

**PANTOGRAF-KATENER SİSTEMLERİNDE
GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI TEMASSIZ
İZLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Orhan YAMAN

**Yüksek Lisans Tezi
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE**

TEMMUZ-2014

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

**PANTOGRAF-KATENER SİSTEMLERİNDE GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI TEMASSIZ
İZLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan YAMAN

(121129107)

Anabilim Dalı: Bilgisayar Mühendisliği

Programı: Yazılım

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 02/07/2014

TEMMUZ-2014

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PANTOGRAF-KATENER SİSTEMLERİNDE GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI TEMASSIZ
İZLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan YAMAN

(121129107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02.07.2014
Tezin Savunulduğu Tarih : 18.07.2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. İlhan AYDIN (F.Ü)

TEMMUZ-2014

ÖNSÖZ

Bu çalışmada pantograf katener sistemleri için görüntü işleme tabanlı temassız izleme yöntemleri geliştirilmektedir. Çalışmanın devamında kenar çıkarım algoritmaları, Hough dönüşümü ve Otsu metodu gibi görüntü işleme yöntemleri kullanılarak pantograf katener sistemi durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Günümüzde görüntü işleme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte arıza teşhis yöntemlerinde de kullanılabilir duruma gelmiştir. Öncelikle MATLAB ortamında gerçekleştirilen yöntemler FPGA ortamında uygulanarak gerçek zamanlı çalışmaya uygun bir sistem olarak geliştirilmiştir. Hazırladığım bu tez çalışmanın da bu amaç doğrultusunda faydalanılabilir bir kaynak olmasını umuyorum.

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

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen, bilgisini paylaşan ve değerli vaktini bana harcayan sayın hocam Yrd. Doç. Dr. İlhan AYDIN' a teşekkür ediyorum.

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

TEŞEKKÜR

Bu tezde geliştirilen yöntemler 112E067 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.

Orhan YAMAN
ELAZIĞ - 2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIII
SİMGELER LİSTESİ	XIV
KISALTMALAR LİSTESİ	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Durum İzleme ve Arıza Teşhisinin Genel Çatısı	2
1.1.1. Temel Kavramlar	3
1.1.2. Durum İzleme	3
1.2. Literatür Özeti	5
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	10
1.4. Tezin Yapısı	12
2. PANTOGRAF KATENER SİSTEMLERİNDE DURUM İZLEME	13
2.1. Pantograf Katener Sistemleri	13
2.2. Pantograf Katener Sistemlerinin Çalışma Prensibi	18
2.3. Pantograf Katener Sistemlerinde Oluşan Arızalar	19
2.4. Bölüm Değerlendirmesi	23
3. GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE PANTOGRAF MODELİ ÇIKARILMASI	24
3.1. Giriş	24
3.2. Pantograf Modelleri	25
3.3. Model Tespiti Yönteminde Kullanılan Teknikler.....	27

3.3.1. Kenar Çıkarım Yöntemleri	27
3.3.1.1. Canny Kenar Çıkarım Algoritması	29
3.3.1.2. Sobel Kenar Çıkarım Algoritması	31
3.3.1.3. Roberts Kenar Çıkarım Algoritması	33
3.3.1.4. Prewitt Kenar Çıkarım Algoritması	34
3.3.2. Hough Dönüşümü	34
3.3.3. Otsu Metodu	39
3.4. Önerilen Yöntem	43
3.5. Deneysel Sonuçlar	47
3.5.1. Model Tespiti Yöntemi için Deneysel Sonuçlar	48
3.5.2. Ark Tespiti Yöntemi için Deneysel Sonuçlar	52
3.6. Bölüm Değerlendirmesi	57
4. GÖRME TABANLI TEMAS NOKTASI İZLEME YAKLAŞIMI	58
4.1. Giriş	58
4.2. Termal Görüntü Özellikleri	60
4.3. Önerilen Yöntem.....	61
4.3.1. Temas Noktasının İzlenmesi Yöntemi.....	61
4.3.2. Sıcaklık Değişimi ve Arkın İzlenmesi Yöntemi	64
4.4. Deneysel Sonuçlar	67
4.4.1. Temas Noktasının İzlenmesi Yöntemi için Deneysel Sonuçlar.....	68
4.4.2. Sıcaklık Değişimi ve Arkın İzlenmesi için Deneysel Sonuçlar	71
4.5. Bölüm Değerlendirmesi	75
5. TEMASSIZ ARK TESPİTİ YÖNTEMİ.....	76
5.1. Giriş	76
5.2. FPGA	77

5.2.1. FPGA Mimarisi.....	78
5.2.2. FPGA’da Uygulama Geliştirme Aşamaları	80
5.3. Önerilen Yöntem	84
5.4. Deneysel Sonuçlar	86
5.4.1. Temassız Ark Tespiti Yönteminin MATLAB’da Gerçekleştirilmesi.....	86
5.4.2. Temassız Ark Tespiti Yönteminin FPGA’da Gerçekleştirilmesi	89
5.5. Bölüm Değerlendirmesi	93
6. SONUÇLAR	94
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	105

ÖZET

Günümüzde önemli bir ulaşım aracı olan elektrikli trenler hızlı, güvenilir ve konforlu bir yapıya sahiptir. Demiryolu ulaşımı bu avantajlarının yanında izlenmesi, bakımı, arızası ve kazaları açısından oldukça maliyetlidir. Bundan dolayı raylı sistemler için doğruluğu yüksek izleme ve tespit algoritmaları geliştirilmektedir. Bir demiryolu aracı için tekerleklerin üzerinde hareket ettiği raylar ve elektriğin iletimini sağlayan pantograf-katener sistemi en önemli bileşenlerdir. Bu tez çalışmasında pantograf-katener sistemleri için görüntü işleme tabanlı izleme ve arıza teşhisine yönelik yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle hızlı trenlerde pantograf-katener sistemlerinde arklar, aşırı sürtünme, yanlış temas kuvveti, pantograf üst çubuğu arızası ve katener hattı arızaları gibi birçok arızalar oluşabilir. Literatürde bu arızaların teşhisi için temaslı ve temassız teknikler olmakla birlikte günümüzde görme tabanlı temassız tekniklerin kullanımı zorunlu hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında pantograf-katener sistemlerinin görme tabanlı izlenmesi ve arıza teşhisi için üç temel çalışma sunulmaktadır. Birinci çalışma görüntü işleme kullanılarak pantograf modellerinin çıkarılmasına yöneliktir. Trenlerde çeşitli şekillerde kullanılabilen pantograf tiplerinin belirlenmesi doğru bir izleme ve arıza tespiti için önemlidir. Burada kenar çıkarma algoritmaları ile pantograf doğruları bulunarak, bu doğruların konum ve açı bilgisinden pantograf tipi tespit edilmektedir. İkinci çalışma katener hattının pantografa temas ettiği noktanın tespitine ve izlenmesine yöneliktir. Görüntü işleme ile bulunan katener hattı ve pantograf üst çubuğunun kesiştiği nokta, geliştirilen algoritmalarla tespit edilerek katener hattının pantograf yüzeyinde düzenli olarak gezindiği izlenmektedir. Son çalışmada termal kameralardan alınan görüntüler ile temas noktasında oluşan ark noktaları da tespit edilebilmektedir. Burada pantograf üst bölgesi sürekli izlenerek pantografin ömrü ve oluşabilecek arızalara yönelik çıkarımlar elde edilmekte, hem de oluşan çeşitli arızaların tespitine yönelik önerilen algoritmalar FPGA ile gerçekleştirilmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında raylı sistemlerde pantograf-katener sistemlerinin yüksek doğrulukla izlenmesi ve arızaların teşhis edilmesine yönelik görüntü işleme tabanlı yöntemler geliştirilmiş ve gerçek veriler ile doğrulanmıştır. Bu tez çalışması 112E067'nolu TÜBİTAK 1001 programı kapsamında yürütülen araştırma projesi ile desteklenmiş, yapılan çalışmalar çeşitli ulusal ve uluslararası yayınlar ile sonuçlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pantograf-Katener sistemleri, Görüntü işleme, Demiryolu sistemleri, Termal görüntü, Arıza teşhisi, Gerçek zamanlı izleme.

SUMMARY

DEVELOPMENT OF IMAGE PROCESSING BASED CONTACTLESS MONITORING METHODS IN PANTOGRAF-CATENARY SYSTEMS

Nowadays, electric trains, an important mode of transport, have fast, reliable and comfortable structure. In addition to these advantages of rail transport, it is costly in terms of monitoring, maintenance, downtime and accidents. Therefore, monitoring detection algorithms with high accuracy for rail systems are developed. For a railway vehicle, the rails that wheels moves on and pantograph-catenary system that enables the transmission of electricity are the most important components. In this study, image processing-based monitoring and diagnostics methods for the pantograph-catenary systems have been developed. Especially, many failures can be occurred in high-speed railways such as arcs, excessive friction, incorrect contact force, the top bar of the pantograph and catenary line failures. In the literature, however, there is contact and contactless techniques for the diagnosis of faults, nowadays usage of the vision based contactless technical techniques has become mandatory.

In this study, three main studies are proposed for vision-based monitoring and fault diagnosis on pantograph-catenary systems. The first study aims to determine the pantograph models by using image processing. For an accurate monitoring and fault detection it is important that determine the types of pantograph which can be used in various ways on trains. Here, the pantograph lines are determined by edge detection algorithms and the pantograph type is determined from the information of the position and angle of these lines. The second study aims to detect and monitor the point of contact of the pantograph. The catenary line has monitored the it navigates on the surface of the pantograph regularly by detecting the point of contact between the top bar of pantograph and catenary line determined by image processing with proposed algorithms. In recent study, arcs at the point of contact can be detected too with images from thermal camera. Here, the inferences about the life of pantograph and failures can be occur are obtained by monitoring upper region of pantograph continuously and also, proposed algorithms that aims to detect various failures are implemented on FPGAs.

Consequently, in this study, image processing-based methods that aims to monitor and fault diagnosis of pantograph-catenary systems in the rail system with high accuracy have been developed and has been verified with real data. This study has been supported by a research project in TUBITAK 1001 programme under Project No: 112E067 and the studies were concluded with various national and international publications.

Key Words: Pantograph-Catenary systems, Image processing, Railway systems, Thermal images, Fault detection, Real time monitoring.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Durum izleme ve arıza teşhisi için yaygın olarak kullanılan deneysel düzenekler ...	4
Şekil 1.2	Literatürde önerilen yöntemin akış şeması [23]	7
Şekil 1.3	Xiai-heng [24]'in önerdiği yöntemin genel şeması	7
Şekil 1.4	Literatürde önerilen yöntemin akış şeması ve kullanılan ölçüm düzeneği	8
Şekil 1.5	Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntem	10
Şekil 2.1	Elektrikli trenlerin basit elektrik aksamı	13
Şekil 2.2	Örnek pantograf katener sistemi	14
Şekil 2.3	Katener sistemi	14
Şekil 2.4	Üç farklı katener sistemi	15
Şekil 2.5	Katener sisteminin gerdirilmesi için kullanılan yapı	15
Şekil 2.6	Katener direğinin yapısı.....	16
Şekil 2.7	Farklı ülkelerde hızlı trenlerde kullanılan katener direği yapıları	17
Şekil 2.8	Örnek pantograf sistemin bileşenleri	18
Şekil 2.9	Demiryolu üzerinde temas telinin hareketi	19
Şekil 2.10	Temas teli ve pantograf arasındaki tarama alanı	19
Şekil 2.11	Pantograf katener arasındaki kayan temas alanı	20
Şekil 2.12	Normal yağışlı ve soğuk kış günlerinde temas bölgesinde oluşan farklılıklar	20
Şekil 2.13	Pantograf katener sistemin köprü giriş ve çıkışındaki durumu	21
Şekil 2.14	Katener temas telinin genleşme sonucundaki durumu	22
Şekil 2.15	Katener temas telinin yükselmesi sonucundaki durumu	22
Şekil 3.1	Pantograf türleri	25
Şekil 3.2	Literatürde kullanılan pantograf modelleri ve graf yapıları [27]	26
Şekil 3.3	Model ve ark tespiti yöntemlerinin pantograf katener sistemlerde kullanılması	26
Şekil 3.4	Herhangi bir resmin piksel değerlerinin değişimi	28
Şekil 3.5	Şekil 3.4'te ki sinyalin birinci türevi	28

Şekil 3.6 Şekil 3.4'te ki sinyalin ikinci türevi	28
Şekil 3.7 Canny kenar çıkarım algoritmasının genel akış şeması	29
Şekil 3.8 Canny kenar algılama algoritması sonucu	31
Şekil 3.9 Sobel kenar çıkarım algoritması değer hesaplama yöntemi	32
Şekil 3.10 Sobel kenar çıkarım algoritması sonucu	32
Şekil 3.11 Roberts kenar çıkarım algoritması sonucu.....	33
Şekil 3.12 Prewitt kenar çıkarım algoritması sonucu	34
Şekil 3.13 Hough dönüşümün sözde kodu	35
Şekil 3.14 “P” değerinin hesaplanması	37
Şekil 3.15 Farklı şekillerin Hough sinüs eğrisi	38
Şekil 3.16 Pantograf ve katener sistemin hough dönüşümünün uygulanması	38
Şekil 3.17 Pantograf görüntüsünün iki seviyeli ve üç seviyeli görünümü	39
Şekil 3.18 Otsu yönteminin sözde kodu	40
Şekil 3.19 En iyi eşik değerlerin elde edilmesi için kullanılan kod parçacığı	42
Şekil 3.20 Örnek bir pantograf görüntüsü ve bu görüntüden en iyi σ_b^2 değerinin elde edilmesi	43
Şekil 3.21 Önerilen model ve ark tespiti yöntemi için kullanılan blok diyagramı	43
Şekil 3.22 Bulanık mantık sisteminin tipik yapısı	44
Şekil 3.23 Bulanık sistemde kullanılan üyelik fonksiyonları	45
Şekil 3.24 Önerilen model ve ark tespiti yönteminde kullanılan Simulink modeli	46
Şekil 3.25 Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntüleri	48
Şekil 3.26 Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinin kenar çıkarım sonuçları	49
Şekil 3.27 Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinin Hough dönüşümü sonucunda elde edilen doğrular	50
Şekil 3.28 Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinden pantograf üst ve yan doğrularının elde edilmesi	50
Şekil 3.29 Pantograf ark tespiti için kullanılan farklı videolardan farklı durumlarda alınan pantograf görüntüleri	52

Şekil 3.30 Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin kenar çıkarımı sonuçları	53
Şekil 3.31 Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin Hough dönüşümü sonucunda elde edilen doğrular	53
Şekil 3.32 Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin bulanık mantık sonucunda pantograf üst ve yan doğrularının elde edilmesi	54
Şekil 3.33 Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerden pantograf üst bölgesinin tespit edilmesi	55
Şekil 3.34 Pantograf üst bölgesinden alınan alana Otsu yönteminin uygulanması sonucu arkların tespit edilmesi	55
Şekil 3.35 Önerilen ark tespiti yönteminin 1000 Frame için uygulanması	56
Şekil 4.1 Çalılık bir gölgenin normal ve termal görüntüleri	60
Şekil 4.2 Önerilen yöntemin temel akış şeması	62
Şekil 4.3 İki doğrunun kesişim noktasının analitik düzlemde gösterilmesi	63
Şekil 4.4 Önerilen yöntemin temel akış şeması	64
Şekil 4.5 R (Red), G (Green) ve B (Blue) renklerinden bütün renklerin elde edilmesi	65
Şekil 4.6 Renkli termal görüntünün R, G ve B formatlarına ayrıştırılması	65
Şekil 4.7 Termal bir görüntünün R ve gri formatlarına dönüştürülmüş hali	66
Şekil 4.8 Lokomotif üzerine kurulan deneysel düzenek	67
Şekil 4.9 Termal kameradan alınan pantograf katener sistemin örnek görüntüleri	68
Şekil 4.10 Termal kameradan alınan pantograf katener sistemin gri seviyeli görüntüleri	68
Şekil 4.11 Normal ve termal görüntüler üzerinde kenar çıkarımı ve doğru tespiti	69
Şekil 4.12 Normal ve termal görüntüler üzerinde kenar çıkarımı ve doğru tespiti	69
Şekil 4.13 Termal görüntü üzerinde temas noktasının belirlenmesi ve temas noktasını içerisinde bulunduran bölgenin oluşturulması	70
Şekil 4.14 Termal kameradan alınan görüntülerin histogram sonuçları	71
Şekil 4.15 Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntüler	71
Şekil 4.16 Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntülerin gri ve R(red) görüntüleri	72
Şekil 4.17 Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntülerden alınan kesit alanı	72

Şekil 4.18 Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntülerin kesit alanlarının histogramı	73
Şekil 5.1 Bir FPGA'nın genel yapısı	78
Şekil 5.2 Lojik hücre yapısı	79
Şekil 5.3 Uygulamanın oluşturulduğu deneysel düzenek	80
Şekil 5.4 Geliştirilen örnek uygulamanın genel akış şeması	81
Şekil 5.5 Pin atama işlemi	82
Şekil 5.6 Uygulamanın chip üzerine yerleştirilmiş hali	82
Şekil 5.7 Uygulamada kullanılan normal görüntü	83
Şekil 5.8 Normal görüntünün kenar çıkarımı	83
Şekil 5.9 Signal Tab II Logic Analyzer'dan değişkenlerin izlenmesi	84
Şekil 5.10 Önerilen yöntemin genel akış şeması	85
Şekil 5.11 Önerilen yöntemde görüntülerin alınması için kurulan deneysel düzenek	86
Şekil 5.12 Önerilen yöntemde kullanılan görüntüler	87
Şekil 5.13 Örnek bir pantograf katener görüntüsünde MATLAB ile elde edilen sonuçlar	88
Şekil 5.14 Önerilen yöntemin blok şeması	89
Şekil 5.15 Örnek bir pantograf katener görüntüsünde FPGA ile elde edilen sonuçlar	90
Şekil 5.16 'Result' sinyalinin elde edilmesi için kullanılan Verilog kod parçası	90
Şekil 5.17 Önerilen yöntemin FPGA'da gerçekleştirilmesi sırasında elde edilen sinyaller ...	91
Şekil 6.1 Tez çalışması sonucunda elde edilen sistem	96

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1 Arıza teşhisi için literatürde kullanılan arızaların türlerine göre sınıflandırılması ..	9
Tablo 3.1 Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu	46
Tablo 3.2 Önerilen model tespit yönteminde kullanılan görüntülerin model tespit sonuçları	51
Tablo 3.3 Literatürde yapılan çalışmanın performans analizi	52
Tablo 3.4 Önerilen ark tespiti yönteminde kullanılan görüntülerdeki ark yoğunlukları	56
Tablo 4.1 Önerilen iki farklı yöntemde elde edilen sonuçlar	74
Tablo 5.1 Farklı boyutlardaki görüntülerden en iyi eşik değerlerinin hesaplanması için geçen zaman	87
Tablo 5.2 Videodan alınan 100 frameden elde edilen eşik değerleri	88
Tablo 5.3 Önerilen yöntemin tasarımı için gerekli kaynaklar	92
Tablo 5.4 Önerilen yöntemin farklı boyutlardaki görüntüler için zaman analizi	92
Tablo 5.5 Literatürde yapılan çalışmanın zaman analizi	92

SEMBOLLER LİSTESİ

x	: Pikselin yatay koordinatı
y	: Pikselin dikey koordinatı
t	: Görüntüdeki çerçeve sayısı
F_g	: Gauss maskeleme matrisi
S_x	: Sobel yatay maskeleme matrisi
S_y	: Sobel dikey maskeleme matrisi
G_x	: Yatay maskeleme matrisi
G_y	: Dikey maskeleme matrisi
G	: Gradient büyüklüğü
α	: Açı değeri
P_1	: Roberts maskeleme matrisinin birinci piksel değeri
P_2	: Roberts maskeleme matrisinin ikinci piksel değeri
P_3	: Roberts maskeleme matrisinin üçüncü piksel değeri
P_4	: Roberts maskeleme matrisinin dördüncü piksel değeri
q	: Roberts maskeleme matris değeri
m	: Doğrunun eğimi
b	: Öteleme değeri
θ	: x eksenini ile doğruya gelen dikme arasındaki açı
p	: Köşeden doğruya dik uzaklık
K	: Threshold sınıf sayısı
T_1	: İlk eşik değeri
T_2	: İkinci eşik değeri
T_3	: Üçüncü eşik değeri
T_4	: Dördüncü eşik değeri
C_k	: K sınıf sayısına ait gri seviye
w_k	: Sıfırıncı dereceden birikimli momentleri
μ	: İmgelerin yoğunluk ortalamaları

KISALTMALAR LİSTESİ

CCD	: Charge Coupled Device
R	: Kırmızı (Red)
G	: Yeşil (Green)
B	: Mavi (Blue)
IBM	: Uluslararası iş makineleri (International Business Machines)
V	: Volt
DC	: Doğru Akım
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
FPGA	: Field-Programmable Gate Array
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
LUT	: Bakma Tabloları
DSP	: Digital Signal Processing
USB	: Universal Serial Bus
PCI	: Peripheral Component Interconnect
CLBs	: Yapılandırılabilir Lojik Bloklar
LC	: Lojik Hücre
ASICs	: Uygulamaya Özgü Tümlşik Devreler

1. GİRİŞ

Demiryolu ulaşımı günümüzde yaygın olarak kullanılan ulaşım türlerinden birisidir. Bu ulaşım türü diğer ulaşım türlerine oranla düşük maliyetli ve güvenilirdir [1, 2]. Ulaşım teknolojisinin gelişmesiyle birlikte demiryolu ulaşımında da elektrikli trenler geliştirilmektedir. Elektrikli trenler diğer trenlere göre daha konforlu ve çevre dostudur. Elektrikli trenlerin çalışabilmesi için lokomotifin üzerine pantograf sistemi ve demiryolu hattı boyunca da katener sistemi kurulmaktadır. Pantograf katener sistemi, elektrikli trenin çalışması için ihtiyaç duyduğu gerekli elektrik enerjisini sağlayan sistemdir [3]. Elektrikli trenler, normal trenlere göre daha az enerji harcamaktadır. Bu nedenle günümüzde elektrikli trenler daha çok tercih edilmektedir. Pantograf katener sistemi demiryolu ulaşımında kritik bir bileşen olup günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 4].

Pantograf-katener sisteminde, pantograf sistemi trenin üzerinde olmasından dolayı ve katener sistemi demiryolu hattı boyunca bulunmasından dolayı çevre şartlarından etkilenmektedir. Olumsuz çevre şartlarında pantograf katener sistemlerinde oluşan anormal durumlar sistemin performansını düşürmektedir. Ayrıca anormal durumlar elektrikli trenlerin performansını da etkilemektedir. Bu sistemlerde erken aşamalarda anormal durumların tespiti ile daha ciddi arızaların oluşmasına engel olunmaktadır. Erken tespit edilemeyen anormal durumlar daha ciddi arızalar oluşturup sistemin tamamen durmasına neden olmakla birlikte bakım onarım maliyetinide artırmaktadır.

Pantograf katener sistemlerde, sistemin mekaniğinden veya çevre şartlarından dolayı birçok anormal durumlar oluşmaktadır. Bu anormal durumların giderilmemesi sonucunda büyük arızalar ortaya çıkmaktadır. Pantograf temas çubuğunun katener temas teliyle temas etmesi sonucunda bazı arıza türleri oluşmaktadır. Pantograf sisteminin katener sistemine aşırı baskı uygulaması sonucunda pantograf temas çubuğunda aşınma ve aşırı ısınma gibi arızalar oluşmaktadır [3]. Mevsim koşullarından dolayı katener temas telinde biriken su veya buz tabakası temas noktasında ark oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca pantograf ark arızaları aşağıdaki sebeplerden dolayı da oluşur:

- Yanlış statik temas kuvveti,
- Aşırı sürtünme,
- Yanlış şekilde kurulmuş aerodinamik,
- Bileşenlerin aşınması ve zayıf geometrik ayarlama.

Bu arıza türlerinin erken teşhis edilmemesi pantograf üst çubuğunda bulunan karbon yapının bozulmasına neden olmaktadır. Böylece daha büyük arızalar oluşarak ulaşımın durmasına neden olmaktadır. Bu nedenle pantograf katener sistemlerde erken arıza teşhisi oldukça önemlidir.

Elektrikli trenlerde oluşan arızaların erken tespit edilmesi için birçok arıza teşhis yöntemleri bulunmaktadır [5]. Pantograf katener sistemlerinde oluşan arızalar genel olarak iki farklı yöntem ile teşhis edilmektedir. Kullanılan yöntemlerden biri akım gerilim tabanlı arıza teşhisi diğeri ise görüntü işleme tabanlı arıza teşhisidir. Akım gerilim tabanlı arıza teşhis yöntemi, trenin içerisinde elektrik aksamı üzerine kurulan bir sistemdir. Lokomotifin pantograf katener sisteminden aldığı enerjinin akım ve gerilim değerlerini kullanarak arıza teşhisi yapmaktadır. Yapılan arıza yönteminde ark arızaları ve temassızlık arızaları gibi arızalar tespit edilmektedir. Fakat bu arıza teşhis yönteminin kurulumu zor ve uzman bilgisi gerektirmektedir. Ayrıca yöntemin gerçekleştirilme maliyeti yüksektir. Bu nedenle günümüzde tercih edilmeyen yöntemlerden biridir. Pantograf katener sistemlerde kullanılan arıza teşhis yöntemlerinden bir diğeri de görüntü işleme tabanlı arıza teşhisidir. Lokomotifin çatısına yerleştirilen normal veya termal kamera aracılığıyla pantograf katener sistemi gerçek zamanlı izlenmektedir. Pantograf katener sisteminden alınan görüntüler, görüntü işleme teknikleriyle birlikte kullanılarak birçok arıza teşhisi yapılmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile katener temas telinin ve pantograf temas çubuğunun hareketleri izlenmektedir. Bu yöntem uygulanması daha kolay, maliyeti düşük ve hızlı bir yöntem olduğundan en çok tercih edilen yöntemler arasındadır [4, 5].

1.1. Durum İzleme ve Arıza Teşhisinin Genel Çatısı

Pantograf katener sisteminde durum izleme ve arıza teşhisi birlikte düşünülmesi gereken iki kavramdır. Çünkü raylı sistemlerde olduğu gibi bütün sistemlerde de arızaların belirlenebilmesi için belirli bir periyot süresince sistemin izlenmesi gereklidir. Durum izleme ve arıza teşhisi kavramı ortaya çıktığından beri birçok arıza teşhis modelleri kullanılmıştır.

1.1.1. Temel Kavramlar

Arıza teşhisi ile ilgili birçok kavram mevcuttur. Bu kavramlar genellikle birbiri ile karıştırılmaktadır. Arıza teşhisinde en çok karşılaşılan kavramlar ile ilgili kısa tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

Arıza, bir sistemin genel ve standart durumundan en az bir karakteristiğinin izin verilmeyen şekilde davranmasıdır. Arıza, üretim kaybına veya üretimin azalmasına neden olan anormal bir durum olarak ifade edilir.

Durum izleme, herhangi bir sistemin çalışma karakteristiklerinin izlenmesi süreci veya tekniği olarak tanımlanmaktadır. İzlenen sinyallerin veya görüntünün değişimi ciddi bir hasar veya bozulma oluşmadan önce sistemin durumunu tahmin etmek veya bakımının gerekli olup olmadığını belirlemek için kullanılır.

Arıza teşhisi ile genellikle sistemlerde arıza olup olmadığını belirlemekle birlikte arızanın sebepleri ve şiddeti de belirlenmektedir.

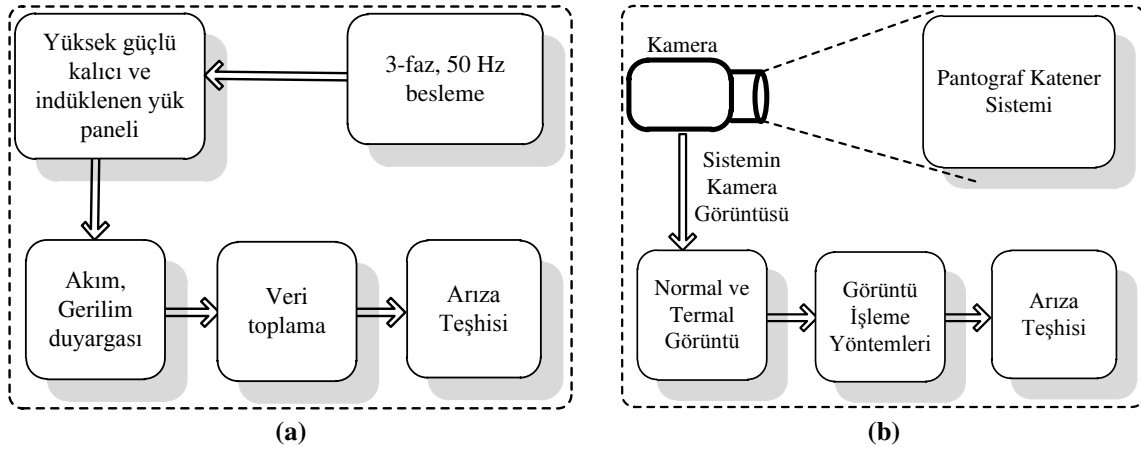
Arıza tahmini ise arıza teşhisine ek olarak donanım bileşenlerinin kalan ömrünün tahmin edilmesi de sağlanmaktadır.

1.1.2. Durum İzleme

Bu tez çalışmasında pantograf katener sistemi için görüntü işleme ve akıllı hesaplama tekniklerine dayalı yöntemler sunulurken durum izleme ve arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen durum izleme ve arıza teşhis yöntemlerinde normal görüntülerin yanı sıra termal kameradan alınan görüntülerde kullanılmaktadır. Elde edilen görüntüler bir akıllı hesaplama tekniği ile değerlendirildiğinde karar verme sürecinde arıza teşhisinin güvenilirliği ve etkinliği arttırılmaktadır. Normal ve termal görüntü tabanlı geliştirilen durum izleme ve arıza teşhis algoritmaları için gerekli test işlemleri yapılmaktadır. Kullanılan bazı yöntemler FPGA ortamında gerçek zamanlı test edilmektedir. Lokomotif yüksek hızda seyrederken normal ve termal görüntülerin alınması değerlendirilerek pantograf katener durumunun belirlenmesi işleminin hızlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle FPGA kartının sinyal işleme ve algoritmaların çalıştırılması için kullanımı önem arz etmektedir.

Pantograf katener sistemi için birçok durum izleme ve arıza teşhis yöntemleri mevcuttur. Günümüzde yaygın olarak bulunan iki farklı yöntem mevcuttur. Bu

yöntemlerden biri akım ve gerilim tabanlı diğeri ise görüntü işleme tabanlı durum izleme ve arıza teşhisidir [6]. Bu iki durumda da izleme ve arıza teşhisi için kullanılan sistemin genel yapısı Şekil 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1. Durum izleme ve arıza teşhisi için yaygın olarak kullanılan deneysel düzenekler (a) Akım ve gerilim ölçme sistemi (b) Normal ve termal görüntüler ile ark ölçme sistemi

Şekil 1.1 (a)’da görüldüğü üzere akım ve gerilim tabanlı durum izleme ve arıza teşhisi yönteminde akım ve gerilim duyargaları ile alınan veriler toplanmaktadır. Elde edilen akım ve gerilim sinyalleri üzerinde durum izleme yapılarak arıza teşhisi için yöntemler geliştirilmektedir. Fakat bu tür durum izleme ve arıza teşhis yöntemlerinin kullanımı günümüzde azalmaktadır. Çünkü bu tür yöntemler için kurulacak sistemler lokomotifin elektrik sistemine doğrudan bağlanmaktadır. Bu ise istenmeyen durumları ortaya çıkarmaktadır. Akım ve gerilim tabanlı yöntemlerde kurulan deneysel düzenekler oldukça maliyetli olup kurulumu zor ve uzman bilgisi gerektirmektedir.

Şekil 1.1 (b)’de verildiği gibi bir kamera aracılığıyla pantograf katener sisteminden alınan normal ve termal görüntüler elde edilmektedir. 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, maliyet gerektirmeyen yapılardır. Lokomotifin çatısına yerleştirilen bu sistem lokomotifin elektrik sistemine herhangi bir müdahalede bulunmamaktadır.

1.2. Literatür Özeti

Son yıllarda elektrikli trenlerin gelişmesiyle birlikte pantograf katener sistemleri de önemli bir sistem haline gelmiştir. Pantograf katener sistemlerinde oluşan arızaların teşhisi için akım, gerilim veya model tabanlı birçok farklı yöntemler geliştirilerek uygulamalar yapılmıştır.

Östund [7] özel tren setleri üzerinde DC bileşenleri ölçmüştür. Fakat tren setleri üzerinde ölçüm yapmak çekme akımı ve tren hızı gibi parametrelerin ayarlanması ve kontrolü zor olduğundan kullanışlı değildir. Matvejevs [8] ise, temas gücü etkilerini azaltmak için özel pantografların geliştirilmesini düşünmüş, ancak bunların pratik olarak geliştirilmesi maddi yönden çok zor olduğundan Matlab Simulink'te modelleme yapıp sonuçlarını simülasyon üzerinde görmeye çalışmıştır. Abdullah [9] kütle dinamiği analizi yöntemi kullanarak katener sistemini modellemiş, katener ve pantograf modellerini birleştirerek temas kuvvetini incelemiş, ileri ve geri beslemeli durumlar için sonuçları göstermiştir. Kia [10] pantograf katener sisteminin gerçek zamanlı olarak çalışması modellemiştir. Elde edilen simülasyon Matlab Simulink kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon farklı özelliklere sahip bilgisayarlarda çalıştırılarak gerçek zamanlı performansı incelenmiştir. Vazquez [11] çalışmasında, katener pantograf etkileşimi için temassız sensör kullanmış ve matematiksel model oluşturmuştur. Ancak ray üzerinde belirli noktalara kurulan sistemde hassasiyet oranı düşüktür ve tren geçişleri sırasında oluşan titreşimlerden etkilenmektedir. Ocoleanu [12] Pantograf katener sistemlerde pantograf ile katener temas noktasındaki aşırı ısınma ve sürtünmeden dolayı oluşan arızalar incelenmektedir. Pantograf katener sistemlerin yapısı verilmektedir. Katener temas telinin özellikleri incelenerek temas telinde oluşan sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Facchinetti [13] pantograf katener sisteminin birbiriyle temasını sağlayan model geliştirmiştir. Geliştirilen bu model gerçek zamanlı çalıştırılarak pantograf katener sisteminde oluşabilecek ark, ısınma ve aşınma problemlerini çözmek için uygulama önermiştir. Pantograf katener sistemi için birçok farklı model geliştirilmiştir. Midya [14] pantograf katener sistemlerinde oluşan ark arızaları için akım ve gerilim değerlerini incelemiştir. Pantograf ve katener sistemini temsil eden bir model yapı oluşturarak modelde oluşan ark türleri, akım ve gerilim değerleriyle tespit edilebilmesi için akım ve gerilim sinyallerini incelemiştir. Geliştirilen modelde ark arızalarının oluşması sonucunda katener temas telinde ortaya çıkan tahribatlar incelenmiştir.

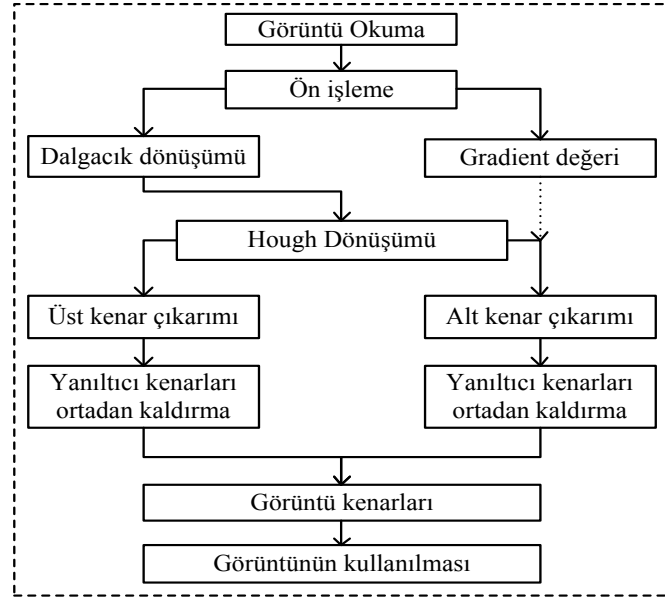
Liu [15] Pantograf katener sisteminde oluşan ark arızalarının tespit edilmesi için bir yöntem önermiştir. Mayr ark model kullanarak pantograf sisteminde oluşan arkları modellemiştir. Modelleme sonucunda pantograf sistemde oluşan arkları tespit etmektedir. Görüntü işleme tabanlı arıza tespit yöntemleri düşük maliyetli ve kurulumu kolay yöntemlerdir.

Mokrani [16] hızlı trenlerde pantograf katener sistemin temas kuvveti için bir kontrol yöntemi önermektedir.. Pantograf katener sistemin matematiksel modelini oluşturarak aktif pantograf kontrolü yapmaktadır. Simulink kullanarak yapılan modelde Fuzzy PID kontrol tabanlı bir yöntem önermiştir.

Collina [17] çalışmasında bazı özel yaklaşımlarla raylı sistemlerde akım toplama işleminin uygulamalarını göstermiştir. Hat testlerinden elde edilen deneysel verileri karşılaştırmalı bir şekilde vermiştir. Zhang [18] çalışmasında özel bir test yeteneğine sahip, hibrid simülasyon yöntemi kullanmıştır. Bu yöntemde hareket halinde olan farklı hızlardaki dört tip pantografin dinamik davranışı incelenerek karşılaştırma yapılmıştır.

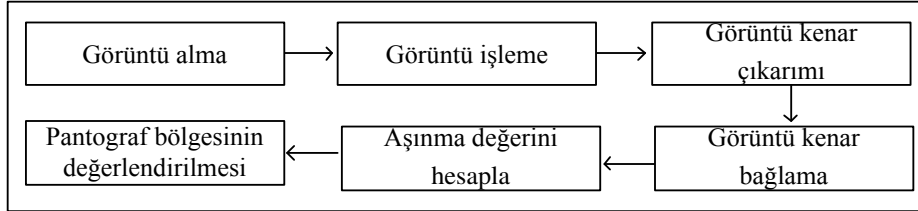
Literatürde verilen örnek çalışmaların dışında akım gerilim veya model tabanlı birçok çalışma bulunmaktadır [19-22]. Akım gerilim ve model tabanlı arıza teşhis yöntemleri gerçek sistem üzerinde uygulanması oldukça zahmetli yöntemlerdir. Bu nedenle bir diğer arıza teşhis yöntemi olan görüntü işleme tabanlı arıza teşhis yöntemi yaygın olarak uygulanmaktadır.

Li [23] pantograf temas bölgesinde oluşan aşınmayı algılamak için görüntü işleme algoritması sunmaktadır. Görüntü içinde kenarları elde etmek için dalgacık dönüşümü ve Hough dönüşümü kullanarak pantograf temas şeridinin alt ve üst kenarlarını elde etmiştir. Literatürde önerilen bu yöntemin akış şeması Şekil 1.2’de verilmektedir. Literatürde yapılan bu çalışmada, sadece pantograf üst bölgesinin görüntüsü kullanılmıştır. Önerilen yöntem bütün pantograf görüntüsü ve farklı türde pantograflar için geliştirilmemiştir. Ayrıca önerilen bu yöntem gerçek zamanlı bir sistem üzerinde gerçekleştirilmemiştir.



Şekil 1.2. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması [23].

Xiao-heng [24] pantograf üst çubuğunda oluşan aşınmaları kenar algılama ve çıkarım algoritmaları üzerinde incelemiştir. Önerdiği yöntemin genel şeması Şekil 1.3'te verilmiştir. Bu çalışmada kullanılabilecek kenar algılama ve çıkarım algoritmalarını kullanarak en uygun kenar çıkarım algoritmasını tespit etmiştir.



Şekil 1.3. Xiar-heng [24]'in önerdiği yöntemin genel şeması

Donnel [25] gerçek zamanlı pantograf durum izleme teknolojisinin temel özellikleri ve mevcut durumu incelemiştir. Pantograf katener sisteminin nesiller arası gelişiminden bahsederek kullanılan teknolojileri anlatmıştır. 16-bit mikroişlemci kullanarak sinyal işleme modülü ile pantograf hasar tespit sistemi önermiştir.

Hamey [26] Pantograf sisteminin incelenmesi için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önermiştir. CCD kameralar kullanarak pantograf sisteminin görüntüsünden segmentasyon yöntemi kullanarak pantograf sisteminin karbon şeridinde oluşan arızaları tespit etmektedir.

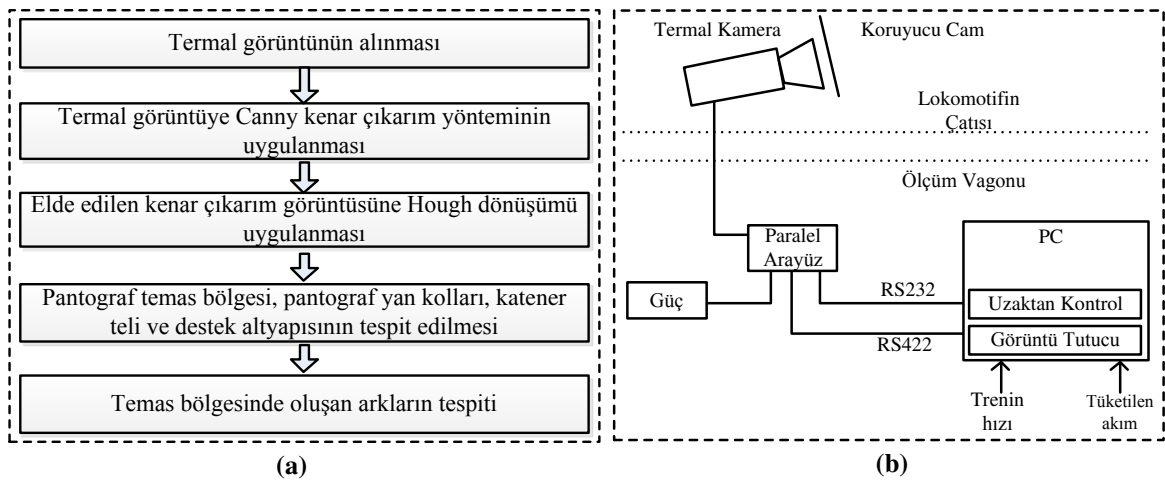
Boguslavskii [27] Bilgisayarlı görüntü işleme teknikleri ile pantograf geometrik model tespiti için gerçek zamanlı bir yöntem önermiştir. Önerilen çalışmada pantograf üst ve yan bölgeleri tespit edilmektedir.

