık girişleri olan yıllık sıcaklık ve gün ışığı grafiklerine göre oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan sıcaklık ve gün ışığına ait üyelik fonksiyonları başka ülkeler için farklılık gösterebilir. Çalışmanın uygulanacağı ülkenin mevsim koşulları dikkate alınarak Karmaşık üyelik fonksiyonları güncellenmelidir.

6.2.2. Deneysel Sonuçlar

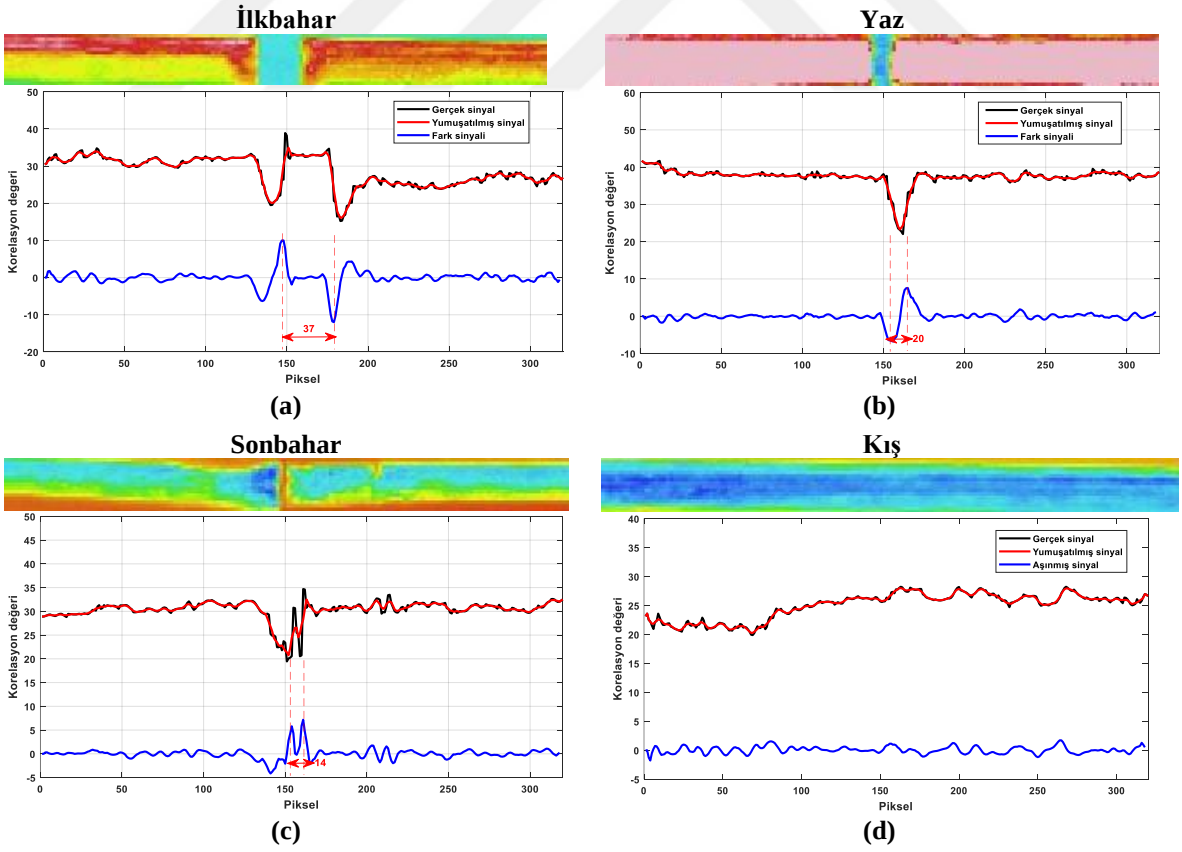
Bu çalışmada, demiryolu hattına ait farklı zamanlarda, farklı mevsim şartlarında termal kamera kullanılarak görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler MATLAB ortamında geliştirilen yöntem ile birlikte kullanılarak sonuçlar elde edilmektedir. Termal görüntülerin alınması için NEC F30W model termal kamera kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen termografi tabanlı yöntemin doğruluğu için ray hattı sistemine ait termal görüntüler kullanılmıştır. Bu termal görüntülerde elde edilen sonuçlar karmaşık bulanık sistem ile ilişkilendirilerek durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır.



Şekil 6.13. Farklı mevsim şartlarında alınan termal görüntüler ve ray yüzey tespiti **(a)** İlkbahar **(b)** Yaz **(c)** Sonbahar **(d)** Kış

Termal görüntüler üzerinde geliştirilen korelasyon yöntemi ile termal görüntü sinyale dönüştürülmektedir. Sinyal üzerinde işlemler yapılarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinde ray birleşim noktası tespit edilerek iki ray arasındaki mesafe ölçülmektedir. Daha sonra karmaşık bulanık sonucunda mevsim şartlarına göre tahmin edilen iki ray arası mesafe ile termal görüntüden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Şekil 6.13'de farklı mevsim şartlarında alınan termal görüntülerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Şekil 6.13'de göründüğü üzere farklı mevsim şartlarında alınan termal görüntüler üzerinde korelasyon sinyalleri elde edilerek ray yüzeyleri tespit edilmiştir. Şekil 6.13.c'de makas geçiş noktasında alınan bir görüntü kullanılmıştır. Bu görüntü üzerinde önerilen yöntem iki ray hattı da başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Tespit edilen ray yüzeyi üzerinde tekrar korelasyon sinyali uygulanarak ray birleşim noktası tespit edilmektedir. Şekil 6.14'da farklı mevsim şartlarında elde edilen termal ray yüzeyi görüntülerinden ray birleşim noktasının tespiti verilmiştir.



Şekil 6.14. Farklı mevsim şartlarında ray birleşim noktasının tespiti ve iki ray arası mesafenin ölçülmesi **(a)** İlkbahar **(b)** Yaz **(c)** Sonbahar **(d)** Kış

Şekil 6.14'da ray birleşim noktalarının tespit edilmesinden sonra iki ray arası mesafe ölçülmektedir. Ölçülen mesafeler karmaşık bulanık sistem sonucu ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmalar ve sonuçları Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4. Örnek ray görüntüleri ile karmaşık bulanık sonucunun incelenmesi

Mevsim	Sıcaklık (Geçmiş yıllar)	Sıcaklık (2016)	Sıcaklık (2017)	Gün ışığı	Tahmini iki ray arası mesafe (Piksel)	Gerçek iki ray arası mesafe (Piksel)	Durum
Kış	$0{,}22e^{j.0{,}16}$	$0{,}4e^{j.0{,}16}$	$0{,}46e^{j.0{,}16}$	$0{,}27e^{j.0{,}16}$	46.1	-	-
İlkbahar	$0{,}71e^{j.0{,}65}$	$0{,}93e^{j.0{,}65}$	$0{,}93e^{j.0{,}65}$	$0{,}71e^{j.0{,}65}$	18.7	37	Uzun
Yaz	$1e^{j.1{,}15}$	$1e^{j.1{,}15}$	$1e^{j.1{,}15}$	$0{,}84e^{j.1{,}15}$	16.3	20	Normal
Sonbahar	$0{,}73e^{j.1{,}64}$	$0{,}85e^{j.1{,}64}$	$0{,}85e^{j.1{,}64}$	$0{,}35e^{j.1{,}64}$	26.4	14	Kısa

Tablo 6.4'te örnek görüntüler için karmaşık bulanık giriş değerleri ve tahmin sonuçları verilmiştir. Tahmini sonuçlar elde edilirken karmaşık bulanık üyelik değerlerinin faz kısımları ihmal edilmiştir. Yıllık sıcaklık değişimi son üç periyota göre hesaplanmıştır. Yıllık sıcaklık değeri karmaşık bulanık sistemin giriş değeri olarak seçilirken, o anki üç periyottan en büyük değere sahip olan karmaşık değer giriş olarak kullanılmıştır. Kurul tablosu sonucunda bulunan mevsim şartlarına göre iki ray arasındaki ideal mesafe piksel cinsinden tahmin edilir. Tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki fark arızanın boyutunu vermektedir. Tablo 6.4'te ilkbahar ayında alınan örnek değer için tahmini değer 18.7 piksel iken gerçek değer 37 piksel olarak hesaplanmıştır. Bu şartlara göre iki ray arası mesafenin normalden uzun olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, soğuk havalarda ray hattında büzüşme olduğunda iki ray arası mesafenin daha da artacağı ön görülmektedir. İki ray arası mesafenin normalden fazla olması durumunda ray mantarının ezilmesi, raylarda çatlaklar oluşması gibi birçok arızaya neden olmaktadır. Ayrıca sonbahar ayında alınan örnekte ise gerçek değer tahmini değerden küçüktür. Bu şartlara göre iki ray arası mesafe normalden kısadır. Bu sonuca göre rayın genleşme payının küçük olduğu görülmektedir. Bu durumda, sıcak havalarda genleşme olduğu zaman ray hattının yapısının bozulabileceği ön görülmektedir.

6.3. Demiryollarında Termal Görüntüler Kullanılarak Karmaşık Bulanık Otomata Tabanlı Arıza Tespit Yöntemi

Demiryolu ulaşımı için en önemli bileşenlerden biri ray hattı ve bileşenleridir. Ray hattı ve bileşenlerinde oluşabilecek arızalar büyük kazalara ve maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada ray yüzey arızalarının tespit edilebilmesi için karmaşık bulanık otomata tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Ray hattından alınan termal görüntüler kullanılarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinde özellik çıkarımı yapılmakta ve elde edilen sonuçlar karmaşık bulanık otomata sistemin giriş değerleri olarak kullanılmaktadır. Karmaşık bulanık otomata çıkışında elde edilen çıkarsamalar ile ray yüzeyinde durum izleme yapılmaktadır. Önerilen karmaşık bulanık otomata çıkışında sağlam ray, ray birleşme noktası ve arızalı ray olmak üzere üç farklı durum oluşmaktadır. Önerilen yöntemde, ray birleşme noktası ile arızalı ray yüzeyi arasındaki farkı algılayabilmesi çalışmanın özgün olduğunu göstermiştir. Ayrıca normal görüntüler yerine termal görüntülerin kullanılması yöntemin başarısını arttırmıştır.

6.3.1. Önerilen Yöntem

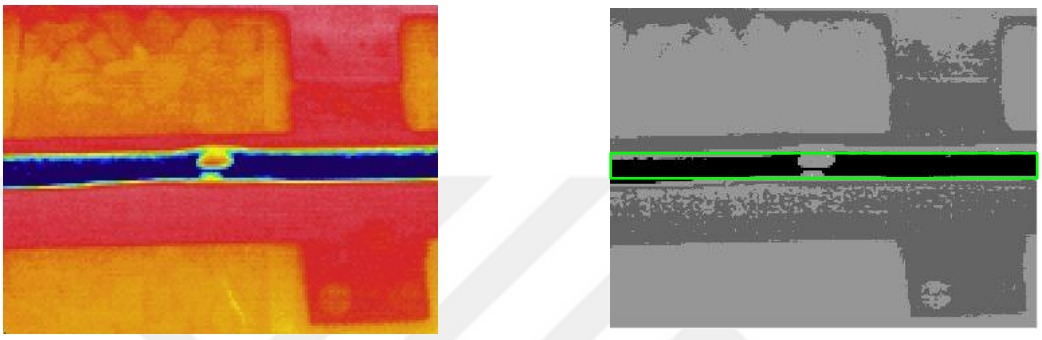
Bu çalışmada, 240 × 320 piksel boyutunda termal görüntüler kullanılarak yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, görüntü ve sinyal işleme adımı ve karmaşık bulanık otomata adımı olmak üzere iki ana adımdan oluşmaktadır. Görüntü ve sinyal işleme ile özelik çıkarımı adımında geliştirilen yöntemin akış şeması Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.15. Önerilen görüntü ve sinyal işleme akış şeması

Önerilen yöntem genel olarak iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda alınan termal görüntüler üzerinde görüntü işleme yöntemleri kullanılarak arka plan çıkarımı

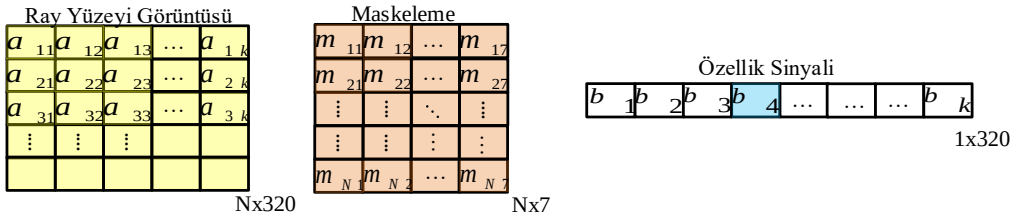
yapılmaktadır. Arka plan çıkarımı yapılırken Otsu yöntemi kullanılarak 240×320 piksel boyutunda ana görüntü segmantasyon yapılmıştır. Segmantasyon sonucuna ana görüntü üzerinde ray yüzeyi tespit edilerek N×320 piksel boyutunda ray yüzey görüntüsü elde edilmektedir. *N* tespit edilen ray yüzeyinin satır piksel sayısıdır ve değeri 20-30 piksel arasındadır. Örnek bir görüntü üzerinde Otsu yöntemi ile ray yüzeyinin tespit edilmesi Şekil 6.16'da verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 6.16. Otsu yöntemi ile örnek görüntü üzerinde ray yüzey tespiti **(a)** Termal görüntü **(b)** Otsu yöntemi sonucu elde edilen görüntü

Şekil 6.16'da ki gibi tespit edilen ray yüzey görüntüsünde özellik sinyalinin çıkarılması için konvolüsyon işlemi yapılmaktadır. N×320 piksel boyutundaki ray yüzey görüntüsü üzerinde, N × 7 piksel boyutundaki maskeleme matrisi kullanılarak konvolüsyon yapılmaktadır. Burada kullanılan maskeleme matrisinin bütün değerleri '1' olarak belirlenmiştir. Şekil 6.17'de ray yüzey görüntüsünden özellik sinyalinin elde edilmesi verilmiştir.

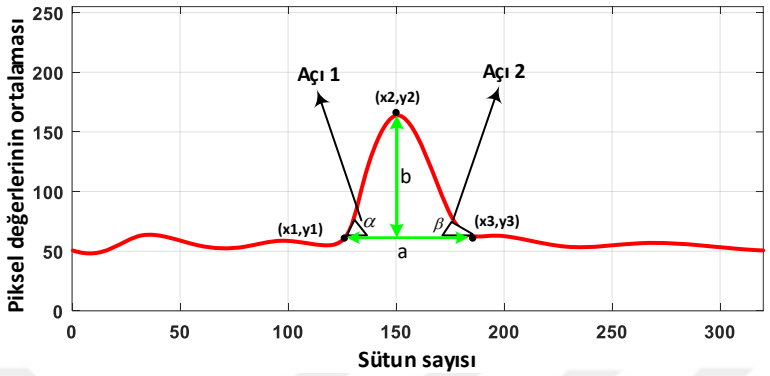


$$b_4 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[(a_{i1} * m_{i1}) + (a_{i2} * m_{i2}) + (a_{i3} * m_{i3}) + (a_{i4} * m_{i4}) + (a_{i5} * m_{i5}) + (a_{i6} * m_{i6}) + (a_{i7} * m_{i7})\right]}{(N * 7)}$$

Şekil 6.17. Ray yüzey görüntüsünden özellik sinyalinin elde edilmesi

Şekil 7.17'nin içerisinde verilen denklem kullanılarak b_4 değeri hesaplanmaktadır. Bu şekilde özellik sinyali elde edilmektedir. Özellik sinyali elde edildikten sonra sinyalin

sağlam ray yüzeyini, ray birleşme noktasını veya arızalı ray yüzey görüntüsünü temsil ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 6.18'de örnek bir özellik sinyali verilmiştir.



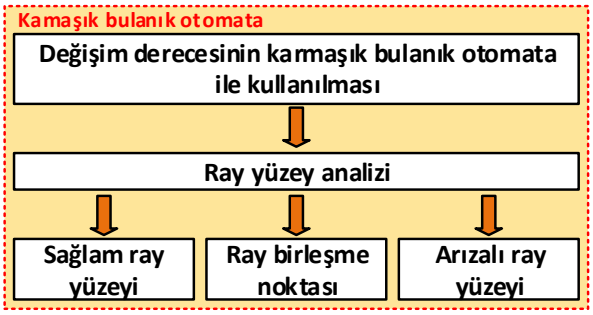
Şekil 6.18. Örnek özellik sinyali

Şekil 6.18'de örnek bir sinyal üzerinde değişim derecesinin elde edilmesi verilmiştir. Sinyal üzerinde oluşan pik noktaları ray birleşme noktası veya ray yüzey arızasını göstermektedir. Ray birleşme noktası ile ray yüzey arızasının ayırt edilebilmesi için Şekil 6.18'de gösterilen sinyalin "α" ve "β" açı değerleri hesaplanmaktadır. "α" ve "β" açılarının hesaplanması için denklem 6.6 kullanılmıştır.

$$\tan\alpha = \frac{y2 - y1}{x2 - x1}$$
$$(180 - \tan\beta) = \frac{y2 - y3}{x2 - x3} \qquad \textbf{(6.6)}$$

Şekil 6.18'de verilen özellik sinyalinde, oluşan ani değişim noktalarının açı değerleri hesaplanmaktadır. Elde edilen açı değerleri karmaşık bulanık otomatanın giriş değeri olarak uygulanmaktadır.

Görüntü ve sinyal işleme adımında, özellik sinyalinden elde edilen "α" ve "β" açıları değerleri karmaşık bulanık otomata adımında kullanılmaktadır. Önerilen karmaşık bulanık otomata akış şeması Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. Önerilen karmaşık bulanık otomata akış şeması

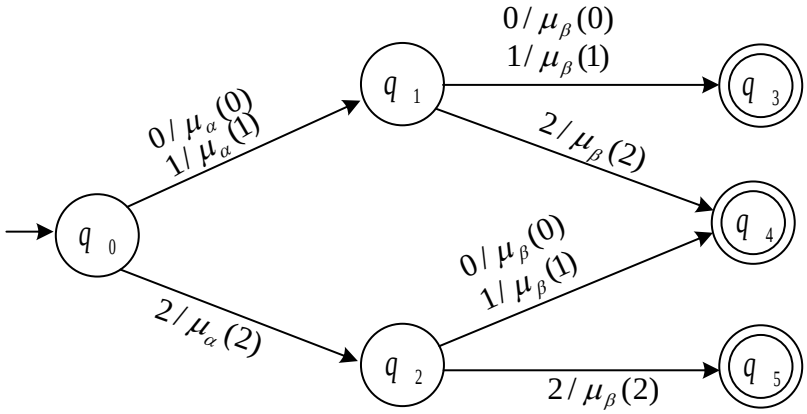
Karmaşık bulanık sistemde üyelik fonksiyonları gerçek veriler kullanılarak oluşturulabilir. Karmaşık bulanık sistemler modül ve faz olmak üzere iki bölümden oluşur. Modül bölümü geleneksel bulanık mantık ile aynıdır. Karmaşık bulanık sistemi geleneksel bulanık sistemden ayıran en önemli özelik faz bölümüdür. Karmaşık bulanık sistemler daha çok zamansal ve mekânsal periyodik durumlarda tercih edilmektedir.

Önerilen iki girişli sistemin karmaşık bulanık üyelik fonksiyonları Şekil 6.20'de verilmiştir. Bu çalışmada özellik sinyalinde elde edilebilecek açı değerleri 0 ile 90 derece arasındadır. Önerilen yöntemde kullanılacak karmaşık bulanık üyelik fonksiyonunda 0-90 derece aralığı 0-(π/2) olarak belirtilmiştir. Şekil 6.20'de verilen üyelik fonksiyonları uzman bilgisine göre oluşturulmuştur.