Sacchi [28] Pantograf sisteminde oluşan arızaları tespit etmek için görüntü işleme tabanlı bir yöntem önermiştir. Farklı türde pantografların üstten görüntülerini kullanarak pantograf üst bölgelerini tespit etmektedir. Pantograf temas bölgelerini inceleyerek oluşan arızaları tespit etmektedir.

Boccioone [29] fiber optik sensörler kullanarak pantograf katener durum izleme için bir yöntem önermektedir. Pantograf temas bölgesine çeşitli sensörler yerleştirilerek pantograf sistemlerde durum izleme yapmaktadır. Pantograf ve havai hat arasındaki etkileşimi inceleyerek pantograf katener sistemlerde oluşan kusurları tespit etmektedir. Akım gerilim ve model tabanlı arıza teşhis yöntemleri gerçek sistem üzerinde kurulumu zor ve uygulanması oldukça zahmetli yöntemlerdir. Bu yüzden görüntü işleme tabanlı arıza tespit yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Landi [30] pantograf katener sistemlerde durum izleme için termal görüntü ve Hough dönüşümü tabanlı bir yöntem önermektedir. Pantograf katener sistemden alınan termal görüntüler kullanılarak pantograf temas bölgesi ve katener temas telinde oluşan arızalar tespit edilmektedir. Landi'nin önerdiği bu yöntemin akış şeması Şekil 1.4 (a)'da ve kullanılan ölçüm düzeneği Şekil 1.4 (b)'de verilmiştir.

Bucca [31] katener pantograf sisteminde temas teli ve temas yüzeyindeki aşınmanın kestirilmesi için bir yöntem önermiş ve yöntemin performansını sunmuştur.



Şekil 1.4. Literatürde önerilen yöntemin akış şeması ve kullanılan ölçüm düzeneği (a) Akış şeması (b) Ölçüm düzeneği [30].

Pantograf katener sistemlerde durum izleme arıza teşhisi için birçok farklı yöntemler geliştirilmiştir [32-39]. Literatürde kullanılan arıza türü, giriş verileri ve kullanılan yöntemler Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1’den görülebileceği gibi literatürde geliştirilen arıza teşhis yöntemleri genelde iki yönde ilerlemiştir. Birincisi, arızaları belirlemek için akım ve gerilim sinyallerini kullanmaktadır. İkincisi ise pantograf katener sistemin görüntüsünü kullanarak görüntü işleme tabanlı arıza teşhis yöntemleridir.

Tablo 1.1. Arıza teşhisi için literatürde kullanılan arızaların türlerine göre sınıflandırılması

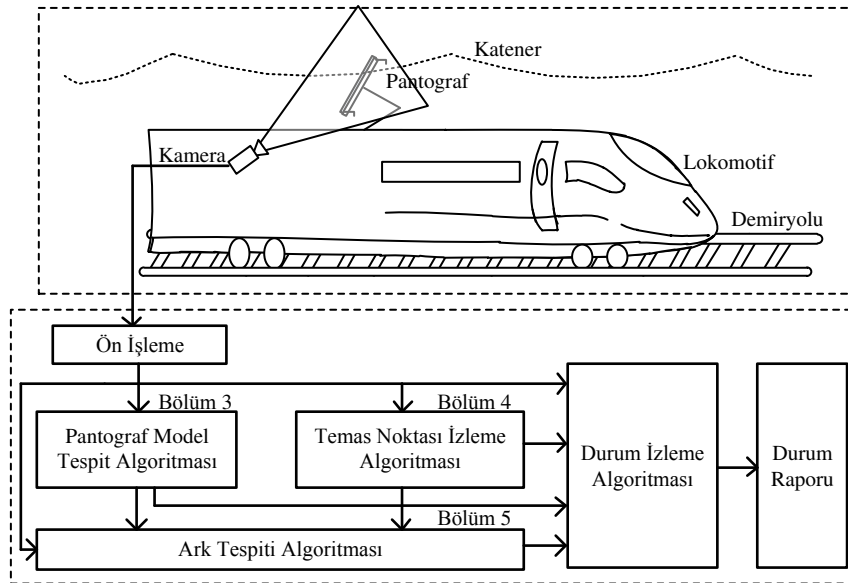
Kullanılan sensörler	Arıza	Kullanılan yöntem	Referans
İvmeölçer	- Pantograf temas şeridinin aşınması - Pantograf yukarı doğru olağanüstü aerodinamik hareketi	- Temas kuvvetinin normal yukarı doğru kuvvetinden sapmalar - İletim telindeki eksensel kuvvetin analizi	[2]
Akım ve gerilim	- Pantograf arkından bir tahrik sistemindeki dc bileşenlerin analizi - Ark arızaları	- Parametrelerin deneysel analizi - Destek vektör makineleri - Bulanık mantık	[14, 19, 42]
Normal ve Termal Video görüntüsü	- Pantograf ile temas telinin pozisyonunun belirlenmesi ve ikisi arasındaki etkileşim - Pantograf şeridinin durumunun izlenmesi - Temas telinin temas performansı - Temas performansının değerlendirilmesi - Temas telinin yüksekliğinin tespiti - Aşırı sürtünme, yanlış statik temas kuvveti	- Kenar çıkarımı ve yapısal geometrik modelleme - Kenar çıkarımı - Temas kuvvetinin analizi - Yapay sinir ağı ile temas teli yüksekliğinin tespiti - Watershed segmentasyon yöntemi - Otsu segmentasyon yöntemi - Diğer segmentasyon yöntemleri - Hough dönüşümü - Line Segment Detection - Mean shift nesne takip algoritması - Otsu segmentasyon yöntemi	[3, 4, 15, 23, 25, 27, 30, 41, 48, 54]
Foto tüp	Temas telinin aşırı aşınmalarının tespiti	Dalgacık analizi	[49]
Ark modelleme	Temas telinin performansı	Ark akım ve gerilimi	[53, 33]
Optik fiber	Pantograf-katener etkileşimi ve katener titreşimi, izolasyon problemleri	Sinyal işleme ile etkileşimin izlenmesi	[35,35]
Modelleme	Pantograf katener sisteminin etkileşimi	Döngüde donanımsal benzetim tekniği	[13-38]
Modelleme Video görüntüsü	- Üst temas telinin analizi - İletim tellerinin analizi	- Sinyal işleme - Dalgacık analizi	[39]
Akım Mikrografik görüntü	Pantograf şeridi ve temas telinin aşınmaları ve sürtünmelerin tespiti	Sinyal ve spektrum analizi	[40]

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, pantograf katener sistemlerde görüntü işleme tabanlı temassız izleme algoritmaları geliştirilmektedir. Tez çalışması süresince geliştirilecek algoritmaların temel amaçları normal ve termal kameralardan alınan görüntülerden pantograf katener temas bölgesinin izlenmesi, ark oluşumu ve oluşan diğer arızaların teşhis edilmesidir. Bu çerçevede tezin genel amaçları aşağıdaki şekilde verilebilir.

- Görüntü işleme ve bulanık mantık tabanlı pantograf geometrik model tespiti ve tespit edilen model yapı kullanılarak temas bölgesinin izlenmesi ve bu bölgede oluşan arkların tespit edilmesi,
- Normal ve termal görüntüler kullanılarak temas noktasındaki sıcaklık değişiminin izlenmesi,
- Termal görüntü kullanarak pantograf katener temas noktasında oluşan aşırı ısınma ve ark oluşumunun tespit edilmesi,
- Görüntü işleme algoritmaları ile temassız olarak ark tespitinin gerçekleştirilmesi,
- Bilgisayar ortamında geliştirilen algoritmaların FPGA ortamında gerçek zamanlı uygulanması ve gerekli teşhis sonuçlarının elde edilmesi,

Bu tez çalışmasının amacı ve kapsamında yapılan çalışmalar Şekil 1.5’te özetlenmiştir.



Şekil 1.5. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntem

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanmakta ve/veya değerlendirme aşamasında olan yayın çalışmalarına ilave olarak sonuçlanan akademik yayın çalışmaları aşağıda verilmiştir [40-47].

- “Pantograf Katener Sistemlerde FPGA Tabanlı Temassız Durum İzleme ve Ark Tespiti”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Türkiye (Hakem değerlendirmesinde).
- “Real-Time Monitoring of Pantograph-Catenary System Using FPGA Based Vision Techniques”, International Journal Engineering Science and Technology (JESTECH), Türkiye (Hakem değerlendirmesinde).
- “Particle Swarm Based Arc Detection on Time Series in Pantograph-Catenary System”, IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA’14), June 23-25, Alberobello, Italy, 2014.
- “Pantograf Katener Sistemlerde Görüntü İşleme ve Model Tabanlı Ark Tespiti”, 22. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014), 24-26 Nisan, Trabzon, Türkiye, 2014.
- “Görüntü İşleme ve Bulanık Mantık Tabanlı Pantograf Geometrik Modelin Tespiti”, 22. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014), 24-26 Nisan, Trabzon, Türkiye, 2014.
- “Contact Point Analysis Of Catenary-Pantograph System by Using Normal and Thermal Images”, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (Iserse 2013), 9-11 Ekim 2013, Karabük, Türkiye, 2013.
- “Pantograf-Katener Sistemlerde Oluşan Sıcaklık Değişimi ve Arkın Termal Görüntü İle Tespit Edilmesi”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK 2013), 26-28 Eylül, Malatya, Türkiye, 2013.
- “Kablosuz Duyarga Ağ Tabanlı Arıza Teşhis Yaklaşımları (Wireless sensor network based fault diagnosis approaches)”, 21. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2013), pp. 1-4, 24-26 Nisan, Girne, Kıbrıs, 2013.

1.4. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması *giriş bölümü* ile birlikte altı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde tez çalışması kapsamında literatür çalışması yapılarak, pantograf-katener sistemi için geliştirilen teknikler incelenmiştir.

İkinci bölümde, elektrikli trenler açıklanarak pantograf katener sistemlerinin yapısı verilmiştir. Pantograf katener sistemlerin bileşenleri, sistemin çalışma prensibi verilmiştir. Pantograf katener sisteminde oluşan arıza türleri ve bu arızaların oluşma nedenleri özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde, pantograf model tespiti amacıyla kullanılan görüntü işleme algoritmaları verilmiştir. Kenar çıkarım yöntemleri, Hough dönüşümü ve Otsu yöntemleri özetlenmiştir. Görüntü işleme ile pantograf modeli çıkarılarak pantograf tipi belirlenmekte ve pantograf temas bölgesinde oluşan ark arızaları tespit edilmektedir.

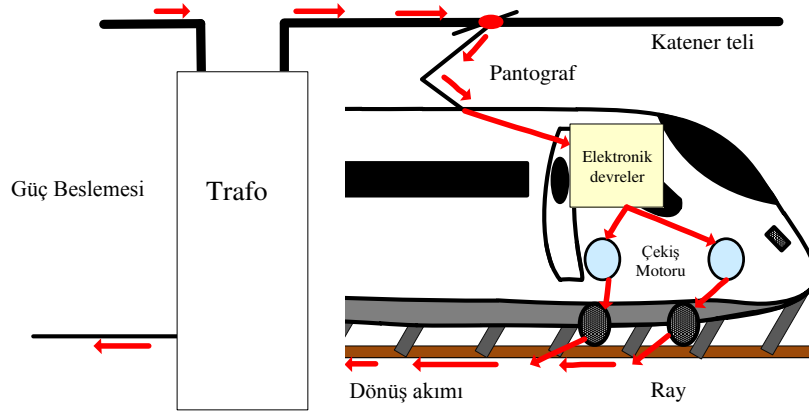
Dördüncü bölümde, termal görüntü özellikleri verilerek görme tabanlı temas noktası izleme yaklaşımları sunulmuştur. Normal ve termal görüntüler kullanılarak temas noktasının izlenmesi için bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde pantograf üst çubuğu ve katener temas teli tespit edilerek temas noktası izlenmektedir. Ayrıca termal görüntüler üzerinde sıcaklık değişimi ve arkın izlenmesi için bir yöntem önerilmiştir. Termal görüntü üzerinde piksellerin yoğunluğu dikkate alınarak temas bölgesi tespit edilmektedir. Tespit edilen temas bölgesi izlenerek aşırı ısınma ve ark arızaları tespit edilmektedir.

Beşinci bölümde, FPGA mimarisi verilerek uygulama geliştirme aşamaları özetlenmiştir. Daha sonra temassız ark tespiti için Otsu ve Sobel algoritmaları tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem FPGA üzerinde uygulanarak gerçek zamanlı çalışabilen bir sistem geliştirilmiştir.

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

2. PANTOGRAF KATENER SİSTEMLERİNDE DURUM İZLEME

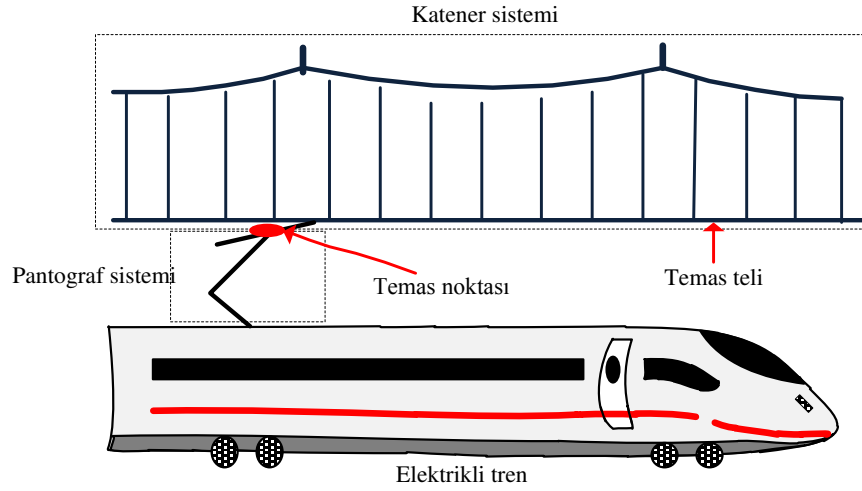
Demiryolu taşımacılığında elektrikli trenlerin çalışabilmesi için enerji iletim hatları, trafo merkezleri ve bunların kumanda kontrol birimlerinden oluşan bir sistem gerekmektedir. Bu sistemlerde, ihtiyaç duyulan enerjinin sağlıklı bir şekilde temin edlip elektrikli trene iletilmesi gerekmektedir. Demiryolu ulaşım sistemleri; elektriksel olarak besleme üniteleri, yardımcı güç üniteleri, tahrik sistemi ve kontrol denetleme ünitesi olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Besleme üniteleri kendi arasında havai hat katener sistemi ve üçüncü ray sistemi olarak ikiye ayrılır. Havai hat katener sistemi demiryolu üzerinde bulunarak trenin üstten elektrik almasını sağlamaktadır. Şekil 2.1’de bir elektrikli trenlerin basit elektrik aksamı gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Elektrikli trenlerin basit elektrik aksamı

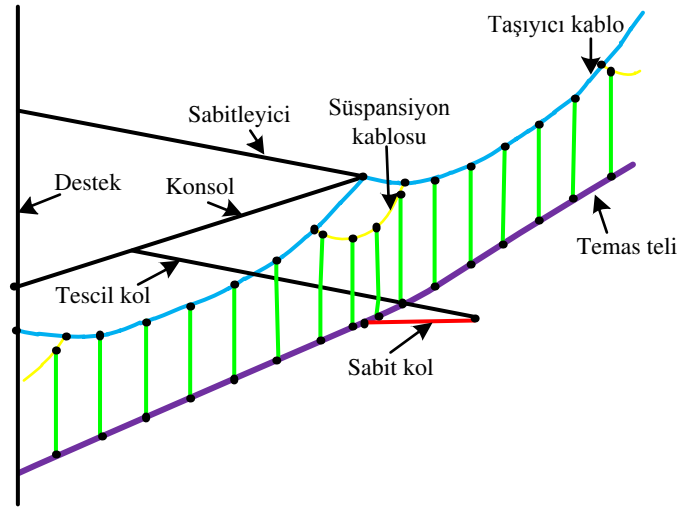
2.1. Pantograf Katener Sistemleri

Demiryolu ulaşımında yaygın olarak kullanılan pantograf katener sistemi, elektrikli trenin üzerinde bulunan pantograf sistemi ve demiryolu hattı boyunca kurulan katener sisteminden oluşmaktadır. Bu iki sistem kullanılarak elektrikli trenlerin gereksinim duyduğu enerjiyi sağlamaktadır [48]. Şekil 2.2’de örnek bir pantograf katener sistemi verilmektedir.



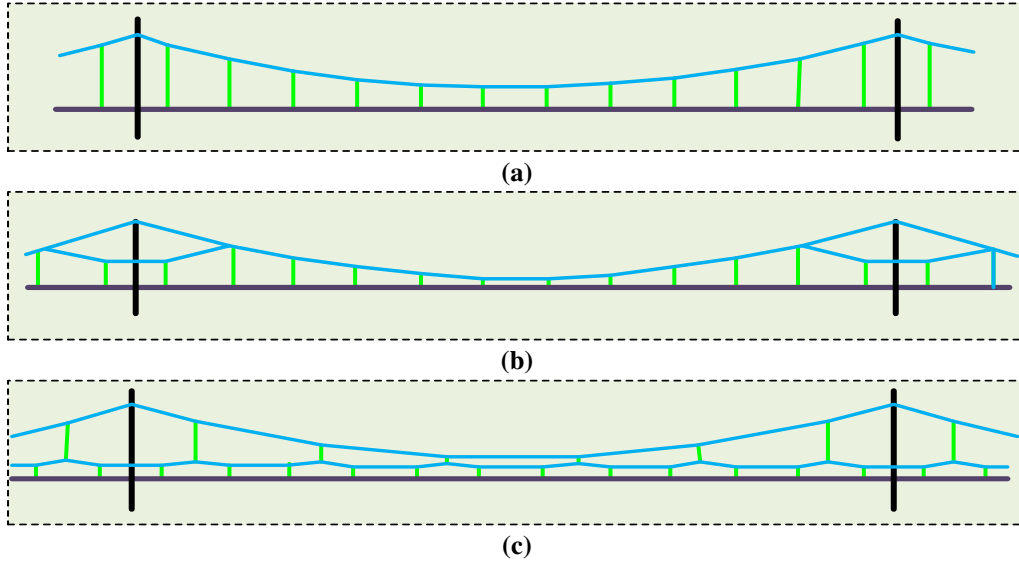
Şekil 2.2. Örnek pantograf katener sistemi

Şekil 2.2’de pantograf ve katener sisteminin genel hatları verilmektedir. Katener sistemi demiryolu hattı boyunca kurulmuş sabit bir sistemdir. Lokomotif hareket halindeyken pantograf ve katener sistemi sürekli temas halinde bulunarak, lokomotifin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi trafo merkezinden lokomotifine iletilmektedir. Elektrikli trenler için çok kritik bir bileşen olan katener sistemini oluşturan birçok bileşen bulunmaktadır. Şekil 2.3’te katener sistemi detaylı bir şekilde verilmektedir.



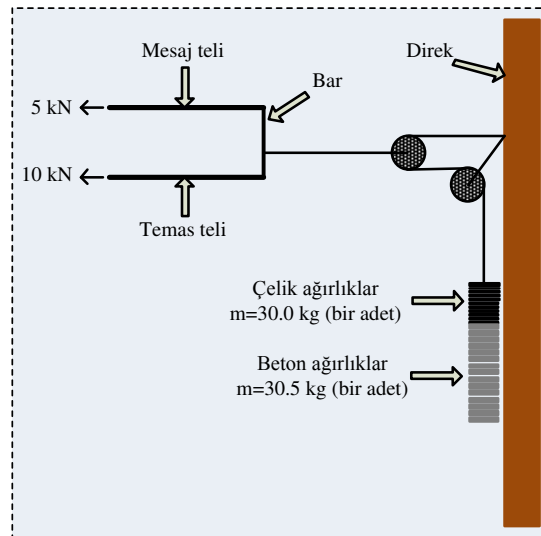
Şekil 2.3. Katener sistemi

Şekil 2.3'te genel bir katener sistemine ait bileşenler bulunmaktadır. Bazı katener sistemleri kullanım şartlarına bileşenlerine göre farklılık göstermektedir [49]. Şekil 2.4'te üç farklı katener sistemine ait görüntüler verilmektedir.



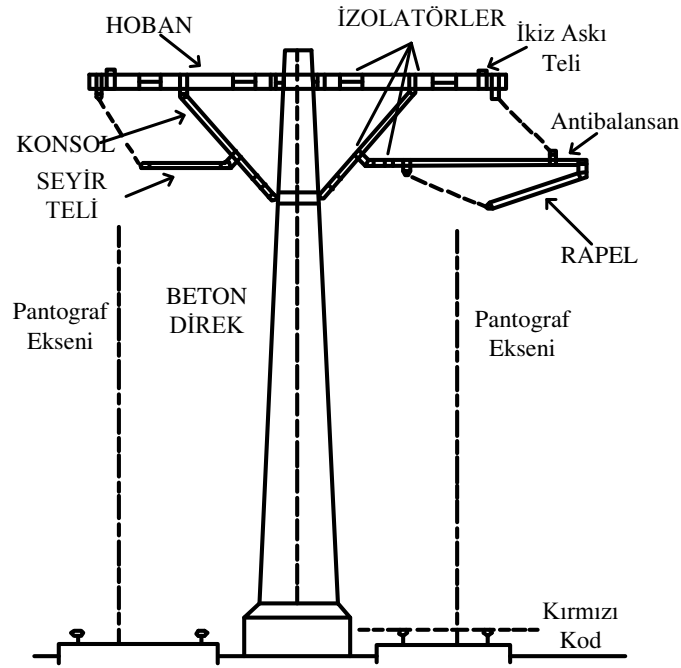
Şekil 2.4. Üç farklı katener sistemi (a) Basit katener (b) Dikişli katener (c) Bileşik katener

Katener sistemi demiryolu hattına belirli aralıklarla direkler vasıtasıyla sabitlenmiştir. Demiryolu hattında boyunca bulunan katener sisteminde elektrik iletiminin sağlanabilmesi için temas telinin düz bir şekilde sabitlenmesi gereklidir. Katener sisteminin düz bir şekilde sabitlenmesi kullanılan yapı Şekil 2.5'te verilmektedir [50].



Şekil 2.5. Katener sisteminin gerdirilmesi için kullanılan yapı

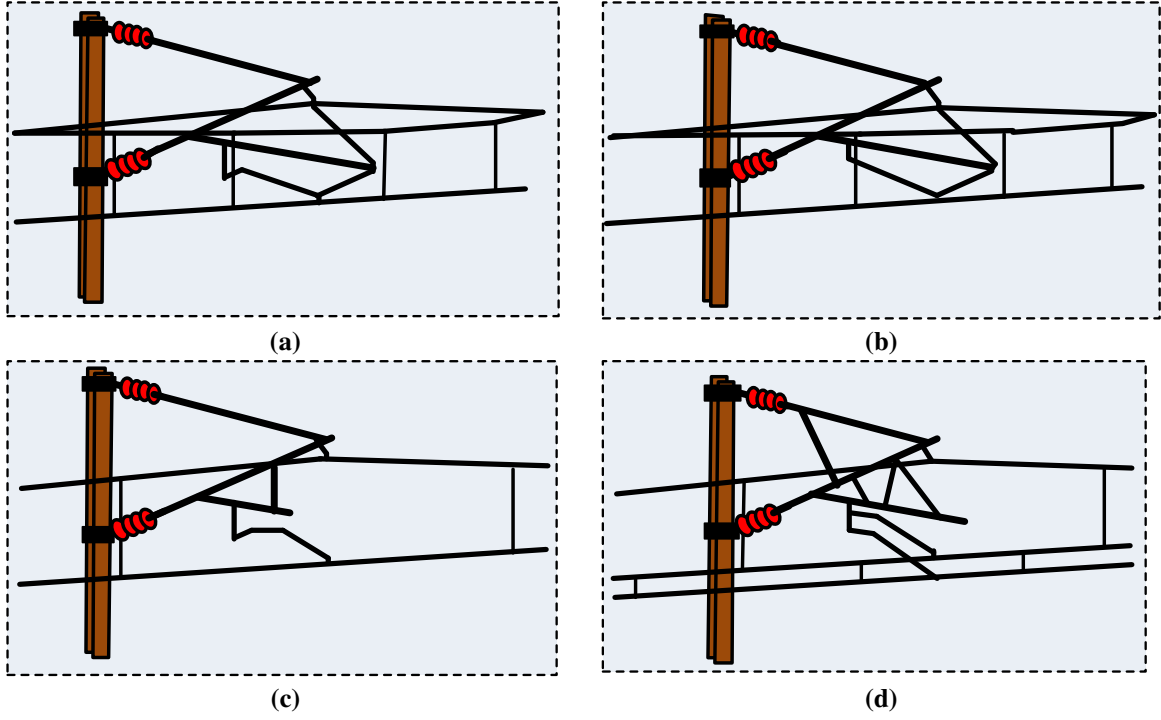
Katener sisteminin düz bir şekilde sabitlenmesi için demiryolu hattında belirli aralıklarla gerdirme işlemi yapılmaktadır. Katener telinin gerdirilmesi için demiryolu hattında bulunan direkler üzerinde çelik ve beton ağırlıklar bulunmaktadır. Bu ağırlıklar ile katener sistemi düz bir şekilde sabitlenmiştir. Katener sisteminde kullanılan direkler genellikle beton yapıda olup demir kollar aracılığıyla katener telleri sabitlenmiştir. Şekil 2.6’da katener direğinin yapısı verilmektedir.



Şekil 2.6. Katener direğinin yapısı

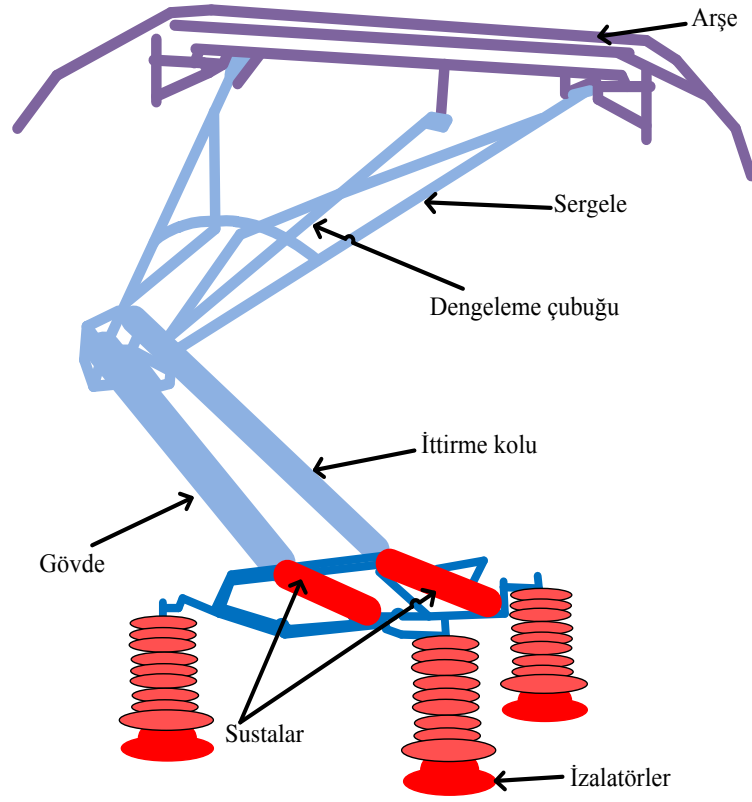
Şekil 2.6’da verilen katener direğinin yapısı genel olarak bu şekildedir. Demiryolu ulaşımında kullanılan elektrikli lokomotiflerin türüne göre katener direğinin yapısı farklılık göstermektedir. Şekil 2.7’de farklı ülkelerde hızlı trenlerde kullanılan katener direği yapıları verilmiştir [51].

Elektrikli demiryolu sistemlerinde katener sisteminin beslemesi için 600, 650, 750, 1500, 3000 V DC ve 15, 25 kV AC gerilimleri kullanılmaktadır. Ülkemizde ise 154 kV’luk elektrik enerjisi trafo merkezlerinde 25 kV’a düşürülerek hızlı tren hatlarında kullanılmaktadır. Katener hatlarındaki enerjinin lokomotiflere iletilmesi için pantograf sistemi kullanılır.



Şekil 2.7. Farklı ülkelerde hızlı trenlerde kullanılan katener direği yapıları (a) Fransa-güneydoğu LN1 (b) Almanya Re330 (c) Fransa-Atlantik LN2 (d) Japonya Shinkansen

Pantograf, elektrikli trenlerde katener telinden elektrik enerjisini trene aktaran bölümdür. Elektrikli trenin çatısında bulunur ve izolatörlerle çatıdan izole edilmektedir. İki adet karbon grafit kömür arşe üzerine monte edilmektedir. Bu iki kömürün pantografin her yüksekliğinde aynı yatay doğrultuda olması gerekmektedir. Dengeleme çubukları ile pantografin aynı doğrultuda kalmasını sağlamaktadır. Aksi halde kömürlerde dengesiz aşınma meydana gelmektedir. Pantografin sergelesi arşe ile gövde arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Pantografin mekanik gövdesi de elektrik enerjisini aktarmada iletken olarak kullanılmaktadır. Farklı mekanik yapılarda ve farklı sayıda başlıklardan oluşabilen pantografların katener hattına sağlıklı şekilde temas etmesi için üzerinde kontrol sistemleri bulunmaktadır. Şekil 2.8’de örnek bir pantograf sisteminin bileşenleri verilmektedir.



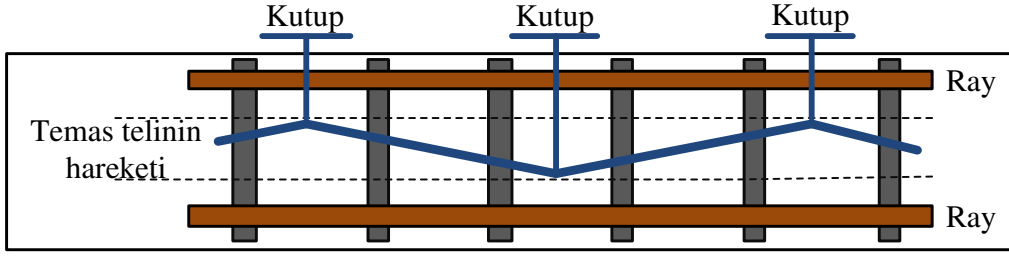
Şekil 2.8. Örnek pantograf sistemin bileşenleri

Elektrik trenlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte çeşitli pantograf türleri geliştirilmiştir.

2.2. Pantograf Katener Sistemlerinin Çalışma Prensibi

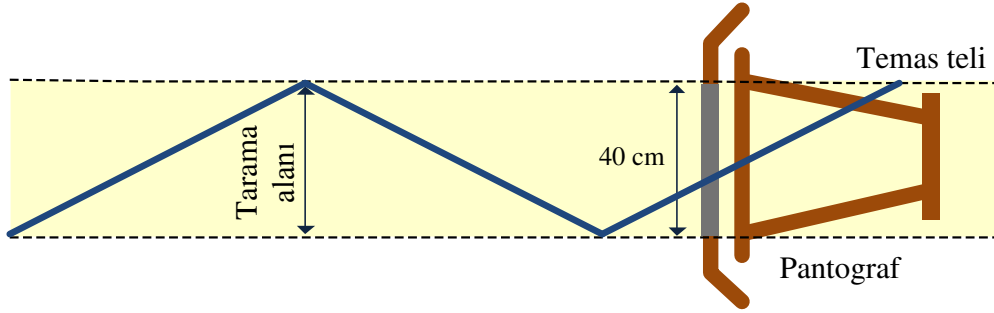
Elektrikli trenlerde, trenin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi, katener teli ile pantograf üst çubuğunun temas etmesiyle sağlanmaktadır. Böylece katener sisteminin sahip olduğu orta gerilim elektrik enerjisi pantograf sistemi aracılığıyla trene iletilmektedir. Bu işlem sırasında trene gelen elektrik enerjisinin kesintisiz bir şekilde iletilmesi sağlanmaktadır.

Katener teli ile pantograf üst çubuğunun birbiriyle temas etmesi durumunda aşırı ısınma ve sürtünmenin engellenmesi için temas noktası sürekli değişmektedir. Temas noktasının sürekli değişebileceği şekilde katener sistemi kurulmuştur. Demiryolu hattında katener temas telinin hareketi Şekil 2.9’da verilmektedir.



Şekil 2.9. Demiryolu üzerinde temas telinin hareketi

Şekil 2.9’da verilen katener teline temas eden pantograf üst çubuğunda temas noktası tren hareket halindeyken sürekli değişmektedir. Böylelikle pantograf üst çubuğu üzerinde bir tarama alanı oluşturulmuştur. Bütün temas noktaları bu tarama alanı içerisinde kalan bölgede gerçekleşmektedir. Pantograf katener sisteminde temas teli ile pantograf arasındaki tarama alanı Şekil 2.10’da verilmektedir.

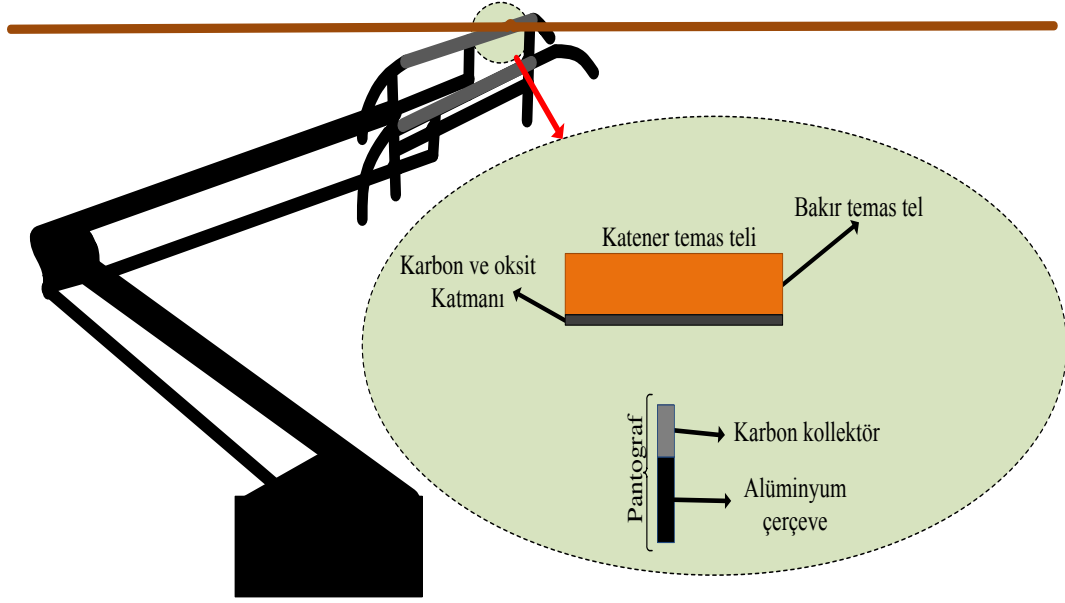


Şekil 2.10. Temas teli ve pantograf arasındaki tarama alanı

Şekil 2.10’da pantograf katener sistemleri için oluşturulan tarama alanı sayesinde pantograf üst çubuğu ile katener temas telinin temas alanı genişletilmiştir. Böylece pantograf üst çubuğunda bulunan karbon yapının aşırı ısınması ve dengesiz aşınması önlenmeye çalışılmaktadır.

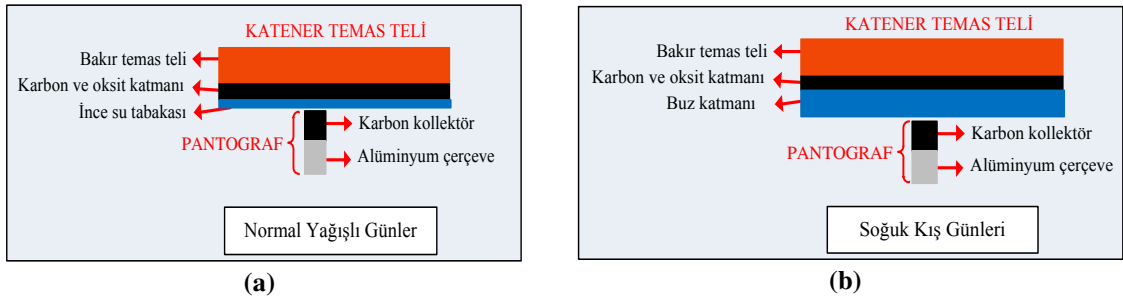
2.3. Pantograf Katener Sistemlerinde Oluşan Arızalar

Pantograf katener sistemlerde temas noktasında oluşan sürtünmeden dolayı aşırı ısınma ve ark oluşumu gibi bazı arızalar ortaya çıkmaktadır. Bu arızaların oluşmasının temel nedeni katener teli ile pantograf üst çubuğunun temas etmesinden kaynaklanmaktadır. Pantograf katener arasındaki kayan temas alanı Şekil 2.11’de verilmektedir.



Şekil 2.11. Pantograf katener arasındaki kayan temas alanı

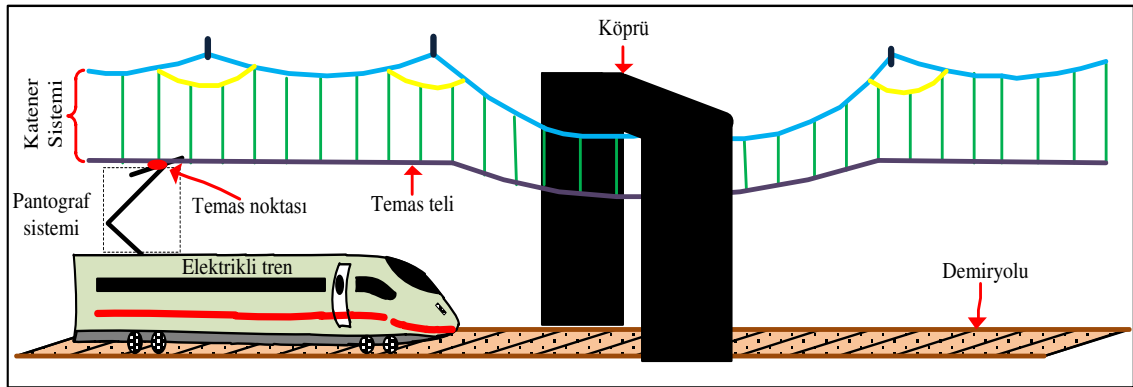
Şekil 2.11’de verilen pantograf katener arasındaki kayan temas alanı incelendiğinde temas bölgesinde bulunan katener temas teli ve pantograf üst çubuğu karbon yapıda olduğu görülmektedir. Karbon yapıda olmasının nedeni iletkenliği arttırmak ve sürtünmeyi azaltmaktır. Kış aylarında yağışlı veya soğuk havalarda katener temas telinde su veya buz tabakası oluşmaktadır [3-5]. Normal yağışlı ve soğuk kış günlerinde temas bölgesinde oluşan su ve buz tabakası Şekil 2.12’de verilmektedir [52].



Şekil 2.12. Normal yağışlı ve soğuk kış günlerinde temas bölgesinde oluşan farklılıklar (a) Normal yağışlı günlerde oluşan farklılıklar (b) Soğuk kış günlerinde oluşan farklılıklar

Şekil 2.12’de verildiği gibi kış aylarında oluşan su veya buz tabakasından dolayı katener temas telinin pantograf üst çubuğuna teması zorlaşmaktadır. Bu nedenle ark oluşumları gibi bazı problemler daha sık aralıklarla oluşmaktadır [26,53]. Ark oluşumlarının ardından aşırı sıcaklık ortaya çıkarak pantograf üst çubuğundan bulunan karbon yapıda hasarlar meydana gelmektedir.

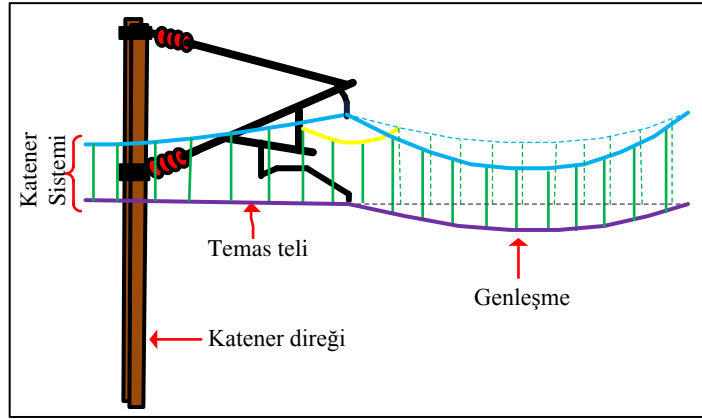
Pantograf katener sistemde temas kuvveti pantograf sistemi tarafından ayarlanmaktadır. Bu ayarlamalar sırasında katener telinin durumu dikkate alınmaktadır. Demiryolu hattında bulunan köprü girişlerinde pantograf temas bölgesi temas ayarlanması için pantograf yüksekliği azalmaktadır. Köprü çıkışlarında katener temas telinin yükselmesi durumunda pantograf yüksekliği artmaktadır. Şekil 2.13'te pantograf katener sistemin köprü giriş ve çıkışındaki durumu verilmektedir.



Şekil 2.13. Pantograf katener sistemin köprü giriş ve çıkışındaki durumu

Şekil 2.13'te görüldüğü gibi köprü girişinde temas telinin yerden yüksekliği azalmaktadır. Pantograf sistemi, yüksekliğini temas telini dikkate alarak ayarladığından pantograf yüksekliği de azalmaktadır. Ayrıca temas telinin genişmesi durumunda da temas kuvvetinin ayarlanması için pantograf yüksekliği azalmaktadır. Katener sisteminde yüksekliğin değişmesi sonucunda pantograf yüksekliğinin kontrol edilebilmesi gerekmektedir. Bu kontrol işleminin sağlanamaması durumunda pantograf ve katener sisteminin bileşenlerinde aşınmalar ve aşırı ısınmalar oluşarak büyük arızaların oluşmasına neden olmaktadır.

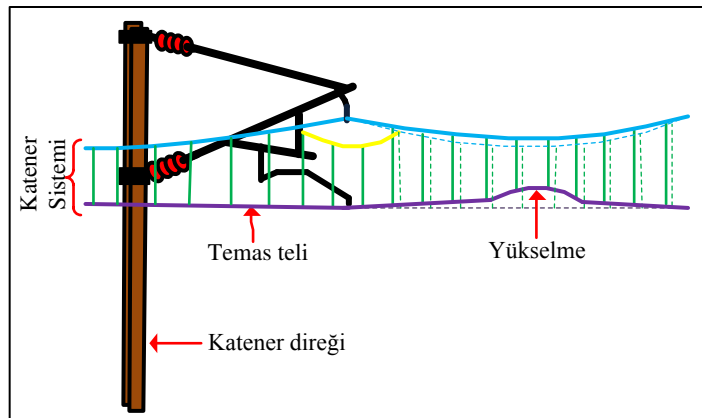
Pantograf katener sistemlerinde temas noktasının sürekliliğinin sağlanmasında katener telindeki genişleme önemlidir. Şekil 2.14'te katener temas telinin genişleme sonucundaki durumu verilmektedir.



Şekil 2.14. Katener temas telinin genleşme sonucundaki durumu

Mevsim şartlarından dolayı katener telinde meydana gelebilecek genleşmeler sonucunda pantograf üst çubuğunun katener teline teması zorlaşmaktadır. Bu nedenle temas işleminde kesintiler olurken elektrik iletiminin aksamasından dolayı arızalar meydana gelmektedir. Ayrıca temas işlemindeki bu aksaklıklar ark oluşumuna da neden olmaktadır.

Pantograf katener sisteminde temas işleminin gerçekleştirilmesi için pantograf sisteminin katener teline belirli bir kaldırma kuvveti uygulayarak temas etmektedir. Pantograf sisteminde bulunan yay ve diğer araçların ayarlarının değişmesi veya arızalanmaları sonucunda katener teline çok fazla kuvvet uygulamaktadır. Uygulanan fazla kuvvet sonucunda katener teli yükseldiği gibi aşırı sürtünme meydana gelmektedir. Aşırı sürtünmeden dolayı hem katener teli hem de pantograf üst çubuğundaki karbon yapı aşınmaktadır. Aşınma işlemi sırasında oluşan aşırı ısınma ile karbon yapılar daha erken deformasyona uğramaktadır. Şekil 2.15'te katener temas telinin yükselmesi sonucundaki durumu belirtilmektedir.



Şekil 2.15. Katener temas telinin yükselmesi sonucundaki durumu

Pantograf katener sistemlerinde oluşan arızalar büyük maddi hasarlara yol açmaktadır. Ayrıca demiryolu ulaşımının aksaması, yolcu ve kargo güvenliği gibi büyük sorunlara yol açmaktadır. Oluşan arızaların daha büyük sonuçlara neden olmasını engellemek için pantograf katener sistemlerinde erken teşhis oldukça önemlidir.

2.4. Bölüm Değerlendirmesi

Bu çalışmada, pantograf katener sistemlerinin yapısı verilerek pantograf ve katener sistemi oluşturan bileşenler açıklanmıştır. Pantograf katener sistemlerin çalışma prensipleri detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu sistemlerde arıza oluşma nedenleri, oluşan arıza türleri ve erken arıza teşhisinin önemi açıklanmıştır. Pantograf katener sistemlerinde oluşan küçük problemler önlenmediğinde büyük arızaların oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan büyük arızalar demiryolu ulaşımın aksamasına, ulaşım kalitesinin düşmesine, yolcu güvenliğinin azalmasına ve bakım-onarım maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle pantograf katener sistemlerinde durum izleme ve erken arıza teşhisi önemlidir. Durum izleme ve erken arıza teşhisi için pantograf katener sistemlerinin yapısı, bileşenleri, çalışma prensibi ve arıza oluşma nedenlerinin bilinmesi gereklidir. Tez çalışmasının bu bölümünde, pantograf katener sistemlerinde durum izleme için gerekli açıklamalar yapılmıştır.

3. GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE PANTOGRAF MODELİ ÇIKARILMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde, pantograf katener sisteminde model ve ark tespiti için yeni bir yöntem önerilmektedir. Görüntü işleme ve bulanık mantık tabanlı bu yöntemde, birçok farklı türde pantograf sisteminin görüntüsü kullanılmıştır. Kullanılan görüntüler üzerinde Canny kenar çıkarımı yapıldıktan sonra Hough dönüşümü ile doğrular elde edilmektedir. Elde edilen doğruların bazı özellikleri bulanık mantığın giriş verileri olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık sonucunda pantograf sisteminin modeli tespit edilmektedir. Tespit edilen pantograf modeli kullanılarak pantograf temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir.

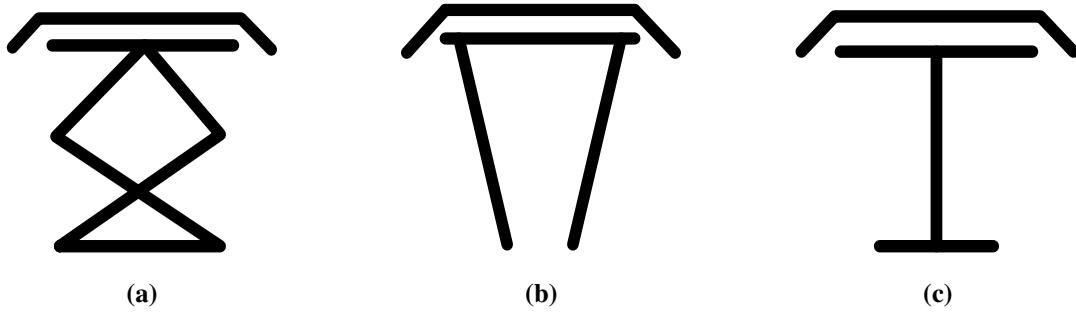
3.1. Giriş

Elektrikli trenin hareketi süresince pantograf-katener sistemi birbiriyle temas halindedir. Pantograf üst şeridi ile katener temas teli birbirine temas ederek elektrik enerjisini lokomotif aktarmaktadır. Bu aktarma işleminin sürekliliğinin sağlanması için pantograf katener sistemi önemlidir. Fakat bazı çevre şartları, pantograf katener sisteminde oluşan küçük arızalardan dolayı elektrik aktarılması sırasında kesintiler oluşmaktadır. Bu kesintilerin önlenmemesi durumunda daha büyük arızalar oluşarak ulaşımın aksaması, maliyetli bakımlar ve güvenliği tehdit eden unsurlar ortaya çıkabilir. Mevsim şartlarından dolayı katener telinde oluşan buz katmanları, sistemin yanlış yapılandırılması, aşırı sürtünme ve ark oluşumu gibi nedenlerden dolayı büyük arızaları oluşabilir [5].

Bu bölümde, pantograf katener sistemlerde model ve ark tespiti için bulanık mantık ile görüntü işleme tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde öncelikle farklı tür pantograflardan alınan görüntüler kullanılarak kenar çıkarımı ile pantograf doğruları elde edilmiştir. Hough dönüşümü ile elde edilen bütün doğruların özellikleri bir bulanık mantık ile birlikte kullanılarak pantograf üst ve yan doğruları tespit edilmektedir. Tespit edilen yan doğruları kullanılarak pantograf modeli belirlenmektedir. Ayrıca pantograf üst doğruları kullanılarak pantograf temas yüzeyinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Böylece ark tespiti için görüntü üzerinde sadece belirli bir alan incelenmektedir.

3.2. Pantograf Modelleri

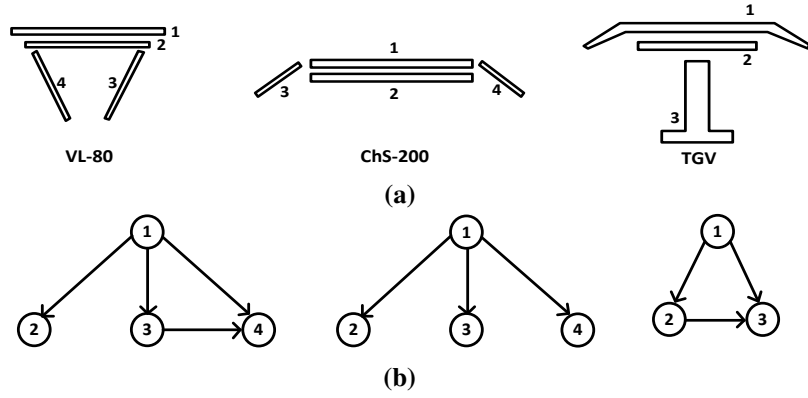
Pantograf katener sistemlerde birçok farklı türde pantograf modelleri bulunmaktadır. Bu modeller kullanılan elektrikli trenlerin türlerine göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada genel olarak üç farklı türde pantograf modeli kullanılmaktadır. Kullanılan pantograf modelleri Şekil 3.1’de verilmektedir [40].



Şekil 3.1. Pantograf türleri (a) Chs-200 (b) VL-80 (c) TGV

Şekil 3.1’de verilen pantograf türleri kullanılarak pantograf model tespiti yapılmaktadır. Günümüzde kullanılan demiryolu araçlarının türlerine göre pantograf katener türleri geliştirilmektedir. Pantograf katener sistemlerde pantograf modellerinin belirlenmesi gerekirse temel olarak üç farklı model bulunmaktadır. Pantograf türleri genellikle Şekil 3.1’de verilen pantograf modellerine benzerlik göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada birçok pantograf modelini temsil eden üç farklı model kullanılmıştır. Şekil 3.1(a)’da verilen pantograf modeli 86-sınıfı ve 87-sınıfı lokomotiflerde yaygın olarak kullanılmaktadır. En çok kullanılan pantograf türü Şekil 3.1(b)’de verilen ve 1970 yıllarında geliştirilen BR/Brecknell modelidir. Şekil 3.1(c)’de verilen pantograf modeli 25 kV lokomotiflerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

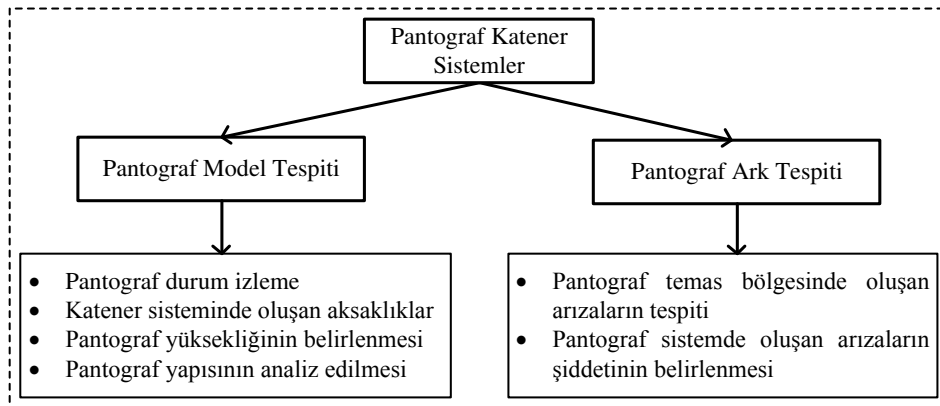
Literatürde önerilen çalışmaya benzer bir çalışma mevcuttur. Boguslavskii [27] önerdiği yöntemde kullanılan pantograf modelleri ve graf yapıları Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Literatürde kullanılan pantograf modelleri ve graf yapıları [27]. (a) Pantograf modelleri (b) Graf yapıları

Şekil 3.2’de verilen graf yapılarında her üç graf için de öncelikle pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Daha sonra pantograf yan bölgeleri tespit edilerek pantografin diğer bölgelerini belirlemektedir.

Literatürde yapılan bu çalışmada, önerilen yöntemin başarı oranı düşüktür. Günümüzde pantograf katener sistemlerde oluşan arızaların erken teşhisi için gerçek zamanlı kontrol ve takip yöntemleri geliştirilmektedir. Pantograf katener sistemi gerçek zamanlı izlenerek oluşan arızalar erken teşhis edilmektedir. Pantograf katener sistemlerde görüntü işleme tabanlı arıza teşhis yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Pantograf görüntüsü izlenerek pantograf model tespiti veya pantograf temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Model ve ark tespiti yöntemlerinin pantograf katener sistemlerde kullanılması Şekil 3.3’te verilmektedir.



Şekil 3.3. Model ve ark tespiti yöntemlerinin pantograf katener sistemlerde kullanılması

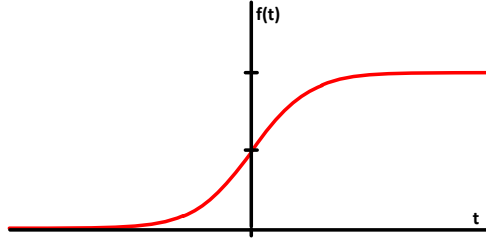
Şekil 3.3'te pantograf modeli tespit edilmesi sonucunda, pantograf sisteminin gerçek zamanlı davranışı gözlemlenebilir. Ayrıca pantograf yüksekliği, temas bölgesi, katener telinin takip edilmesinde pantograf modeli kullanılabilir. Pantograf ark tespitinde ise pantograf temas bölgesinde oluşan arklar erken teşhis edilerek oluşan arızalar önlenmektedir. Pantograf temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilerek arızanın şiddeti ölçülmektedir.

3.3. Model Tespiti Yönteminde Kullanılan Teknikler

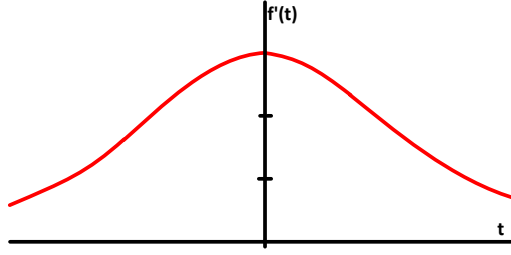
Günümüzde pantograf katener sisteminde durum izleme ve arıza tespiti için görüntü işleme tabanlı çok sayıda çalışma bulunmamaktadır [54-56]. Bu nedenle pantograf model tespiti için görüntü işleme tabanlı çalışmaların sayısı oldukça azdır. Literatür taraması yapılarak, pantograf model tespiti için geliştirilen yöntemler incelenmiştir. Mevcut çalışmalarda, pantograf görüntüsü üzerinde kenar çıkarımı ve Hough dönüşümü uygulanarak görüntü üzerinde pantograf kenarları elde edilmektedir. Elde edilen pantograf kenarları ile graf yapıları kullanılarak pantograf üst, yan ve alt doğruları tespit edilmektedir. Bu çalışmada ise pantograf model çıkarımı ve ark tespiti için kenar çıkarımı ve Hough dönüşümünün ardından bulanık mantık tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan görüntü işleme teknikleri; kenar çıkarım yöntemleri, Hough dönüşümü ve Otsu metodudur.

3.3.1. Kenar Çıkarım Yöntemleri

Kenar çıkarım algoritmaları, görüntülerdeki ana hatların bulunmasını içeren algoritmalar [22]. Bu algoritmalar Gradient ve Gaussian olarak iki ana başlık altında verilebilmektedir. Gradient sınıfına giren algoritmalar, sinyalin birinci türevinin maksimum ve minimum olduğu noktaların kontrol edilmesiyle kenar algılanması işlemini gerçekleştirirler [57]. Şekil 3.4'te herhangi bir resmin piksel değerlerinin değişimi olduğu varsayılmaktadır. Bu sinyalin birinci türevi alındığında Şekil 3.5'te verilen sinyal elde edilmekte ve değişim noktasında maksimum değere ulaşıldığı kolayca görülmektedir.

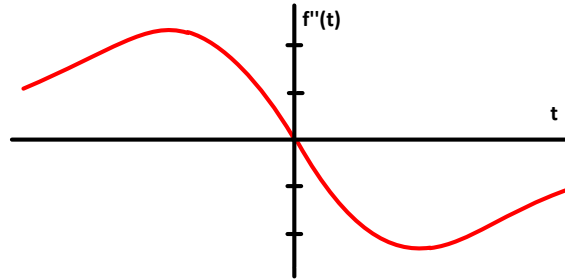


Şekil 3.4. Herhangi bir resmin piksel değerlerinin değişimi



Şekil 3.5. Şekil 3.4'te ki sinyalin birinci türevi

Gaussian sınıfına giren kenar çıkarma algoritmaları da sinyalin ikinci türevinin sıfır noktalarının belirlenmesi ile kenar çıkarma işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.4'te ki sinyalin ikinci türevi alındığında Şekil 3.6'da sıfır noktasının sinyalin değişim noktası olduğu açık bir biçimde görülmektedir.

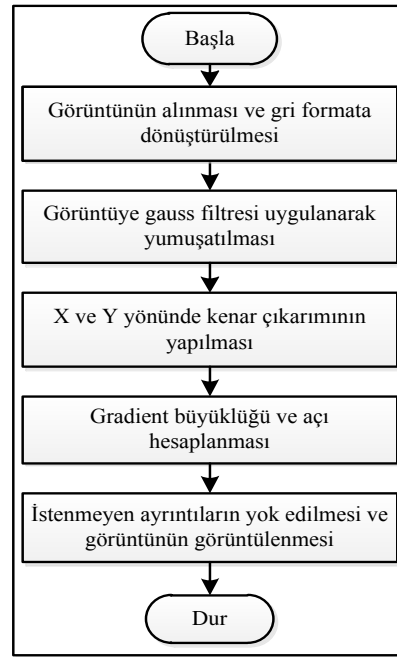


Şekil 3.6. Şekil 3.4'te ki sinyalin ikinci türevi

Görüntü işleme yöntemlerinde sıklıkla kullanılan belli başlı algoritmalar; Canny kenar çıkarma algoritması, Sobel kenar çıkarma algoritması, Robert kenar çıkarma algoritması ve Prewitt kenar çıkarma algoritmalarıdır.

3.3.1.1. Canny Kenar Çıkarım Algoritması

Bir görüntüdeki kenarlar, parlaklık değerlerinin ani değiştiği pikseller olarak tanımlanmaktadır. Kenar çıkarım yöntemleri görüntü işlemede oldukça önemlidir. Canny kenar çıkarım algoritması çok aşamalı olarak işlem görmektedir. Canny kenar çıkarım algoritmasının genel akış şeması Şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7. Canny kenar çıkarım algoritmasının genel akış şeması

Şekil 3.7’de verilen akış şemasına göre Canny algoritmasının ilk adımı görüntünün gri formata dönüştürülmesidir. Renkli bir görüntü “Red”, “Green” ve “Blue” renklerini içeren üç temel matristen oluşmaktadır. Renkli bir görüntünün görüntü işleme için uygun olmamasından dolayı gri formata dönüştürülmektedir. Renkli bir görüntünün matris değerlerinin gri formatlı görüntü matrislerine dönüştürülmesi denklem 3.1’de verilmektedir.

$$f(i, j) = R(i, j) * 0,2989 + G(i, j) * 0,5870 + B(i, j) * 0,1140 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’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. Elde edilen gri formattaki görüntüye gauss filtresi uygulanarak görüntüde

yumuşatma işlemi yapılmaktadır. Gauss filtresinde 5x5 boyutunda bir Gauss maskesi kullanılmaktadır. Gauss maskesi denklem 3.2’ de verilmektedir.

$$Fg = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * \frac{1}{159} \quad (3.2)$$

Gaussian filtre uygulanarak görüntü yumuşatma işlemi yapılmıştır. 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 3.3’te verilmektedir.

$$Sx = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Sy = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Elde edilen görüntü matrisleri üzerinde Gradient büyüklüğü hesaplanarak belirli açı sınırlamalarına göre görüntü oluşturulmaktadır. Her piksel için hesaplanan Gradient büyüklüğü denklem 3.4’te verilmektedir.

$$G(i, j) = \sqrt{Gx(i, j)^2 + Gy(i, j)^2} \quad (3.4)$$

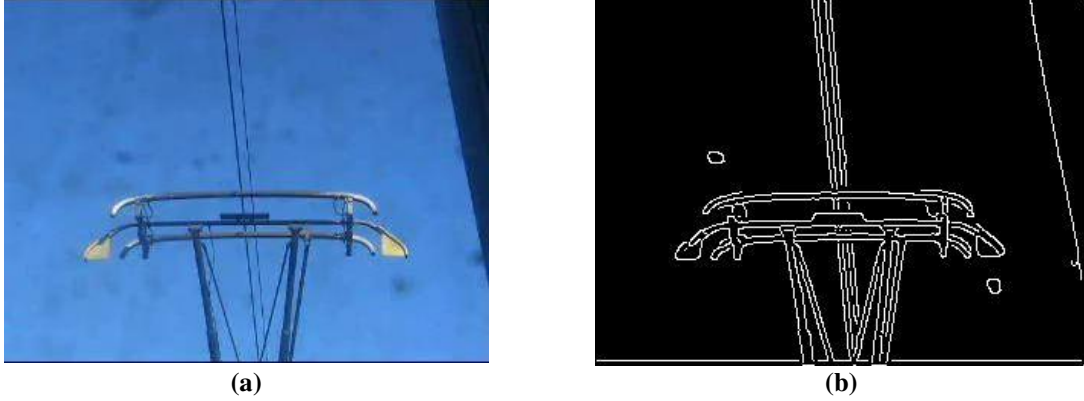
Denklem 3.4’te her piksel için Gradient büyüklüğü hesaplandıktan sonra her pikselin açı değeri denklem 3.5’te ki gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha(i, j) = \tan^{-1} \frac{Gy(i, j)}{Gx(i, j)} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’te hesaplanan açı değerleri dikkate alınarak özel açı olmayan açı değerleri kullanılmayarak istenmeyen ayrıntılar yok edilmektedir.

Kenar tespiti için eşikleme uygulanması adımımda ise elde edilen görüntünün ikili formatta bir görüntüye dönüştürülmesi için eşikleme işlemi yapılmaktadır. Bu eşikleme sonucunda görüntüde bulunan kenarlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca pantograf katener sistemlerde görüntü üzerinde eşikleme yapılarak özellik çıkarımı da yapılmaktadır [22]. Bu işlem, görüntüdeki piksel değerlerini kontrol etmektedir. Belirlenen eşik değerinin

altındaki pikseller siyah, üstündeki piksel değerleri ise beyaz olarak belirlenmektedir. Böylece görüntüdeki bütün pikseller siyah-beyaz değerler içererek ikili formatta bir görüntü elde edilmektedir. Şekil 3.8’de bir görüntünün kenar çıkarımı yapılmış hali verilmektedir.



Şekil 3.8. Canny kenar algılama algoritması sonucu (a) Normal görüntü (b) Kenar çıkarımı elde edilmiş görüntü

Canny kenar çıkarım algoritması görüntüde kenar çıkarımı yapmadan önce Gauss filtresini kullandığı için kenar çıkarım işlemi daha başarılı elde edilmektedir. Bu kenar çıkarım algoritması diğer kenar çıkarım algoritmalarına göre daha iyi sonuç vermektedir.

3.3.1.2. Sobel Kenar Çıkarım Algoritması

Sobel kenar çıkarım algoritması, sinyalin birinci türevindeki maksimum ve minimum noktalarının kontrol edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem için 3x3 boyutunda iki adet maskeleme matrisi kullanılmaktadır. Bu iki adet matris hem x ekseninde hem de y ekseninde kontrollerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Sobel kenar çıkarım algoritması görüntü matrisi üzerinde 3x3 boyutundaki S_x ve S_y matris ile tarama işlemidir. S_x ve S_y matrisleri 3.6’da verilmektedir.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Bu maskeleme matrisleri, resimdeki tüm piksellerin değerleri ile konvolüsyon işlemine girerek x ve y eksenindeki değerlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Şekil 3.9’da maskeleme işleminin nasıl gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

GİRİŞ MATRİSİ					MASKELEME			ÇIKIŞ MATRİSİ				
a_{11}	a_{12}	a_{13}	...	a_{1k}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	...	b_{1k}
a_{21}	a_{22}	a_{23}	...	a_{2k}	m_{21}	m_{22}	m_{23}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	...	b_{2k}
a_{31}	a_{32}	a_{33}	...	a_{3k}	m_{31}	m_{32}	m_{33}	b_{31}	b_{32}	b_{33}	...	b_{3k}
⋮	⋮	⋮						⋮	⋮	⋮		

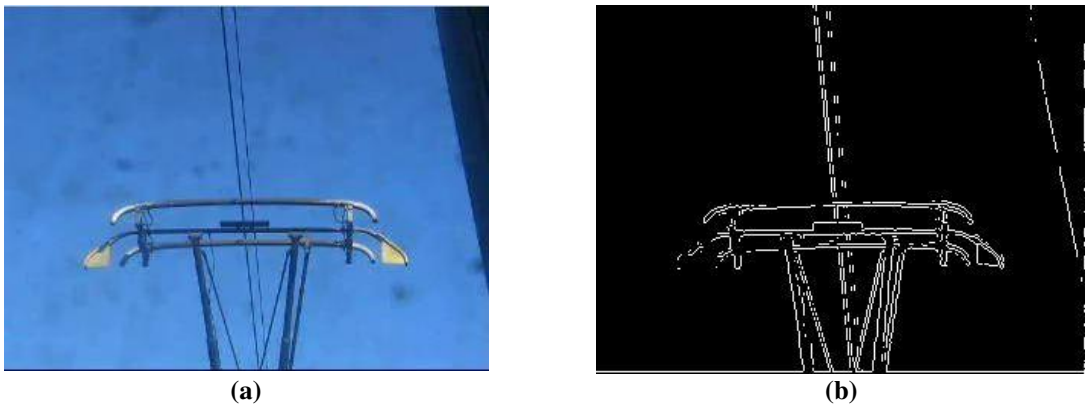
$$b_{22} = (a_{11} * m_{11}) + (a_{12} * m_{12}) + (a_{13} * m_{13}) + (a_{21} * m_{21}) + (a_{22} * m_{22}) + (a_{23} * m_{23}) + (a_{31} * m_{31}) + (a_{32} * m_{32}) + (a_{33} * m_{33})$$

Şekil 3.9. Sobel kenar çıkarma algoritması değer hesaplama yöntemi

Şekil 3.9’da, verilen şekilde S_x ve S_y matrisleri elde edildikten sonra denklem 3.8’de ki ifade kullanılarak piksel değerleri belirlenmektedir.

$$G(i, j) = \sqrt{Gx(i, j)^2 + Gy(i, j)^2} \quad (3.7)$$

Şekil 3.10’da renkli bir görüntü kullanılarak elde edilen Sobel kenar çıkarma sonucu verilmektedir.



Şekil 3.10. Sobel kenar çıkarma algoritması sonucu (a) Normal görüntü (b) Kenar çıkarmı elde edilmiş görüntü

3.3.1.3. Roberts Kenar Çıkarım Algoritması

Roberts kenar algılama algoritması, Sobel kenar çıkarım algoritması ile aynı mantıkta çalışmaktadır. Bu iki algoritma arasındaki farklılık maskeleme filtrelerinin farklı olmasıdır.

Roberts kenar çıkarım algoritması görüntü matrisi üzerinde 2x2 boyutundaki G_x ve G_y matris ile tarama işlemidir. G_x ve G_y matrisleri denklem 3.8’de verilmektedir.

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

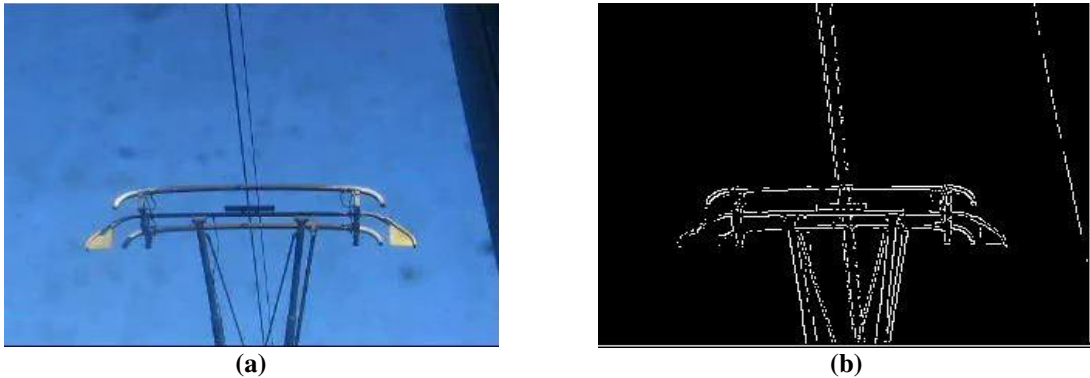
Resim üzerinde maskeleme uygulanacak olan kısmın aşağıdaki piksel değerlerine sahip olduğunu düşünelim.

p_1	p_2
p_3	p_4

Roberts metoduna göre bu dörtlü pikselin “ q ” değeri denklem 3.9’da verilmektedir.

$$q = |p_1 - p_4| + |p_2 - p_3| \quad (3.9)$$

Resimdeki tonlarda bir değişim olmadığında “ q ” değeri “0” olur ve resmin bu bölgesinin bir kenar oluşturmadığı sonucuna varılmaktadır. Eşik değerine bağlı olarak belli bir değerin üzerindeki sonuçlar kenar olarak belirlenmektedir. Şekil 3.11’de renkli bir görüntü kullanılarak elde edilen Roberts kenar çıkarım sonucu verilmektedir.



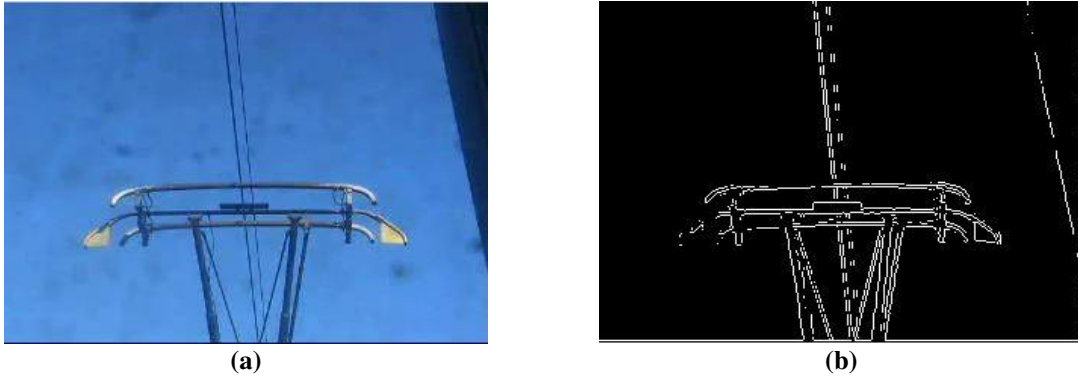
Şekil 3.11. Roberts kenar çıkarım algoritması sonucu (a) Normal görüntü (b) Kenar çıkarımı elde edilmiş görüntü

3.3.1.4. Prewitt Kenar Çıkarım Algoritması

Prewitt kenar çıkarım algoritması, Sobel ve Roberts kenar çıkarım algoritmaları ile aynı mantıkta çalışmaktadır. Aralarındaki fark, kullanılan maskeleme matrislerinin farklılık göstermesidir. Prewitt kenar çıkarım algoritması, görüntü matrisi üzerinde 3x3 boyutundaki G_x ve G_y matris ile tarama işlemidir. G_x ve G_y matrisleri denklem 3.10'da verilmektedir.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Şekil 3.12'de renkli bir görüntü kullanılarak elde edilen Prewitt kenar çıkarım sonucu verilmektedir.



Şekil 3.12. Prewitt kenar çıkarım algoritması (a) Normal görüntü (b) Kenar çıkarımı elde edilmiş görüntü

3.3.2. Hough Dönüşümü

Hough dönüşümü sayısal görüntü işlemede matematiksel olarak ifade edilebilen şekillerin konum bilgilerinin, açı değerlerinin vs. bulunmasında kullanılmaktadır. 1962 yılında Paul Hough tarafından bulunan bu yöntem IBM tarafından patentlidir.

Yöntem daha çok görüntü üzerindeki doğruların tespitinde kullanılmakta ancak geliştirilmiş Hough dönüşümü matematiksel olarak ifade edilebilen bütün şekillerin tespitinde kullanılmaktadır [30].

Görüntü üzerindeki doğrular araştırılmaya başlanmadan önce ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Doğru oluşturabilecek kenarların resim üzerinde güçlendirilmesi için kenar algılama maskeleri kullanılmaktadır. Kenarları güçlendirilen görüntü üzerinde eşikleme işlemi yapılarak kenar bilgisi oluşturabilecek ikili bilgilerle çalışılmaktadır.

Hough dönüşümü, kenar bilgisi elde edilmiş gri-seviye imgeler üzerine uygulanmaktadır. Yöntem imge uzayındaki bilgiyi parametre uzayına taşıyarak şekil bulma problemini bir yoğunluk bulma problemine dönüştürülmektedir [58]. Hough dönüşümünde, şekillerin tespit edilebilmesi için görüntü üzerindeki noktaların yan yana veya bağlantılı olmalarını gerektirmemektedir.

Matematiksel olarak bir noktadan sonsuz doğru geçmekte ve bunlarda sonsuz eğimlerde olmaktadır. Bu durumda her noktadan geçebilecek doğruların araştırılarak bunların kıyaslanması sonsuz zaman alabilecektir. Elimizdeki doğru oluşturabilecek her noktadan da sonsuz doğru geçebilecektir.

Hough dönüşümü ile temel olarak, görüntüdeki noktalar taranarak bunlar içinde aynı doğru çizgisi üzerine düşenler araştırılmaktadır. Diğer şekiller için Hough dönüşümü kullanılma mantığı da yine aynıdır.

Noktaların doğru oluşturması için aynı belirli özelliklere sahip olmalıdır. Bu ortak özelliklerin belirlenmesi için şeklin geometrik formülü veya yine aynı şekli belirleyecek geometrik farklı bir yaklaşımın belirlenmesi gerekmektedir.

Önerilen yöntemde kullanılan Hough dönüşümünün sözde kodu Şekil 3.13'te verilmektedir.

Algoritma:	
1	Image $\leftarrow$ İkili görüntü kenar çıkarımı görüntüsü
2	Sutun $\leftarrow$ Image'nin piksel genişliği
3	Satir $\leftarrow$ Image'nin piksel yüksekliği
4	for i=1:Sutun
5	for j=1:Satir
6	if (Image(i,j) bir kenar çıkarım pikseli ise)
7	for $\theta=0:\theta_{max}$
8	$r = \text{Sutun} \cdot \cos(\theta) + \text{Satir} \cdot \sin(\theta)$
9	$r = \text{round}(r)$
10	$H(\theta, r) = H(\theta, r) + 1$
11	end
12	end
13	end
14	end

Şekil 3.13. Hough dönüşümün sözde kodu

Şekil 3.13'te verilen Hough dönüşümün sözde kodunda öncelikle kenar çıkarım sonucunda elde edilmiş ikilik tabanlı bir görüntü kullanılmaktadır. Denklem 3.11'de bir doğrunun denklemi verilmektedir.

$$Y = mX + b \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemde doğrunun eğimi m ötelenme değeri " b " olarak belirlenmektedir. " b " değeri belirten bir sabittir. " $b=0$ " olası durumunda doğru orijinden geçmektedir.

$A(x,y)$ noktasından geçen, denklem 3.11'i sağlayan bir doğru için " m " ve " b " değerleri aynıdır. Böylece " m " ve " b " çiftleri saklanarak doğru belirginleştirilebilecektir. Bellekte saklanan (m,b) çiftleri görüntü üzerindeki doğrulara karşılık gelecektir. Görüntü alanındaki her bir (x,y) noktası, parametre uzayındaki (m,b) bilgisine karşılık gelmektedir.

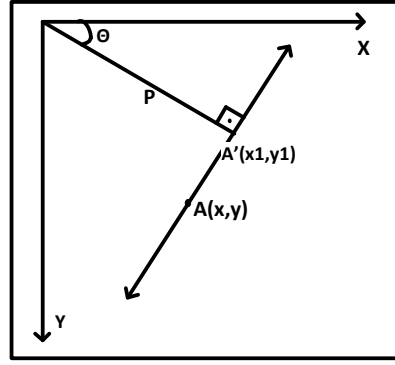
Hough dönüşümü ile her bir (x,y) noktasının (m,b) uzayındaki muhtemel bir doğruya, (m,b) uzayındaki her bir nokta da görüntü uzayındaki bir doğruya karşılık gelmesi sağlanmaktadır.

Hough dönüşümü, görüntü üzerindeki herhangi bir $A(x,y)$ noktasının, (m,b) uzayındaki her muhtemel doğru için bir gerçeklik değeri artırmasıyla çalışmaktadır. Belirli bir (m,b) ikilisinin gerçeklik değeri, görüntü üzerinde bu ikilinin temsil ettiği doğruyu sağlayan noktaların sayısıdır.

Doğru tespitinde, parametre olarak, tek bir doğru belirleyebilen eğim " m " ve öteleme sabitti " b " saklanabildiği gibi, farklı ve daha iyi sonuç verecek olan görüntü üzerinde bir doğruyu oluşturacak olan noktaların, görüntü alanının herhangi bir köşesine olan dik uzaklıklarının aynı olması özelliği bilgisinden yararlanılabilir. Görüntü üzerindeki bir noktanın üzerinden geçebilecek farklı açılarda " θ " eğime sahip doğruya, köşeden dik uzaklığı " p " parametre olarak kullanılmaktadır.

Bellekte (m,b) çiftlerinin gerçeklik değerleri yerine, (θ, p) ikililerine karşılık gelen gerçeklik değerleri doğruların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Dönüşüm algoritmasında (m,b) parametreleri yerine yine bir $A(x,y)$ noktasından geçen tek bir doğruyu tanımlayabilen (θ, p) parametreleri kullanılır. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi " θ " açısının değişimi, $A(x,y)$ noktasından geçecek olan doğruyu dik olarak kesebilmesi için doğrunun eğiminin de farklı olmasını gerektirmektedir. Nokta aynıken eğimin değişmesi farklı bir doğru meydana getirmektedir. Böylece (θ, p) farklı doğruları temsil edilmektedir. Açısız değişim adımıyla " $\Delta\theta$ " ortaya çıkan sonlu sayıda " θ " değeri için " p " değeri, doğruların

kesişim noktasının köşe noktasına uzaklığı ile hesaplanmaktadır. Şekil 3.14'te görülen $A'(x_1, y_1)$ noktası, $A(x, y)$ noktasından geçen ve " Θ " açısıyla köşeden gelen dik doğru parçasının kesiştiği noktadır. Köşeye olan dik uzaklık " p ", $A'(x_1, y_1)$ noktasının köşeye olan uzaklığıdır. Denklem 3.12'de dik uzaklığın " p " hesaplanma şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.14. " P " değerinin hesaplanması

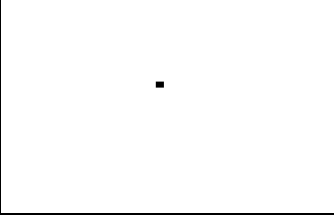
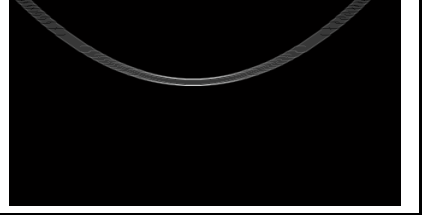
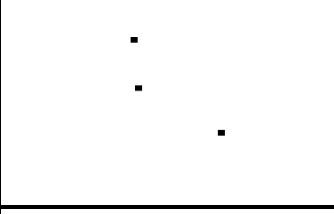
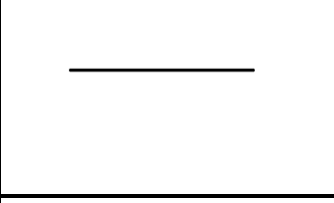
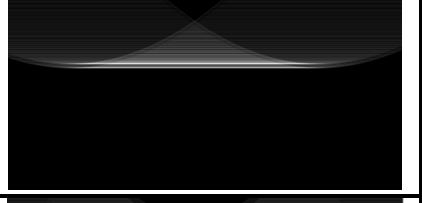
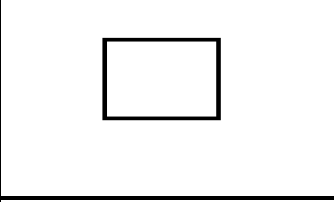
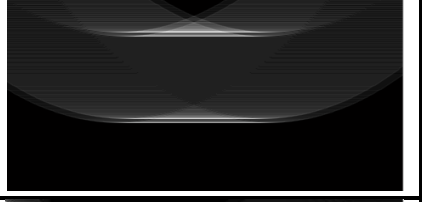
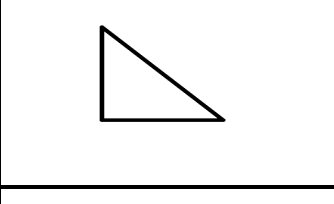
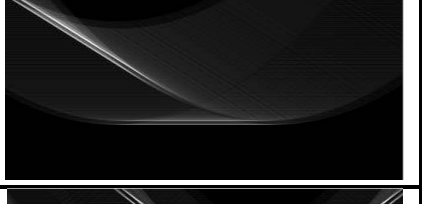
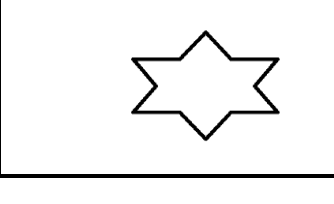
$$P = (x_1)^2 + (y_1)^2 \quad (3.12)$$

Köşeye olan dik uzaklığın " p ", " Θ " değerini kullanarak denklem 3.13'te görülen bağıntıyla doğrudan hesaplanması mümkündür.