Şekil 6.20. Geçişler için kullanılabilecek üyelik fonksiyonları (**a)** Birinci üyelik fonksiyonu (**b)** İkinci üyelik fonksiyonu

Bu çalışmada önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.21. Önerilen karmaşık bulanık otomata yapısı

Şekil 6.21'de verilen karmaşık bulanık otomata yapısında $\mu(\alpha)$ ve $\mu(\beta)$ için "0" geçişi $\omega \in \left[0,\ \frac{\pi}{6}\right]$ aralığını, "1" geçişi $\omega \in \left[\frac{\pi}{6},\ \frac{\pi}{3}\right]$ aralığını ve "2" geçişi $\omega \in \left[\frac{\pi}{3},\ \frac{\pi}{2}\right]$ aralığını ifade etmektedir. Şekil 6.21'de "q_3" durumu sağlam ray yüzeyini, "q_4" durumu arızalı ray yüzeyini ve "q_5 ""durumu ise ray birleşme noktasını ifade etmektedir.

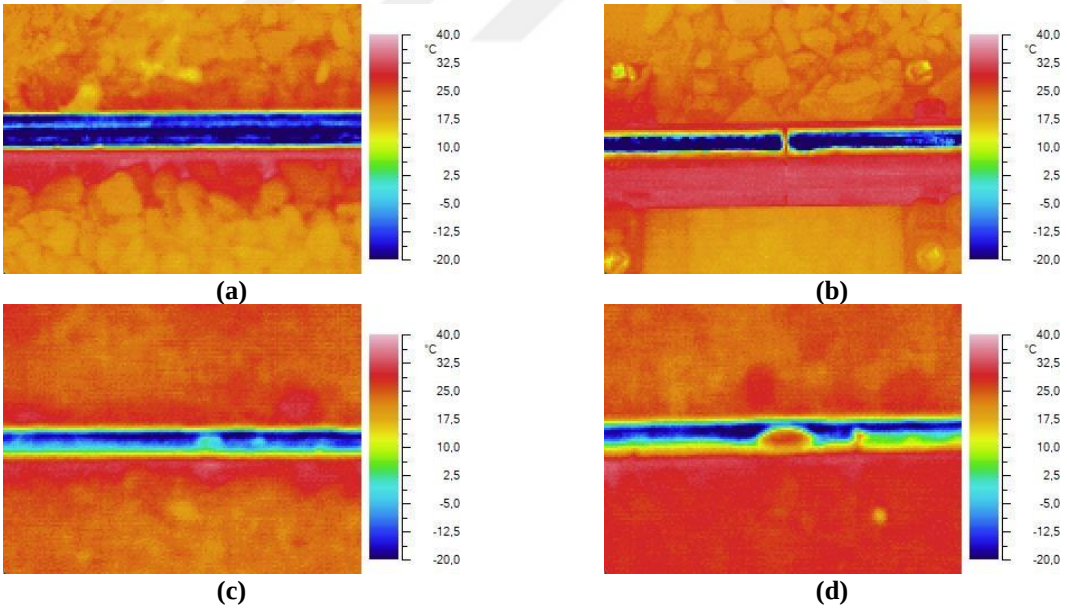
Şekil 6.21'de verilen karmaşık bulanık otomata geçiş diyagramının geçiş tablosu Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5. Önerilen karmaşık bulanık otomatanın geçiş tablosu

		Bir sonraki durum					
		q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
Mevcut durum	q_0	-	$0/\mu_\alpha(0)$ $1/\mu_\alpha(1)$	$2/\mu_\alpha(2)$	-	-	-
	q_1	-	-	-	$0/\mu_\beta(0)$ $1/\mu_\beta(1)$	$2/\mu_\beta(2)$	-
	q_2	-	-	-	-	$0/\mu_\beta(0)$ $1/\mu_\beta(1)$	$2/\mu_\beta(2)$
	q_3	-	-	-	-	-	-
	q_4	-	-	-	-	-	-
	q_5	-	-	-	-	-	-

6.3.2. Deneysel Sonuçlar

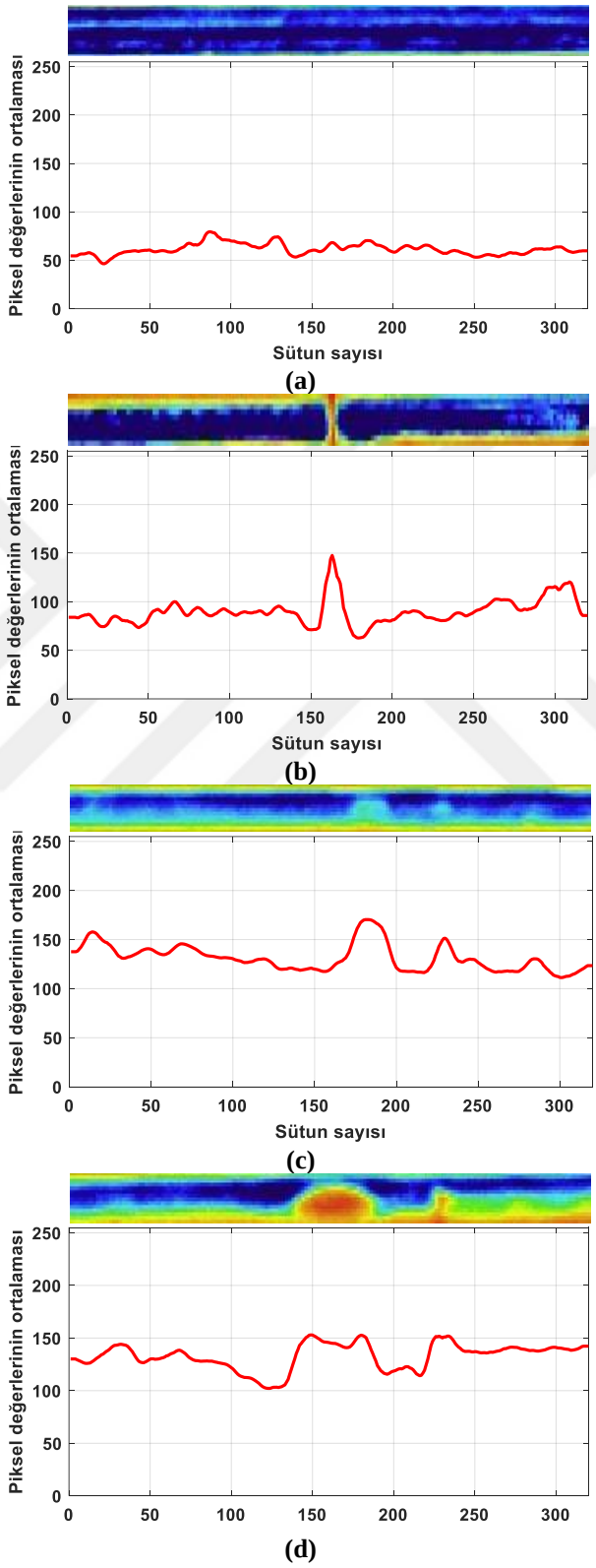
Bu çalışmada kullanılan görüntüler NEC F30W model termal kamera ile alınmıştır. Bu kameranın ölçüm aralığı -20°C ile 350°C, görüş alanı $28° \times 21°$ ve spektral aralığı 8-13µm'dir. Alınan görüntüler MATLAB ortamında geliştirilen yöntem ile birlikte kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan deneysel düzenekte kamera ray hattına dik ve 60cm uzaklıkta sabit tutularak görüntüler alınmıştır. Bu çalışmada 100 adet termal görüntü kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler Şekil 6.22'de verilmiştir. Şekil 6.22'de görüldüğü gibi farklı durumlarda alınan termal görüntüler verilmiştir. Şekil 6.22.a'da sağlam ray yüzeyine ait termal görüntü, Şekil 6.22.b'de ray birleşme noktasına ait termal görüntü, Şekil 6.22.c ve Şekil 6.22.d'de arızalı ray yüzeyine ait görüntüler verilmiştir. Alınan görüntüler -20°C ile 40°C arasındadır. Bu görüntüler üzerine Otsu yöntemi uygulanarak ray yüzeyleri tespit edilmiştir. Tespit edilen ray yüzey görüntüleri üzerinde konvolüsyon yapılarak özellik sinyali elde edilmiştir. Şekil 6.22'de verilen görüntüler için ray yüzey tespiti ve özellik sinyalleri Şekil 6.23'te verilmiştir.



Şekil 6.22. Bu çalışmada kullanılan örnek termal görüntüler **(a)** Sağlam ray yüzeyi **(b)** Ray birleşme noktası **(c)** Arızalı ray yüzeyi **(d)** Arızalı ray yüzeyi

Şekil 6.23'te verilen ray yüzey görüntülerine ait özellik sinyalleri verilmiştir. Özellik sinyallerinde oluşan değişimlerin açıları karmaşık bulanık otomata sistemine verilerek ray

yüzey analizi yapılmaktadır. Şekil 6.23'te verilen örnek özellik sinyallerin açı değerleri ve karmaşık bulanık otomata ile ray analiz sonuçları Tablo 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.23. Ray yüzey görüntüleri ve özellik sinyalleri **(a)** Sağlam ray yüzeyi **(b)** Ray birleşme noktası **(c)** Arızalı ray yüzeyi **(d)** Arızalı ray yüzeyi

Tablo 6.6. Örnek görüntüler için karmaşık bulanık otomata ile ray analiz sonuçları

Şekil 6.23	Özellik sinyali		Giriş üyelik fonksiyonu		Çıkış üyelik fonksiyonu	Durum	Ray yüzey analiz sonucu
	Açı (α)	Açı (β)	$\mu(\alpha)$	$\mu(\beta)$	μ_g		
a	0	0	0	0	0	(q_3)	Sağlam ray yüzeyi
b	74	71	$0{,}82e^{j.0{,}41}$	$0{,}78e^{j.0{,}39}$	$0{,}82e^{j.0{,}41}$	(q_5)	Ray birleşme noktası
c	54	65	$0{,}6e^{j.0{,}3}$	$0{,}72e^{j.0{,}36}$	$0{,}72e^{j.0{,}36}$	(q_4)	Arızalı ray yüzeyi
d	48	39	$0{,}53e^{j.0{,}26}$	$0{,}42e^{j.0{,}21}$	$0{,}53e^{j.0{,}26}$	(q_4)	Arızalı ray yüzeyi

Tablo 6.6'da dört görüntüden elde edilen özellik sinyalleri için karmaşık bulanık otomata sonuçları verilmiştir. Şekil 6.23.a'da verilen özellik sinyalinde bir değişim olmadığı için açı değeri "0"dır. Bu nedenle tablodaki diğer değerleri hesaplanamamıştır. Böylece "q_3" durumunda olup ray yüzeyinin sağlam olduğu görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 6.23.b'de "q_5" durumunda olup ray birleşme noktasını tespit etmiştir. Şekil 6.23.c ve Şekil 6.23.d'de "q_4" durumunda olup ray yüzeyinin arızalı olduğunu tespit etmiştir.

6.4. Bölüm Değerlendirmesi

Termal görüntü işleme tabanlı çalışmada, termal görüntü üzerinde ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzeyi tespiti için Watershed segmantasyon yöntemi kullanılmıştır. Tespit edilen ray yüzey görüntüsü üzerinde özellik çıkarımı yapılırken ray yüzey görüntüsünde her sütuna ait satır piksellerinin ortalaması alınmaktadır. Bu işlem tüm sütunlar için yapıldığında 1×320 piksel boyutunda sinyal elde edilmiştir. Bu sinyal 0 ile 1 değer aralığında normalize edilmektedir. Sinyal üzerindeki anormal değişimler arıza olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ray yüzey izleme ve arıza tespiti için termal görüntülerin kullanılması çalışmanın temel katkısıdır.

Karmaşık bulanık sistem tabanlı çalışmada, demiryolu ray hattı için yeni bir termografi yöntemi geliştirilmiştir. Termal görüntülerden elde edilen özellikler karmaşık bulanık sonucu ile karşılaştırılarak ray hattı izlenmektedir. Ortama ait yıllık sıcaklık ve yıllık gün ışığı bilgileri kullanılarak bir karmaşık bulanık sistem geliştirilmiştir. Raylı sistemler için önerilen kestirimci bakım yöntemi mevsim koşulları ve gün ışığı gibi periyodik etkilere bağlıdır. Bu nedenle karmaşık bulanık sistem, geleneksel bulanık sistemine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada karmaşık bulanık üyelik fonksiyonları karmaşık

düzlem üzerinde oluşturularak faz aralığı 2π ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca sonuçlar elde edilirken karmaşık sonuçların faz kısmı ihmal edilmiştir. Böylece önerilen kestirimci bakım yöntemi basit ve uygulanabilir bir yapıya dönüştürülmüştür. Önerilen yöntemde farklı mevsimlerde demiryolu hattına ait termal görüntüler alınarak her mevsim için sonuçlar elde edilmiştir. Karmaşık bulanık sistem ve termal görüntülerin birlikte kullanılarak önerilen yöntemin özgünlüğünü arttırmıştır.

Karmaşık bulanık otomata tabanlı yöntemde demiryolu ray hattında oluşan arızalar tespit edilmektedir. Termal kameralardan alınan kameralar üzerinde Otsu yöntemi ile ray yüzeyi tespit edilmiştir. Ray yüzeyi görüntüsü üzerinde konvolüsyon yapılarak özellik sinyali çıkarılmaktadır. Özellik sinyalindeki değişimler açı cinsinden hesaplanarak geliştirilen karmaşık bulanık otomata sistemine verilmekte ve ray yüzeyi analiz edilmektedir. Bu çalışma literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında iki avantajı vardır. Birincisi, önerilen yöntemde termal kamera kullanılarak yöntemin çevre koşullarından etkilenmemesidir. İkincisi ise karmaşık bulanık otomata tabanlı tamamen özgün yeni bir yöntemin geliştirilmesidir.

7. SONUÇLAR

Son yıllarda teknolojinin daha da gelişmesi ile birlikte demiryolu ulaşımına yapılan yatırımlar daha da artmaktadır. Demiryolu hatlarının hem periyodik bakımlarının yapılması için hem de hatlarda oluşabilecek arızaların erkenden tespiti için rayların sürekli muayene edilmesi gerekmektedir. Günümüzde demiryollarını işletmesini yapan TCDD'nin elinde sınırlı özellikte ve sınırlı sayıda ölçüm cihazı mevcuttur. Ray hattında yapılan muayene işlemleri genellikle yurt dışından kiralanan araçlarla yapılmaktadır. Bu uygulama hem önemli ölçüde maddi kayba hem de yeterli sıklıkla muayene edilememesine neden olmaktadır. Yeterli sıklıkla muayene edilememesinden dolayı demiryolu trafiğini aksatacak ve insanların yaşam kalitesini azaltacak büyük arızalar oluşabilmektedir. Ülkemizdeki demiryolu hattının uzunluğu önümüzdeki yıllarda artması planlanmaktadır. Bu bakımdan ray hattının kontrolü için gerekli durum izleme sistemlerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu tezde, yüksek hızlı kameralar kullanılarak görüntü işleme tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Görüntü işleme tabanlı yöntemler, son zamanlarda durum izleme ve arıza tespiti için kullanılan temassız bir yöntemdir. Demiryolu ölçüm aracı üzerine sabitlenen kameralar ile temassız bir şekilde durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, demiryolu rayları için gerçek zamanlı bulanık otomata ile görme tabanı arıza teşhis yaklaşımları geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar genel olarak incelendiğinde, ray bileşen tespit yöntemleri, ray yüzeyi izleme yöntemleri ve termal görüntü işleme tabanlı durum izleme yöntemleri olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.

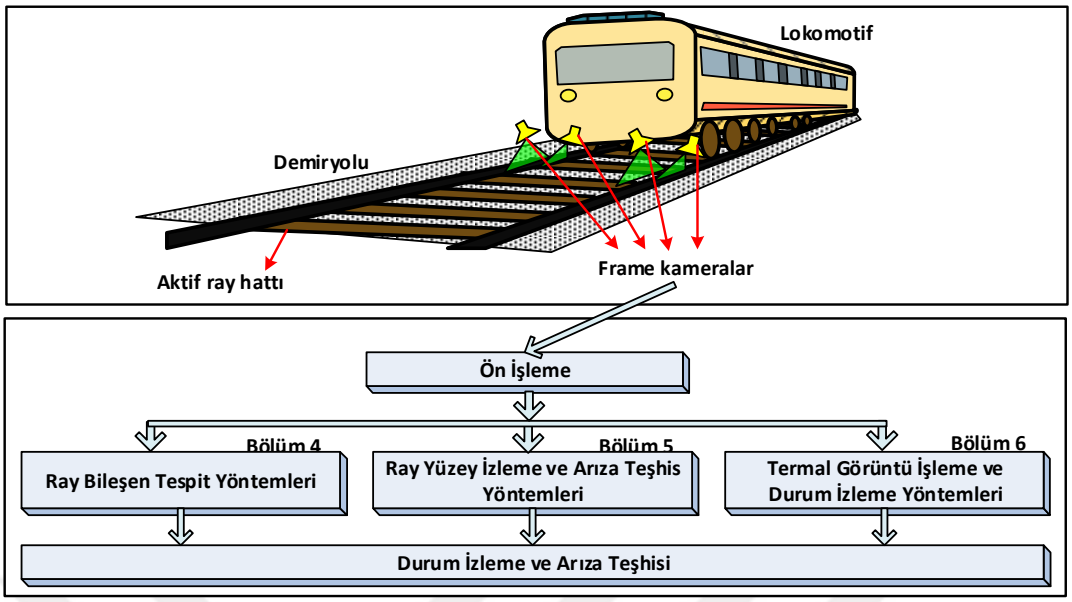
Ray bileşen tespiti için iki genel yöntem sunulmuştur. Birinci yöntem, ray bileşenlerinin tespiti ve durum izleme için karar ağacı tabanlı bir yöntemdir. Bu yöntemde temel görüntü işleme teknikleri kullanılarak ray hattı görüntülerinden özellik çıkarımı yapılmıştır. Görüntülerden çıkarılan özellikler karar ağacı yapısına verilerek travers ve ray yüzeyleri tespit edilmektedir. Önerilen yaklaşımda, bir görüntü için ray bileşen tespiti yaklaşık 164.4ms'de ray yüzey izleme ise 50ms'de yapılmaktadır. Önerilen yöntemin başarısı yaklaşık % 79 olarak hesaplanmıştır. Ray bileşen tespiti için sunulan diğer yöntem ise parçacık sürü optimizasyon tabanlıdır. Bu çalışmada da görüntü eşleştirme teknikleri kullanılarak ray yüzeyi ve bağlantı elemanları tespit edilmektedir. Tespit edilen ray yüzeyi üzerinde görüntü işleme kullanılarak durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır. Bağlantı

bileşen tespitini yaklaşık 313ms'de, ray yüzey tespitini ise yaklaşık 113ms'de yapmaktadır. Önerilen bu çalışmanın başarı oranı yaklaşık % 70 olarak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında, ray yüzey izleme ve arıza teşhisi için genel olarak iki yöntem geliştirilmiştir. Oto korelasyon tabanlı ray yüzeyi durum izleme yönteminde, görüntü işleme yerine basit sinyal işleme adımları kullanılmıştır. Görüntü üzerinde oto korelasyon uygulanarak görüntü matrisi tek boyutlu bir diziye dönüştürülmektedir. Bu dizi üzerinde temel işlemler uygulanarak ray yüzeyi tespit edilmektedir. Ray yüzey görüntüleri üzerinde durum izleme ve arıza tespiti yapılmaktadır. Ray yüzey arıza türünün tespiti yönteminde ise bulanık mantık tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu yöntemde ray yüzeylerinde oluşan arızalar tespit edilerek bu arızalara ait bazı öznitelikler elde edilmektedir. Bu öznitelikler geliştirilen bulanık mantık girişine verilerek arıza türü tespit edilmektedir. Bu yöntem için genel başarı oranı %72.05'tir.