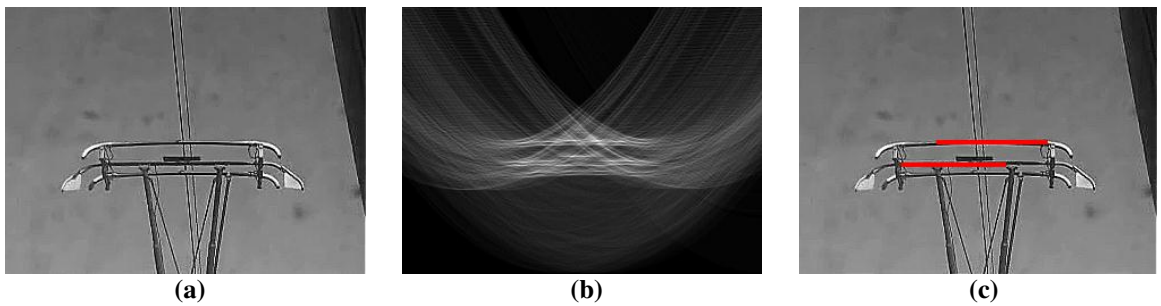
$$x \cdot \cos \Theta + y \cdot \sin \Theta - p = 0 \quad (3.13)$$

Parametre uzayında $A(x, y)$ şeklinde olan noktayı her farklı " Θ " ye karşı gelen " p " şeklinde çizilirse bu noktayı ifade eden bir sinüs eğrisi elde edilir. Farklı şekillerin Hough sinüs eğrileri Şekil 3.15'te verilmektedir.

Pantograf katener sistemi için Hough dönüşümü oldukça önemlidir [41,48]. Hough dönüşümü kullanılarak pantograf katener sistemlerde birçok özellik elde edilmektedir. Şekil 3.16'da örnek bir pantograf katener sisteminin Hough dönüşümü sonucunda bazı doğruların elde edilmiş hali verilmektedir.

a) Tek bir noktanın (Θ, p) ikilileri		
b) Üç noktanın (Θ, p) ikilileri		
c) Bir doğrunun (Θ, p) ikilileri		
d) Bir Dikdörtgenin (Θ, p) ikilileri		
e) Bir üçgenin (Θ, p) ikilileri		
f) Bir çokgenin (Θ, p) ikilileri		

Şekil 3.15. Farklı şekillerin Hough sinüs eğrisi



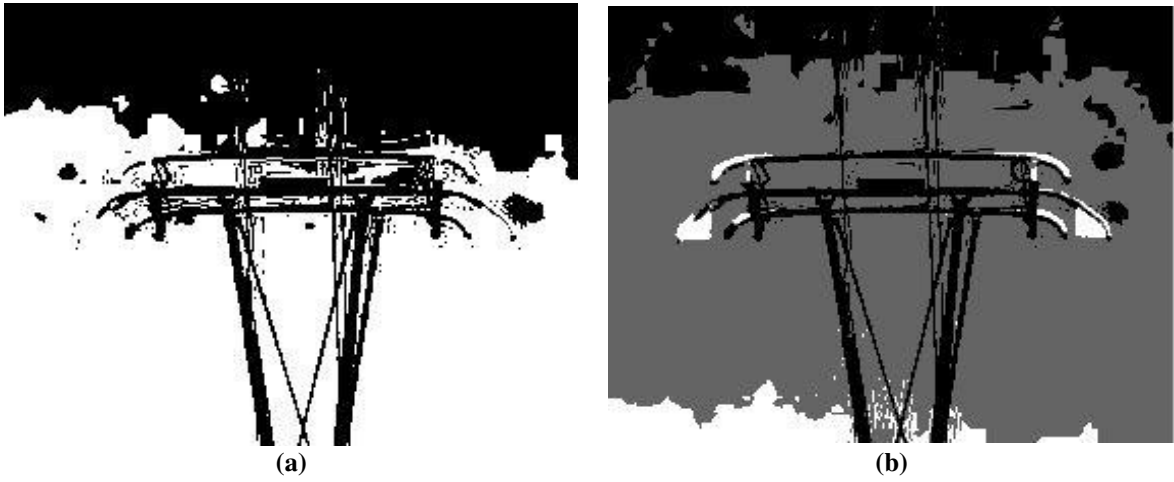
Şekil 3.16. Pantograf ve katener sistemin Hough dönüşümünün uygulanması (a) Gri görüntü (b) Hough dönüşümü (c) Görüntüdeki doğruların elde edilmesi

3.3.3. Otsu Metodu

Görüntü bölütleme veya eşikleme işlemi olarak adlandırılan yöntemler görüntüdeki özelliklerin elde edilmesi için kullanılan temel görüntü işleme tekniklerinden biridir [54,55]. Görüntüde ki piksel değerlerini kontrol ederek ikili renk tabanlı bir görüntü elde etmek için denklem 3.14'te kullanılmaktadır.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{eger } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{diger} \end{cases} \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'te verilen $g(x, y)$ iki seviyeli bir imge olup, $f(x, y) \geq T$ 'ye karşılık gelen pikseller hedef piksellerini, diğerleri ise arka planı göstermektedir. Burada T eşik değeri olup, bu değer belirlenmesi oldukça önemli bir işlemdir. Çünkü belirlenen eşik değeri arka planın çıkarılması ve özelliklerin elde edilebilmesi gereklidir. Fakat bazı görüntü işleme uygulamalarında bu tür bir eşikleme denkleminin kullanılması özellik çıkarımı için yeterli olmayabilir. Şekil 3.17'de örnek bir pantograf sisteminin iki ve üç seviyeli görünümü verilmiştir.



Şekil 3.17. Pantograf görüntüsünün iki seviyeli ve üç seviyeli görünümü (a) İki seviyeli görüntü (b) Üç seviyeli görüntü

Şekil 3.17'de verilen örnek bir pantograf görüntüsünde iki ve üç seviyeli görüntü arasında birçok fark bulunmaktadır. Görüntü üzerinde belirlenen eşikleme sayısı ve kullanılan eşik değerleri oldukça önemlidir. Bütün eşikleme teknikleri arasında otomatik eşikleme yöntemleri basit ve kısa zamanda uygulanabildikleri için birçok uygulamada

kullanılmaktadır. Otomatik eşiklemedeki temel amaç arka plandan istenilen bölgeyi bölütlemek için en uygun gri seviyeli eşik değerlerini seçmektir.

Otsu eşikleme yöntemi, birçok görüntü işleme uygulamalarında kullanılan ve başarılı sonuçlar veren bir görüntü eşikleme yöntemidir. Bu eşikleme yönteminde en iyi eşik değerlerin belirlenmesi için piksellerin ağırlık değerleri dikkate alınmaktadır [61]. Ayrıca daha iyi sonuçlar elde edilmesi için Çoklu Otsu yöntemi geliştirilmiştir.

Çoklu Otsu yöntemi ikili otsu yöntemine göre, ikili eşiklemedeki iki sınıf K sınıfa ayrılarak genişletilmiştir, bu yüzden $K - 1$ tane $(T_1, T_2, \dots, T_{K-1})$ eşik değeri vardır. İmgenin pikselleri K farklı sınıfa bölünmektedir;

C_1 : gri seviyesi $1 \leq i \leq T_1$ aralığında olan pikseller kümesi, burada T_1 ilk eşik değeri olarak hesaplanmıştır.

C_2 : gri seviyesi $T_1 \leq i \leq T_2$ aralığında olan pikseller kümesi, burada T_2 ikinci eşik değeri olarak hesaplanmıştır.

:

C_K : gri seviyesi $T_{K-1} \leq i \leq L$ aralığında olan pikseller kümesi, burada T_{K-1} son eşik değeri olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.18’de Otsu yönteminin sözde kodu verilmektedir.

Algoritma:	
1	Görüntü üzerinde K sınıf sayısı belirlenir
2	while (En büyük σ_B^2 değeri elde edilene kadar aşağıdaki adımları tekrarla)
3	K-1 tane eşik değeri belirlenir ($T_1, T_2, \dots, T_{K-1}$)
4	Görüntünün pikseli K farklı sınıfa bölünür ($C_1, C_2, \dots, C_K$)
5	Her sınıfa karşılık gelen sıfırıncı derecede birikimli momentleri hesaplanır
6	Her sınıfa karşılık gelen birinci derecede birikimli momentleri hesaplanır
7	Bütün imgelerin yoğunluk ortalaması hesaplanır
8	Eşiklenmiş imgenin sınıflar arası değişimi hesaplanır (σ_B^2)
9	end
10	Eşik değerlerini kullanarak görüntü piksellerini sınıflandır

Şekil 3.18. Otsu yönteminin sözde kodu

Her sınıfa karşılık gelen sıfırıncı derece birikimli momentleri denklem 3.15’te ki gibi hesaplanır.

$$\omega_k = \sum_{i \in C_k} P_i = \frac{1}{N} \sum_{i \in C_k} f_i \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, K \quad (3.15)$$

Birinci derece birikimli momentleri ise denklem 3.16'da ki gibi hesaplanır.

$$\mu_k = \frac{1}{\omega_k} \sum_{i \in C_k} i P_i = \frac{1}{N \omega_k} \sum_{i \in C_k} i f_i \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, K \quad (3.16)$$

Bütün imgelerin yoğunluk ortalaması ise denklem 3.17'de verilmiştir.

$$\mu = \sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k \quad (3.17)$$

Son olarak, eşiklenmiş imgenin sınıflar arası denklem 3.18'de ki gibi tanımlanmıştır.

$$\sigma_B^2 = \sum_{k=1}^K \omega_k (\mu_k - \mu)^2 = \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right) - \mu^2 \quad (3.18)$$

σ_B^2 en büyüken en iyi eşik değerleri denklem 3.19'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} [\hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_{K-1}] &= \arg \max \{ \sigma_B^2 \} \\ &= \arg \max \left\{ \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right) - \mu^2 \right\} \\ &= \arg \max \left\{ \sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right\} \\ &= \arg \max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \left[\frac{\left(\sum_{i \in C_k} i f_i \right)^2}{\sum_{i \in C_k} f_i} \right] \right\} \\ &= \arg \max \left\{ \sum_{k=1}^K \left[\frac{\left(\sum_{i \in C_k} i f_i \right)^2}{\sum_{i \in C_k} f_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Burada μ^2 ve N her imgede sabittir. Bu yüzden, bu sabitler en iyi eşik değerlerinin hesaplanmasında göz ardı edilebilir. Bu işlemler sırasında en elde edilen en iyi σ_B^2 değerinin elde edilmesinde kullanılan $(T_1, T_2, \dots, T_{K-1})$ eşik değerleri en iyi eşik değer olarak elde edilmektedir. Önerilen yöntemde (T_1, T_2, T_3) olmak üzere üç tane eşik değeri bulunmaktadır. Bu eşik değerlerine göre en iyi σ_B^2 değerinin elde edilmesi için Şekil 3.19’da verilen kod parçacığı kullanılmıştır.

```

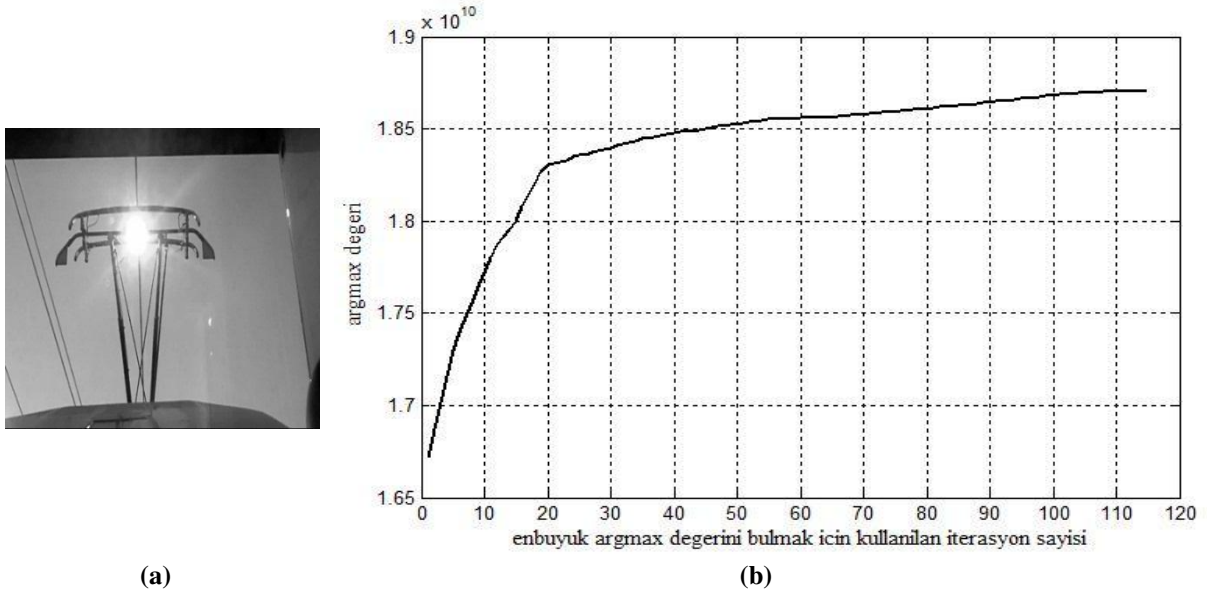
buyuk=0;
for T1=5:255
    for T2=T1:255
        for T3=T2:255
            arg =  $\left\{ \frac{\left( \sum_{i=1}^{T1} ifi \right)^2}{\sum_{i=1}^{T1} fi} + \frac{\left( \sum_{i=T1+1}^{T2} ifi \right)^2}{\sum_{i=T1+1}^{T2} fi} + \frac{\left( \sum_{i=T2+1}^{T3} ifi \right)^2}{\sum_{i=T2+1}^{T3} fi} + \frac{\left( \sum_{i=T3+1}^L ifi \right)^2}{\sum_{i=T3+1}^L fi} \right\}$ 
            if (arg>buyuk)
                buyuk = arg;
            end
        end
    end
end
end

```

Şekil 3.19. En iyi eşik değerlerin elde edilmesi için kullanılan kod parçacığı

Şekil 3.19’da verilen kod parçacığı kullanılarak en iyi eşik değeri elde edilmiştir. Böylece ark tespiti için kullanılan bu yöntemde görüntüdeki eşikleme işlemi daha iyi bir şekilde olacaktır. Kullanılan kod parçacığı, Şekil 3.20 (a)’da verilen örnek bir pantograf görüntüsü için kullanılarak Şekil 3.20 (b)’de verilen grafikler elde edilmektedir.

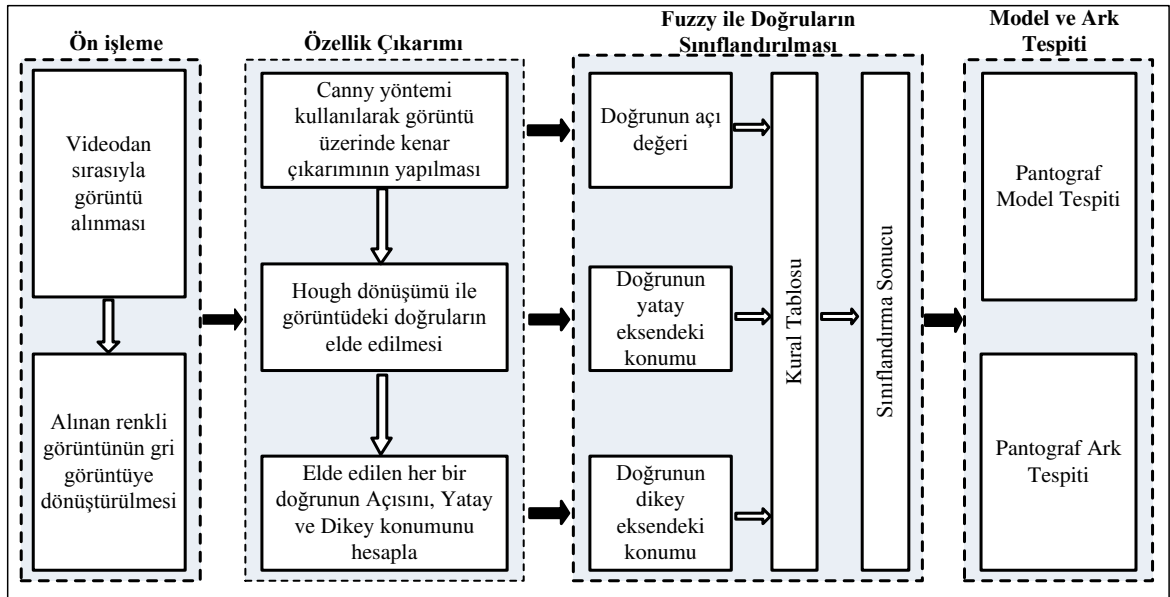
Şekil 3.20’de örnek bir pantograf görüntüsü için en iyi (T_1, T_2, T_3) değerlerinin elde edilmesi işleminde ortaya çıkan grafik verilmiştir. Bir görüntü için en iyi eşik değerlerin elde edilmesinde Otsu eşikleme yöntemi oldukça önemlidir.



Şekil 3.20. Örnek bir pantograf görüntüsü ve bu görüntüden en iyi σ_B^2 değerinin elde edilmesi (a) Ark oluşmuş örnek bir pantograf görüntüsü (b) en büyük argmax değerinin elde edilmesinde iterasyon sayısına göre oluşan grafik

3.4. Önerilen Yöntem

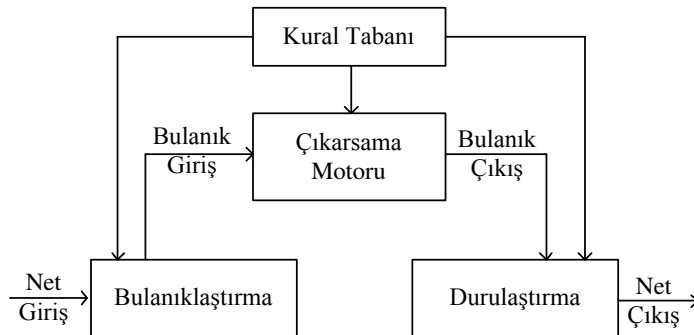
Bu çalışmada pantograf modeli ve ark tespiti için önerilen yöntemin blok şeması Şekil 3.21’de verilmektedir.



Şekil 3.21. Önerilen model ve ark tespiti yöntemi için kullanılan blok diyagramı

Şekil 3.21’de verilen blok şemasında ön işleme, özellik çıkarımı, bulanık mantık ile doğruların sınıflandırılması, model ve ark tespiti olmak üzere dört farklı temel adımdan oluşmaktadır. Ön işleme adımında önerilen yöntemde kullanılan pantograf videolarından sırasıyla görüntü alınmaktadır. Alınan renkli görüntüler gri görüntü formatına dönüştürülerek görüntü işleme için uygun duruma getirilmektedir. Özellik çıkarımı adımında gri görüntü üzerinde Canny kenar çıkarım yöntemi uygulanarak pantograf görüntüsünün kenarları elde edilmektedir. Elde edilen kenar çıkarım görüntüsü üzerinde Hough dönüşümü uygulanarak görüntüde bulunan doğrular tespit edilmektedir. Tespit edilen doğruların açısı, yatay ve dikey eksenlerdeki konumları elde edilmektedir. Bulanık mantık ile doğruların sınıflandırılması adımında görüntü üzerinde bulunan doğruların özellikleri bulanık sistemin girişine verilerek, bulanık sistemin çıkışında sonuçları elde edilmektedir. Sınıflandırma sonucunda görüntü üzerinde bulunan doğruların pantograf üst doğrusu, pantograf yan doğrusu veya geçersiz doğru olmak üzere üç farklı sonuç elde edilmektedir. Elde edilen bu sonuçlarda geçersiz doğrular önerilen yöntemde kullanılmamaktadır. Böylece önerilen yöntemin başarı oranı artırılmaktadır. Model ve ark tespiti adımında ise pantograf üst ve yan doğruları kullanılarak pantografin modeli ve temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir.

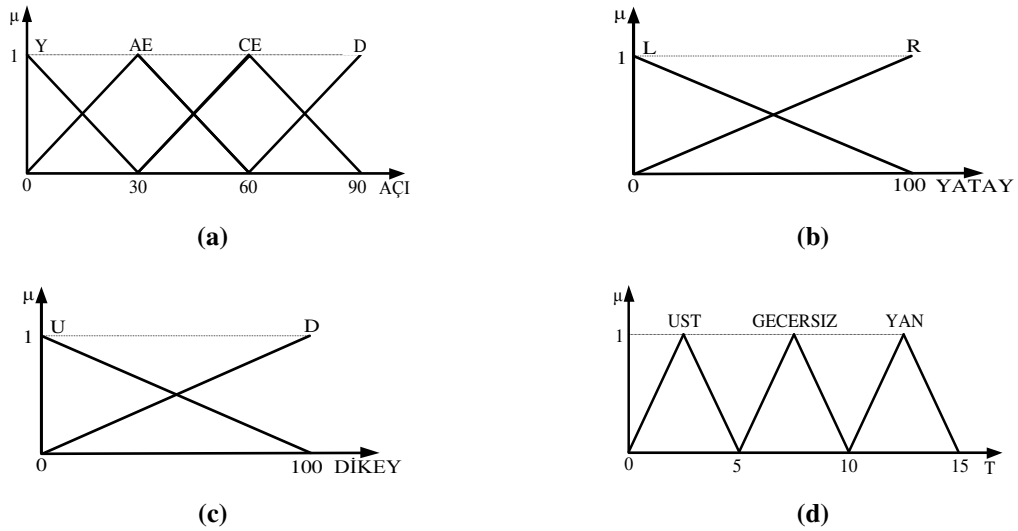
Bulanık mantık sistemleri sınıflandırma, arıza teşhisi ve daha birçok uygulamalarda veya problemlerde kullanılmaktadır. Bu çalışmada da elde edilen verilerin sınıflandırılması için bulanık mantık kullanılmaktadır. Görüntüde Hough dönüşümü sonrasında elde edilen doğrulardan özellik çıkarımı yapılarak özellikler bulanık sisteminin giriş değerleri olarak kullanılmaktadır. Bulanık sistemin tipik yapısı Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3.22. Bulanık mantık sisteminin tipik yapısı

Şekil 3.22’de verilen bulanık mantık sisteminin tipik yapısında verildiği gibi ilk önce giriş verileri bulanıklaştırma adımından geçmektedir. Bulanıklaştırma işleminden geçen net giriş verilerinden bulanık giriş verileri elde edilmektedir. Bulanık giriş verileri kural tabanı ile birlikte kullanılarak çıkarsama yapılmaktadır. Çıkarsama işleminin ardından bulanık çıkışlar elde edilmektedir. Bulanık çıkışlardan elde edilmesinin ardından net çıkışların oluşturulması için durulaştırma işlemi uygulanmaktadır.

Bulanık mantık, arıza teşhis uygulamalarında sınıflandırma ve karar verme işlemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır [62-64]. Görüntüde tespit edilen her bir doğru için özellik çıkarımı yapılmaktadır. Her bir doğru için açısı, yatay ve dikey eksenindeki konumu dikkate alınmaktadır. Elde edilen özellikler bulanık mantıkta giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Pantograf görüntüsünde elde edilen bütün doğrular özellik çıkarımı için bulanık mantık ile birlikte kullanılmaktadır. Pantograf modelinde pantograf üst bölgesi ve pantograf yan bölgeleri önemlidir. Bu nedenle pantograf modelini belirlerken üst ve yan doğrular tespit edilmelidir. Önerilen yöntemde kullanılan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 3.23’te verilmektedir.



Şekil 3.23. Bulanık sistemde kullanılan üyelik fonksiyonları (a) Açı değeri (**Y**: Yatay, **AE**: Az Eğik, **CE**: Çok Eğik, **D**: Dikey) (b) Yatay konum (**L**: Sol, **R**: Sağ) (c) Dikey konum (**U**: Yukarı, **D**: Aşağı) (d) Çıkış üyelik fonksiyonu

Şekil 3.23'te verilen giriş üyelik fonksiyonları kullanılarak net giriş değerleri bulanık giriş değerlerine dönüştürülmektedir. Elde edilen bulanık giriş değerleri bir kural tablosuyla birlikte kullanılarak çıkarsama yapılmaktadır. Önerilen yöntem için kullanılan kural tablosu Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu

Numara	Kural
Kural-1	$Aç_1 = Y \text{ \& Dikey} = U \rightarrow SONUC = UST$
Kural-2	$Aç_1 = Y \text{ \& Dikey} = D \rightarrow SONUC = GECERSİZ$
Kural-3	$Aç_1 = AE \text{ \& Dikey} = U \rightarrow SONUC = GECERSİZ$
Kural-4	$Aç_1 = AE \text{ \& Dikey} = D \rightarrow SONUC = YAN$
Kural-5	$Aç_1 = CE \text{ \& Dikey} = U \rightarrow SONUC = GECERSİZ$
Kural-6	$Aç_1 = CE \text{ \& Dikey} = D \rightarrow SONUC = YAN$
Kural-7	$Aç_1 = D \text{ \& Dikey} = U \rightarrow SONUC = GECERSİZ$
Kural-8	$Aç_1 = D \text{ \& Dikey} = D \rightarrow SONUC = YAN$

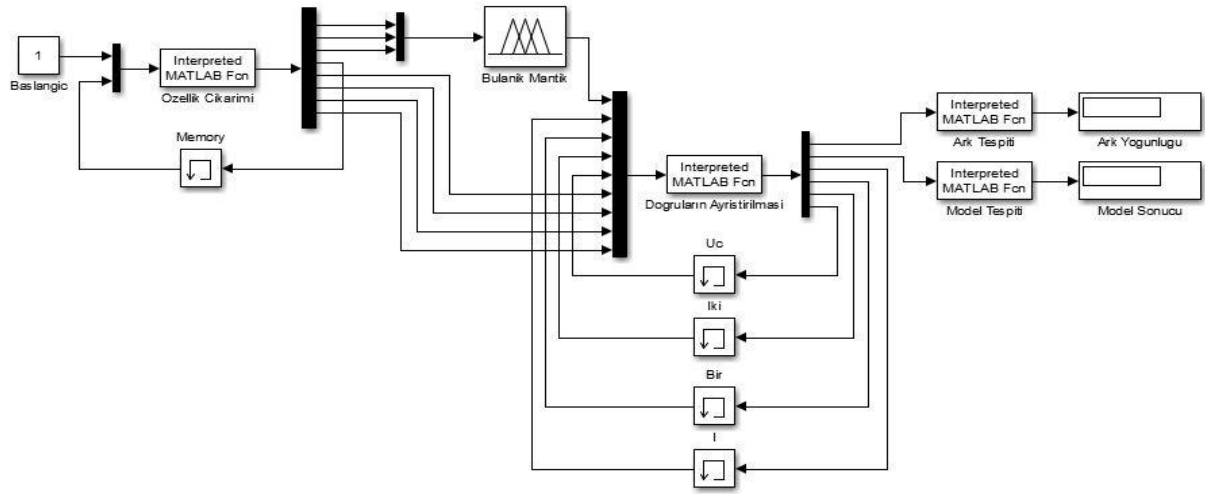
Tablo 3.1'de verilen kural tablosu kullanılarak bulanık sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilen bulanık çıkış değerleri çıkış üyelik fonksiyonu ile kullanılarak net çıkış değerleri elde edilmektedir.

Önerilen yöntemde pantograf doğrularının türleri belirlendikten sonra geçersiz doğrular kullanılmayarak üst ve yan doğrular kullanılmaktadır. Böylece pantograf modeli belirlenirken geçersiz doğrular göz ardı edilerek daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Pantograf modeli belirlenirken yan doğrular kullanılmaktadır. Elde edilen her bir yan doğrunun eğimleri dikkate alınarak pantograf modeli belirlenmektedir.

Önerilen yöntemde ayrıca bulanık mantık sonucunda elde edilen üst doğrular kullanılarak pantograf temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Bulanık mantık ile sınıflandırma işleminin ardından elde edilen pantograf üst doğruları kullanılarak görüntü üzerinde pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Daha sonra pantograf üst bölgesine Otsu yöntemi uygulanarak pantograf temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir.

3.5. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada bulanık mantık tabanlı pantograf model ve ark tespiti yöntemi için birçok farklı pantograf görüntüsü kullanılmaktadır. Pantograf model ve ark tespiti için önerilen yöntem MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Pantograf görüntülerinden Canny kenar çıkarımı ve Hough dönüşümü kullanılarak doğrular elde edilmiştir. Elde edilen doğruların özellikleri kullanılarak bir bulanık sistem ile birlikte kullanılarak pantograf üst ve yan doğruları elde edilmiştir. Elde edilen pantograf üst ve yan doğruları dikkate alınarak pantografin modeli tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen pantograf üst doğruları dikkate alınarak pantografin temas bölgesi tespit edilmiştir. Tespit edilen pantograf temas bölgesine Otsu yöntemi uygulanarak oluşan arklar tespit edilmektedir. Önerilen model ve ark tespiti yönteminde kullanılan Simulink modeli Şekil 3.24'te verilmektedir.



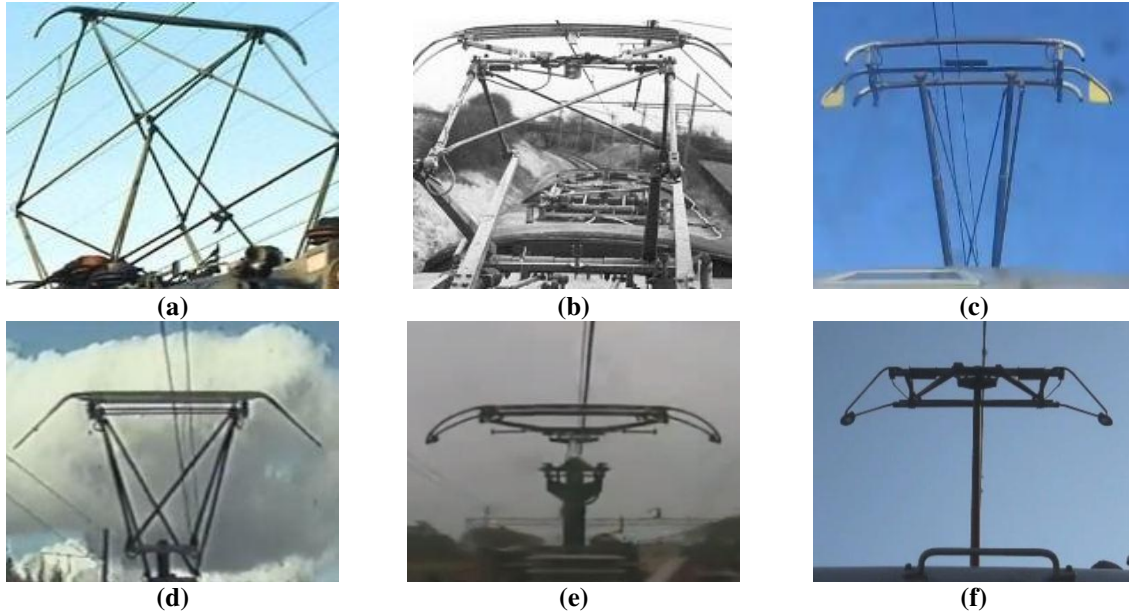
Şekil 3.24. Önerilen model ve ark tespiti yönteminde kullanılan Simulink modeli

Önerilen yöntemde kullanılan Simulink modelinde Özellik Çıkarımı bloğunda görüntülerden özellik çıkarımı yapılmaktadır. Canny kenar çıkarım algoritması ve Hough dönüşümü uygulanarak görüntü üzerinde bulunan doğrular tespit edilmektedir. Tespit edilen doğrular üç girişli bir çıkışlı “Bulanık Mantık” bloğunda kullanılarak doğrular üzerinde sınıflandırma yapılmaktadır. “Doğruların Ayırılması” bloğunda ise sınıflandırılmış pantograf doğruları ile bu doğruların özellikleri birleştirilerek “Model Tespiti” ve “Ark Tespiti” bloklarına gönderilmektedir. “Model tespiti” bloğuna gelen pantograf doğrularının özellikleri kullanılarak pantograf modeli tespit edilmektedir. Elde

edilen sonuç “Model Sonucu” bloğunda görüntülenmektedir. “Ark Tespiti” bloğunda ise pantograf üst doğruları kullanılarak temas bölgesinde oluşan arkların yoğunluğu tespit edilmektedir. Elde edilen sonuç “Ark Yoğunluğu” bloğunda görüntülenmektedir.

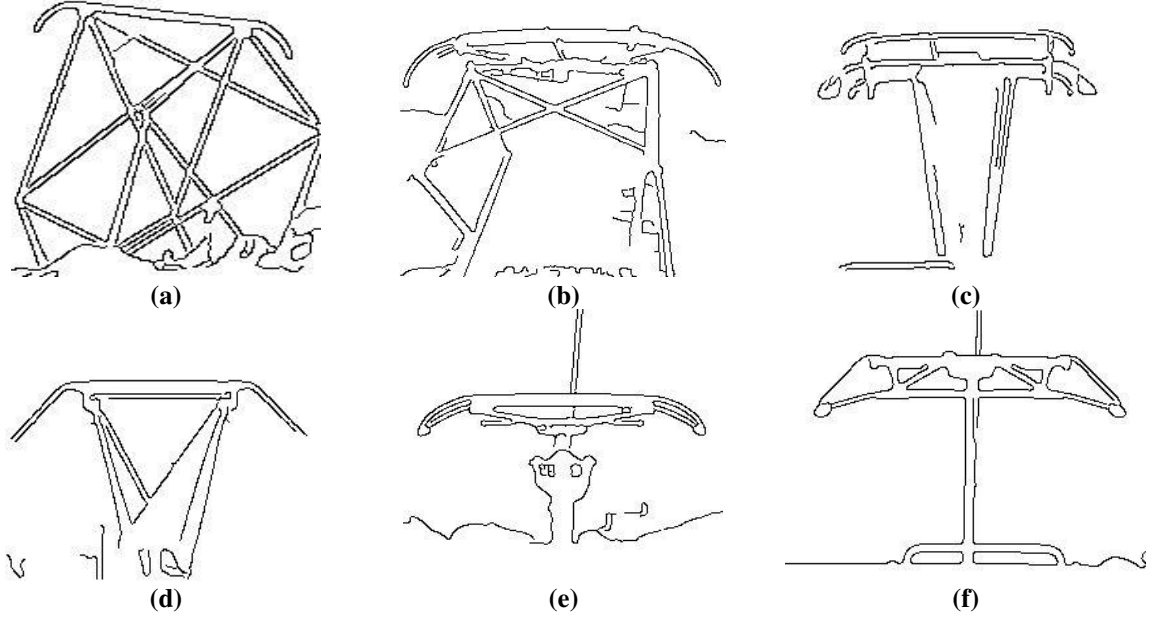
3.5.1. Model Tespiti Yöntemi için Deneysel Sonuçlar

Önerilen yöntemde pantograf görüntülerinden pantograf modellerinin belirlenmesi için altı farklı pantograf görüntüsü kullanılmıştır. Kullanılan pantograf görüntüleri Şekil 3.25’te verilmiştir.



Şekil 3.25. Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntüleri (a) ChS-200 (b) ChS-200 (c) VL-80 (d) VL-80 (e) TGV (f) TGV

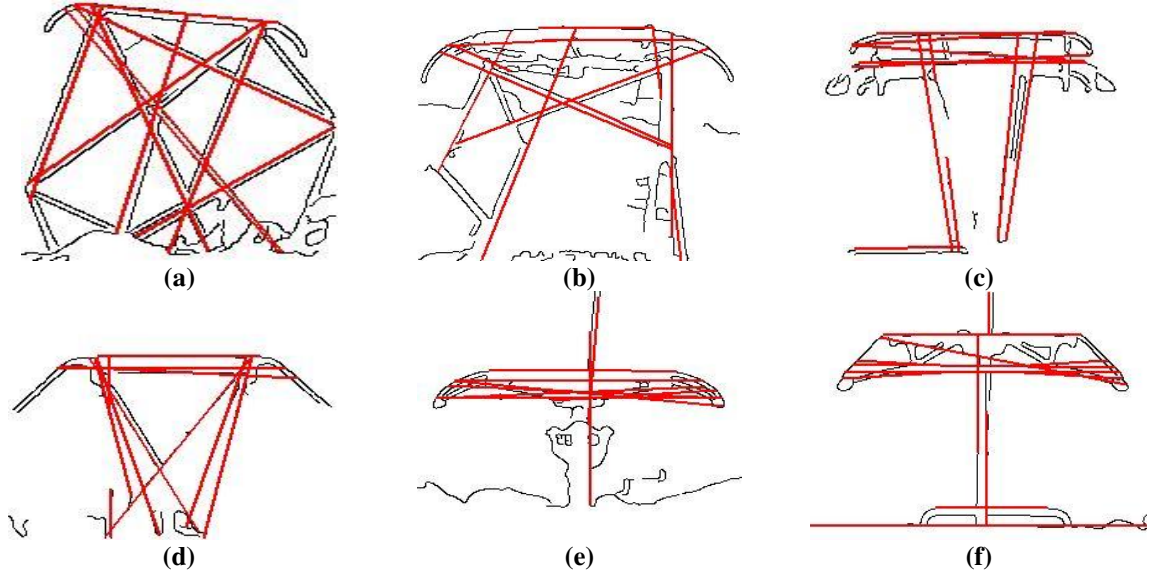
Şekil 3.25’de verilen farklı türde pantograf görüntüleri kullanılarak bütün pantograf görüntüleri için model tespiti yapılmaktadır. Öncelikle kullanılan görüntüler gri formata dönüştürülerek Canny kenar çıkarımı için uygun hale getirilmiştir. Daha sonra Canny kenar çıkarımı yapılmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan görüntülerin kenar çıkarımı sonucunda elde edilen görüntü Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.26. Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinin kenar çıkarım sonuçları (a) ChS-200 (b) ChS-200 (c) VL-80 (d) VL-80 (e) TGV (f) TGV

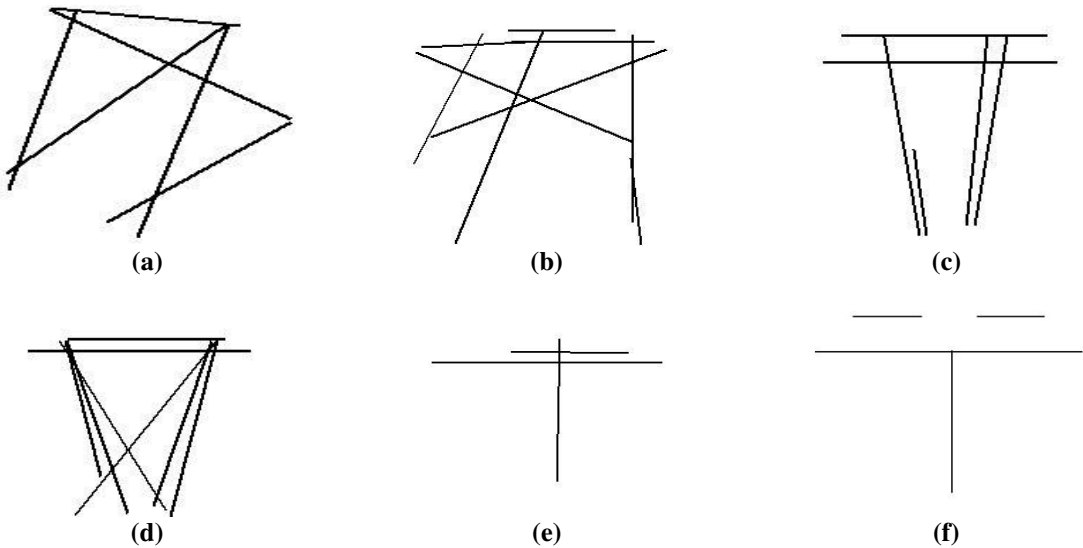
Şekil 3.26’da verilen kenar çıkarım sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir. Kenar çıkarımı sonucunda elde edilen görüntüler Hough dönüşümü ile birlikte kullanılarak görüntüler üzerindeki doğrular tespit edilmektedir. Tespit edilen doğrular kırmızı renk ile çizdirilerek doğrular daha belirgin olarak Şekil 3.27’de verilmiştir.

Şekil 3.27’de verilen görüntülerde kenar çıkarımı elde edilen görüntüler üzerinde Hough dönüşümü ile doğrular elde edilmiştir. Elde edilen doğruların bazıları pantograf üst ve yan doğrularını temsil ederken bazıları da farklı doğruları tespit etmektedir. Pantograf modelini tespit edebilmek için öncelikle pantograf modelini belirleyecek doğruların kullanılması gerekmektedir. Görüntüde bulunan bütün doğruların kullanılması durumunda pantograf modelinin türü başarılı bir şekilde belirlenemeyebilir. Bu nedenle Hough dönüşümü ile elde edilen doğrulardan sadece pantograf üst ve yan doğrularını temsil eden doğrular kullanılmaktadır.



Şekil 3.27. Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinin Hough dönüşümü sonucunda elde edilen doğrular (a) ChS-200 (b) ChS-200 (c) VL-80 (d) VL-80 (e) TGV (f) TGV

Elde edilen doğruların açı değerleri, dikey ve yatay eksenlerdeki konumları dikkate alınarak pantograf görüntüsünde elde edilen doğruların sınıflandırılması yapılmaktadır. Yapılan sınıflandırma sonucunda elde edilen pantograf üst ve yan doğruları kullanılmakta, diğer doğrular ise dikkate alınmamaktadır. Şekil 3.28’de bulanık sistem çıkışında tespit edilen pantograf üst ve yan doğruları verilmektedir.