Önerilen termal görüntü işleme ve durum izleme yöntemlerinde ise genel olarak üç yöntem sunulmuştur. Birinci yöntemde termal görüntüler üzerinde görüntü işleme yaparak ray yüzey tespiti yapılmıştır. İkinci uygulamada karmaşık bulanık sistem tabanlı ray birleşme noktaları izlenmektedir. Mevsim değişimlerinde ray hattının genleşmesi veya büzüşmesi sonucunda iki ray arasındaki mesafe izlenerek anormal durumlar tespit edilmektedir. Üçüncü uygulamada ise termal görüntüler kullanılarak karmaşık bulanık otomata tabanlı arıza tespit yöntemi sunulmuştur. Bu çalışma ray yüzey durum izleme ve arıza tespitinde karar verme mekanizması olarak karmaşık bulanık otomata geliştirilmiştir.

Önerilen yöntemlerin sonuçları değerlendirildiğinde temassız durum izleme ve arıza tespiti için birçok yenilik geliştirilmiştir. Frame kameralardan alınan görüntüler üzerinde gerçek zamanlı görüntü işleme yöntemlerinin geliştirilmiştir. Ray yüzeyi üzerindeki oluşan arızaların tespit edilmesi, arıza boyutlarının hesaplanması ve arıza türünün sınıflandırılması için yöntemler önerilmiştir. Bağlantı elemanlarının tespiti ve arıza teşhisi için görüntü işleme tabanlı gerçek zamanlı çalışmaya uygun yaklaşımlar geliştirilmiştir. Dört adet frame kameradan alınan görüntüler ilişkilendirilerek elde edilen özelliklerin birlikte kullanılmıştır. Ray yüzeyi, ray bileşenleri ve bağlantı elemanlarında oluşan arızaların bulanık otomata ve karmaşık bulanık otomata kullanılarak arıza teşhisi yapılmıştır. Dört adet kameradan alınan görüntülerin gömülü kartlar üzerinde eş zamanlı çalışabilmesi ve elde edilen sonuçların birleştirilmesi için paralel bir yapı sunulmuştur. Karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata tabanlı yöntemlerin geliştirilmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilen sistem Şekil 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Tez çalışması sonucunda elde edilen sistem

Şekil 7.1'de görüldüğü üzere tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntemler birleştirilerek temassız durum izleme sistemi elde edilmiştir. Lokomotifin üzerine yerleştirilen normal veya termal kamera ile alınan ray hattı görüntüsü üzerinde önerilen yöntemler uygulanarak durum izleme yapılmıştır. Ray hattı görüntüleri ön işleme bloğundan geçtikten sonra önerilen yöntemler kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin sonuçları kullanılarak durum izleme yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar bir durum raporu niteliği taşımıştır. Tez çalışmasında geliştirilen yöntemler; endüstriyel bilgisayarlar, yüksek hızlı frame kameralar ve frame grabber kartları kullanılarak tümleşik bir mimari üzerinde çalıştırıldığında, yaklaşık 100 km/h hızla hareket eden bir demiryolu aracı için gerçek zamanlı çalışabilmektedir.

Bu tez çalışmasının uygulamaya yönelik katkıları; önerilen yöntemler genel amaçlı olup, farklı tür arıza tespit problemlerinin yanı sıra temassız durum izleme ve anomali tespiti gibi problemlere kolaylıkla uyarlanabilir. Temassız durum izleme için önerilen özellik çıkarım yöntemleri farklı türde görüntülere de uygulanabilir. Ayrıca geliştirilen durum izleme ve arıza tespit yöntemleri endüstriyel alanlara kolaylıkla uyarlanabilir.

Tez çalışmasının bilimsel katkıları; tez süresince ortaya çıkan bilimsel yayınlar ulusal ve uluslararası konferanslarda sunularak, çalışmaların iyileştirilmesi için geri beslemeler alınmıştır. Tez metni içerisinde yer almayan makas geçiş tespiti, FGPA tabanlı durum izleme yöntemleri ve ray hattı izleme gibi çalışmalar da yapılmıştır. Geliştirilen çalışmalar bilimsel yayınlara dönüştürülerek akademik katkı sağlanmıştır. Ayrıca bulanık otomata,

karmaşık bulanık mantık ve karmaşık bulanık otomata kullanılarak uygulamaya yönelik çalışmalar yapılmış ve yöntemler geliştirilmiştir. Tez kapsamında 1 SCI dergi, 1 ulusal dergi, 4 uluslararası dergi, 8 uluslararası konferans, 2 ulusal konferans, olmak üzere toplamda 16 adet bilimsel çalışma tamamlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda, geliştirilen özgün algoritma ve yöntemlerin gömülü kartlar üzerinde gerçekleştirilmesi ve tümleşik bir yapının oluşturulması hedeflenmektedir. Bulanık otomata ve karmaşık bulanık otomata tabanlı yöntemler geliştirilerek uygulamaya yönelik çalışmaların yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Türk Demiryollarının 161 Yıllık Öyküsü, 8. Baskı, Ankara, Mart 2018.

[2] **Gonzalez Nicieza, C., Alvarez-Fernandez, M. I., Menendez-Diaz, A., Alvarez-Vigil, A. E., Ariznavarreta-Fernandez, F.,** 2008. Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks. *Engineering Failure Analysis,* 15(1), s. 90-117, 2008.

[3] **Maqsood, M., Javed, A., Majeed, N.,** 2013. A Novel Algorithm for Railway Tracks Detection using Satellite Imagery. *International Journal of Computer Applications,* s. 13-17, 2013.

[4] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** 2013. A Robust Anomaly Detection in Pantograph-Catenary System Based on Mean-Shift Tracking and Foreground Detection, *IEEE International Conference on Systems,* Man, and Cybernetics (SMC), s. 4444 – 4449, 2013.

[5] **Yaman, O.,** 2014. Pantograf-katener sistemlerinde görüntü işleme tabanlı temassız izleme yöntemlerinin geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.

[6] **Karaduman, G.,** 2013. Demir yollarında ray profil analizi için üç boyutlu görüntü işleme, Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.

[7] https://tr.railturkey.org/demiryolu-sozlugu/8/

[8]http://www.dtd.org.tr/_files/ulusal/ulascca7tc4b1rmavehaberlescca7meterimlerisocc88zlucc88gcc86u.pdf

[9] **Singh, M., Singh, S., Jaiswal, J., Hempshall, J.,** 2006. Autonomous Rail Track Inspection using Vision Based System, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety,* 56-69, 2006.

[10] **Karaduman, G., Karakose, M., Akin, E.,** 2012. Experimental fuzzy diagnosis algorithm based on image processing for rail profile measurement, *15th International Symposium MECHATRONIKA,* 1-6, 2012.

[11] **Santur, Y.,** 2018. Lazer Kameralar Kullanılarak Bilgisayar Görmesi ile Üç Boyutlu Ray Profili Arızalarının Gerçek Zamanlı Teşhisi Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.

[12] **Tastimur, C.,** 2017. Demiryollarında ray yüzeyleri, makas geçişleri ve hemzemin geçitlerin durum teşhisi için görme tabanlı yöntemlerin geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.

[13] **Cheng, Y., Liu, Z. and Huang, K.** 2017. Transient Analysis of Electric Arc Burning at Insulated Rail Joints in High-Speed Railway Stations Based on State-Space Modeling. *IEEE Transactions on Transportation Electrification,* 3(3), 750-761.

[14] **Gallou, M., Temple, B., Hardwick, C., Frost, M. and El-Hamalawi, A.,** 2018. Potential for external reinforcement of insulated rail joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* 232(3), 697-708.

[15] **El-sayed, H. M., Lotfy, M., Zohny, H. E. D. and Riad, H. S.,** 2018. A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration. *Engineering Failure Analysis,* 91, 201-215.

[16] **Beaty, P., Temple, B., Marshall, M. B. and Lewis, R.** 2016. Experimental modelling of lipping in insulated rail joints and investigation of rail head material improvements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* 230(4), 1375-1387.

[17] **Sharma, S., Cui, Y., He, Q., Mohammadi, R. and Li, Z.,** 2018. Data-driven optimization of Railway maintenance for track geometry. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 90, 34-58.

[18] **Sabato, A. and Niezrecki, C.,** 2017. Feasibility of Digital Image Correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment. *Measurement,* 103, 93-105.

[19] **Malathy, S., Kumar, A. and Priya, H.,** 2017. IoT: Automatic Broken Railway Track Detection with Live VideoStreaming. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research,* 3(4).

[20] **Mao, Q., Cui, H., Hu, Q. and Ren, X.,** 2017. A rigorous fastener inspection approach for high-speed railway from structured light sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.*

[21] **Manikandan, R., Balasubramanian, M. and Palanivel, S**., 2017. Machine Vision Based Missing Fastener Detection In Rail Track Images Using Svm Classifier. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems,* 10(4), 574-589.

[22] **Feng, H., Jiang, Z., Xie, F., Yang, P., Shi, J. and Chen, L.,** 2014. Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems. *IEEE transactions on instrumentation and measurement,* 63(4), 877-888.

[23] **Biswas, R., Khan, R. A., Islam, S. and Uddin, J.,** 2016. A Novel Approach to Detect and Classify the Defective of Missing Rail Anchors in Real-time. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering,* 6(12), 270-276.

[24] **Liu, J., Li, B., Xiong, Y., He, B. and Li, L.,** 2015. Integrating the symmetry image and improved sparse representation for railway fastener classification and defect recognition. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

[25] **Aytekin, Ç., Rezaeitabar, Y., Dogru, S. and Ulusoy, I.,** 2015. Railway fastener inspection by real-time machine vision. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *45*(7), 1101-1107.

[26] **Gibert, X., Patel, V. M. and Chellappa, R.,** 2015. Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*,(s. 694-701). IEEE.

[27] **Gibert, X., Patel, V. M. and Chellappa, R.,** 2017. Deep multitask learning for railway track inspection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(1), 153-164.

[28] **Fan, H., Cosman, P. C., Hou, Y. and Li, B.,** 2018. High-Speed Railway Fastener Detection Based on a Line Local Binary Pattern. *IEEE Signal Processing Letters*, 25(6), 788-792.

[29] **Yuan, X., Liu, B. and Chen, H.,** 2017. Algorithm and program design for fastener locating and detection using wavelet transformation and template matching. *IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, s. 1116-1121.

[30] **Liu, J. and Li, B.,** 2015. Railway fastener defects recognition algorithm based on computer vision. *International Conference on Electronic Science and Automation Control (ESAC 2015)*, s. 285-288.

[31] **Krummenacher, G., Ong, C. S., Koller, S., Kobayashi, S. and Buhmann, J. M.,** 2018. Wheel defect detection with machine learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(4), 1176-1187.

[32] **Askarinejad, H., Dhanasekar, M., Boyd, P. and Taylor, R.,** 2015. Field measurement of wheel–rail impact force at insulated rail joint. *Experimental Techniques*, 39(5), 61-69.

[33] **Trinh, H., Haas, N., Ying, Li., Otto, C., Pankanti, S.,** 2012. Enhanced rail component detection and consolidation for rail track inspection, *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, s. 289 – 295, 2012.

[34] **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 Measurement*, 63(4), s. 877-888, 2014.

[35] **Babenko, P.,** 2009. Visual inspection of railroad tracks, Doctoral dissertation, University of Central Florida Orlando, Florida.

[36] **Clark, M., McCann, D. M. and Forde, M. C.,** 2002. Infrared thermographic investigation of railway track ballast. *NDT & E International*, 35(2), 83-94.

[37] **Ying, L., Trinh, T., Haas, N., Otto, C., Pankanti, S.,** 2014. Rail Component Detection, Optimization, and Assessment for Automatic Rail Track Inspection, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, 2014, 760 – 770.

[38] **Sawadısavı, S. V.,** 2010. Development of Machine-Vision Technology for Inspectıon of Railroad Track, Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.

[39] **Sheerin Sitara, N., Kavitha, S., Raghuraman, G.,** 2018. Review and Analysis of Crack Detection and Classification Techniques based on Crack Types. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(8), 6056-6062.

[40] **Gabara, G. and Sawicki, P.,** 2018. A new approach for inspection of selected geometric parameters of a railway track using image-based point clouds. *Sensors*, 18(3), 791.

[41] **Rizvi, A. R., Khan, P. R. and 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] **Hiensch, M. and Steenbergen, M.,** 2018. Rolling Contact Fatigue on premium rail grades: Damage function development from field data. *Wear*, 394, 187-194.

[43] **Mandriota, C., Nitti, M., Ancona, N., Stella, E. and Distante, A.,** 2004. Filter-based feature selection for rail defect detection. *Machine Vision and Applications*, 15(4), 179-185.

[44] **Li, Q., Shi, Z., Zhang, H., Tan, Y., Ren, S., Dai, P. and Li, W.,** 2018. A cyber-enabled visual inspection system for rail corrugation. *Future Generation Computer Systems*, 79, 374-382.

[45] **Zhuang, L., Wang, L., Zhang, Z. and Tsui, K. L.,** 2018. Automated vision inspection of rail surface cracks: A double-layer data-driven framework. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *92*, 258-277.

[46] **Min, Y., Xiao, B., Dang, J., Yue, B. and Cheng, T.,** 2018. Real time detection system for rail surface defects based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018(1), 3.

[47] **Biao, Y. U. E. and MIN, Y. Z.,** 2017. An Adaptive Background Adjusting Algorithm for Rail Surface Defect Image Segmentation. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*.

[48] **Robin A.,** 2015. Surface defects in rails, Thesıs For The Degree of Lıcentıate of Engıneerıng in Solıd and Structural Mechanıcs, Department of Applied Mechanics Chalmers Unıversıty of Technology, Göteborg, Sweden.

[49] **Gan, J., Li, Q., Wang, J. and Yu, H.,** 2017. A Hierarchical Extractor-Based Visual Rail Surface Inspection System. *IEEE Sensors Journal,* 17(23), 7935-7944.

[50] **Shang, L., Yang, Q., Wang, J., Li, S. and Lei, W.,** 2018. Detection of rail surface defects based on CNN image recognition and classification. *20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT),* s. 45-51.

[51] **Santur, Y., Karaköse, M., Akin, E.,** 2018. An adaptive fault diagnosis approach using pipeline implementation for railway inspection. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,* 26(2), 987-998.

[52] **Faghih-Roohi, S., Hajizadeh, S., Núñez, A., Babuska, R. and De Schutter, B.,** 2016. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects. *International Joint Conference Neural Networks (IJCNN),* s. 2584-2589.

[53] **Hu, Z., Zhu, H., Hu, M. and Ma, Y.,** 2018. Rail surface spalling detection based on visual saliency. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering,* 13(3), 505-509.

[54] **Qingyong, L., Shengwei, R.,** 2012. A Real-Time Visual Inspection System for Discrete Surface Defects of Rail Heads, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* Vol. 61, s. 2189-2199, 2012.

[55] **Taştimur, C., Akın, E., Karaköse, M., Aydın, İ.,** 2015. Detection of rail faults using morphological feature extraction based image processing. *In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),* 2015 s. 1244-1247.

[56] **Liu, Z., Wang, W., Zhang, X. and Jia, W.,** 2010. Inspection of rail surface defects based on image processing. *International Asia Conference on Automation and Robotics Informatics in Control, 2nd,* Vol. 1, s. 472-475.

[57] **Bocciolone, M., Caprioli, A., Cigada, A. and Collina, A.** 2007. A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy. *Mechanical Systems and Signal Processing,* 21(3), s. 1242-1254.

[58] **Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., and Dollevoet, R.,** 2013. Monitoring the railway infrastructure: Detection of surface defects using wavelets, *In 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (ITSC) s. 1316-1321.

[59] **Dubey, A., and Jaffery, Z.,** 2016. Maximally Stable Extremal Region Marking (MSERM) based Railway Track Surface Defect Sensing, *IEEE Sensors Journal*.

[60] **Li, X., Gao, B., Woo, W. L., Tian, G. Y., Qiu, X. and Gu, L.,** 2017. Quantitative Surface Crack Evaluation Based on Eddy Current Pulsed Thermography, *IEEE Sensors Journal*, 17(2), s. 412-421.

[61] **Ma, K., Vicente, T. F. Y., Samaras, D., Petrucci, M. and Magnus, D. L.,** 2016. Texture classification for rail surface condition evaluation, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2016 s. 1-9.

[62] **Steenbergen, M. and Dollevoet, R.,** 2013. On the mechanism of squat formation on train rails–Part I: Origination, *International Journal of Fatigue*, 47, s. 361-372.

[63] **Tastimur, C., Yetis, H., Karaköse, M. and Akın, E.,** Rail Defect Detection and Classification with Real Time Image Processing Technique. *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, 5,12, s. 283-290.

[64] **Santur, Y., Karaköse, M. and Akin, E.,** 2016. Random forest based diagnosis approach for rail fault inspection in railways. *In Electrical, National Conference on Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, s. 745-750.

[65] **Wilson, J., Tian, G., Mukriz, I. and Almond, D.,** 2011. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue. *NDT & E International*, 44(6), s. 505-512.

[66] **Limin, C., Yin, L., Kaimin, W.,** 2010. Inspection of rail surface defect based on machine vision system, *2nd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE)*, 2010, s. 3793 - 3796.

[67] **Sun, B., Zhuang, J., Lin, J., Zhang, Q., Chen, S.,** 2011. Research on the new rail auto-inspection system, *IET International Conference on Smart and Sustainable City (ICSSC 2011)*, s. 1-4.

[68] **Zheng, S. Chai, X. An, X., Li, L.,** 2012. Railway Track Gauge Inspection Method Based on Computer Vision, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, s. 1292 - 1296.

[69] **Ritika, S. and Rao, D.,** 2015. Data Augmentation of Railway Images for Track Inspection. arXiv preprint arXiv:1802.01286.

[70] **Kaleli, F. and Akgul, Y. S.,** 2009. Vision-based railroad track extraction using dynamic programming. *12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, s. 1-6.

[71] **Karaduman, M.,** 2017. Image processing based obstacle detection with laser measurement in railways. *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, s. 899-903.

[72] **Selver, M. A., Zoral, E. Y., Belenlioglu, B. and Dogan, S.,** 2017. Predictive modeling for monocular vision based rail track extraction. *10th*

International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), s. 1-6.

[73] **Wohlfeil, J.,** 2011.Vision based rail track and switch recognition for self-localization of trains in a rail network. *In Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, s. 1025-1030.

[74] **Johansson, A., Pålsson, B., Ekh, M., Nielsen, J. C., Ander, M. K., Brouzoulis, J. and Kassa, E.,** 2011. Simulation of wheel–rail contact and damage in switches & crossings. *Wear*, 271(1), s. 472-481.

[75] **Palsson, B.,** 2014. Optimisation of railway switches and crossings, *Chalmers University of Technology*.

[76] **Singh, A. K., Swarup, A., Agarwal, A. and Singh, D.,** 2017. Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery. *ICT Express.*

[77] **Mittal, S. and Rao, D.,** 2017. Vision Based Railway Track Monitoring using Deep Learning. arXiv preprint arXiv:1711.06423.

[78] **Santur, Y., Karaköse, M. and Akin, E.,** 2017. A new rail inspection method based on deep learning using laser cameras. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, s. 1-6.

[79] **Santur, Y., Karaköse, M. and Akin, E.,** 2017. Big data framework for rail inspection. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, s. 1-4.

[80] **Wang, C., Li, Y., Ma, Z., Zeng, J., Jin, T. and Liu, H.,** 2018. Distortion Rectifying for Dynamically Measuring Rail Profile Based on Self-Calibration of Multiline Structured Light. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.*

[81] **Xiong, Z., Li, Q., Mao, Q. and Zou, Q.,** 2017. A 3D laser profiling system for rail surface defect detection. *Sensors*, 17(8), 1791.