Şekil 3.28. Pantograf model tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntülerinden pantograf üst ve yan doğrularının elde edilmesi (a) ChS-200 (b) ChS-200 (c) VL-80 (d) VL-80 (e) TGV (f) TGV

Şekil 3.28’te görüldüğü gibi, bulanık sistem sonucunda pantograf görüntülerinden pantograf üst ve yan doğruları elde edilmektedir. Önerilen model tespiti yönteminde pantograf modelinin belirlenmesinde pantograf yan doğruları daha çok etkili olmaktadır. Bu nedenle pantograf yan doğruları kullanılarak modeli tespiti yapılmaktadır. Pantograf yan çizgilerinin açı değerleri dikkate alınarak pantograf türü belirlenmektedir. Önerilen yöntemde kullanılan görüntülerin model tespit sonuçları ve benzerlik oranları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Önerilen model tespit yönteminde kullanılan görüntülerin model tespit sonuçları

Kullanılan görüntüler (Şekil 15)	Benzerlik Gösteren Model Türü	Benzerlik Oranı (%)
a	ChS-200	62.5
b	ChS-200	66.6
c	VL-80	100
d	VL-80	100
e	TGV	100
f	TGV	100

Tablo 3.2’de de görüldüğü üzere Şekil 3.28 (a) ve Şekil 3.28 (b) incelendiğinde pantograf yan doğruları diğer pantograf görüntülerindeki pantograf yan doğrularına göre açı değeri düşüktür. Ayrıca Şekil 3.28 (e) ve Şekil 3.28 (f) görüntüleri incelendiğinde aynı şekilde pantograf yan doğrularının dik olduğu görülmektedir. Bu şekilde pantograf yan doğrularının açı değerleri kullanılarak önerilen yöntemde pantograf modeli tespit edilmiştir. Önerilen yöntem sonucunda Şekil 3.28 (a) ve Şekil 3.28 (b) görüntülerinde kullanılan pantograflar “Chs-200” türündeki pantograf modeli ile daha çok benzerlik göstermektedir. Şekil 3.28 (c) ve Şekil 3.28 (d) görüntülerindeki pantograflar “TGV” türündeki pantograf modeli ile benzerlik gösterirken Şekil 3.28 (e) ve Şekil 3.28 (f) görüntüsündeki pantograflar ise “VL-80” türündeki pantograf modeli ile benzerlik göstermektedir. Önerilen yöntemle benzer bir çalışma literatürde bulunmaktadır [27]. Önerilen yöntemin farklı görüntüler kullanarak gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen performans analizi ve literatürde yapılan çalışmada verilen performans sonucu Tablo 3.3’te verilmiştir.

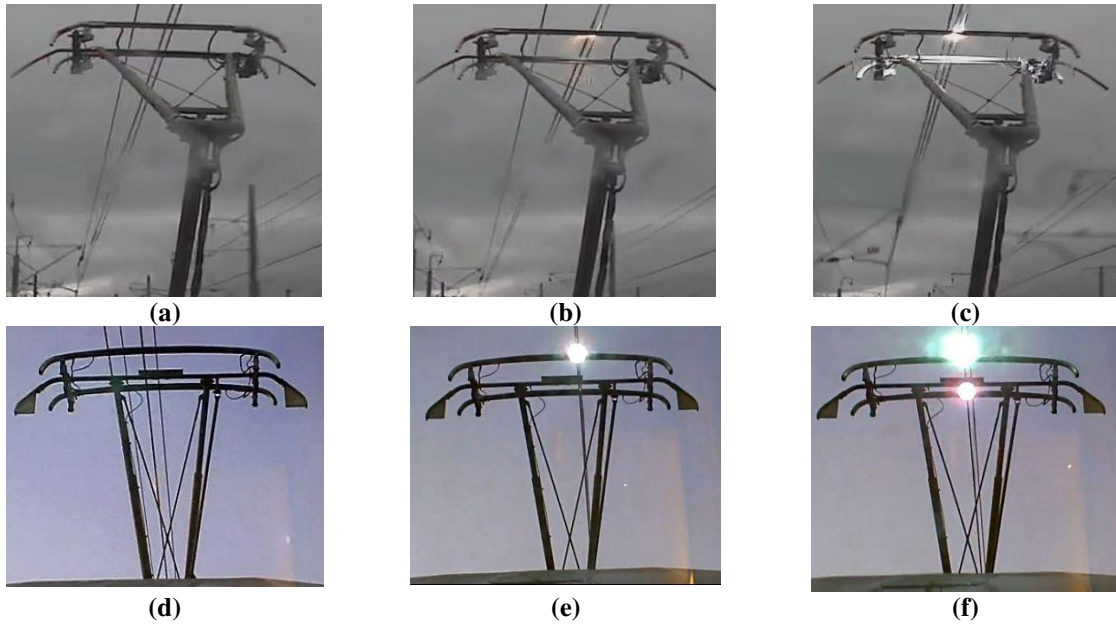
Önerilen yöntem literatürde yapılan çalışma ile karşılaştırıldığında literatürde yapılan çalışmanın daha hızlı sonuç verdiği görülmektedir. Önerilen yöntemde daha yüksek bir başarı elde edebilmek için kullanılan algoritmalarından dolayı literatürde yapılan çalışmaya göre daha yavaş sonuç vermektedir. Fakat önerilen yöntem de literatür de yapılan çalışmaya göre daha yüksek başarı oranı sağlamıştır.

Tablo 3.3. Literatürde yapılan çalışmanın performans analizi

		Ortalama Süre, (ms)	Standart Sapma, (ms)	Oran (%)	Standart Sapma, (%)
Önerilen yöntem	Başarılı işleme	9.6	1.06	94	6.9
	Başarısız işleme	9.6	1.06	6	7.5
	Üst doğru tespiti	4.5	0.60	-	-
	Alt doğru tespiti	4.5	0.60	-	-
Literatürde yapılan çalışma	Başarılı işleme	3.1	0.87	83	-
	Başarısız işleme	3.0	1.43	17	-
	Üst doğru tespiti	1.6	0.64	-	-
	Alt doğru tespiti	1.5	0.60	-	-

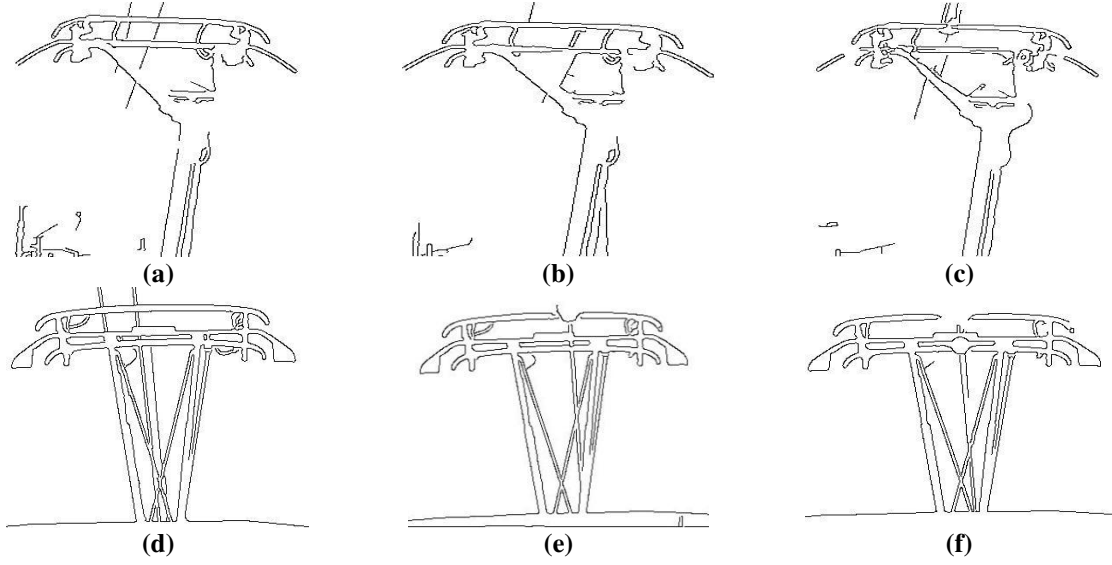
3.5.2. Ark Tespit Yöntemi için DeneySEL Sonuçlar

Önerilen yöntemde ark tespiti için iki farklı videodan üç farklı durumda alınan görüntüler kullanılmaktadır. Önerilen yöntem için hiç ark oluşmamış, küçük ve şiddetli ark oluşmuş görüntüler kullanılmaktadır. Kullanılan pantograf görüntüleri Şekil 3.29’da verilmektedir.



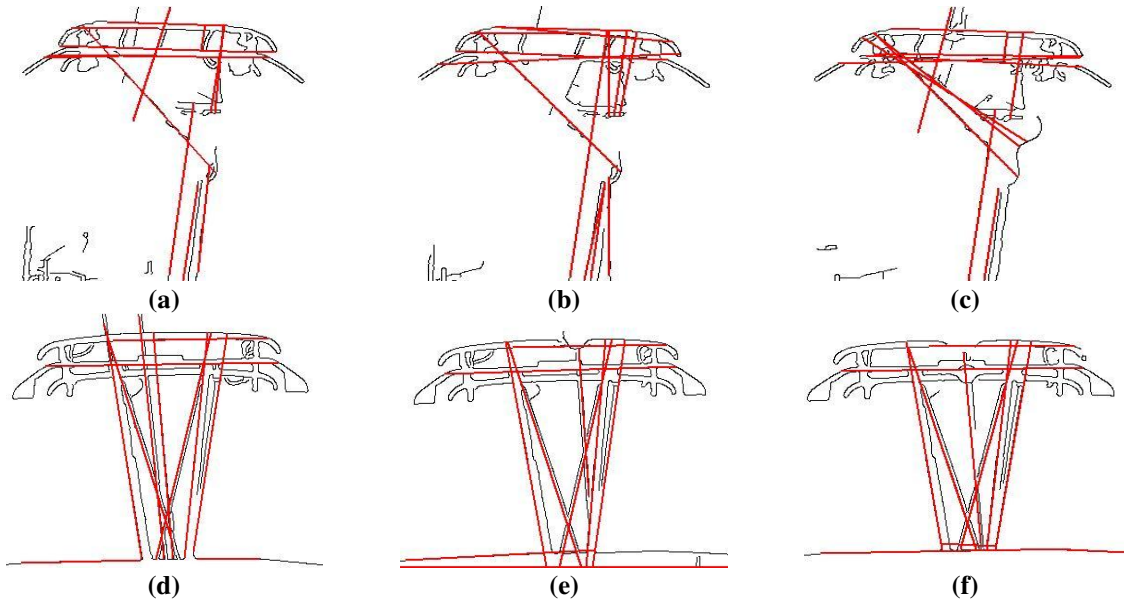
Şekil 3.29. Pantograf ark tespiti için kullanılan farklı videolardan farklı durumlarda alınan pantograf görüntüleri (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100

Şekil 3.29’da verilen pantograf görüntüleri gri görüntüye dönüştürüldükten sonra Canny kenar çıkarım yöntemi uygulanmıştır. Canny kenar çıkarım sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 3.30’da verilmiştir.

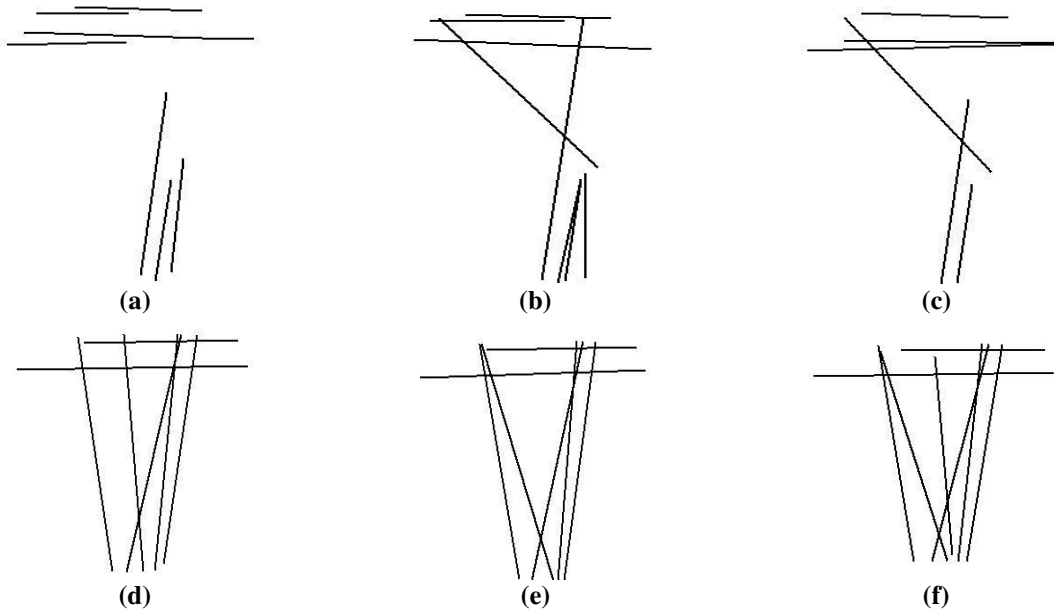


Şekil 3.30. Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin kenar çıkarımı sonuçları (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100

Şekil 3.30’da verilen kenar çıkarımı yapılmış görüntüler üzerinde Hough dönüşümü yapılarak Şekil 3.31’de verilen görüntülerdeki gibi doğrular tespit edilmiştir. Tespit edilen doğrular kırmızı renk ile çizdirilerek belirgin bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.31. Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin Hough dönüşümü sonucunda elde edilen doğrular (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100

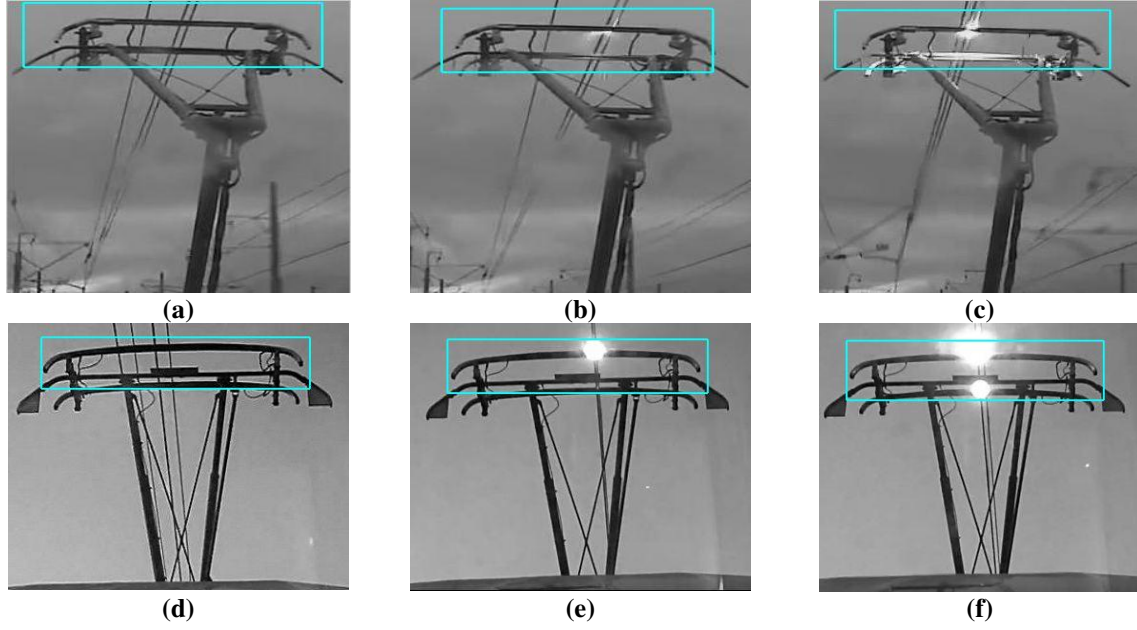


Şekil 3.32. Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerin bulanık mantık sonucunda pantograf üst ve yan doğrularının elde edilmesi (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100

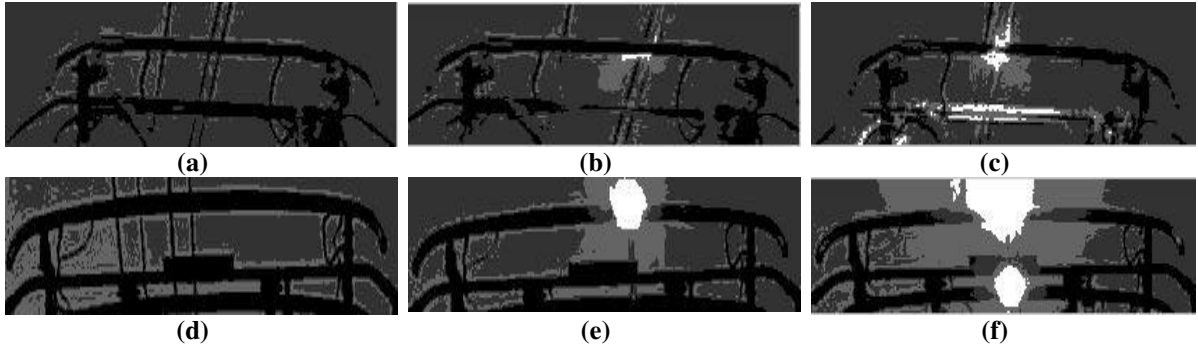
Önerilen yöntem için kullanılan pantograf görüntülerinde tespit edilen doğrular bulanık sistem ile birlikte kullanılarak pantograf üst ve yan doğruları elde edilmiştir. Elde edilen pantograf üst ve yan doğruları Şekil 3.32’de verilmiştir.

Şekil 3.32’de verilen pantograf üst ve yan doğruları pantograf şeklini belirtmektedir. Pantograf katener sistemlerinde temas bölgesinde oluşan arkların tespit edilmesi için pantograf temas bölgesi gözlemlenmektedir. Şekil 3.32’de verilen pantograf üst doğrularından pantograf temas bölgesi elde edilmiştir. Kullanılan pantograf görüntülerinde temas bölgesi bir alan içerisine alınarak Şekil 3.33’te verilmiştir.

Şekil 3.33’te bütün görüntülerde görüldüğü gibi pantograf temas bölgesi tespit edilerek bir alan içerisine alınmıştır. Daha sonra pantograf temas bölgesine Otsu yöntemi uygulanarak temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Önerilen ark tespiti yönteminde kullanılan bütün görüntülerde pantograf temas bölgesinden alınan alana Otsu yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.34’te verilmiştir.



Şekil 3.33. Pantograf ark tespiti için kullanılan görüntülerden pantograf üst bölgesinin tespit edilmesi (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100



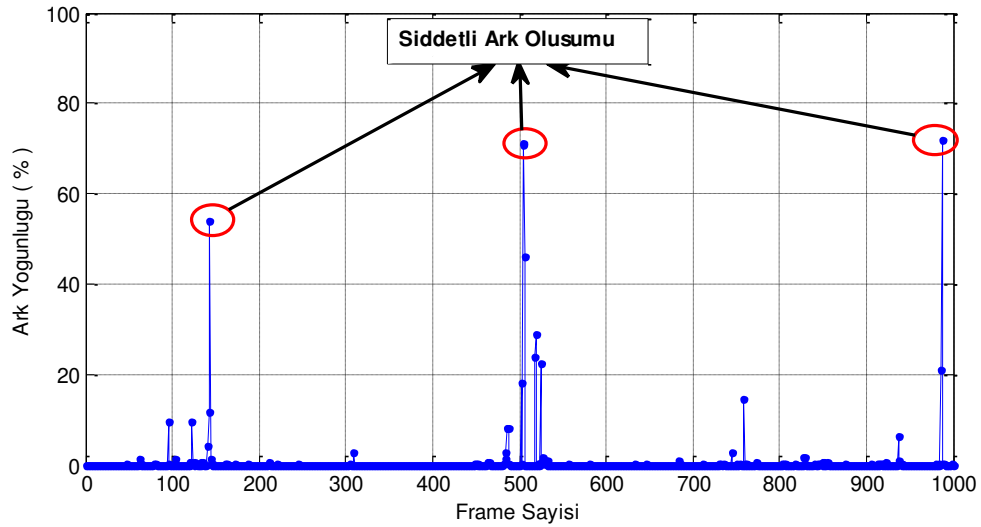
Şekil 3.34. Pantograf üst bölgesinden alınan alana Otsu yönteminin uygulanması sonucu arkların tespit edilmesi (a) Video 1, Frame = 1 (b) Video 1, Frame = 50 (c) Video 1, Frame = 100 (d) Video 2, Frame = 1 (e) Video 2, Frame = 50 (f) Video 2, Frame = 100

Şekil 3.34’de görüldüğü gibi önerilen yöntemde kullanılan bütün görüntülerden pantograf temas bölgesi kolaylıkla tespit edilmiştir. Tespit edilen temas bölgesine uygulanan Otsu yöntemi ile ark oluşan bölgelerin beyaz olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde kullanılan pantograf temas alanı görüntülerinde beyaz bölgeler incelenerek ark tespiti yapılmıştır. Ayrıca beyaz bölgelerin yoğunluğuna göre oluşan arkların şiddeti de belirlenmektedir. Önerilen ark tespiti yönteminde kullanılan görüntülerde ark yoğunlukları Tablo 3.4’te verilmektedir.

Tablo 3.4. Önerilen ark tespiti yönteminde kullanılan görüntülerdeki ark yoğunlukları

Kullanılan görüntüler (Şekil 21)	Ark oluşan piksel sayısı	Temas alanındaki toplam piksel sayısı	Ark yoğunluğu %
a	0	16080	0
b	32	14405	0.22
c	345	15232	2.26
d	0	15565	0
e	415	15504	2.67
f	1454	17615	8.25

Tablo 3.4'te de görüldüğü gibi Şekil 3.34(a) ve Şekil 3.34(d) görüntülerinde hiç ark oluşmadığı, Şekil 3.34(b)'de ark oluştuğu ve oluşan arkın şiddetinin çok küçük olduğu görülmektedir. Şekil 3.34(c) ve Şekil 3.34(e) görüntülerinde ark oluştuğu ve oluşan arkın şiddetinin büyük olduğu, Şekil 3.34(f)'de ise oluşan arkın şiddetinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan video görüntülerine önerilen ark tespiti yöntemi uygulandığında 1000 frame için elde edilen sonuç Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.35. Önerilen ark tespiti yönteminin 1000 Frame için uygulanması

Şekil 3.35'te görüldüğü gibi bir pantograf videosundan alınan 1000 frame için önerilen yöntem uygulanmıştır. Her frame için oluşan ark yoğunluğu elde edilmiştir. Şekil 3.35'te görüldüğü üzere üç farklı noktada şiddetli arklar oluşmuştur. Oluşan şiddetli arklar pantograf temas bölgesinde arızaların oluşumuna neden olmaktadır. Arkların şiddeti arttıkça temas bölgesinde oluşturduğu zarar daha da artmaktadır.

3.6. Bölüm Değerlendirmesi

Bu çalışmada pantograf model ve ark tespiti için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde pantograf görüntülerinden pantograf üst ve yan doğrularının tespit edilmesi için bulanık mantık tabanlı bir sistem kullanılmıştır. Öncelikle pantograf model ve ark tespiti için önerilen iki yöntemde de pantograf üst ve yan doğruları tespit edilmektedir. Pantograf görüntülerinden pantograf üst ve yan doğrularının tespit edilmesi için öncelikle özellik çıkarımı yapılmaktadır. Yapılan özellik çıkarımında Canny kenar çıkarım yöntemi ve Hough dönüşümü kullanılarak pantograf görüntüsünde bulunan bütün doğrular elde edilmektedir. Elde edilen doğrular bulanık sistemde kullanılarak pantograf üst ve yan doğruları tespit edilmektedir. Pantograf model tespiti için bulanık sistem sonucunda tespit edilen pantograf yan doğruları kullanılmıştır. Pantograf yan doğrularının açısı değerleri göz önünde bulundurularak pantograf modeli belirlenmiş ve hangi tür pantografa daha çok benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Pantograf ark tespiti için önerilen yöntemde ise pantograf üst doğruları kullanılarak pantograf temas bölgesi elde edilmiştir. Pantograf temas bölgesine Otsu yöntemi uygulanarak ark tespiti yapılmıştır. Önerilen ark tespiti yönteminde bütün görüntü üzerine Otsu yöntemi uygulanacağına sadece tespit edilen temas bölgesine uygulanmıştır. Böylece önerilen yöntemin daha hızlı çalışması sağlanarak temas bölgesi dışında oluşan ışık kaynaklarının ark olarak tespit edilmesi engellenmiştir. Böylece önerilen yöntem daha hızlı ve daha doğru sonuç vermektedir. Önerilen yöntem literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında, bu yöntemin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

4. GÖRME TABANLI TEMAS NOKTASI İZLEME YAKLAŞIMI

Tezin bu bölümünde pantograf katener sisteminde görme tabanlı temas noktası izleme yaklaşımları için iki farklı yöntem sunulmaktadır. Normal ve termal pantograf görüntüleri birlikte kullanılarak bir yöntem önerilmektedir. Önerilen bu yöntemde normal ve termal görüntüden katener ve pantograf arasındaki temas noktası kenar çıkarım ve Hough dönüşümü ile bulunmakta, termal görüntüden ise temas noktasının sıcaklığı analiz edilmektedir. Temas noktasındaki aşırı ısınmalar analiz edilerek ark oluşumları tespit edilmektedir. Önerilen yöntemin doğruluğu TCDD Malatya Müdürlüğünde gerçek bir pantograftan alınan deneysel görüntüler ile ispat edilmiştir. Bir diğer yöntemde ise sadece termal görüntüler kullanarak görme tabanlı temas noktası izleme yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen çalışmada pantograf katener sistemlerinde temas noktasının aşırı ısınmasını veya ark oluşmasını tespit etmek için histogram tabanlı termal görüntü işleme yöntemi önerilmektedir. Pantograf katener sistemin termal görüntüleri alınarak, elde edilen görüntüler üzerinde görüntü işleme yöntemleriyle temas noktası tespit edilmektedir. Tespit edilen temas noktasına göre bir kesit alanı oluşturulmaktadır. Kesit alanının histogramı çıkarılarak aşırı ısınma ve ark oluşumları gözlemlenmektedir. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesiyle erken arıza tespiti yapılarak daha büyük arızaların oluşması engellenmektedir. Önerilen yaklaşımda, temas noktasının tespit edilmesi, kesit alanlarının oluşturulması ve histogram değerlerinin elde edilmesi gibi bütün adımlar deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve doğrulanmıştır.

4.1. Giriş

Demiryolları, günümüzde diğer ulaşım türlerine göre daha çevreci, güvenli, konforlu ve daha az enerji kullanımı bakımından üstünlük göstermektedir. Trenlerdeki konforun ve hızın artması, enerji tüketiminin azalmasıyla birlikte demiryolu ulaşımını daha önemli bir ulaşım aracı haline getirmiştir [3]. Her geçen gün ulaşım araçlarına son teknolojiye sahip yeni trenleri de ekleyen demiryolları, ulaşım dünyasında büyük bir öneme sahiptir. Demiryolu ulaşımında son zamanlarda elektrikli raylı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler diğer demiryolu araçlarına göre daha hızlı ve konforlu olup, daha az enerji

tüketir. Elektrikli raylı sistemlerde, elektriğin trene iletilmesi için geliştirilen pantograf katener sistemi oldukça önemlidir [1-4].

Trenin üzerinde bulunan pantograf demiryolu boyunca sabit olarak yerleştirilen katener sistemine temas ederek elektrik iletimi sağlanmaktadır [4]. Bu temas işleminin sürekliliğinin sağlanması son derece önemlidir. Pantograf katener sisteminin teması sürekli olmazsa, elektrik iletimi kesintili olacağından tren verimli bir şekilde çalışmayacaktır. Mevsim şartları temas işleminin sürekliliğini yüksek oranda etkilemektedir. Temas işleminin sürekliliği sağlanmadığı sürece pantograf katener sistemlerinde birçok arıza meydana gelmektedir. Bu arızaların zamanında tespit edilmesi demiryolu sisteminin bozulmadan onarılmasını ve düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca erken teşhis yapılarak demiryolu ulaşımının aksamaması sağlanmaktadır. Bu nedenle raylı sistemlerde erken teşhis oldukça önemlidir. Pantografin temas teline az baskı uygulaması temasın sürekliliğini azaltırken, çok baskı yapması ise sürtünmeden dolayı birçok arıza türleri oluşmaktadır [56,65]. Pantograf sisteminde aşırı ısınmadan dolayı karbon yapı deformasyona uğramaktadır. Böylelikle daha büyük arızalar oluşmaktadır.

Önerilen bu çalışmada, termal ve normal görüntüler kullanılarak temas noktasına ait belirli bir bölgenin piksel değerleri analiz edilmektedir. Termal görüntülerden katener temas tellerinin tespit edilememesinden dolayı önerilen yöntemde normal görüntü de kullanılmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan termal kamera aldığı her termal görüntünün aynı zamanda normal görüntüsünü de kaydetmektedir. Bu ayrıcalık kullanılarak normal görüntü üzerinden katener teli tespit edilmektir. Daha sonra tespit edilen teli, pantograf üst çizgisinin tespit edildiği termal görüntü ile birleştirilmektedir. Elde edilen doğrular ile pantograf üst çizgisinin katener teli ile temas noktası tespit edilmektedir. Tespit edilen temas noktasını içerisinde bulunduran 20x20 boyutundaki görüntünün histogramı alınarak sistemin temas noktasındaki sıcaklık değişimi gözlemlenmektedir.

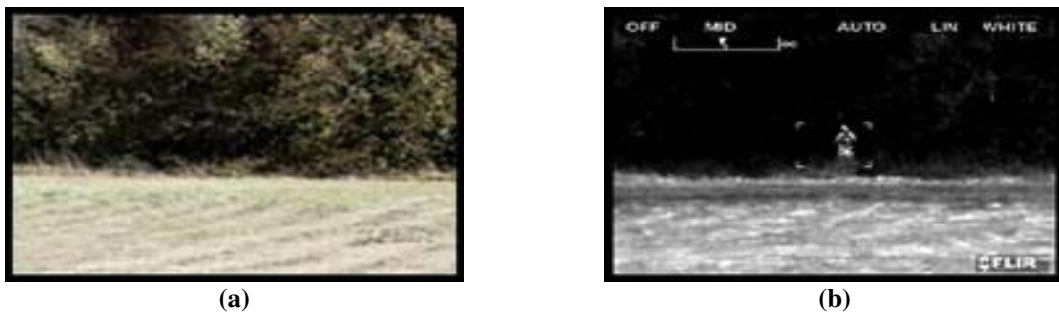
Önerilen diğer çalışmada, termal görüntüler kullanılarak piksel yoğunluğuna göre pantograf temas bölgesi tespit edilmektedir. Tespit edilen temas bölgesinde bir kesit alanı oluşturularak bu alanın histogramı elde edilmektedir. Elde edilen histogram grafiğinde aşırı ısınma ve ark arızaları gibi sıcaklık değişimleri izlenmektedir. Öncelikle lokomotifin üzerine yerleştirilen termal kameradan alınan termal görüntüler R (red), G(green) ve B(blue) çerçevelerine ayrılmaktadır. Görüntüde elde edilen R(red) çerçevesi kullanılarak ve

piksel yoğunluğu dikkate alınarak temas bölgesi elde edilmektedir. Temas bölgesindeki piksel değerlerinin değişimleri incelenerek sıcaklık ve ark oluşumları izlenmektedir.

4.2. Termal Görüntü Özellikleri

Her cisim sahip olduğu sıcaklık değerine göre IR yayılımları yapar. Termal kameralar çok küçük sıcaklık farklarını yakalayabilen ve cisimlerin sıcaklık farklarından görüntü oluşturabilen özelliktedir. Termal kameralar da normal kameralar ile aynı yapıya sahiptir. Fakat termal kamerada kullanılan imaj sensörlerinin yapısı farklıdır. Normal kameralarda kullanılan imaj sensörler görünebilir ışıkları algılayarak görüntü oluştururken, termal kameralarda da kullanılan imaj sensörler infrared ışığa duyarlıdır. Termal görüntüler; elektrik ile ilgili uygulamalarda, elektromekanik ve mekanik uygulamalarda, süreç uygulamalarında, sağlık ve savunma uygulamaları gibi oldukça önemli alanlarda kullanılmaktadır [66-71].

Termal görüntülerin normal görüntülere göre birçok avantajları bulunmaktadır. Normal kameralar zifiri karanlıkta hiçbir şey görüntüleyemezken termal kameralar rahatlıkla görüntü elde etmektedir. Termal kameralar, genellikle gece görüşlü kameralar olarak adlandırılmaktadır. Fakat sadece gece kullanılan bir kamera türü değildir. Gündüz normal kameraların uzun mesafelerde görüntü alımında görüntüdeki netlik azalırken termal kameralarda gündüz olmasına rağmen görüntü kalitesi düşmemektedir. Çünkü çoğu durumda enerji atmosferde görünür ışıktan daha kolay iletilmektedir. Görünür ışık termal enerjiden daha çok soğurulur. Termal kameralar günlük hayattaki toz, hafif çalılık ve hafif sisin olduğu bölgelerde bile görüntü sağlamaktadır. Şekil 4.1’de çalılık alana ait bir görüntünün normal ve termal görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4.1. Çalılık bir bölgenin normal ve termal görüntüleri (a) Normal görüntü (b) Termal görüntü

Şekil 4.1(a)'da verilen çalılık bölgenin normal görüntüsünde çalılıkların arkasında bulunan davetsiz misafir görülmezken Şekil 4.1(b)'de verilen termal görüntüde açıkça görülmektedir. Termal kameralar genellikle pahalı cihazlardır. Buna rağmen endüstriyel uygulamalarda kullanılarak oluşabilecek arızaların erken teşhis edilmesiyle arıza maliyetleri azaltılabilir. Ayrıca faaliyetlerin aksamamasını sağlayarak maliyetin düşmesini engeller.

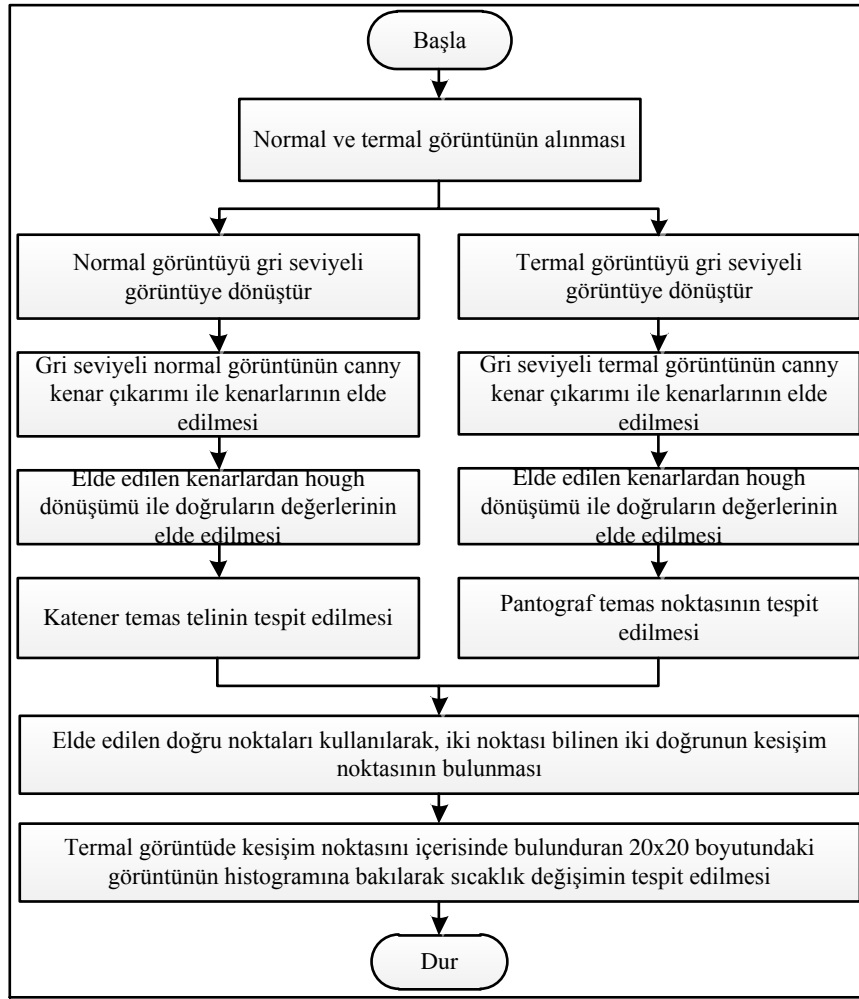
4.3. Önerilen Yöntem

Bu bölümde, önerilen yöntemde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Önerilen yöntemlerden biri temas noktasının izlenmesi diğer bir yöntem ise sıcaklık değişimi ve arkın izlenmesidir.

4.3.1. Temas Noktasının İzlenmesi Yöntemi

Pantograf katener sistemlerinde normal ve termal görüntü tabanlı temas noktasındaki sıcaklık değişiminin gözlemlenmesi için yeni bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde normal ve termal görüntüler üzerinde Canny kenar algılama algoritması ve Hough dönüşümü uygulanarak normal görüntüden temas teli ve termal görüntüden ise pantograf üst çizgisi tespit edilmektedir. Böylece temas noktası kolayca tespit edilmektedir. Her bir görüntü çerçevesinde değişen temas noktasına ait piksel bilgileri alınarak sıcaklık değişimi gözlemlenmektedir. Normal ve termal görüntü işleme tabanlı pantograf katener sistemi için önerilen yöntemin temel akış şeması Şekil 4.2'de verilmektedir.

Şekil 4.2'de verilen temel akış şemasında normal ve termal görüntü üzerinde ayrı ayrı işlemler yapılmaktadır. Normal ve termal görüntü bir termal kameradan anlık olarak çekilen iki farklı türdeki görüntülerdir. Normal görüntü ile termal görüntü arasında pantografin konumu değişmemektedir. Bu nedenle iki farklı türdeki görüntüler aynı alanların görüntülerine sahiptir. Böylece normal kamera görüntüsünden temas telini temsil eden doğru termal görüntüde kullanılmaktadır.

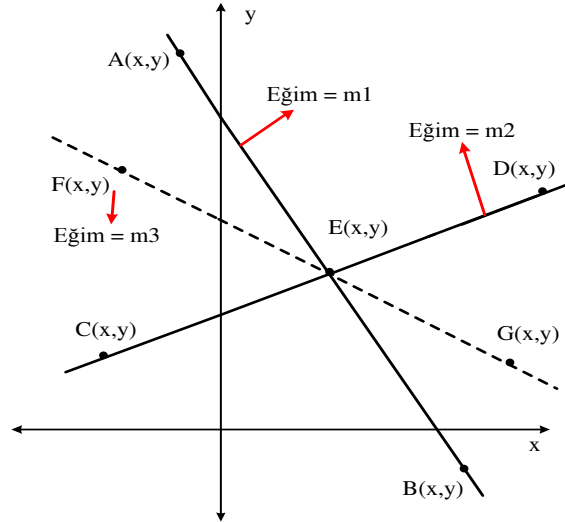


Şekil 4.2. Önerilen yöntemin temel akış şeması

Temas teli pantografa göre çevrenin sıcaklığından farklı sıcaklık değerine sahip olmadığından termal görüntüde temas teli görünmemektedir. Bu nedenle bu yöntemde normal görüntüde kullanılmıştır. Normal görüntü üzerinden kenar çıkarımı ve Hough dönüşümü yapılarak temas telini temsil eden doğrular elde edilmiştir. Bu doğruların elde edilmesinde iki noktası bilinen doğrunun eğimi yönteminden yararlanılmıştır. Pantograf katener sisteminin eğim aralıkları dikkate alınarak temas telini ifade eden doğrular tespit edilir. İki noktası bilinen doğrunun eğimi denklem 4.1’de verilmektedir.

$$m = \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de verilen m eğim, (A_x, A_y) A noktasının konum bilgileri ve (B_x, B_y) ise B noktasının konum bilgisidir. Bu denklem normal ve termal görüntü üzerinde uygulanarak elde edilen eğim değerine göre temas teli ve pantograf üst çizgisi tespit edilmektedir. Her bir doğrunun kendisine ait iki noktası bilinmektedir. Bu iki doğru kesişerek pantograf katener sistemindeki temas noktasını vermektedir. Temas noktasının hesaplanması için iki noktası bilinen doğrunun kesişim noktası için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle normal görüntüden alınan doğruya ait noktalar A ve B ’dir. Termal görüntüden elde edilen pantograf üst çizgisi doğrusuna ait noktalar ise C ve D ’dir. Bu iki doğrunun kesişim noktası E ’dir. İki noktası verilen iki doğruya ait kesişim noktası Şekil 4.3’te ki gibi analitik düzlemde gösterilmektedir.



Şekil 4.3. İki doğrunun kesişim noktasının analitik düzlemde gösterilmesi

Şekil 4.3’te verilen E noktasının değerlerini hesaplamak için E , F ve G noktasından geçen başka bir doğru çizilir. Eğimi m_3 olan doğrunun denklemi denklem 4.2’de verilmektedir.

$$m_3 = \frac{G_y - F_y}{G_x - F_x} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de verilen F ve G ye ait konum bilgilerinin hesaplanarak, denklem 4.2’nin son hali denklem 4.3’te verilmektedir.

$$m_3 = \frac{((D_y - C_y) * (C_x - A_x)) - ((C_y - A_y) * (D_x - C_x))}{((D_y - C_y) * (B_x - A_x)) - ((B_y - A_y) * (D_x - C_x))} \quad (4.3)$$

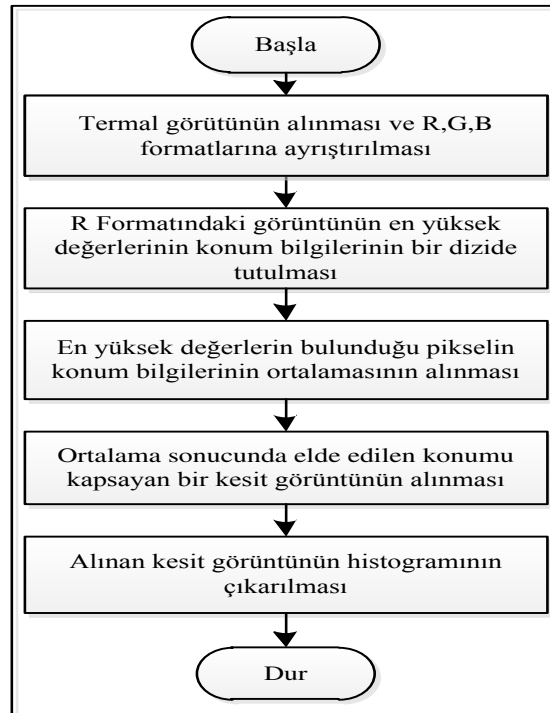
Denklem 4.3'te verilen m_3 değeri kullanılarak denklem 4.4'te E_x ve E_y değerleri hesaplanmaktadır.

$$E_x = A_x + (B_x - A_x) * m_3, E_y = A_y + (B_y - A_y) * m_3 \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'te elde edilen E_x ve E_y değerleri kullanılarak termal görüntü üzerinde temas noktasının sıcaklık değişimi gözlemlenmektedir.