[82] **Yunjie, Z., Xiaorong, G., Lin, L., Yongdong, P. and Chunrong, Q.,** 2017. Simulation of Laser Ultrasonics for Detection of Surface-Connected Rail Defects. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 36(4), 70.

[83] **Karthick, N., Nagarajan, R., Suresh, S. and Prabhu, R.,** 2017. Implementation of Railway Track Crack Detection and Protection, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 6(5).

[84] **Krishna, B. S. R., Seshendra, D. V. S., Raja, G. G., Sudharshan, T. and Srikanth, K.,** 2017. Railway Track Fault Detection System by Using IR Sensors and Bluetooth Technology. *Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST)*, 1(6), 82-84.

[85] **Fan, Y., Dixon, S., Edwards, R. S. and Jian, X.,** 2007. Ultrasonic surface wave propagation and interaction with surface defects on rail track head. *Ndt & E International*, 40(6), 471-477.

[86] **Mariani, S. and di Scalea, F. L.,** 2018. Predictions of defect detection performance of air-coupled ultrasonic rail inspection system. *Structural Health Monitoring*, 17(3), 684-705.

[87] **Loveday, P. W., Taylor, R. M., Long, C. S. and Ramatlo, D. A.,** 2018. Monitoring the reflection from an artificial defect in rail track using guided wave ultrasound. *In AIP Conference Proceedings* Vol. 1949, No. 1, s. 1-7.

[88] **Zhang, X., Feng, N., Wang, Y. and Shen, Y.,** 2014. An analysis of the simulated acoustic emission sources with different propagation distances, types and depths for rail defect detection. *Applied Acoustics,* 86, s. 80-88.

[89] **Cui, X., Chen, G., Zhao, J., Yan, W., Ouyang, H. and Zhu, M.,** 2017. Field investigation and numerical study of the rail corrugation caused by frictional self-excited vibration. *Wear,* 376, s. 1919-1929.

[90] **Wei, J., Liu, C., Ren, T., Liu, H. and Zhou, W.,** 2017. Online condition monitoring of a rail fastening system on high-speed railways based on wavelet packet analysis. *Sensors,* 17(2), s. 318.

[91] **Oregui, M., Li, S., Núñez, A., Li, Z., Carroll, R. and Dollevoet, R.,** 2017. Monitoring bolt tightness of rail joints using axle box acceleration measurements. *Structural Control and Health Monitoring,* 24(2).

[92] **Montiel-Varela, G., Domínguez-Vázquez, A. C., Gallardo-Hernández, E. A., Bregant, L. and García-Illescas, R.,** 2017. Experimental and numerical study for detection of rail defect. *Engineering Failure Analysis,* 81, s. 94-102.

[93] **Sun, Y. Q., Spiryagin, M., Wu, Q., Cole, C. and Ma, W. H.,** 2018. Feasibility in assessing the dipped rail joint defects through dynamic response of heavy haul locomotive. *Journal of Modern Transportation,* 26(2), s. 96-106.

[94] **Boronakhin, A. M., Larionov, D. Y., Podgornaya, L. N., Tkachenko, A. N. and Shalymov, R. V.,** 2018. Detection and classification of rail track flaws using inertial and magnetometric sensors. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus),* s. 1066-1070.

[95] **Li, Z., Molodova, M., Núñez, A. and Dollevoet, R.,** 2015. Improvements in axle box acceleration measurements for the detection of light squats in railway infrastructure. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 62(7), 4385-4397.

[96] **Masson, J. E. N. and Petry, M. R.,** 2017. Comparison of mesh generation algorithms for railroad reconstruction. *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC),* s. 266-271.

[97] **Kaewunruen, S., Ngamkhanong, C., Janeliukstis, R. and You, R.,** 2017. Influence of surface abrasions on dynamic behaviours of railway concrete sleepers. *International Congress on Sound and Vibrasiopn.*

[98] **Soylemez, E. and Ciloglu, K.,** 2016. Influence of track variables and product design on insulated rail joints. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* (2545), s. 1-10.

[99] **Zhao, X., Li, Z. and Dollevoet, R.,** 2014. Influence of the fastening modeling on the vehicle-track interaction at singular rail surface defects. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics,* 9(3), 031002.

[100] Li**, C., Luo, S., Cole, C. and Spiryagin, M.,** 2017. An overview: modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Vehicle system dynamics,* 55(7), s. 1045-1070.

[101] **Yaman, O., Karaköse, M.,** 2018. Development of a Complex Fuzzy System-Based Thermography Approach for Predictive Maintenance in Railways, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* (Hakem değerlendirmesinde), 2018.

[102] **Yaman, O., Karaköse, M.,** 2018. Complex Fuzzy Automata Based Fault Detection Approach Using Thermal Images in Railways, *International in Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP),* (Hakem değerlendirmesinde), 2018.

[103] **Karakose, M., Yaman, O.,** 2018. A Method Based on Thermal Image Processing for Rail Surface Monitoring in Railways, *In International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'18),* s. 704-708.

[104] **Karakose, M., Yaman, O., Murat, K. and Akin, E.,** 2018. A New Approach for Condition Monitoring and Detection of Rail Components and Rail Track in Railway. *Internatıonal Journal of Computatıonal Intellıgence Systems,* 11(1), s. 830-845.

[105] **Yaman, O. Y., Karaköse, M. M., Aydın, İ. and Akın, E.,** 2017. Demiryolu Hattında Oto-Korelasyon Tabanlı Makas Geçişi ve Ray Yüzeyi Durum İzleme Yöntemi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 29(2), s. 41-50.

[106] **Yaman, O., Karakose, M. and Akin, E.,** 2017. Improved Rail Surface Detection and Condition Monitoring Approach with FPGA in Railways. *International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'17)* s. 108-111.

[107] **Yaman, O., Karakose, M. and Akin, E.,** 2017. A Fault Diagnosis Approach for Rail Surface Anomalies Using FPGA in Railways. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers,* 5, s. 42-46.

[108] **Tastimur, C., Yaman, O., Karakose, M. and Akin, E.,** 2017. A real time interface for vision inspection of rail components and surface in railways.

International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), s. 1-6.

[109] **Yaman, O., Karakose, M. and Akin, E.,** 2017. A vision based diagnosis approach for multi rail surface faults using fuzzy classificiation in railways. *International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK),* s. 713-718.

[110] **Karakose, M., Yaman, O., Baygin, M., Murat, K. and Akin, E.,** 2017. A New Computer Vision Based Method for Rail Track Detection and Fault Diagnosis in Railways. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research,* 6(1), s. 22-17.

[111] **Karaköse, M., Akın, E. and Yaman, O.,** 2016. Detection of rail switch passages through image processing on railway line and use of condition-monitoring approach, *International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16)* s. 99-105.

[112] **Karaköse, M., Yaman, O. and Akın, E.,** 2016. Real time implementation for fault diagnosis and condition monitoring approach using image processing in railway switches. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers,* 4(Special Issue-1), s. 307-313.

[113] **Yaman, O., Karakose, M. and Akin, E.,** 2016. PSO Based Diagnosis Approach for Surface and Components Faults in Railways. *International Journal of Computer Science and Software Engineering,* 5(5), 89.

[114] **Yaman, O., Karaköse, M., Akın, E. and Aydın, İ.,** 2015. Image processing based fault detection approach for rail surface. *In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),* s. 1118-1121.

[115] **Yaman, O., Karaköse, M., Akın, E.,** 2015. Görüntü eşleştirme kullanan temassız ray hattı durum analizi yöntemi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015,* s.1005-1009.

[116] **Yaman, O., Karaköse, M.,** 2015. Fuzzy Logic Based Rail Component Detection Method Using Line Extraction from Continuously Images. *International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2015)*

[117] Australian Rail Track Corporation, 2009. Manual for non-destructive testing of rail, *ARTC,* Avustralya.

[118] **Kerr, M.,** 2012. Rail Defects Handbook. Australian Rail Track Corporation, Avustralya.

[119] **Lichtberger, B.,** 2005. Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Eurail Press, Hamburg, Almanya.

[120] **Zarembski, A. M.,** 2005. The Art and Science of Rail Grinding. Simmons-Boardman Books Inc., Nebraska, Amerika Birleşik Devletleri.

[121] **Doyle, N. F.,** 1980. Railway track design: a review of current practice, Bureau of Transport Economics Technical Report, Canberra, Avustralya.

[122] **Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O., Smith, R. A.,** 2009. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review, *Engineering Fracture Mechanics,* 76, s. 2563-2601.

[123] **Kassa, E.,** 2012. Wheel-rail contact, Vehicle System Dynamics & Control course lectures.

[124] UIC-712 R, 2002. Rail defects, International Union of Railways (UIC), Paris, Fransa.

[125] **Kumar, S.,** 2006. A study of the rail degredation process to predict rail breaks, (yüksek lisans tezi), Lulea University of Technology, Lulea, İsviçre.

[126] UIC-725 R, 2007. Treatment of rail defects, International Union of Railways (UIC), Paris, Fransa.

[127] **Öztürk, Z.,** 2010. Demiryolunda ray bozulmalarına bağlı titreşim ve azaltma yöntemleri, Transist 2010 Toplu Ulaşım Sempozyumu, İstanbul, 2-3.

[128] **Yılmaz, H.,** 2014. Ray kusurlarının örnek hat üzerinde ultrasonik yöntemle incelenmesi ve ray gerilmelerinin belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı / Ulaştırma Mühendisliği Bilim Dalı.

[129] **Hocking NDT.** (t.y.) Rail inspection: the eddy current solution.

[130] KTU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. (t.y). Tahribatsız muayene laboratuvar föyleri, Trabzon, Türkiye.

[131] **Yakıbul, İ.** (t.y.) Tahribatsız muayene yöntemleri.

[132] **Papaelias, M. Ph., Roberts, C. ve Davis, C. L.,** 2008. A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development, Proc. *Instn. Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit,* 222, s. 367-384.

[133] **Roche, E. and Schabes, Y. (Eds.).,** 1997. Finite-state language processing. MIT press.

[134] **Zadeh, L. A.,** 1965. Sets, Fuzzy, Inform Control 8 (1965): 338-353.