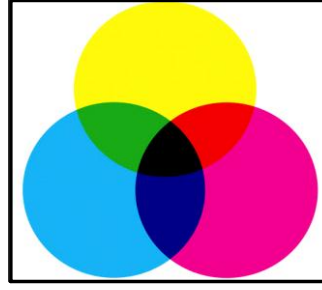
4.3.2. Sıcaklık Değişimi ve Arkın İzlenmesi Yöntemi

Pantograf katener sistemlerinde alınan termal görüntüler kullanılarak histogram tabanlı ark tespiti önerilmiştir. Bir termal görüntüde cisimlerin sıcaklığına göre renklendirilmektedir. Görüntüde sıcaklık farkına göre renk farkı oluşturulmaktadır. Önerilen yöntemin temel akış şeması Şekil 4.4'te verilmektedir.



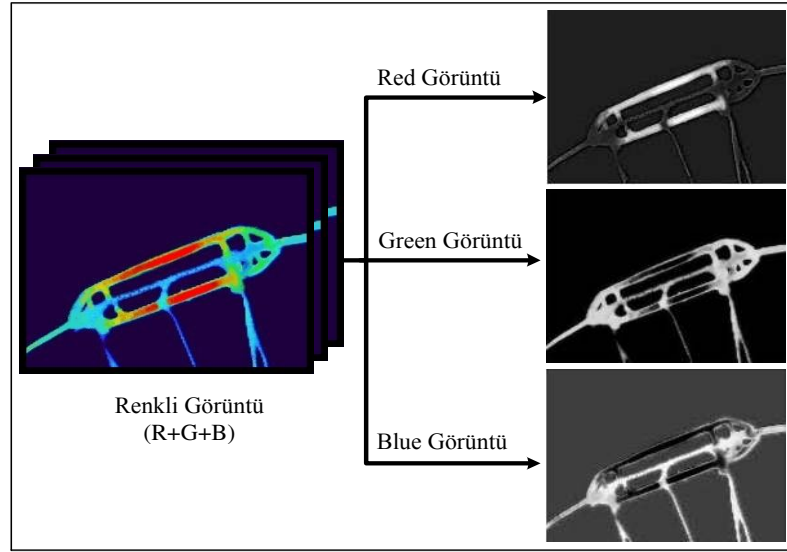
Şekil 4.4. Önerilen yöntemin temel akış şeması

Termal bir görüntü hem gri tonlamalı hem de renkli olmaktadır. Renkli bir termal görüntüde mavi renk soğuğu temsil ederken kırmızı renk ise sıcaklığı temsil etmektedir. Bütün sıcaklık değerleri, mavi ile kırmızı arasında farklı renk tonları ile ifade edilmektedir. Temel olarak 3 renk mevcuttur. Bu renk değerlerinden farklı değerlerde kullanılarak farklı renk tonları elde edilmektedir. Görüntü sistemlerinde de bu işlem mevcuttur. Renkli bir görüntü R (Red), G (Green) ve B (Blue) temel renklerden oluşmaktadır. Şekil 4.5'te verilen görüntüde R, G ve B renkleri kullanılarak bütün renk tonlarının elde edilebileceği verilmiştir.



Şekil 4.5. R (Red), G (Green) ve B (Blue) renklerinden bütün renklerin elde edilmesi

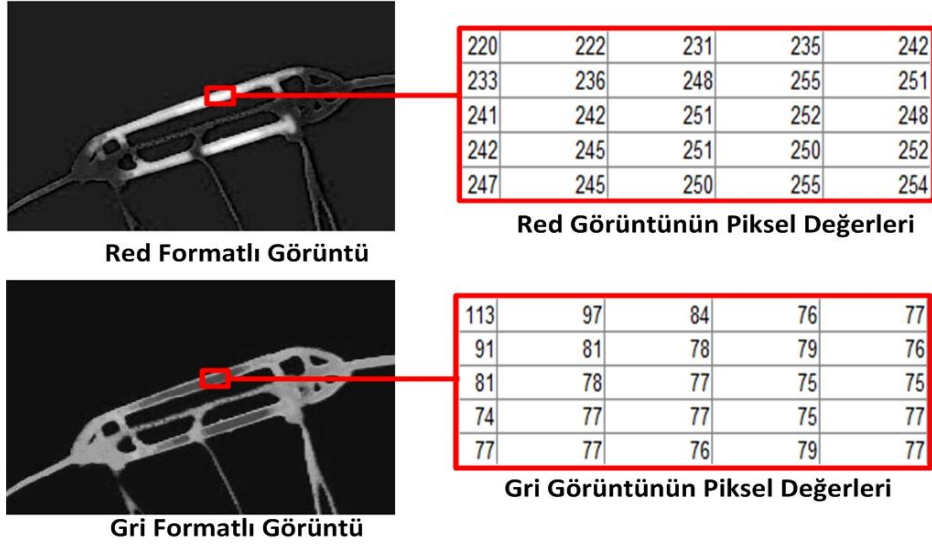
Şekil 4.5'te de verildiği gibi R, G ve B temel renkleri kullanılarak bütün renkler elde edilmektedir. Termal görüntüde de aynı şekilde bütün renkler bu üç temel renkten oluşmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan termal görüntü gri formata dönüştürüleceğine R,G ve B renk formatlarına ayrıştırılarak R renk formatı kullanılmıştır. Böylelikle pantograf ile katener telinin temas noktası daha net elde edilmektedir. Şekil 4.6'da renkli bir termal görüntünün R, G ve B formatlarına ayrıştırılmış hali verilmektedir.



Şekil 4.6. Renkli termal görüntünün R, G ve B formatlarına ayrıştırılması

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi termal kameradan alınan renkli bir görüntünün R, G ve B formatlara ayrıştırıldığında elde edilen görüntüler verilmiştir. Termal görüntüden, pantograf ile katener tellerinin temas noktasında oluşan sıcaklığın tespit edilmesi için R, G ve B renk formatlarına baktığımızda en uygunun R renk formatı olduğu belirlenmiştir. Temas noktasının aşırı ısınmasından dolayı termal görüntüde kırmızı renk ile ifade edilmiştir. Temas noktasındaki ısınma ve oluşan arkların tespit edilmesi için R renk formatı kullanılmıştır.

Normal görüntü işleme uygulamalarında, renkli görüntü doğrudan gri formata dönüştürülerek işlem yapılmaktadır. Fakat termal görüntü işleme uygulamalarında bu işlem başarılı değildir. Çünkü normal bir görüntüde ark oluşumunu tespit etmek için ark oluştuğunda ortaya çıkan ışık ve aşırı ısınma aranır. Işıқта genellikle beyaz renk ile ifade edildiğinde görüntüde R, G ve B değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle gri format uygun olur. Fakat termal uygulamalarda görüntü cisimlerin sıcaklık değerlerine göre işlendiğinden dolayı gri format başarılı bir yöntem değildir. Temas noktası diğer bölgelere göre daha sıcak olduğundan kırmızı renkle ifade edilmektedir. Kırmızı renkte temel bir renk olduğundan R formatı kırmızı rengi daha iyi temsil etmektedir. Böylelikle temas noktası diğer bölgelere göre daha belirgin haldedir. Şekil 4.7’de termal bir görüntünün R ve gri formatlarına dönüştürülmüş hali verilmektedir.

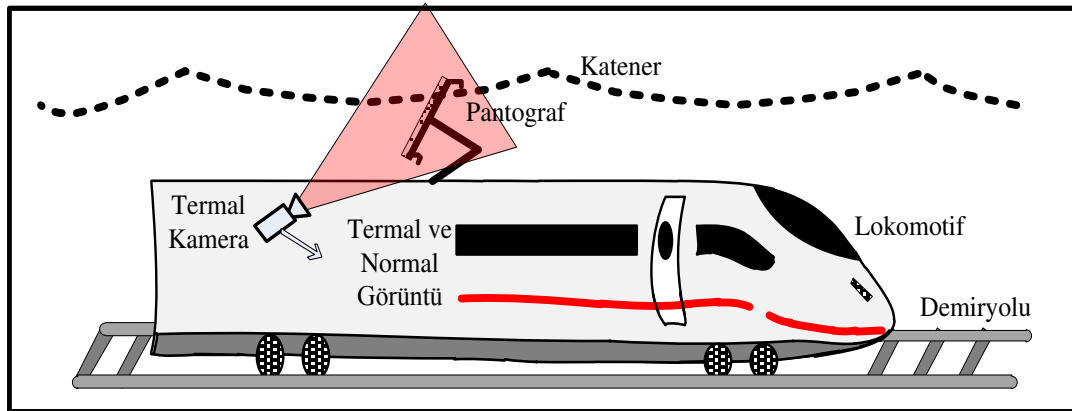


Şekil 4.7. Termal bir görüntünün R ve gri formatlarına dönüştürülmüş hali

Şekil 4.7’de R ve gri formatlı iki görüntüden de alınan 5x5 boyutundaki küçük kesitlere ait piksel değerleri incelenmiştir. Verilen piksel değerleri incelendiği zaman temas noktasının daha iyi bir şekilde tespit edilmesi için R formatlı görüntünün kullanılması daha uygun olduğu görülmüştür.

4.4. Deneysel sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan görüntüler, Malatya Demir Yollarında kullanılan bir lokomotiften Şekil 4.8’de verilen deney düzeneği kurularak alınmıştır.



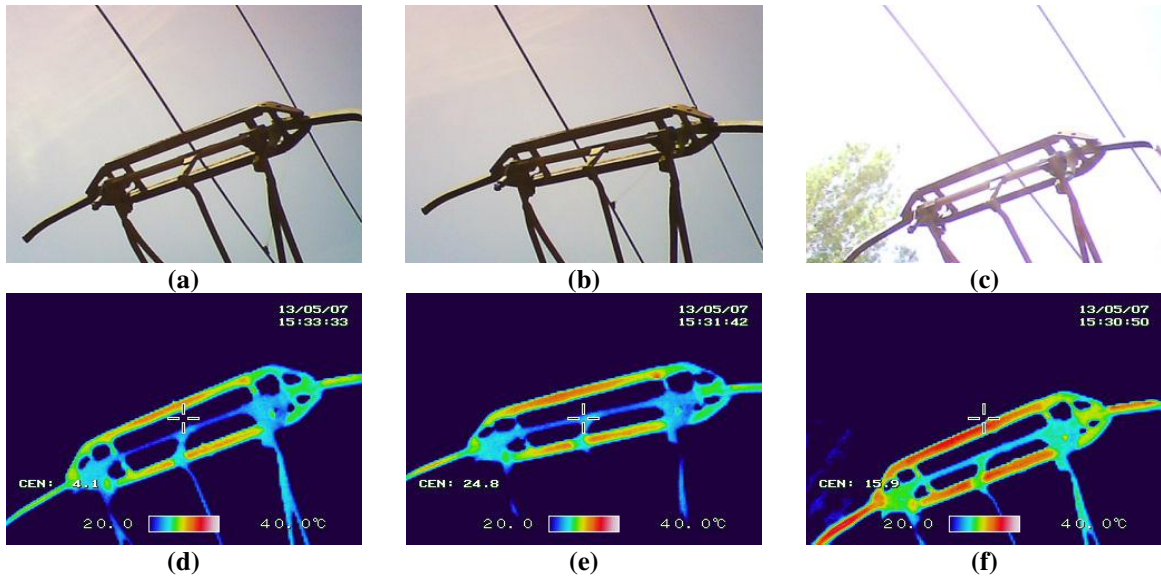
Şekil 4.8. Lokomotif üzerine kurulan deneysel düzenek

Şekil 4.8’de verilen termal kamera aynı anda normal ve termal görüntü kaydetme özelliğine sahiptir.

4.4.1. Temas Noktasının İzlenmesi Yöntemi için Deneysel Sonuçlar

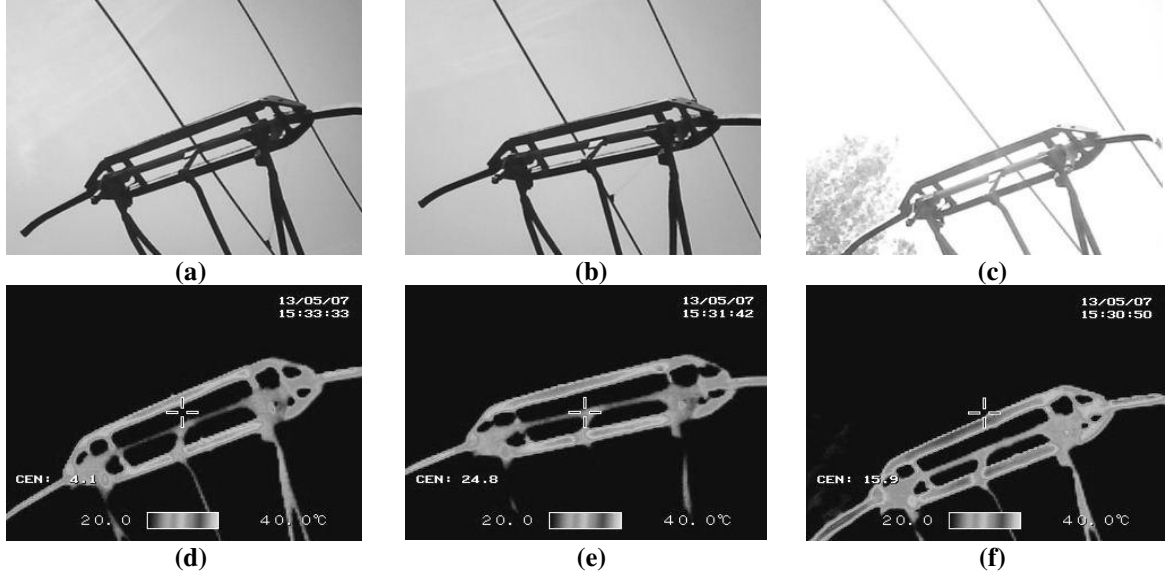
Deney ortamından alınan bir dizi normal ve termal görüntüler ile önerilen yöntem uygulanmıştır. Termal kameradan alınan pantograf katener sistemin normal görüntüleri ve termal görüntüler Şekil 4.9’da verilmektedir.

Şekil 4.9’da verilen normal ve termal pantograf katener örnek görüntüleri üzerinde görüntü işleme yapılmak üzere gri seviyeli görüntülere dönüştürülmüştür. Termal kameradan alınan normal ve termal görüntülerin gri seviye görüntüye dönüştürülmüş hali Şekil 4.10’da verilmektedir.

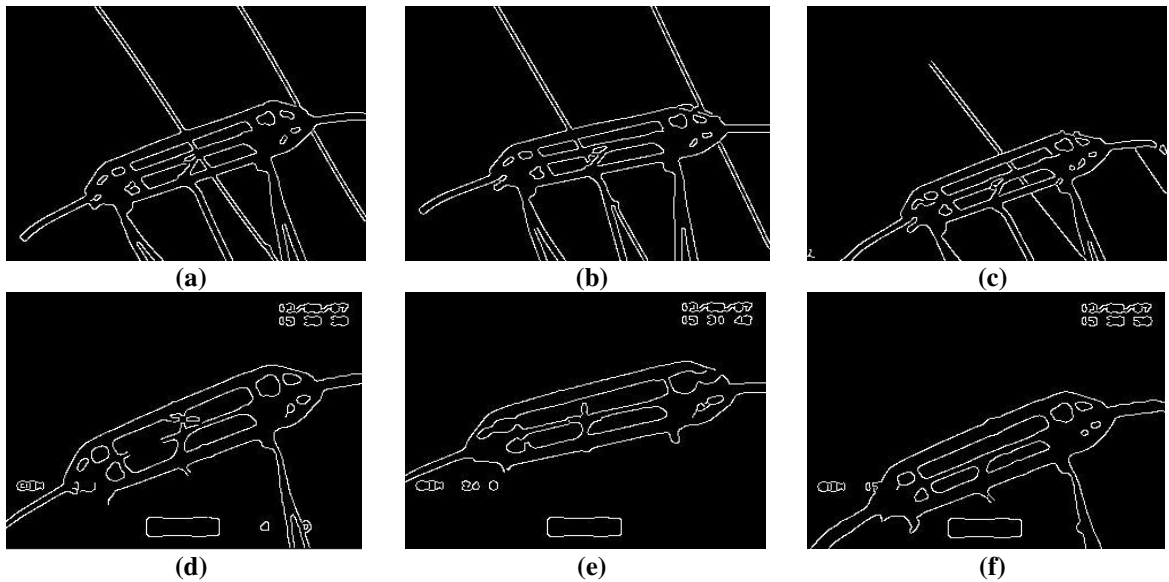


Şekil 4.9. Termal kameradan alınan pantograf katener sistemin örnek görüntüleri (a) Çok az ısınma olan pantografin normal görüntüsü (b) Isınma olan pantografin normal görüntüsü (c) Aşırı ısınma olan pantografin normal görüntüsü (d) Çok az ısınma olan pantografin termal görüntüsü (e) Isınma olan pantografin termal görüntüsü (f) Aşırı ısınma olan pantografin termal görüntüsü

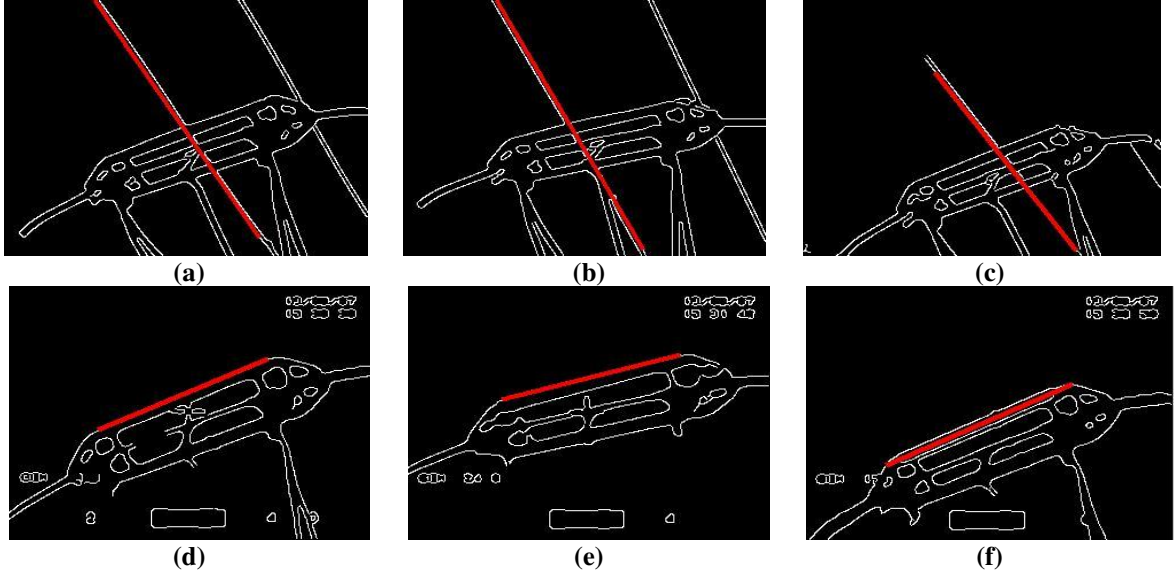
Şekil 4.10’da verilen görüntüler kullanılarak üzerinde Canny kenar algılama algoritması uygulanarak kenar çıkarımı yapılmıştır. Kenar çıkarımı sonucunda normal ve termal görüntülerden elde edilen kenar çıkarım görüntüleri Şekil 4.11’de verilmektedir.



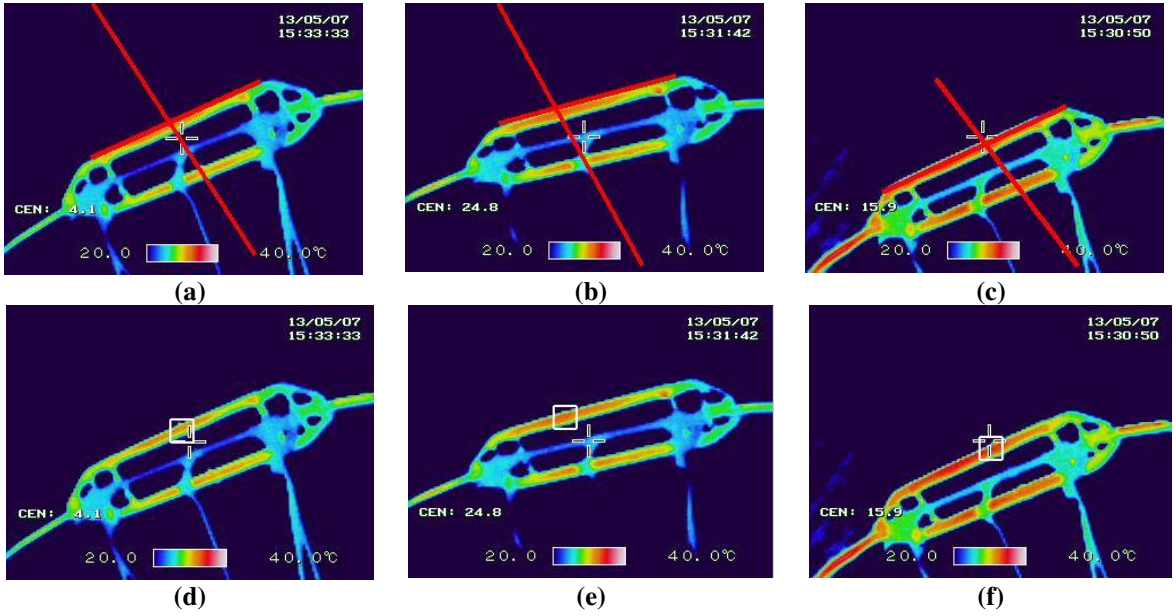
Şekil 4.10. Termal kameradan alınan pantograf katener sistemin gri seviyeli görüntüleri (a) Çok az ısınma olan pantografin gri görüntüsü (b) Isınma olan pantografin gri görüntüsü (c) Aşırı ısınma olan pantografin gri görüntüsü (d) Çok az ısınma olan termal görüntünün gri görüntüsü (e) Isınma olan termal görüntünün gri görüntüsü (f) Aşırı ısınma olan termal görüntünün gri görüntüsü



Şekil 4.11. Normal ve termal görüntüler üzerinde kenar çıkarımı ve doğru tespiti (a) Çok az ısınma olan pantografin kenar çıkarımı (b) Isınma olan pantografin kenar çıkarımı (c) Aşırı ısınma olan pantografin kenar çıkarımı (d) Çok az ısınma olan termal görüntünün kenar çıkarımı (e) Isınma olan termal görüntünün kenar çıkarımı (f) Aşırı ısınma olan termal görüntünün kenar çıkarımı



Şekil 4.12. Normal ve termal görüntüler üzerinde kenar çıkarımı ve doğru tespiti (a) Çok az ısınma olan pantograf normal görüntüsünden katener temas teli tespiti (b) Isınma olan pantograf normal görüntüsünden katener temas teli tespiti (c) Aşırı ısınma olan pantograf normal görüntüsünden katener temas teli tespiti (d) Çok az ısınma olan pantograf termal görüntüsünden katener temas teli tespiti (e) Isınma olan pantograf termal görüntüsünden katener temas teli tespiti (f) Aşırı ısınma olan pantograf termal görüntüsünden katener temas teli tespiti

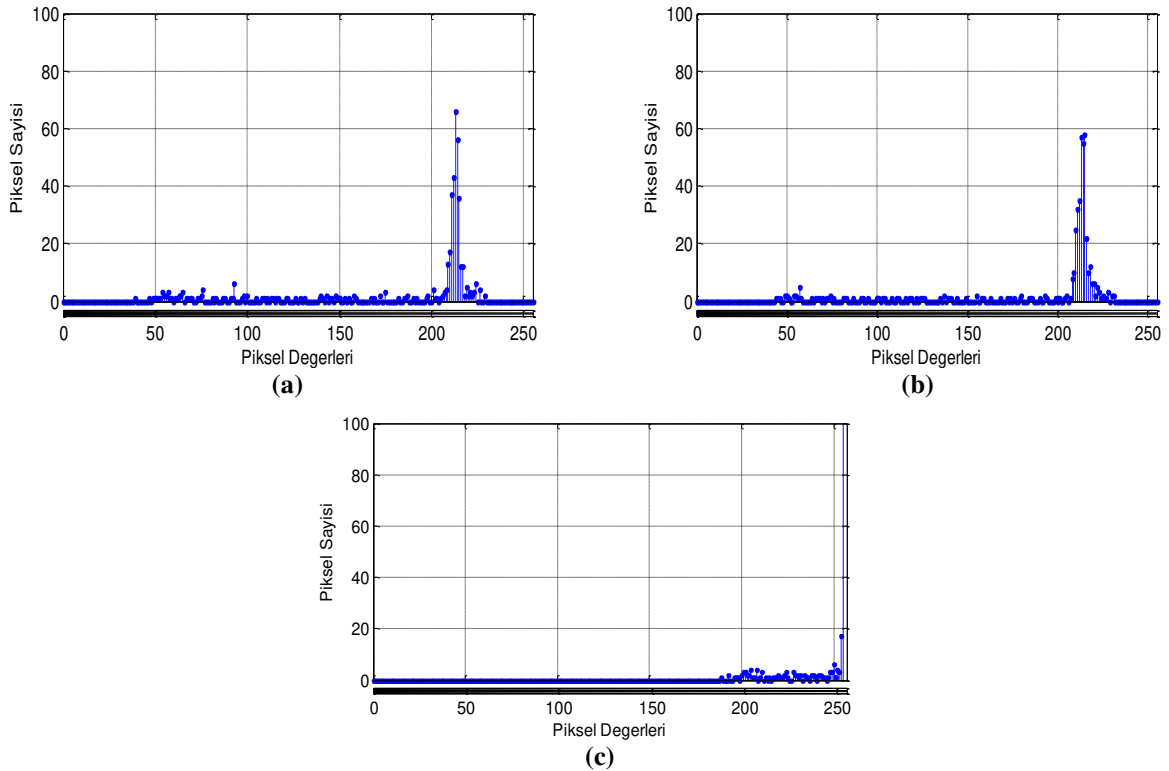


Şekil 4.13. Termal görüntü üzerinde temas noktasının belirlenmesi ve temas noktasını içerisinde bulunduran bölgenin oluşturulması (a) Çok az ısınma olan termal görüntüden temas noktasının belirlenmesi (b) Isınma olan termal görüntüden temas noktasının belirlenmesi (c) Aşırı ısınma olan termal görüntüden temas noktasının belirlenmesi (d) Çok az ısınma olan termal görüntüden temas bölgesinin belirlenmesi (e) Isınma olan termal görüntüden temas bölgesinin belirlenmesi (f) Aşırı ısınma olan termal görüntüden temas bölgesinin belirlenmesi

Elde edilen kenar çıkarımlarına Hough dönüşümü uygulayarak kenar çizgileri belirten doğrular oluşturulmuştur. Daha sonra doğruların üzerinde bulunan nokta değerleri kullanılarak elde edilen doğruların eğimleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan eğim sonuçlarına göre katener temas teli ve pantograf üst çizgisi tespit edilmektedir. Hough dönüşümü sonucunda elde edilen doğrulardan katener temas telinin ve pantograf temas çubuğunun tespit edilmiş görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir.

Şekil 4.12’de elde edilen doğrular termal görüntü ile birlikte kullanılmıştır. Doğrular termal görüntü üzerinde gösterilerek temas noktasının belirlendiği görüntü ve temas noktasını içerisinde bulunduran bölgenin gösterildiği görüntü Şekil 4.13’te verilmiştir.

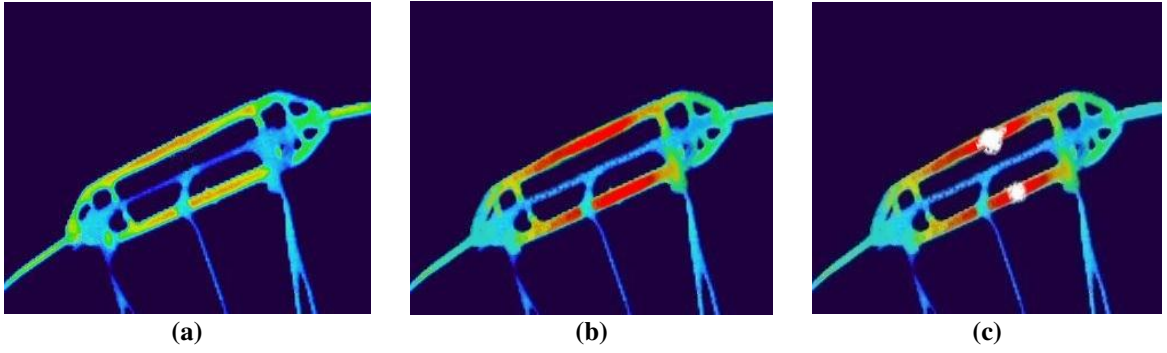
Şekil 4.13’te verilen temas noktasını içerisinde bulunduran 20x20 boyutundaki görüntünün histogramı alınmıştır. Elde edilen histogram grafiğine bakılarak temas noktasındaki aşırı ısınma tespit edilmektedir. Şekil 4.13’te verilen görüntüde belirtilen temas noktasına ait 20x20 boyutundaki görüntünün histogram grafiği Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.14. Termal kameradan alınan görüntülerin histogram sonuçları (a) Çok az ısınma olan termal görüntüden temas noktasının histogramı (b) Isınma olan termal görüntüden temas noktasının histogramı (c) Aşırı ısınma olan termal görüntüden temas noktasının histogramı

4.4.2. Sıcaklık Değişimi ve Arkın İzlenmesi Yöntemi için Deneysel Sonuçlar

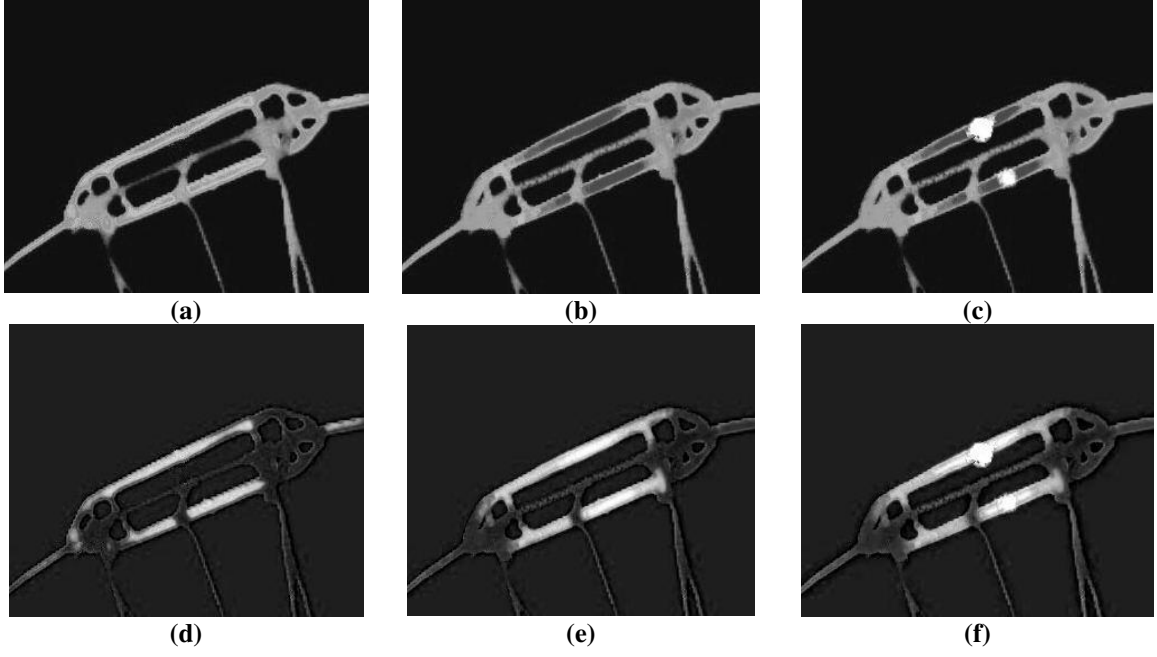
Önerilen yöntem kullanılarak pantograf katener sistemlerine ait üç farklı termal görüntü incelenmiştir. Şekil 4.15(a)'da pantograf temas bölgesinde oluşan ısınmanın çok az olduğu, Şekil 4.15(b)'de pantograf temas bölgesinde aşırı ısınmanın olduğu ve Şekil 4.15(c)'de ise aşırı ısınma ve ark oluşumunun olduğu görülmektedir.



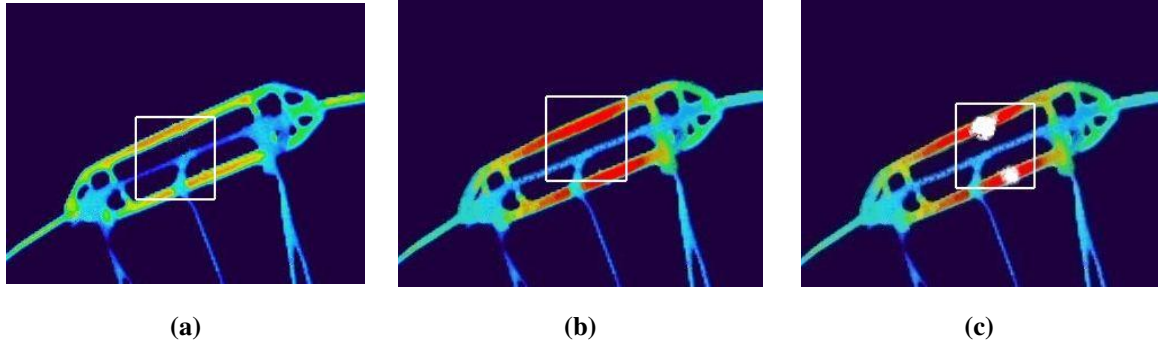
Şekil 4.15. Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntüler (a) Sağlam termal görüntü (b) Temas noktası ısınan termal görüntü (c) Ark oluşmuş termal görüntü

Şekil 4.15'te verilen termal görüntüler üzerinde temas bölgesinin tespit edilebilmesi için görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Genellikle görüntü üzerinde özellik çıkarımı yapılırken renkli görüntü gri görüntüye dönüştürülmektedir. Fakat bu yöntemde renkli görüntüde bulunan R (red) çerçevesi kullanılmıştır. Görüntü üzerinde, R (red) görüntü matrisi incelendiğinde gri görüntüden daha iyi özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.16'da üç farklı termal görüntünün gri görüntüsü ve R (red) görüntüsü verilmiştir.

Şekil 4.16'da verilen R (red) görüntüler önerilen yöntem ile birlikte kullanılarak öncelikle temas noktası tespit edilmiştir. Temas noktası pantograf üst çubuğu ile katener telinin birbirine temas etmesi sonucu oluşan sıcaklık kullanılarak temas noktası izlenmiştir. Tespit edilen temas noktasını kapsayan 70x70 piksel büyüklüğünde küçük bir kesit alınmıştır. Şekil 4.16'da kullanılan R (red) görüntülerden temas noktası tespit edilerek oluşturulan kesit alanı Şekil 4.17'de verilmiştir.

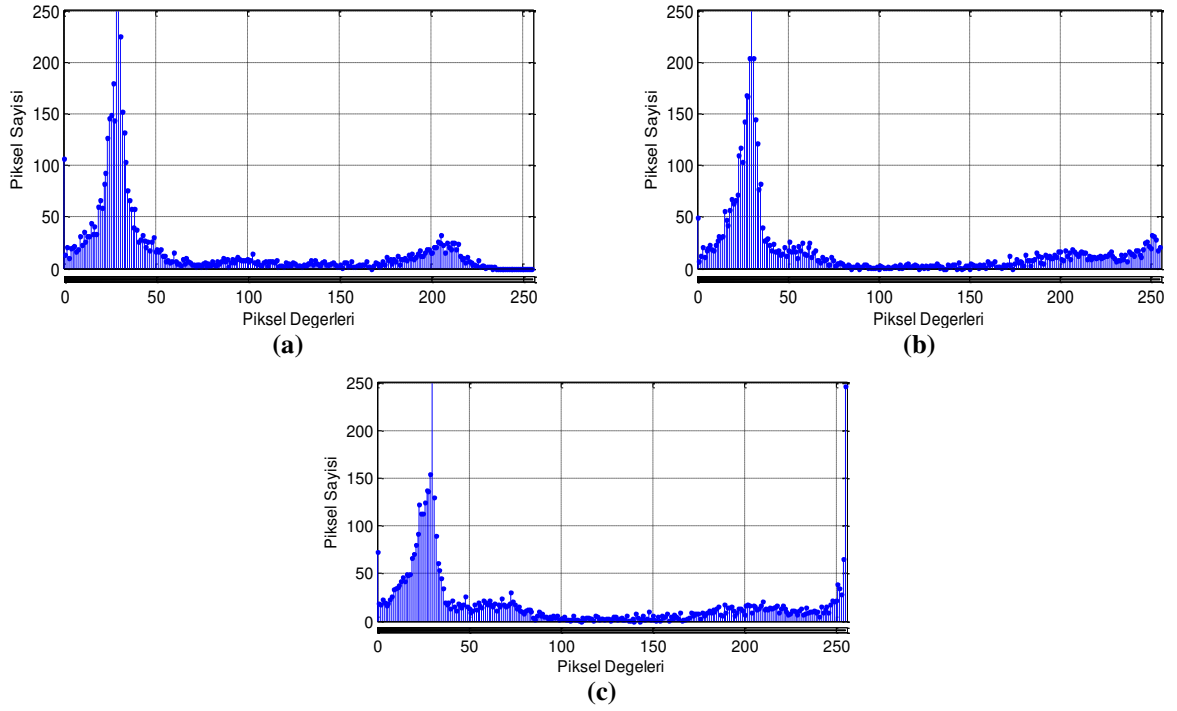


Şekil 4.16. Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntülerin gri ve R(red) görüntüleri (a) Sağlam termal görüntünün gri görüntüsü (b) Temas noktası ısınan termal görüntünün gri görüntüsü (c) Ark oluşmuş termal görüntünün gri görüntüsü (d) Sağlam termal görüntünün R(red) görüntüsü (e) Temas noktası ısınan termal görüntünün R(red) görüntüsü (f) Ark oluşmuş termal görüntünün R(red) görüntüsü



Şekil 4.17. Temas noktasında sağlam ve ark oluşmuş termal görüntülerden alınan kesit alanı (a) Sağlam termal görüntüde kesit alanının elde edilmesi (b) Temas noktası ısınan termal görüntüde kesit alanının elde edilmesi (c) Ark oluşmuş termal görüntüde kesit alanının elde edilmesi

Şekil 4.17’de alınan bu kesitteki renk değişimi, temas noktasının ısınmasından veya temas noktasında oluşan arkten etkilenmektedir. Bu nedenle elde edilen kesit alanına histogram işlemi uygulayarak temas noktasının ısınmasını veya ark oluşumunu kolayca tespit edilmektedir. Şekil 4.17’de pantograf ve katener sistemine ait üç farklı görüntüden alınan kesit alanları kullanılarak temas noktasındaki değişimler histogram ile tespit edilmiştir. Şekil 4.17’den alınan kesit alanının histogramı Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Temas noktasında sağlam ve ark olmuş termal görüntülerin kesit alanlarının histogramı (a) Sağlam termal görüntünün kesit alanının histogramı (b) Temas noktası ısınan termal görüntünün kesit alanının histogramı (c) Ark olmuş termal görüntünün kesit alanının histogramı

Pantograf temas noktasındaki aşırı ısınma ve ark oluşumunun tespit edilmesi için Şekil 4.18'deki grafiklerin 200 ile 255 arasındaki piksel değerleri analiz edilmektedir. Şekil 4.18 (a) , Şekil 4.18 (b) ve Şekil 4.18 (c)'deki grafikler incelendiğinde grafiğin 200 ile 255 arasında artış varsa aşırı ısınma veya ark arızası olduğu söylenebilir. Ayrıca sayısal olarak aşırı ısınma veya ark oluşumunun tespit edilmesi için piksel değeri 200 ile 255 değerleri arasında bulunan değerlerin ortalaması alınarak bir sonuç elde edilebilmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde önerilen iki farklı yöntemde elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Önerilen iki farklı yöntemde elde edilen sonuçlar

	Boyut	Kesit	Ortalama(ms)	Standart Sapma (ms)
Temas noktasının izlenmesi yöntemi	320x240	20x20	839,1	6,59
Sıcaklık değişimi ile arkin izlenmesi yöntemi	320x240	70x70	436,8	7,55

4.5. Bölüm Değerlendirmesi

Tezin bu bölümünde iki farklı temas noktası izleme yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen birinci yöntemde, pantograf katener sistemleri için normal ve termal görüntü işleme tabanlı temas noktası izleme yaklaşımı önerilmiştir. Termal kameradan alınan normal ve termal görüntüler kullanılarak pantograf katener sisteminin temas noktasında oluşan sıcaklık değişiminin izlenmesi için görüntü işlemeye dayalı bir yöntem önerilmiştir. Normal ve termal görüntüler üzerinde Canny kenar algılama ve Hough dönüşümleri uygulanmıştır. Bu temel işlemlerin ardından normal görüntüden katener teli, termal görüntüden ise pantograf üst çizgisini temsil eden doğrular oluşturulmuştur. Belirli denklemler kullanılarak elde edilen iki doğrunun kesişim noktası hesaplanmıştır. Kesişen bu iki doğru termal görüntü üzerinde gösterilerek kesişim noktasını içerisinde bulunduran bölgenin histogram grafiğine bakılarak aşırı ısınmalar ve ark oluşumları gözlemlenmektedir. Önerilen yöntem gerçek zamanlı uygulamalar için ideal olup gerçekleştirilmesi düşük maliyetli olmasıyla birlikte kurulumu ve kullanımı oldukça kolaydır.

Önerilen diğer yöntemde, pantograf katener sistemleri için termal görüntü işleme tabanlı temas noktası izleme yaklaşımı önerilmiştir. Termal kameradan alınan termal görüntüler kullanılarak aşırı ısınma ve teknik ark arızalarının izlenmesi için görüntü işlemeye dayalı bir yöntem önerilmiştir. Renkli termal görüntüler kullanılarak görüntü üzerinde renk ayrışımı sonucunda yeni görüntüler elde edilmiştir. Kullanılan görüntünün diğer görüntülerden farkı açıklanarak avantajları verilmiştir. Görüntü üzerinde temas noktası tespit edilmesi daha kolay hale getirilmiştir. Böylelikle temas noktasının tespiti daha hızlı ve daha kesin hale getirilmiştir. Görüntüde temas noktasını içerisinde bulunduran kesit alanları alınarak bu kesit alanlarındaki ani sıcaklık değişimi ve ark oluşumları tespit edilmiştir. Bu tespit etme işlemi kesit alanındaki piksellerin değerlerinin aniden değişmesiyle elde edilmiştir. Görüntülerden alınan kesit alanlarının histogramı oluşturularak aşırı ısınma ve ark oluşumu tespit edilmiştir.

5. TEMASSIZ ARK TESPİT YÖNTEMİ

Bu bölümde, raylı sistemlerin bir parçası olan pantograf katener sistemlerde ark tespiti için görüntü işleme tabanlı yeni bir yöntem önerilmektedir. İki farklı lokomotifin çatısına kamera yerleştirilerek pantograf katener sisteminin gerçek zamanlı görüntüsü alınmıştır. Alınan görüntülerde oluşan arkların tespiti için Otsu eşikleme algoritması kullanılmıştır. Ayrıca pantograf temas bölgesinin tespit edilmesi için Sobel kenar çıkarım algoritması kullanılmıştır. Elde edilen özellikler birleştirilerek pantograf temas bölgesinde oluşan arkların tespiti yapılmaktadır. Önerilen yöntem MATLAB ve FPGA ortamında gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1. Giriş

Günümüzde yaygın olarak kullanılan iki farklı türde arıza teşhis yöntemleri bulunmaktadır. Akım gerilim tabanlı arıza teşhis yöntemlerinde pantograf katener sisteminden lokomotifte aktarılan elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerleri kullanılarak arıza teşhisi yapılmaktadır [72-74]. Ayrıca lokomotifin üzerine yerleştirilen ‘phototube’ sensör ile sistemde oluşan ark tespit edilmektedir [75]. Ayrıca maliyeti düşük ve kurulumu kolay bir sistem olan görüntü işleme tabanlı arıza teşhis yöntemleri tercih edilmektedir. Lokomotifin üzerine yerleştirilen kamera ile temas bölgesinin görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntüler kullanılarak görüntü işleme yöntemleri ile arıza teşhisi yapılmaktadır [75-78].

Bu çalışmada, pantograf katener sistemlerde oluşan ark arızalarının tespiti için görüntü işleme tabanlı yeni bir yöntem önerilmektedir. Yöntem iki farklı algoritmayı kullanarak iki farklı özellik çıkarımı yapmaktadır. İlk olarak ark tespiti için segmentasyon tabanlı bir yöntem olan otsu eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak, görüntü için en iyi üç tane eşik değeri belirlenir. Belirlenen eşik değerlerine göre görüntü dört farklı renk grubuna göre oluşturulur. Bu işlemin ardından ark tespiti yapılmaktadır. Daha sonra görüntü üzerinde kenar çıkarım yöntemi kullanılarak görüntünün kenar bilgisi elde edilmektedir. Kenar bilgisinin ardından pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Elde edilen bu özellikler birleştirilerek temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir.

Önerilen yöntem hem MATLAB ortamında hem de FPGA geliştirme kiti üzerinde gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.2. FPGA

FPGA üzerinde durum izleme ve arıza teşhisi için düşük maliyetli, taşınabilir ve gömülü durum izleme donanımları geliştirilebilir. Bu tür donanımların sağladığı en önemli avantaj yerinde izlemenin gerçekleştirilebilmesidir. Dolayısıyla FPGA kartına takılan kameralar ile bilgisayara ihtiyaç duyulmadan güvenilir ve taşınabilir basit durum izleme ekipmanları geliştirilebilmektedir [79]. Ayrıca FPGA kartlarının yeniden programlanabilme özellikleri sayesinde, farklı arıza durumları veya izlenen sistemin parametrelerine göre tasarım yeniden uyarlanabilmektedir.

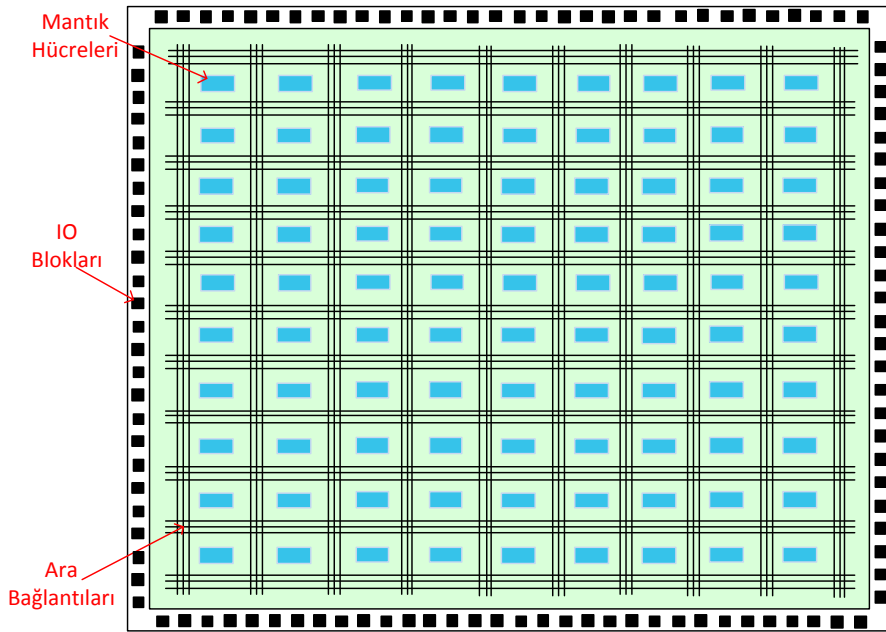
Programlanabilir devrelerin geçmişi, 1970 yıllarında programlanabilir lojik dizilerin üretilmesiyle başlamıştır. Bu devrelerin kullanımı teknolojik nedenlerden dolayı oldukça sınırlıydı. 1980 yıllarında ise hızlı tasarım, yüksek yapılandırılabilme ve değişiklik özelliklerine sahip programlanabilir dizi mantık aygıtları geliştirildi. Özel lojik bloklar dizisine dayalı kapı dizileri tekniğinin gelişimi ile birlikte 1984'te Xilinx firması tarafından ilk sahada programlanabilir kapı dizileri (FPGA) geliştirildi. İlk geliştirilen FPGA tasarımı 85000 transistörden oluşmaktaydı [80]. Aynı dönemde uygulamaya özgü tümleşik devreler özel uygulamalar için tasarlandı. Karmaşık yapıları ve geniş kullanım olanaklarına rağmen, yeniden programlanamama ve pahalı bir teknoloji olmalarından dolayı ASICs devreleri kullanışlı değildi. İlk FPGA'lar CMOS tabanlı olmasına rağmen daha sonra geliştirilenler SRAM tabanlıdır. 2000'li yıllarda FPGA'nın temel lojik blokları olan bakma tabloları (LUT) ve flip-flop'lar oldukça düşük bir maliyet ile gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla milyonlarca kapı elemanı içeren yüksek hızlı FPGA donanımlarının geliştirilmesine başlandı. Günümüzde geliştirilen FPGA kartları gömülü mikroişlemci çekirdekleri, yüksek hızlı giriş/çıkış arabirimleri ve DSP'ye sahiptir. Bu özellikleri sayesinde FPGA kartları robotik, otomotiv endüstrisi, sinyal ve görüntü işleme, uzay araçları ve uçakların gömülü kontrolü için oldukça geniş bir şekilde kullanılmaktadır [81].

5.2.1. FPGA Mimarisi

FPGA geniş bir programlanabilir lojik bileşenler kümesine sahiptir. Bir FPGA donanımı temel olarak yeniden ayarlanabilen lojik bloklar matrisi olarak tanımlanır [82]. Lojik blokların her biri diğerine yeniden programlanabilir bir ara bağlantı ağı ile bağlanmıştır. Genel olarak bir FPGA üç temel birimden oluşmaktadır:

- G/Ç blokları,
- Ara bağlantı blokları,
- Mantık blokları.

Bir FPGA farklı tasarımları oluşturabilecek şekilde bağlanabilen mantık bloklar dizisinden oluşur. Mevcut FPGA kartları transistör çiftleri, temel basit kapılar, çoklayıcılar ve LUT gibi mantık bloklarından biri kullanılarak oluşmaktadır [83]. FPGA kartının yeniden programlanması statik RAM (SRAM), antifuse veya Flash temelli yapılmaktadır. Şekil 5.1’de SRAM tabanlı FPGA’nın genel yapısı gösterilmiştir.

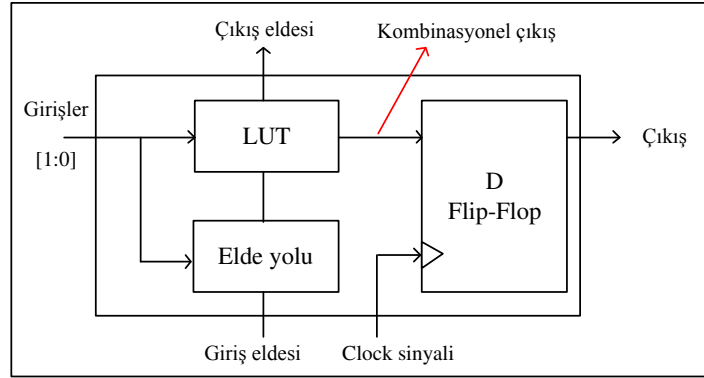


Şekil 5.1. Bir FPGA’nın genel yapısı

Şekil 5.1’de gösterilen giriş/çıkış blokları, mantık blokları ve ara bağlantı blokları bir FPGA kartında bulunan en temel bileşenlerdir. Günümüzde kullanılan FPGA kartları bu bileşenlerin dışında hafıza blokları, fiziksel bağlantılı DSP’ler, saat yönetim blokları ve

iletişim bloklarını içermektedir [82]. FPGA kaynaklarını optimum şekilde kullanabilmek için toplayıcı, çarpıcı ve diğer aritmetik işlemleri içeren fiziksel bağlantılı DSP blokları bulunmaktadır. Aynı amaç için bütünleşik RAM, ROM ve Flash ROM gibi hafıza blokları da bütünleşik olarak bulunmaktadır [84]. Bütünleşik saat yönetim bloğu faz kilitli döngülere dayalı olup saat kaynaklarının yönetimini sağlar. Saat yönetim bloğu, saat frekansını bölme, çarpma, faz kaydırma ve yayılma gecikmesi gibi işlemleri yönetir. FPGA donanımları aynı zamanda USB, PCI, Ethernet gibi protokolleri de desteklemektedir.

FPGA donanımlarını diğer gömülü sistemlerden en önemli özellik programlanabilir ara bağlantılar içerisinde gömülü olarak bulunan küçük programlanabilir lojik bloklardır [85,86]. Lojik blokları oluşturan hücreler lojik hücre (LC) veya lojik eleman (LE) olarak isimlendirilir. Birim hücre mimarisine göre MUX veya LUT tabanlı FPGA'lar üretilmiştir. Karmaşık donanımları tasarlamak amacıyla LUT tabanlı mimari daha uygundur. LUT tabanlı mimaride LUT oluşturmak için esnek hafıza kullanım imkânı veren SRAM kullanılır. İki büyük FPGA üreticisi Xilinx ve Altera LUT tabanlı hücre mimarisini kullanmaktadır. Yapılandırılabilir lojik bloklar (CLBs), lojik elemanlar olarak isimlendirilen iki, dört veya daha fazla lojik hücreden oluşur. Bir lojik hücrenin temel yapısı Şekil 5.2'de verilmiştir.

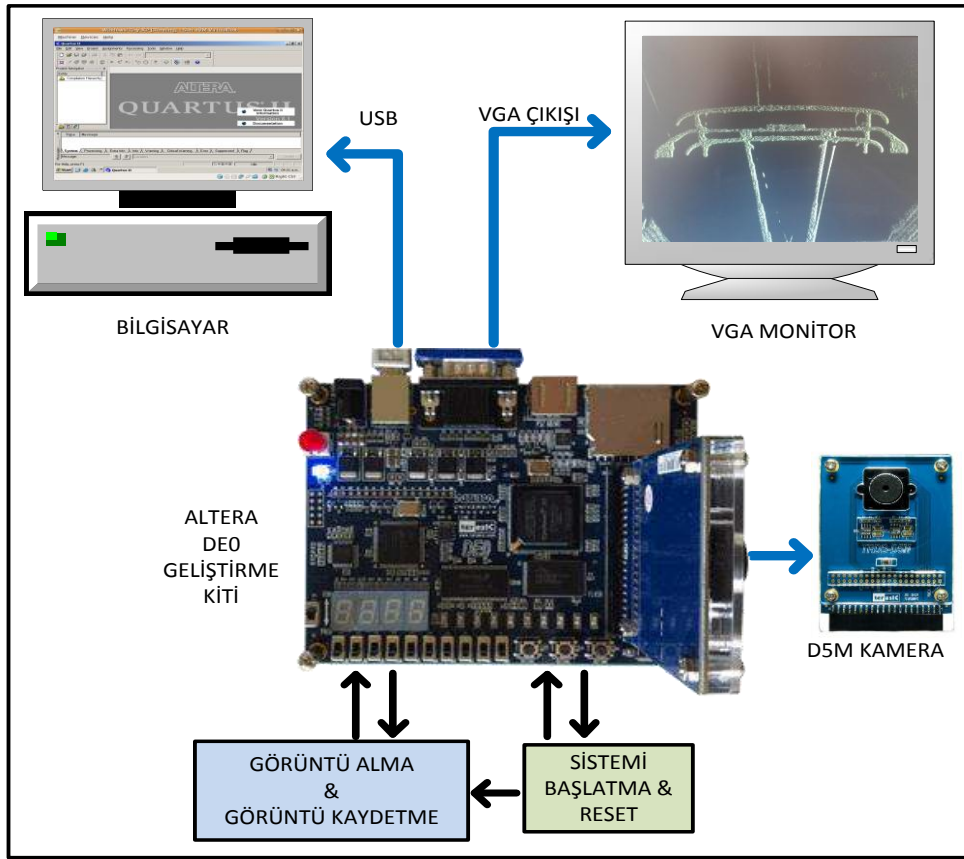


Şekil 5.2. Lojik hücre yapısı

Şekil 5.2'de verilen mantık hücresi iki bitlik bir LUT'a sahiptir. Bu LUT 4X1'lik ROM, RAM veya kombinyasyonel bir fonksiyon olarak ayarlanmaktadır.

5.2.2. FPGA’da Uygulama Geliştirme Aşamaları

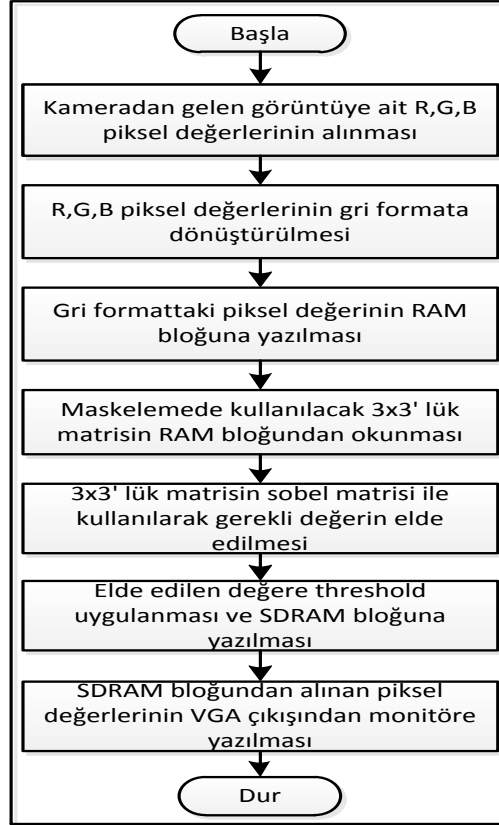
FPGA uygulama geliştirme kartı ve D5M kamera ile birlikte kullanılarak pantograf kaneter sistemi için gerçek zamanlı bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulama “Altera Quartus” programında “Verilog” programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulamanın gerçekleştirilmesi için oluşturulan deneysel düzenek Şekil 5.3’te verilmektedir.



Şekil 5.3. Uygulamanın oluşturulduğu deneysel düzenek

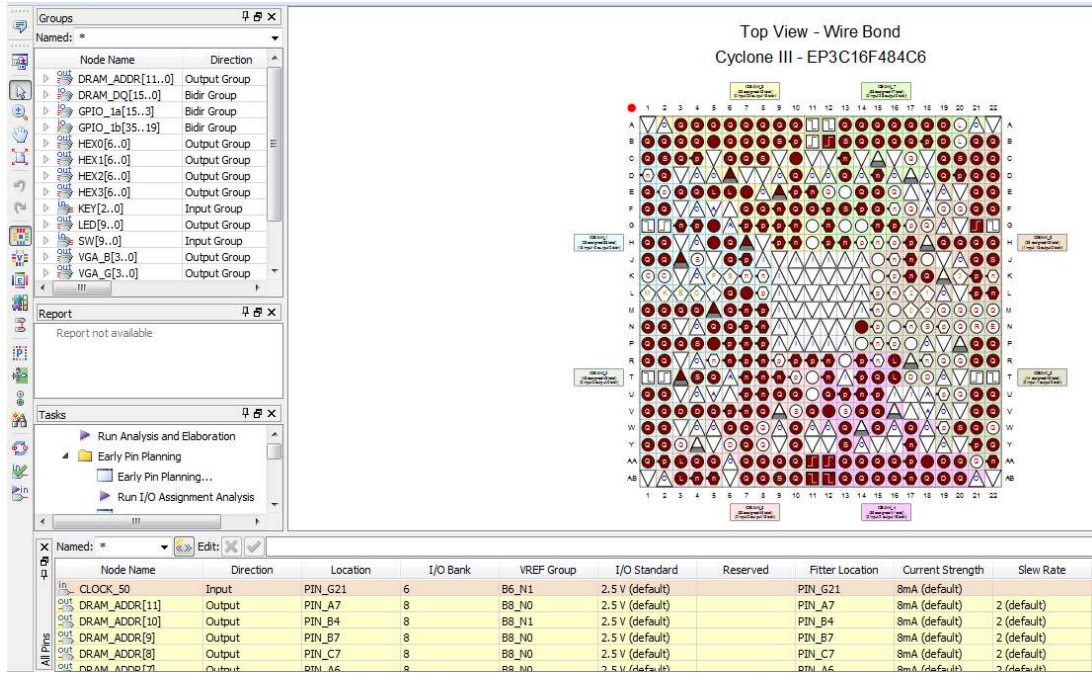
Şekil 5.3’te verilen deneysel düzenekte Altera DEO uygulama geliştirme kartına takılan D5M kamera ile normal görüntü alınarak gerekli işlemlerin ardından istenilen görüntü VGA çıkışına bağlanan monitörde görüntülenmektedir. Bu işlem gerçek zamanlı olarak çalışmaktadır. Gerçek zamanlı çalışan bu uygulamaya görüntünün kalitesini arttırmak ve bazı görüntülerin daha detaylı incelenebilmesi amacıyla kontrol girişleriyle uygulama kontrol edilebilmektedir. Normal görüntü öncelikle gri formata dönüştürülerek görüntü işlemeye uygun hale getirilmiştir. Daha sonra gri görüntünün matrislerine Sobel kenar

algılama yöntemi ve eşikleme işlemi uygulandıktan sonra kenar çıkarımı elde edilmektedir. Kenar çıkarımı yapılan görüntü monitörde görüntülenmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için örnek bir algoritma oluşturulmuştur. Kullanılan örnek algoritmanın genel akış şeması Şekil 5.4'te verilmektedir.



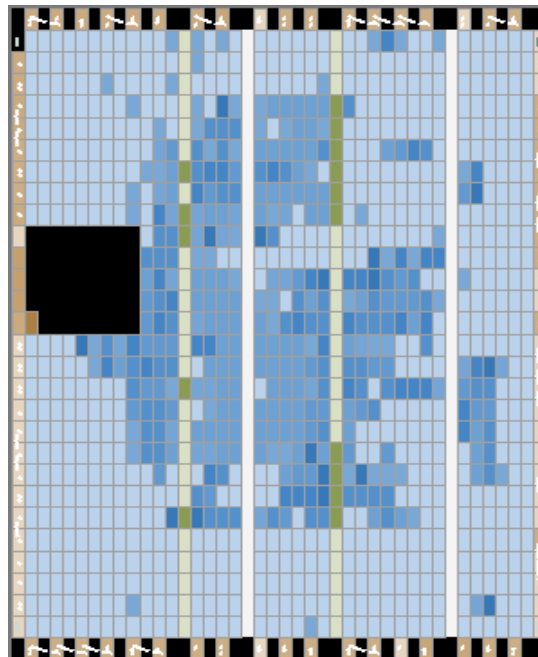
Şekil 5.4. Geliştirilen örnek uygulamanın genel akış şeması

Şekil 5.4'te verilen örnek algoritma “Quartus” programında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen algoritmanın kart üzerinde çalışabilmesi için kartın giriş çıkışlarının işlemcinin hangi pinlerine bağlanması gerektiği belirlenmelidir. Pin atama işlemi sırasında “Quartus” programından alınan görüntü Şekil 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.5. Pin atama işlemi

Pin atama işleminin ardından uygulama derlendikten sonra chip üzerine yerleştirilir. Uygulamanın chip üzerine yerleştirilmiş hali Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.6. Uygulamanın chip üzerine yerleştirilmiş hali

Giriş/çıkış ve programların hücre yerleşimi derleme işlemine en uygun şekilde yapılmaktadır. Yerleşimin istenilen şekilde değiştirilmesi ve verimin belirli ölçüde artırılması mümkündür. Yonga üzerinde yaklaşılarak şekil daha ayrıntılı görülebilir.

Uygulama karta yüklendikten sonra, gerekli bağlantılar yapılmış ve çalıştırılmıştır. Uygulamada kullanılan pantograf katener sistemi görüntüsü Şekil 5.7’de verilmektedir.

Şekil 5.7’de verilen normal görüntü kullanılarak kenar çıkarımı yapılmaktadır. Elde edilen görüntü Şekil 5.8’de verilmiştir.

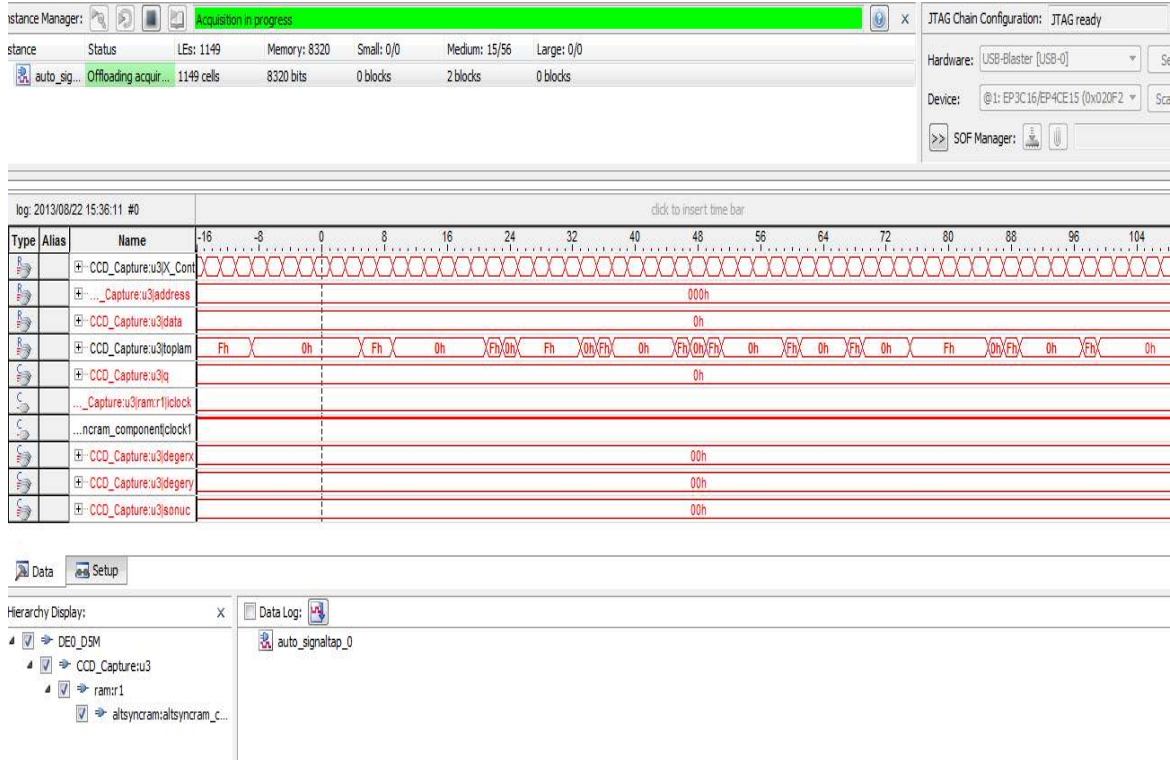
Şekil 5.8’de verilen görüntüde pantograf katener sistemine ait bütün kenarlar elde edilmiştir. Sistemin gerçek zamanlı çalışırken uygulamada kullanılan giriş çıkışların ve değişkenlerin izlenebilmesi için “Quartus” programının “Signal Tab II Logic Analyzer” arayüz aracı kullanılmaktadır. Örnek olarak görüntüdeki her bir pikselin threshold sonucunu gösteren değişken Şekil 5.9’da incelenmektedir.



Şekil 5.7. Uygulamada kullanılan normal görüntü



Şekil 5.8. Normal görüntünün kenar çıkarımı



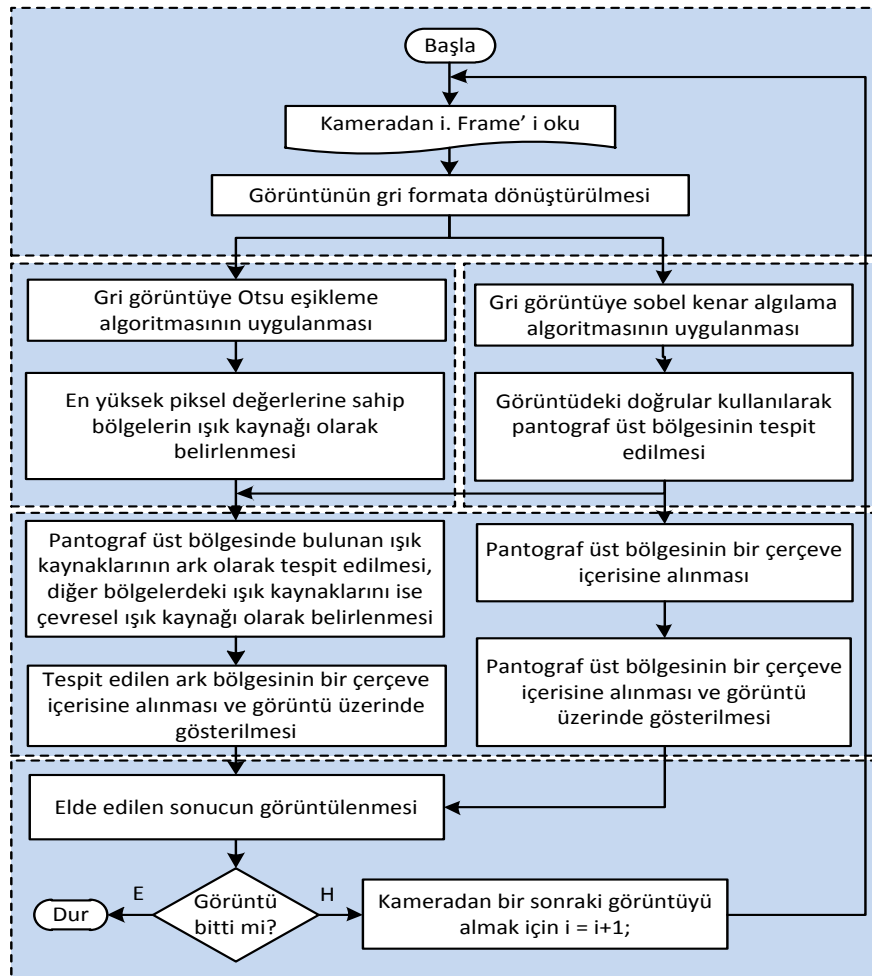
Şekil 5.9. Signal Tab II Logic Analyzer’den değişkenlerin izlenmesi

5.3. Önerilen Yöntem

Bu bölümde önerilen yöntemde Otsu eşikleme algoritması ve Sobel kenar çıkarım algoritması olmak üzere iki farklı algoritma kullanılmıştır. Otsu eşikleme algoritması kullanılarak görüntüde segmentasyon yapılmaktadır. Bu segmentasyon sonucunda görüntüde bulunan ışık bölgeleri tespit edilmektedir. Ayrıca kullanılan Sobel kenar çıkarım algoritması ile görüntüde kenar çıkarımı yapılmaktadır. Kenar çıkarımının ardından elde edilen doğrular kullanılarak görüntü üzerinde pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Pantograf katener sistemin görüntüsü alınırken görüntü alanın içerisinde bulunan farklı ışık kaynaklarının ark olarak tespit edilmemesi için pantograf üst bölgesi de tespit edilmektedir. Kullanılan iki algoritmanın sonucunda elde edilen özellikler birleştirilerek temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Temas bölgesinde tespit edilen bölgeler ark olarak adlandırılırken, temas bölgesi dışında tespit edilen bölgeler ise dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır:

1. **Başlangıç Aşaması:** Bu bölümde kameradan alınan bir frame gerekli hafıza birimlerine kaydedilerek gri renk formatına dönüştürülmektedir.
2. **Özellik Çıkarım Aşaması:** Bu aşama iki bölümden oluşmaktadır.
 - 2.1. **Işık Kaynaklarının Tespiti:** Gri görüntü kullanılarak Otsu yöntemi ile ışık kaynakları tespit edilir.
 - 2.2. **Temas Bölgesinin Tespiti:** Gri görüntü kullanılarak Sobel kenar çıkarım yöntemi ile pantograf üst bölgesi tespit edilir.
3. **Ark Tespiti:** Bir önceki aşamada kullanılan yöntemlerden elde edilen özellikler birleştirilerek ark tespiti yapılır.
4. **Sonuç Aşaması:** Bu aşamada elde edilen sonuçlar görüntülenerek işlem bitmemiş ise kameradan bir sonraki frame almak için gerekli işlemler yapılır.

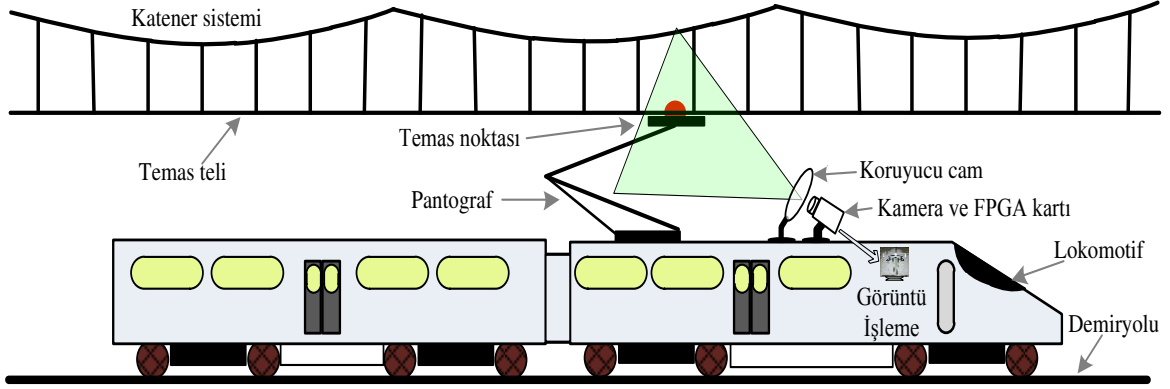
Dört ana bölümden oluşan önerilen yöntemin genel akış şeması Şekil 5.10'da verilmektedir.



Şekil 5.10. Önerilen yöntemin genel akış şeması

5.4. Deneysel Sonuçlar

Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi için lokomotif üzerine bir kamera yerleştirilerek pantograf katener sisteminden görüntüler alınmıştır. Bu çalışmada görüntülerin alınması için kurulan deneysel düzenek Şekil 5.11’de verilmiştir.

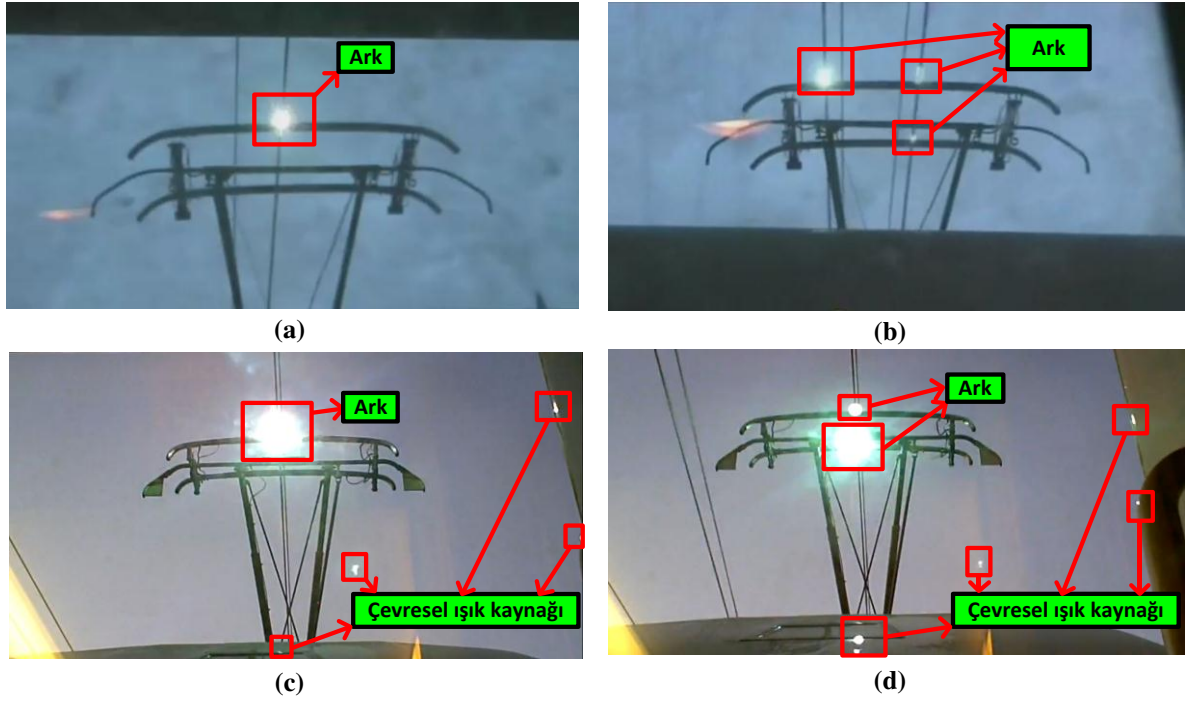


Şekil 5.11. Önerilen yöntemde görüntülerin alınması için kurulan deneysel düzenek

Şekil 5.11’de verilen deneysel düzenek kurularak alınan pantograf görüntüleri önerilen yöntemde kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

5.4.1. Temassız Ark Tespiti Yönteminin MATLAB’da Gerçekleştirilmesi

Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi için farklı türden pantograf görüntüleri kullanılmıştır. Ayrıca bir veya birden fazla ark oluşumu olan pantograf görüntüleri kullanılarak ark tespiti yapılmıştır. Ark oluşumu sırasında çevredeki farklı ışık kaynaklarının veya ark oluşumu sırasında ortaya çıkan ışığın yansıması sonucunda görüntüde farklı bölgelerde ışıklar oluşmaktadır. Bütün durumlarda önerilen yöntemin doğru bir şekilde çalışarak ark tespiti yapabilmesi için Şekil 5.12’de verilen dört farklı durumda bulunan pantograf görüntüleri kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Önerilen yöntemde kullanılan görüntüler (a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü (b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü (c) Bir yerde oluşan ark görüntüsü ve farklı bölgelerde oluşan çevresel ışıklar (d) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü ve farklı bölgelerde oluşan çevresel ışıklar

Şekil 5.12’de verilen farklı türde pantograf görüntüleri kullanılarak önerilen yöntemde kullanılacak eşik değerleri belirlenmektedir. Otsu eşikleme yönteminde kullanılan bu eşik değerlerin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle en iyi eşik değerinin kullanılması görüntü eşiklemede daha iyi sonucu almamızı sağlar. Önerilen yöntemde kullanılan eşik değerlerinin belirlenmesi için kullanılan bu kod parçasığının zaman karmaşıklığı kullanılan eşik sayısı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle kullanılan algoritmada eşik sayısı arttıkça yapılan işlemin süresi artmaktadır. Bir görüntü farklı çözünürlükte kullanılarak en iyi eşik değerinin elde edilmesi için geçen zaman Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1’de görüldüğü gibi bir görüntüde en iyi eşik değerlerinin elde edilmesi için geçen zaman oldukça fazladır. Önerilen yöntemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için eşik değerlerinin önceden elde edilmesi gerekmektedir.

Tablo 5.1. Farklı boyutlardaki görüntülerden en iyi eşik değerlerinin hesaplanması için geçen zaman

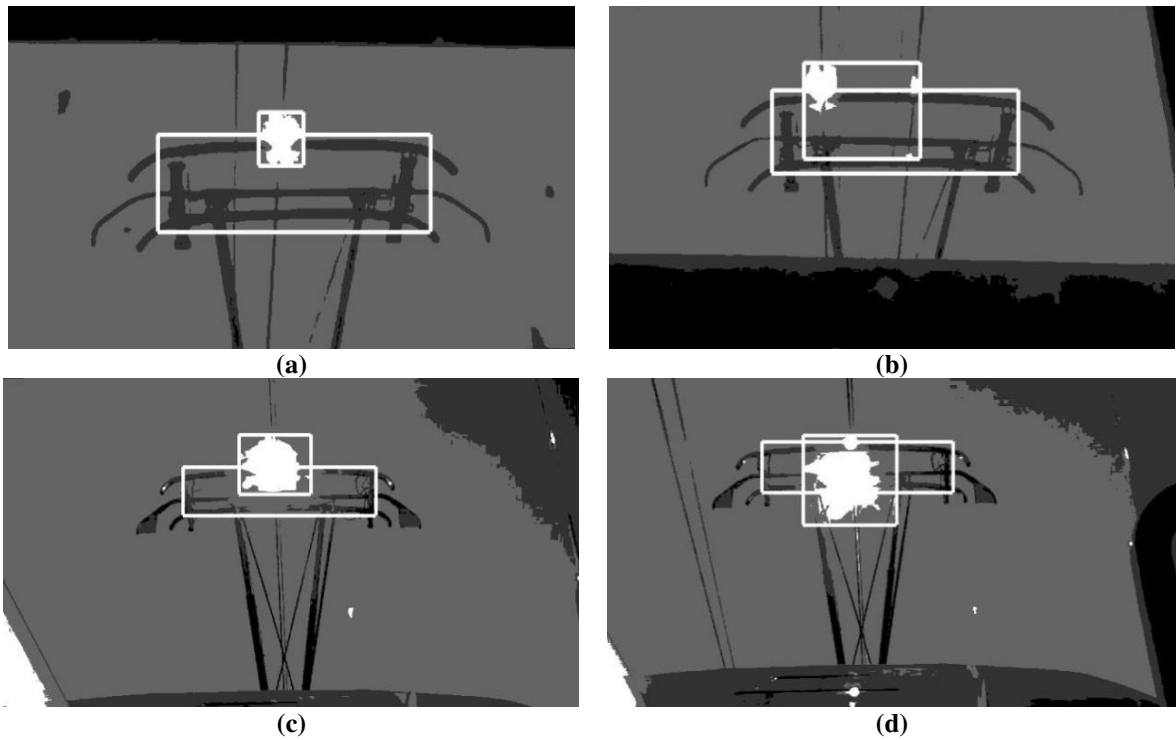
Görüntü Boyutu (piksel)	Ortalama (ms)	Standart Sapma (ms)
1280x720	44996	3193
640x480	16979	72
320x240	7917	32

Bu çalışmada kullanılan görüntülerin eşik değerlerinin belirlenmesi için sistemin çalışması sırasında elde edilen bir videodan 100 frame kullanılarak her bir frame için en iyi eşik değerleri hesaplanmıştır. Videodan alınan 100 frameden elde edilen eşik değerleri Tablo 5.2’de verilmektedir.