[135] **Karakose, M.,** 2001. Elektrik motorlarında fiziksel büyüklüklerin tahmininde bulanık mantık kullanımı, Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü.

[136] **Atanassov, K. T.,** 2017. Type-1 Fuzzy Sets and Intuitionistic Fuzzy Sets. Algorithms, 10(3), 106.

[137] **Mendel, J. M.,** 2017. Type-2 fuzzy sets. *In Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems Springer, Cham.* s. 259-306.

[138] **De Silva, C. W.,** 2018. Intelligent control: fuzzy logic applications. CRC press.

[139] **Wee, W. G. and Fu, K. S.,** 1993. A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning systems. *In Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, s. 892-900.

[140] **Santos, E.S.,** 1968. Maximin automata. Inform. Control, 13 (1968) 363-377.

[141] **Rajaretnam, T.,** 2006. A study on fuzzy finite state automata. (2006).

[142] **Doostfatemeh, M. and Kremer, S. C.,** 2005. New directions in fuzzy automata. *International Journal of Approximate Reasoning*, 38(2), s. 175-214.

[143] **Stamenković, A., Ćirić, M. and Ignjatović, J.,** 2015. Different models of automata with fuzzy states. Facta Universitatis, Series: *Mathematics and Informatics*, 30(3), s. 235-253.

[144] **Stamenković, A. and Ćirić, M.,** 2012. Construction of fuzzy automata from fuzzy regular expressions. *Fuzzy Sets and Systems*, 199, s. 1-27.

[145] **Jancic, Z., Micic, I., Ignjatovic, J. and Ciric, M.,** 2016. Further improvements of determinization methods for fuzzy finite automata. *Fuzzy Sets and Systems*, 301, s. 79-102.

[146] **Aydın, I., Karakose, M., Akın, E.,** 2009. Bulanık Otomata Yaklaşımı Kullanan Arıza Tespit Algoritması, *13. Ulusal Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Kongresi (EEB09)*, 1(1), s. 121-126.

[147] **Li, L. and Qiu, D.,** 2015. On the state minimization of fuzzy automata. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 23(2), s. 434-443.

[148] **Mordeson, J. N. and Malik, D. S.,** 2002. Fuzzy automata and languages: theory and applications. *CRC Press.*

[149] **Kovács, S.,** 2000. Interpolative Fuzzy Reasoning and Fuzzy Automata in Adaptive System Applications. *In Proceedings of the IIZUKA*, s. 1-4.

[150] **Choubey, A. and Ravi, K. M.,** 2013. Minimization of deterministic finite automata with vague (final) states and intuitionistic fuzzy (final) states. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 10(1), s. 75-88.

[151] **Horry, M. and Zahedi, M. M.,** 2013. Some (Fuzzy) Topologies on General\Fuzzy Automata. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 10(6), s. 73-89.

[152] **Deshmukh, A. Y., Bavaskar, A. B., Bajaj, P. R. and Keskar. A. G.,** 2008. Implementation of complex fuzzy logic modules with VLSI approach, *International Journal on Computer Science and Network Security*, vol. 8, s. 172-178.

[153] **Tamir, D. E., Jin, L. and Kandel. A.,** 2011. A new interpretation of complex membership grade, *International Journal of Intelligent Systems,* vol. 26, no. 4, s. 285-312.

[154] **Tamir, D. E., Rishe, N. D. and Kandel. A.,** 2015. Complex Fuzzy Sets and Complex Fuzzy Logic an Overview of Theory and Applications, *In Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications, Springer International Publishing,* s. 661-681.

[155] **Poodeh. O. Y.,** 2017. Applications of Complex Fuzzy Sets in Time-Series Prediction, Doctoral dissertation, University of Alberta.

[156] **Ma, J., Zhang, G. and Lu. J.,** 2012. A method for multiple periodic factor prediction problems using complex fuzzy sets, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems,* vol. 20, no. 1, s. 32-45.

[157] **Yazdanbakhsh, O., and Dick. S.,** 2017. A systematic review of complex fuzzy sets and logic, *Fuzzy Sets and Systems,* 2017.

[158] **Ma, J., Feng, L. and Yang. J.,** 2017. Using complex fuzzy sets for strategic cost evaluation in supply chain downstream, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE),* s. 1-6.

[159] **Wee, W. G.,** 1967. On generalization of adaptive algorithm and application of the fuzzy sets concept to pattern classication, Ph.D. dissertation, Purdue University, Lafayette, IN 1967.

[160] **Horry, M.,** 2017. Some hypergroups on grneral complex fuzzy automata. *Annals of Fuzzy Mathematics and Informatics.*

[161] **Horry, M.,** 2016. General Complex Fuzzy Transformation Semigroups in Automata. *Journal of Advances in Computer Research,* 7(2), s. 127-137.

[162] **Doostfatemeh, M., and Kremer, S. C.,** 2005. New directions in fuzzy automata , *International Journal of Approximate Reasoning,* 38 s. 175-214.

[163] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** 2014. An approach for automated fault diagnosis based on a fuzzy decision tree and boundary analysis of a reconstructed phase space, *ISA transactions,* 53(2), s. 220-229.

[164] **Khan, R. A., Islam, S., Biswas, R.,** 2014. Automatic Detection of Defective Rail Anchors, *IEEE 17th International Conference on Intelligent Trasportation Systems (ITSC),* 2014, s. 1583 – 1588.

[165] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** 2012. A new contactless fault diagnosis approach for pantograph-catenary system, *15th International Symposium MECHATRONIKA,* s. 1-6

[166] **Canny, J.,** 1986. A computational approach to edge detection Pattern Analysis and Machine Intelligence, *IEEE Transactions on,* s, 679-698.

[167] **Landi, A., L. Menconi, and L. Sani.,** 2006. Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 220.4, s. 435-447.

[168] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** 2015. Anomaly detection using a modified kernel-based tracking in the pantograph–catenary system. *Expert Systems with Applications,* s. 938-948.

[169] **Qifan, B., Minglu, L., Rongguo, L.,** 2007. A Research on the Container Car's Location Under the Bridge Crane By the Technology of Laser Measuring, *Science & Technology Of Ports.*

[170] **Xia, Y., Xie, F. and Jiang, Z.,** 2010. Broken railway fastener detection based on adaboost algorithm, *International Conference on In Optoelectronics and Image Processing (ICOIP),* 1, s. 313-316.

[171] **Yang, J., Tao, W., Liu, M., Zhang, Y., Zhang, H., and Zhao, H..,** 2011. An efficient direction field-based method for the detection of fasteners on high-speed railways, *Sensors,* 11(8), s. 7364-7381.

[172] **Murat, K.,** 2014. Yeniden düzenleşim için entropi tabanlı arama algoritmalarının geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.

[173] **Berry, A., Nejikovsky, B., Gilbert, X., Jajaddini, A.,** 2008. High speed video inspection of joint bars using advanced image collection and processing techniques. *In Proc. of World Congress on Railway Research,* 2008.

[174] **Lee, J. S., Hwang, S. H., Choi, I. Y. and Kim, I. K.,** 2018. Prediction of Track Deterioration Using Maintenance Data and Machine Learning Schemes. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(9), 04018045.

[175] **Zitova, B. and Flusser, J.,** 2003. Image registration methods: a survey. *Image and vision computing,* 21(11), s. 977-1000.

[176] **Aydin, I., Yaman, O., Karakose, M. and Celebi, S. B.,** 2014. Particle swarm based arc detection on time series in pantograph-catenary system. *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)* s. 344-349.

[177] **Alatas, B. and Akin, E.,** 2009. Multi-objective rule mining using a chaotic particle swarm optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems,* 22(6), s. 455-460.

[178] **Aydin, I., Karakose, M. and Akin, E.,** 2014. Monitoring of pantograph-catenary interaction by using particle swarm based contact wire tracking. *International Conference on Systems, Signals and Image Processing* (IWSSIP), s. 23-26.

[179] **Djemame, S., Batouche, M., Oulhadj, H. and Siarry, P.,** 2018. Solving reverse emergence with quantum PSO application to image processing. *Soft Computing,* s. 1-15.

[180] **Tastimur, C., Karaköse, M., and Akın, E.,** 2016. A Vision Based Condition Monitoring Approach for Rail Switch and Level Crossing using Hierarchical SVM in Railways. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers,* 4(1), s. 319-325.

[181] **Li, Z., Mahapatra, D., Tielbeek, J. A., Stoker, J., van Vliet, L. J., and Vos, F. M.,** 2016. Image registration based on autocorrelation of local structure. *IEEE transactions on medical imaging,* 35(1), s. 63-75.

[182] **Chen, Q. Zhao, L. Lu, J. Kuang, G. Wang, N. Jiang. Y.,** 2012. Modified two-dimensional otsu image segmentation algorithm and fast realisation, *IET Image Processing*, vol. 6, Issuse. 4, s. 426-433.

[183] **AlSaeed, D.H. Bouridane, A. Elzaart, A. Sammouda. R.,** 2012. Two modified Otsu image segmentation methods based on Lognormal and Gamma distribution models, *International Conference on Information Technology and e-Services,* s. 1-5.

[184] **Miao, H. and Xiao, C.,** 2018. Simultaneous segmentation of leukocyte and erythrocyte in microscopic images using a marker-controlled watershed algorithm. *Computational and mathematical methods in medicine*.

ÖZGEÇMİŞ

Orhan YAMAN 1990 yılında Elazığ' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2007 yılında Hıdır Sever Lisesini bitirdikten sonra 2012 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2012 yılında İlmek Bilişim Hizmetleri Yazılım Mekatronik Sistemler Ar-Ge Danışmanlık San. Ve Tic. Ltd. Şti.' de Bilgisayar Mühendisi olarak çalıştı. Aynı yıl içerisinde Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi boyunca 112E067 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinde bursiyer olarak çalıştı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl içerisinde Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim dalında doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimi başlayınca 114E202 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinde yarı zamanlı doktora bursiyeri olarak çalışmaya başladı. 2014 yılının Aralık ayında Fırat Üniversitesi Enformatik Bölümünde uzman olarak çalışmaya başladı.