Tablo 5.2. Videodan alınan 100 frameden elde edilen eşik değerleri

Video Türü (100 Frame)	Ortalama	Standart Sapma
T1 (Threshold 1)	51,4	6,5
T2 (Threshold 2)	110,7	7,5
T3 (Threshold 3)	153,7	8,8

Bu çalışmada ilk aşamada hesaplanan en iyi eşik değerlerinin ortalaması bütün sistem için kullanılmaktadır. Böylece önerilen yöntem hızlı bir şekilde çalışarak gerçek zamanlı çalışması uygun hale getirilmiştir. Önerilen yöntem hem MATLAB hem de FPGA ortamında uygulanarak iki farklı ortamda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

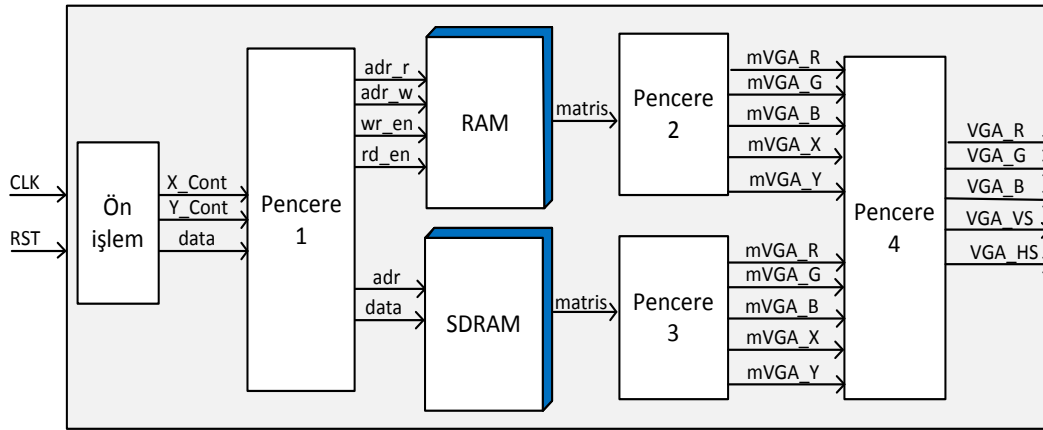


Şekil 5.13. Örnek bir pantograf katener görüntüsünde MATLAB ile elde edilen sonuçlar (a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü (b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü (c) Farklı bir görüntüde bir yerde oluşan ark görüntüsü, (d) Farklı bir görüntüde birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü

Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi için iki farklı pantograf türüne ait örnek görüntüler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.12’de verilen pantograf temas bölgesinde bir veya birden fazla yerde ark oluşmuş görüntüler kullanılmıştır. Bu iki yöntem sonucunda elde edilen özellikler birleştirilerek temas bölgesinde oluşan ark oluşumları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Otsu yöntemi sonucunda elde edilen görüntü ile birleştirilerek Şekil 5.13’te verilmiştir.

5.4.2. Temassız Ark Tespiti Yönteminin FPGA’da Gerçekleştirilmesi

Önerilen yöntem FPGA geliştirme kartı üzerinde uygulanarak sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemin blok şeması Şekil 5.14’te verilmektedir.

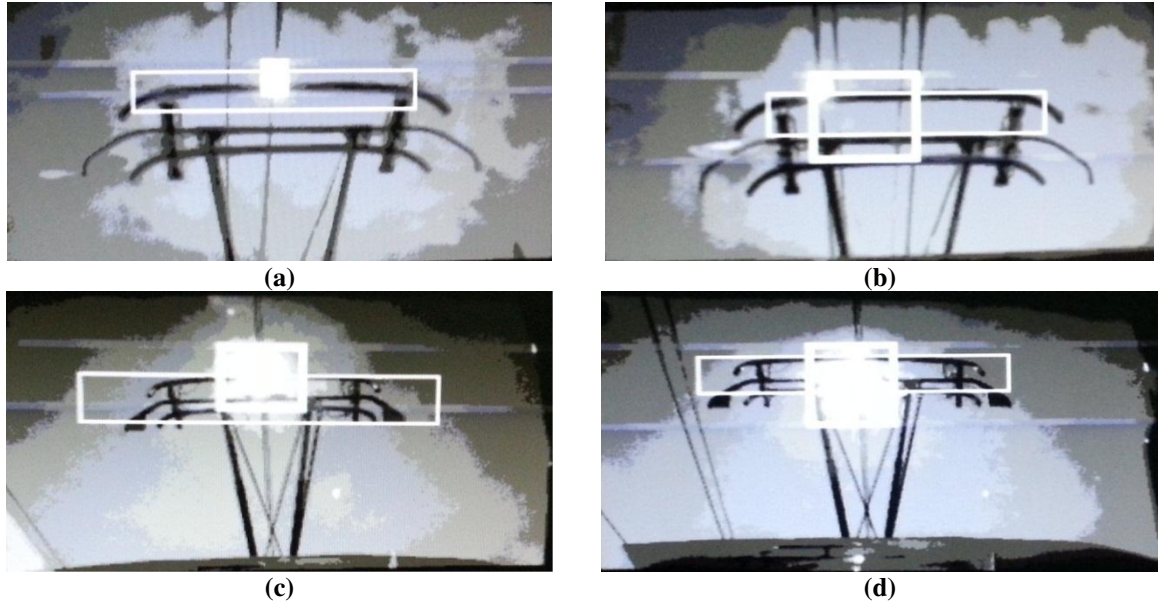


Şekil 5.14. Önerilen yöntemin blok şeması

Şekil 5.14’te verilen önerilen yöntemin blok şemasında bulunan blokların tümü birbiriyle bağlantılı bir şekilde çalışmaktadır. Ön İşlem bloğu, kameradan gelen görüntü verilerinin bir görüntü matrisi şeklinde dönüştürülmesini sağlamaktadır. Pencere 1 bloğuna gelen görüntünün matris değerleri RAM ve SDRAM hafıza bloklarına kaydedilecek formata dönüştürülmektedir. RAM bloğundan Pencere 2 bloğuna gelen veriler üzerinde önerilen yöntemin bir özellik çıkarımı adımı gerçekleştirilerek pantograf üst çubuğu tespiti yapılmaktadır. SDRAM bloğundan Pencere 3 bloğuna gelen veriler üzerinde önerilen yöntemin bir diğer özellik çıkarımı adımı gerçekleştirilerek pantograf temas noktasında oluşan arklar tespit edilmektedir. Daha sonra Pencere 2 ve Pencere 3 bloklarında elde edilen

sonuçlar Pencere 4 bloğunda birleştirilerek FPGA kartının VGA çıkışından monitöre aktarılmaktadır.

Şekil 5.12’de verilen pantograf temas bölgesinde bir veya birden fazla yerde ark oluşmuş görüntüler kullanılmıştır. Bu görüntüler FPGA geliştirme kitinde uygulanarak sonuçlar alınmıştır. Şekil 5.12’de verilen görüntüler kullanılarak Şekil 5.15’te verilen sonuçlar elde edilmiştir.



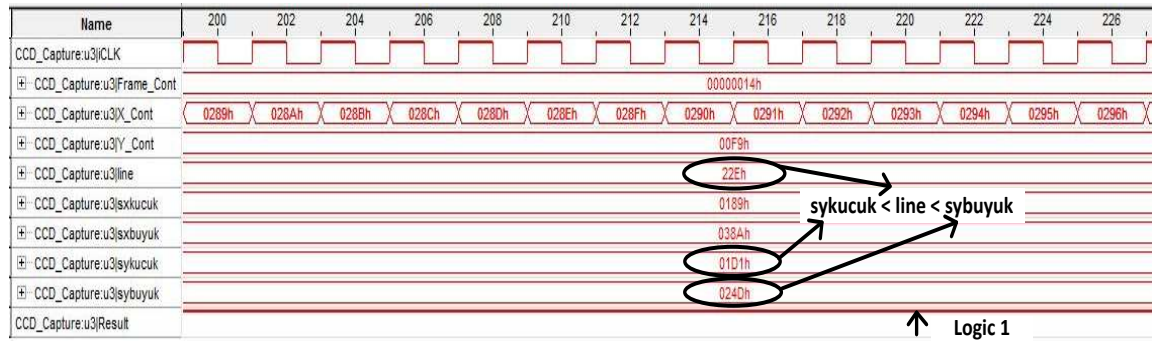
Şekil 5.15. Örnek bir pantograf katener görüntüsünde FPGA ile elde edilen sonuçlar (a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü (b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü (c) Farklı bir görüntüde bir yerde oluşan ark görüntüsü, (d) Farklı bir görüntüde birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü

Şekil 5.15’de elde edilen sonuçlarda, pantograf temas bölgesi tespit edilerek oluşan arklar tespit edilmiştir. Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi sırasında ark oluşan bölgenin tespit edilebilmesi için temas bölgesinde olması gerekmektedir. Bir görüntüde oluşan arkin tespit edilmesi için kullanılan kod parçasığı Şekil 5.16’da verilmiştir.

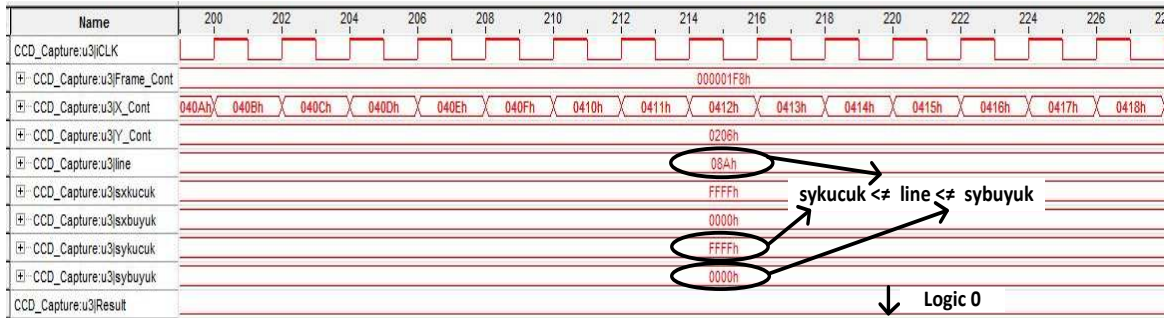
```
always@(posedge iCLK)
begin
  if(sybuyuk>=line && sykucuk<=line)
    Result <=1;
  else
    begin
      Result <=0;
    end
end
end
```

Şekil 5.16. ‘Result’ sinyalinin elde edilmesi için kullanılan Verilog kod parçası

Şekil 5.16'daki kod parçasında da verildiği gibi, eğer pantograf üst bölgesinin merkezinin düşey eksenindeki konumu, ark bölgesinin düşey sınırları içerisinde ise ark tespit edilmektedir. Şekil 5.17(a)'da verilen şartlar sağladığı için 'Result' değeri Lojik 1 olmuştur. Yani ark tespitinin yapıldığını göstermektedir. Şekil 5.17(b)'de ise ark oluşmamış bir normal pantograf görüntüsünden alınan sinyaller verilmiştir. Burada ark oluşmadığı için gerekli şartlar sağlanmadığından dolayı 'Result' değeri Lojik 0 olmuştur.



(a)



(b)

Şekil 5.17. Önerilen yöntemin FPGA'da gerçekleştirilmesi sırasında elde edilen sinyaller (a) Ark oluşumun tespit edilmesi sırasında alınan sinyal (b) Ark oluşumu olmayan bir görüntü sırasında alınan sinyal

Şekil 5.17'de görüldüğü gibi birçok sinyal incelenmiştir. 'iCLK' sinyali önerilen yöntemde kullanılan 50Mhz osilatörü, 'Frame_Count' sinyali kameradan alınan frame sayısını, 'X_Count' ve 'Y_Count' sinyalleri alınan pikselin konumunu, 'line' sinyali pantograf üst bölgesinin merkezinin düşey eksenindeki konumunu, 'sxkucuk', 'sxbuyuk', 'sykucuk' ve 'sybuyuk' sinyalleri ark bölgesinin yatay ve düşey eksenindeki minimum ve maksimum değerlerini, 'Result' sinyali ise pantograf bölgesinde oluşan arkların tespit edilmesini temsil etmektedir.

Bu çalışmada önerilen yöntemin FPGA geliştirme kartında gerçekleştirilmesi sonucunda geliştirmede kullanılan gerekli kaynaklar Tablo 5.3'te verilmiştir.

Önerilen yöntemin MATLAB ve FPGA ortamında uygulanması sonucunda ark tespiti başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemde kullanılan her bir görüntü üzerinde gerçekleştirilmesi için geçen zaman, hem MATLAB hem de FPGA ortamında ölçülerek Tablo 5.4'te verilmiştir. Tablo 5.4'te MATLAB' da her bir görüntü boyutu için uygulama 10 defa çalıştırılmıştır. FPGA ortamında ise tek bir görüntü boyutu için sistem çalıştırılarak geçen süre hesaplanmıştır.

Önerilen yöntemin uygulaması "Intel Core 2 Duo T6600 ve 2.2GHz" özelliklerine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.4'te verilen önerilen yöntemin performans tablosundaki değerler, literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Literatürde ki çalışmada "Intel Pentium 4 ve 2.4 MHz" özelliklerine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir [27]. Literatürde yapılan çalışmanın her bir durum için zaman analizi Tablo 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Önerilen yöntemin tasarımı için gerekli kaynaklar

Name	Logic elements required
Logic elements	5.537 / 15.408 (% 36)
Combinational function	4.959 / 15.408 (% 32)
Dedicated logic registers	1.830 / 15.408 (% 12)
Total memory bits	78.800 / 516.096 (% 18)
Enabled multipliers	0 / 112 (% 0)

Tablo 5.4. Önerilen yöntemin farklı boyutlardaki görüntüler için zaman analizi

Uygulama	Görüntü Boyutu (piksel)	Ortalama (ms)	Standart Sapma (ms)
MATLAB	1280x720	32,532	0,537
	640x480	12,405	0,125
	320x240	4,333	0,082
FPGA	1280x1024	26,214	-

Tablo 5.5. Literatürde yapılan çalışmanın zaman analizi

Uygulama	Ortalama (ms)	Standart Sapma (ms)
Bir alanın başarılı işlenmesi	13,9	5,17
Bir alanın başarısız işlenmesi	43,6	14,86
Her bir dikey parçanın işlenmesi	3,8	0,84

Tablo 5.5’te literatürde yapılan çalışmanın bir çok farklı durumlardaki zaman analizi verilmiştir. Literatürde yapılan çalışma ile önerilen yöntem karşılaştırıldığında, literatürde başarısız işleme sırasında geçen zaman önerilen yöntemin bütün durumlarından fazladır. Ayrıca önerilen yöntemde her bir görüntü boyutu için zaman analizi sonuçları verilmişken literatürde kullanılan görüntünün boyutları belirli değildir. Önerilen yöntemde küçük boyutlarda görüntü kullanılması durumunda literatürde yapılan çalışmalardan daha hızlı bir sonuç vermektedir.

5.5. Bölüm Değerlendirmesi

Tezin bu bölümünde, pantograf katener sistemlerinde temas bölgesinde oluşan arkların tespit edilmesi için yeni bir yöntem sunulmuştur. Önerilen bu yöntemde farklı görüntüler kullanılarak MATLAB ve FPGA ortamında sonuçlar elde edilmiştir. Farklı tür pantograf görüntüleri kullanılarak bu görüntülerde Otsu ve Sobel algoritmaları uygulanmıştır. Kullanılan algoritmalar sonucunda elde edilen sonuçlar birleştirilerek temas bölgesinde oluşan ark arızaları tespit edilmiştir. Önerilen yöntemde bir veya birden fazla bölgede ark oluşan görüntüler kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Son yıllarda elektrikli trenlerin gelişmesiyle birlikte pantograf katener sistemleri üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Pantograf katener sistemler elektrikli trenler için önemli bir bileşen olduğu için, bu sistemlerde oluşan arızaların tespit edilmesi de oldukça önemlidir. Pantograf katener sistemlerinde oluşan arızaların tespit edilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Genel olarak akım ve gerilim tabanlı ya da görüntü işleme tabanlı arıza tespit yöntemleri sunulmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem, geliştirilen diğer yöntemlere göre görüntü işleme tabanlı çalışması yönünden avantajlı bir yöntemdir. Görüntü işleme yaparken aynı anda iki farklı yöntem kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntemin, hem MATLAB hem de FPGA ortamında gerçekleştirilmiş olması bu yöntemin gerçek zamanlı ve farklı sistemlerde kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında demiryolu ulaşımında önemli bir yeri olan elektrikli trenlerden bahsedilerek pantograf-katener sistemi incelenmiştir. Pantograf-katener sisteminin çalışma prensibinden bahsedilerek oluşabilecek arıza türleri ve bu arızaların oluşma nedenleri açıklanmıştır. Raylı sistemlerin kritik bir bileşeni olan pantograf-katener sistemi için erken teşhisin ne kadar önemli olduğu vurgulanarak, durum izleme ve arıza teşhisi için ne tür yöntemlerin kullanıldığı verilmiştir.

Günümüzde, pantograf-katener sisteminde oluşan arızaların tespit edilebilmesi için mevcut çalışmalar incelenmiştir. Mevcut çalışmalarda bulunan eksiklikler dikkate alınarak görüntü işleme tabanlı temassız durum izleme yöntemleri geliştirilmiştir. Literatürde verilen çalışmalar incelendiğinde, görüntü işleme tabanlı durum izleme yöntemlerinde normal ve termal pantograf-katener görüntüleri kullanıldığı görülmektedir. Tez kapsamında da normal ve termal görüntüler kullanılarak iki görüntü türü için de durum izleme yöntemleri geliştirilmiştir. Görüntü özellikleri, görüntü sınıflandırma, kenar çıkarım yöntemleri, Hough dönüşümü ve Otsu metodu gibi yöntemler açıklanmıştır. Temassız durum izleme yöntemlerinin geliştirilmesinde görüntü işleme yöntemlerinin kullanılması incelenmiştir. Ayrıca termal görüntü sistemleri hakkında bilgi verilerek, pantograf-katener sistemleri için termal görüntülerin önemi anlatılmıştır.

Öncelikle pantograf sisteminin normal görüntüleri kullanılarak bulanık mantık tabanlı model ve ark tespiti yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bulanık sistemin sonucunda pantograf üst ve yan doğruları elde edilerek pantograf modeli belirlenmektedir. Belirlenen modelin hangi türe ait olduğu tespit edildikten sonra durum izleme ve arıza teşhisi yapılmıştır. Tespit edilen pantograf üst doğrusu dikkate alınarak temas bölgesinde oluşan arızaların tespiti için bir yöntem geliştirilmiştir.

Termal ve normal görüntüler kullanılarak pantograf-katener sisteminde görme tabanlı temas bölgesi izlenmiştir. Pantograf sisteminden aynı anda alınan pantograf normal ve termal görüntüleri kullanılarak pantograf temas noktası tespit edilmektedir. Bu temas noktasını kapsayan küçük bir kesit alanı alınarak bu alan içerisinde oluşan durumlar incelenmiştir. Ayrıca pantograf termal görüntüleri kullanılarak piksellerin yoğunluklarına göre temas bölgesi tespit edilmektedir. Temas bölgesinde oluşan sıcaklık değişimi ve ark oluşumu incelenmiştir.

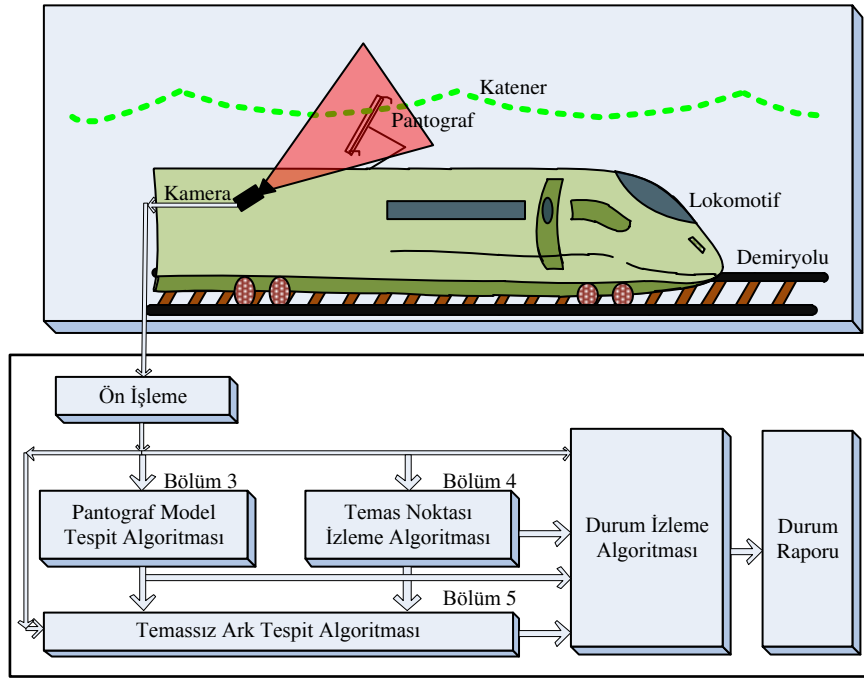
Normal görüntüler kullanılarak temassız ark tespiti yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen temassız ark tespit yöntemleri hem MATLAB’da hem de FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pantograf sisteminin görüntüleri kullanılarak görüntü işleme yöntemleri ile pantograf üst çubuğu tespit edilmektedir. Tespit edilen temas bölgesi etrafında oluşan değişimler incelenerek oluşan arklar tespit edilmektedir.

Sonuç olarak, pantograf-katener sistemleri elektrikli trenlerde kullanılan en önemli bileşenlerden biridir. Elektrikli trenlerin çalışması sırasında pantograf katener sisteminde oluşan arızaların erken teşhis edilmesi önemli bir konudur. Literatürde yapılan birçok çalışmada pantograf katener sistemlerinde oluşan arızaların teşhisi için akım gerilim tabanlı arıza teşhis yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemler oldukça maliyetli ve kurulumu zordur. Ayrıca literatürde verilen diğer çalışmalarda görüntü işleme tabanlı arıza teşhis yöntemleri mevcuttur. Fakat kullanılan normal görüntüler çevre şartlarından ve gürültülerden etkilenmektedir. Bu tez çalışmasında, pantograf katener sistemleri için görüntü işleme tabanlı temassız durum izleme yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca görüntü işleme tabanlı arıza teşhisi için donanımsal çalışan FPGA tabanlı temassız durum izleme teknikleri geliştirilerek algoritmaların bilgisayardan bağımsız çalışabilmeleri sağlanmıştır.

Önerilen yöntemlerin sonuçları değerlendirildiğinde temassız durum izleme ve arıza tespiti için aşağıdaki yenilikler geliştirilmiştir.

- Görüntü işleme ve bulanık mantık tabanlı pantograf geometrik model tespiti ve tespit edilen model yapı kullanılarak temas bölgesinin izlenmesi,
- Pantograf katener sistemin normal ve termal görüntüleri kullanılarak temas noktasındaki sıcaklık değişiminin izlenmesi,
- Termal görüntü kullanarak pantograf katener temas noktasında oluşan aşırı ısınma ve ark oluşumunun tespit edilmesi,
- Görüntü işleme algoritmaları ile temassız olarak ark tespitinin gerçekleştirilmesi,
- Temassız durum izleme ve arıza tespiti algoritmaların donanımsal olarak FPGA ortamında gerçekleştirilmesi,

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen sistem Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Tez çalışması sonucunda elde edilen sistem

Şekil 6.1’de görüldüğü üzere tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntemler birleştirilerek temassız durum izleme sistemi elde edilmiştir. Lokomotifin çatısına yerleştirilen normal veya termal kamera ile alınan pantograf katener sistemin görüntüsü üzerinde önerilen yöntemler uygulanarak durum izleme yapılmıştır. Pantograf katener sistemin görüntüleri ön işleme bloğundan geçtikten sonra önerilen yöntemlerde kullanılmıştır. Pantograf model tespit algoritması ve temas noktası izleme algoritmalarından elde edilen çıkarsamalar sonucunda temassız ark tespiti algoritması geliştirilmiştir. Önerilen bütün algoritmaların sonuçları kullanılarak durum izleme yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar bir durum raporu niteliği taşımıştır.

Bu tez çalışmasında, 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 uygulanabilir. FPGA için geliştirilen görüntü işleme tabanlı temassız durum izleme yöntemleri diğer görüntü işleme uygulamaları için de kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Schöbel, A., Maly, T.,** Operational fault states in railways, Eur. Transp.Res. Rev., 107-113, 2012.
- [2] **Koyama, T.,** Detection of Pantograph Failures Using Sensor Fixed to Catenary System, Railway Technology Avalanche, 246, Dec. 2012.
- [3] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** A New Contactless Fault Diagnosis Approach for Pantograph-Catenary System, 15th IEEE International Conference On Mechatronika, Prague, Czech Republic, 5 – 7, 2012.
- [4] **Aydin, I., Karakose, E., Karakose, M., Gencoglu, M.T., Akin, E.,** A new computer vision approach for active pantograph control, Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 1-5, 2013.
- [5] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** “A Robust Anomaly Detection in Pantograph-Catenary System Based on Mean-Shift Tracking and Foreground Detection,” 2013 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern., 4444–4449, 2013.
- [6] **Agdogan, D., Babacan, V. K., Eskil, M. T.,** Real-time defect detection in power conduction devices for rail transportation, 22. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014), Trabzon, Türkiye, 782-785, 2014.
- [7] **Östlund S., Gustafsson A., Buhrkall L., Skoglund M.,** Condition Monitoring of Pantograph Contact Strip, , 4th IET IEEE International Conference on Railway Condition Monitoring, Derby, England, 1 – 6, 2008.
- [8] **Matvejevs A., Matvejevs A.,** Pantograph-Catenary System Modeling Using Matlab-Simulink Algorithms, Scientific Journal of Riga Technical University Computer Science Information Technology and Management Science, 38-44, 2010.
- [9] **Abdullah M.A., Michitsuji Y., Nagai M., Miyajima N.,** Integrated Simulation Between Flexible Body of Catenary and Active Control Pantograph for Contact Force Variation Control, Journal of Mechanical Systems, 166-77, 2010.
- [10] **Kia S.H., Bartolini F., Mpanda-Mabwe A., Ceschi R.,** Pantograph-Catenary Interaction Model Comparison, 36th Annual Conference On IEEE Industrial Electronics Society, Glendale-AZ, 1584-1589, 2010.
- [11] **Luna Vázquez C.A.L., Quintas M.M., Romera M.M.,** Non-Contact Sensor for Monitoring Catenary Pantograph Interaction, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari-Italy, 482-487, 2010.

- [12] **Ocoleanu C.F, Popa I., Manolea G., Dolan A.I., Vlase S.,** Temperature Investigation in Contact Pantograph - AC Contact Line, *International Journal Of Circuits, Systems and Signal Processing*, 154-163, 2009.
- [13] **Facchinetti A., Bruni S.,** Hardware-in-the-loop hybrid simulation of pantograph–catenary interaction, *Journal of Soundand Vibration*, 2783-2797, 2012.
- [14] **Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., Thottappillil, R.,** Pantograph Arcing in Electrified Railways—Mechanism and Influence of Various Parameters—Part I: With DC Traction Power Supply, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1931- 1939, 2009.
- [15] **Liu, Y., Chang, G. W., Huang, H. M.,** Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 2025–2027, 2010.
- [16] **Mokrani, N., Rachid, A.,** A robust control of contact force of pantograph-catenary for the high-speed train, *European Control Conference (ECC)*, pp. 4568-4573, 2013.
- [17] **Collina A., Bruni S.,** Numerical Simulation of Pantograph-Overhead Equipment Interaction, *Vehicle System Dynamics*, 38, 4, 261-91, (2002).
- [18] **Zhang W.H. , Mei G.M., Wu X.J., Chen L.Q.,** A Study on Dynamic Behavior of Pantographs By Using Hybrid Simulation Method, *J. Rail and Rapid Transit*, 219, 189-199, (2005).
- [19] **Barmada, B., Raugi, M., Tucci, M., Romano, F.,** Arc detection in pantograph-catenary systems by the use of support vector machines-based classification, *Institution of Engineering and Technology*, 1 – 8, 2013.
- [20] **Bahrani, B., Rufer, A., Aeberhard, M.,** Railway catenary parameters identification based on harmonic current injection, *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, 1 – 10, 2011.
- [21] **Zhonghua, C., Lichuan, H., Tiejun, W., Fengyi, G.,** Modeling Study of the Amount of Wear in Sliding Electric Contact, *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, 146 – 150, 2012.
- [22] **Kuo, M., Lo, W.,** Magnetic components used in the train pantograph to reduce the arcing phenomena, *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1 – 8, 2013.
- [23] **Li M., Ze-yong W., Xiao-rong G., Li W., Kai Y.,**” Edge Detection on Pantograph Slide Image” *International Congress on Image and Signal Processing*, s: 1 – 3, 2009.

- [24] **Xiao-heng Z., Xiao-rong G., Ze-yong W., Li W., Kai Y.**, “Study on the Edge Detection and Extraction Algorithm in the Pantograph slipper's Abrasion” International Conference on Computational and Information Sciences, s: 474 – 477, 2010.
- [25] **ODonnell, C., Palacin, R., Rosinski, J.**, Pantograph Damage and Wear Monitoring System, IEEE Conference on Railway Condition Monitoring, London, England, pp. 178 - 181, 2006.
- [26] **Hamey, L. G. C., Watkins, T., Yen, S. W. T.**, Pancam: In-Service Inspection of Locomotive Pantographs, *9th Bienn. Conf. Aust. Pattern Recognit. Soc. on Digit. Image Comput. Tech. and Appl. (DICTA 2007)*, pp. 493–499, Dec. 2007.
- [27] **Boguslavskii A. A., Sokolov S. M.**, “Detecting Objects in Images in Real-Time Computer Vision Systems Using Structured Geometric Models”, Pleiades Publishing, Vol. 32, 2006, 177-187.
- [28] **Sacchi, M., Cagnoni, S., Spagnolettix, D., Ascariz, L. Zunino, G. Piazzzi, A.**, PAVISYS A computer vision system for the inspection of locomotive pantographs, *Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control*, 2011.
- [29] **Bocciolone, M., Bucca, G., Collina, A., Comolli, L.**, Pantograph–catenary monitoring by means of fibre Bragg grating sensors: Results from tests in an underground line, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 41, pp. 226-238, 2013.
- [30] **Landi, A., Menconi, L., Sani, L.**, Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 220, no. 4, pp. 435–447, Jan. 2006.
- [31] **Bucca G., Collina A.**, A Procedure for The Wear Prediction of Collector Strip and Contact Wire in Pantograph–Catenary System, *Wear Journal*, 266, 46–59, (2009).
- [32] **Pisano, A., Usai, E.**, Contact Force Regulation in Wire-Actuated Pantographs Via Variable Structure Control, 46th IEEE Conference On Decision And Control, LA, USA, Dec. 12-14, pp. 1986-1992, 2007.
- [33] **Midya, S.**, Conducted and Radiated Electromagnetic Interference in Modern Electric Railways with Emphasis on Pantograph Arcing, PhD Thesis, Kungliga Tekniska Höghskolan, Stockholm, Sweeden, 2009.
- [34] **Yaxing, Y., Xuemei, Y., Zhongke, L., Kaiduan, Y.**, Non-contact measurement of contact wire, International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Applications, 2008.

- [35] **Jie, Y., Mingli, W.**, Development of a Detection System for the Catenary Vibration Monitoring, International Conference of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences, pp. 76-79, 2011.
- [36] **Schroder, K., Ecke, W., Kautz, M., Willett, S., Jenzer, M., Bosselmann, T.**, An approach to continuous on-site monitoring of contact forces in current collectors by a fiber optic sensing system, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 51, No. 2, pp. 172-179, 2013.
- [37] **Pombo, J., Ambrosio, J.**, Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains, Computers and Structures, Vol.110–111, pp. 32–42, November 2012.
- [38] **Facchinetti, A., Gasparetto, L., Bruni, S.**, Real-time catenary models for the hardware-in-the-loop simulation of the pantograph–catenary interaction, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2012.
- [39] **Bobillot, A., Delcourt, V., Damanche, P., Massat, J. P.**, Pantograph-Catenary: three paths to knowledge, 7th congress on Railway Research, 4-8 June, Montreal, Canada, 2006.
- [40] **Yaman, O., Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.**, Pantograf Katener Sistemlerde FPGA Tabanlı Temassız Durum İzleme ve Ark Tespiti, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Türkiye (Hakem değerlendirmesinde).
- [41] **Yaman, O., Karakose, M., Aydin, I., Akin, E.**, Real-Time Monitoring of Pantograph-Catenary System Using FPGA Based Vision Techniques, International Journal Engineering Science and Technology (JESTECH), Türkiye (Hakem değerlendirmesinde).
- [42] **Aydin, I., Yaman, O., Karakose, M., Celebi, S. B.**, Particle Swarm Based Arc Detection on Time Series in Pantograph-Catenary System, IEEE International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA'14), June 23-25, Alberobello, Italy, 2014.
- [43] **Yaman, O., Karakose, M., Aydin, I., Akin, E.**, Pantograf Katener Sistemlerde Görüntü İşleme ve Model Tabanlı Ark Tespiti, 22. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014), Trabzon, Türkiye, 2014.
- [44] **Yaman, O., Karakose, M., Aydin, I., Akin, E.**, Görüntü İşleme ve Bulanık Mantık Tabanlı Pantograf Geometrik Modelin Tespiti, 22. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014), Trabzon, Türkiye, 2014.
- [45] **Yaman, O., Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.**, Contact Point Analysis Of Catenar-Pantograph System By Using Normal And Thermal Images, 2. Uluslar Arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (Iserse'13), 2013.

- [46] **Yaman, O., Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** Pantograf-Katener Sistemlerde Oluşan Sıcaklık Değişimi ve Arkın Termal Görüntü İle Tespit Edilmesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 1071-1075, 2013.
- [47] **Yaman, O., Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** Kablosuz Duyarga Ağ Tabanlı Arıza Teşhis Yaklaşımları (Wireless sensor network based fault diagnosis approaches), 21. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2013), pp. 1-4, 24-26 Nisan, Girne, Kıbrıs, 2013.
- [48] **Barmada, S., Landi, A., Sani, L.,** Wavelet Multiresolution Analysis for Monitoring the Occurrence of Arcing on Overhead Electrified Railways, Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 217, 177-187, 2003.
- [49] **Hallgrímsson, A., K.,** Dynamic behavior of contact lines for railways with laboratorial model setup according to Norwegian conditions, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Structural Engineering, Master thesis, pp. 129, 2013.
- [50] **Nåvik, P., R.,** Numerical Analysis of the Dynamic Behaviour of Railway Catenary Systems in Accordance with Norwegian Conditions, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Structural Engineering, Master thesis, pp. 119, 2003.
- [51] **Pedro C., A.,** Development of Multibody Pantograph and Finite Element Catenary Models for Application to High-speed Railway Operations, Mechanical Engineering, Master thesis, pp. 100, 2012.
- [52] **Verschraegen, P., V.,** A Model of the Pantograph Arc Impedance for 50 Hz Catenary Voltage, KTH, School of Electrical Engineering, Electromagnetic Engineering, Master of Science Thesis, Stockholm Sweden, pp. 89, 2010.
- [53] **Zhang, W., Zhou, N., Li, R., Mei, G., Song, D.,** Pantograph and Catenary System with Double Pantographs for High-Speed Trains at 350 Km/H or Higher, Journal of Modern Transportation, 7-11, 2011.
- [54] **Ding, T., Chen, G.X., Bu, J., Zhang, W.H.,** Effect of temperature and arc discharge on friction and wear behaviours of carbon strip/copper contact wire in pantograph–catenary systems, Wear, 1629– 1636, 2011.
- [55] **Koyama, T.,** A Method to Measure the Contact Force of Pantographs through Image Processing, Railway Technology Avalanche, no. 37, pp.219, 2011.
- [56] **Karakose, E., Gencoglu, M.T.,** Adaptive fuzzy control approach for dynamic pantograph-catenary interaction, 15th IEEE International Symposium On Mechatronika, 1-5, 2012.

- [57] **Kalyoncu H., B.**, Hiz Kontrolü Amacı İle Demiryolu Dönüş Şiddetinin Lokomotif Üzerindeki Bir Kamera İle Belirlenmesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, pp. 89, 2006.
- [58] **Rujiao, D., Wei, Z., Songling, H., Jianye, C.** Automatic inspection of the localizer slope based on improved Hough transform, IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf., pp. 1–4, May 2011.
- [59] **Chen, Q., Zhao, L., Lu, J., Kuang, G., Wang, N., Jiang, Y.**, Modified two-dimensional otsu image segmentation algorithm and fast realisation, IET Image Processing, vol. 6, Issue. 4, pp. 426-433, 2012.
- [60] **AlSaeed, D.H., Bouridane, A., Elzaart, A., Sammouda, R.** Two modified Otsu image segmentation methods based on Lognormal and Gamma distribution models, International Conference on Information Technology and e-Services, pp. 1-5, 2012.
- [61] **Özkan, D.**, Kamera görüntülerinden hareketli hedef tespiti, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek lisans tezi, pp.104, 2011.
- [62] **Walters, S.**, Simulation of Fuzzy Control Applied to a Railway Pantograph-Catenary System 2 A Model of a PAC System, Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, vol.6277, pp. 322–330, 2010.
- [63] **Karakose, M., Aydin, I., Akin, E.**, The intelligent fault diagnosis frameworks based on fuzzy integral, International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 1634-1639, 2010.
- [64] **Adrian, P.**, Electric arc power collection system for electric traction vehicles, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.57, pp. 212-221, 2014,
- [65] **Bocciolone, M., Bucca, G., Collina, A., Comolli, L.**, Pantograph–catenary monitoring by means of fibre Bragg grating sensors: Results from tests in an underground line, Mech. Syst. Signal Process., vol. 41, no. 1–2, pp. 226–238, Dec. 2013.
- [66] **Wang, J., Yang, Z., Lin, F., Cao, J., Liu, W.**, Analysis of electromagnetic characteristics of the main transformer caused by pantograph-catenary disconnection in high speed train, International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, vol. 6, no. 1-2, pp. 91–106, 2014.
- [67] **Wiecek, B., Danych, R., Zwolenik, Z., Jung, A., Zuber, J.**, Advanced thermal image processing for medical and biological applications, Proceedings of the 23rd Annual International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society, 2805 – 2807, 2001.

- [68] **Genest, M.**, Pulsed thermography image processing for damage growth monitoring, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 721 – 728, 2011.
- [69] **Ma, S., Ma, Q.**, Modified Infrared Images Contrast for Pulsed Thermography, Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 632 – 635, 2011.
- [70] **Chih-Lung, L., Kuo-Chin, F.**, Biometric Verification Using Thermal Images of Palm-dorsa Vein-patterns, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 199 – 213, 2004.
- [71] **Park, C., Lee, B., Lee, H.**, Magnetic and thermal characteristics analysis of inductive power transfer module for railway applications, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 576 – 579, 2012.
- [72] **Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., Thottappillil, R.**, DC Component From Pantograph Arcing in AC Traction System—Influencing Parameters, Impact, and Mitigation Techniques, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 53, pp. 18-27. 2011.
- [73] **Mariscotti, A., Marrese, A., Pasquino, N., Moriello, R.S.L.**, Time and frequency characterization of radiated disturbance in telecommunication bands due to pantograph arcing, Measurement, vol. 46, no. 10, pp. 4342–4352, Dec. 2013.
- [74] **Boffi, P., Cattaneo, G., Amoriello, L., Barberis, A., Bucca, G., Bocciolone, M. F., Collina, A., Martinelli, M.**, Optical Fiber Sensors to Measure Collector Performance in the Pantograph-Catenary Interaction, IEEE Trans. on Sensors, vol. 9, 635-640, 2009.
- [75] **Bruno, O., Landi, A., Papi, M., Sani, L.**, Phototube sensor for monitoring the quality of current collection on overhead electrified railways, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit pp. 231-241, 2001.
- [76] **Haghi, A., Sheikh, U. U., Marsono, M. N.**, A Hardware/Software Co-design Architecture of Canny Edge Detection, 2012 Fourth Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul., vol. 2, no. 2, pp. 214–219, Sep. 2012.
- [77] **Hulin, B. and Schussler, S.**, Concepts for Day-Night Stereo Obstacle Detection in the Pantograph Gauge, 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, vol. 1, 449 – 454, 2007.
- [78] **Uwe, R., Schneider, R.**, Automated optical inspection of overhead contact line systems, Siemens Efficient Railway Solutions, 2010.

- [79] **Aydın, İ.**, Gerçek zamanlı durum izleme ve arıza teşhisi için bağışık akıllı hesaplama tekniklerinin geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi, pp. 226, 2011.
- [80] **Andina, R. J. J., Moure, M. J., Valdes, M. D.**, 2007. Features, design tools, and application domains of FPGAs, IEEE Trans. On Industrial Electronics, 54 (4), 1810-1823.
- [81] **Monmasson E., Cirstea, M. N.**, 2007. FPGA design methodology for industrial control systems—a review, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 54 (4), 1824–1842.
- [82] **Wang, X., Wang, X., He, J., Meng, X., Deng, C.**, The Impact of Contact Lines Wear on Current-Collecting Reliability of Pantograph and Security of Catenary, International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation, vol. 287, 67–74, 2014.
- [83] **Wolf, W. H.**, FPGA-based system design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice- Hall, 2004.
- [84] **Chu, P. P.**, FPGA prototyping by VHDL examples- xilinx spartan-3 version, John Wiley & Sons Press, New Jersey, 2008.
- [85] **Monmasson, E., Idkhajine, L., Cirstea, M. N., Bahri, I., Tisan, A., Naouar, M. W.**, FPGAs in industrial control applications, IEEE Trans. on Industrial Informatics, 7 (2), 224-243 2011.
- [86] **Y. Li, Q. Yao, B. Tian, W. Xu**, Fast double-parallel image processing based on FPGA, IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, pp. 97-102, 2011,

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 çalışmaya başladı. Aynı yıl içerisinde Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisans yapma hakkı kazandıktan sonra İlmek Bilişim Hizmetleri Yazılım Mekatronik Sistemler Ar-Ge Danışmanlık San. Ve Tic. Ltd. Şti.’ deki işinden ayrılarak TÜBİTAK 1001 projesinde bursiyer olarak çalışmaya başladı. Halen TÜBİTAK bursiyerliği devam etmektedir.