

**RAYLI SİSTEMLERDE
PANTOGRAF-KATENER SİSTEMİNİN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU
VE ARIZA TEŞHİS YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Ebru KARAKÖSE

**Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU**

EKİM-2014

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

**RAYLI SİSTEMLERDE PANTOGRAF-KATENER SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE ARIZA TEŞHİS YÖNTEMLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ebru KARAKÖSE

(091113205)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.09.2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 14.10.2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü.)

: Prof. Dr. Erhan AKIN (F.Ü.)

: Prof. Dr. Sedat SÜNTER (F.Ü.)

: Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ (İ.Ü.)

EKİM-2014

ÖNSÖZ

Elektrikli demiryolu sistemlerinde elektrik enerjisinin lokomotifte aktarılmasını sağlayan pantograf ve katener arasındaki etkileşimin ve mekanik temasın tam olarak sağlanması, özellikle yüksek hızlı trenlerde güvenilir, sürekli ve kesintisiz bir çalışma için çok önemlidir. Bu tez çalışmasında, elektrikli demiryolu sistemlerinde pantograf ve katener sistemlerinin modellenmesi, kontrolü, arıza teşhisi ve analizine yönelik yeni yöntemler geliştirilmiştir. Tez kapsamında pantografin katener hattına temas kuvvetinin kontrolü, sistem parametrelerinin etkileri ve analizi, özellikle yüksek hızlarda durum izleme ve arıza teşhisi için kullanımı zorunlu hale gelen görüntü işleme tekniklerinin kullanılması açısından gerçek zamanlı uygulanabilir yeni yaklaşımlar deneysel veriler üzerinden doğrulanarak sunulmaktadır. Bununla birlikte bu alanda ilk doktora tez çalışmalarından birisi olan bu tez ile demiryolu sistemlerinde yüksek hızlarda durum izleme ve kontrol için ileride birçok yeni çalışmanın yapılabileceği ortaya konulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince sürekli yol göstererek beni destekleyen, anlayışını, katkılarını ve zamanını esirgemeyerek beni hep motive ve teşvik eden değerli tez danışmanım Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na içtenlikle çok teşekkür eder, saygılarımı sunarım. TCDD Malatya 5. Bölge Tesisler Müdür Yrd. Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi Ali Seydi FELEK'e saha çalışmalarında verdiği desteklerden dolayı çok teşekkür ederim. İlgi ve desteklerini her zaman hissettiğim tüm hocalarım ve arkadaşlarıma, her zaman ve her konuda beni destekleyen, güç veren ve sabır gösteren değerli eşime ve aileme teşekkür ederim.

Bu tezde yapılan çalışmalar 112E067 nolu TÜBİTAK 1001 araştırma projesi ile desteklenmiştir. Tezdeki desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna teşekkür ederim.

Ebru KARAKÖSE
ELAZIĞ-2014

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
TABLolar LİSTESİ	XV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVI
KISALTMALAR LİSTESİ	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Demiryolu Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi.....	2
1.2. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinin Avantajları	3
1.3. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinin Bileşenleri.....	5
1.4. Pantograf–Katener Sistemlerinin Modellenmesine İlişkin Literatür Özeti.....	6
1.5. Pantograf – Katener Sistemlerinde Aktif Kontrol Yaklaşımına İlişkin Literatür Özeti	12
1.6. Pantograf–Katener Sistemlerinde Arıza Teşhisine İlişkin Literatür Özeti	17
1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı	24
1.8. Tezin Yapısı.....	25
2. PANTOGRAF- KATENER SİSTEMLERİ.....	28
2.1. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinde Elektrifikasyon.....	28
2.2. Pantograf	30
2.3. Katener	32
2.4. Pantograf ve Katener Sisteminin Birleştirilmesi	36

3. PANTOGRAF- KATENER SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ.....	39
3.1. Yay-Kütle Sistemleri	41
3.2. Pantograf- Katener Sistemlerinin Matematiksel Denklemleri.....	47
3.3. Pantograf-Katener Sistemlerinde Parametre Etkilerinin Analizi	52
4. YENİ AKTİF PANTOGRAF KONTROL YAKLAŞIMLARI.....	62
4.1. Giriş	62
4.2 Pasif ve Aktif Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırılması	65
4.3. Adaptif Bulanık Mantık Kullanılan Aktif Kontrol Sistemi.....	69
4.4. Görüntü İşleme Tabanlı Aktif Kontrol Sistemi.....	76
4.4.1. Kullanılan Görüntü İşleme Algoritmaları	80
4.4.1.1. Canny Kenar Çıkarım Algoritması	80
4.4.1.2. Hough Dönüşümü	82
4.4.2. Deneysel Sonuçlar	84
5. PAK SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN İZLEME VE ARIZA TESPİT YAKLAŞIMLARI	95
5.1. Giriş	95
5.2. Arıza Teşhisi ve Durum İzleme için Analiz Yaklaşımı	97
5.2.1. Önerilen Yöntem	97
5.2.2. Analiz Yaklaşımı için Elde Edilen Simülasyon Sonuçları	102
5.3. Temas Noktasının Görüntü İşleme ile İzlenmesi ve Analizi.....	111
5.3.1 Önerilen yöntem	112
5.3.2. Önerilen Görüntü İşleme Tabanlı Yaklaşım için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	119
6. S - DÖNÜŞÜMÜ TABANLI YENİ BİR DURUM İZLEME VE ARK TESPİTİ YAKLAŞIMI.....	127
6.1. Giriş	127
6.2. Önerilen Yöntem	129

6.3. Uygulama Sonuçları	138
6.3.1. Mayr Ark Modeli için Elde Edilen Simülasyon Sonuçları	138
6.3.2. Gerçek Akım Verileri için Elde Edilen DeneySEL Sonuçlar	146
7. SONUÇLAR.....	153
KAYNAKLAR.....	156
EKLER	168
EK-1	168
ÖZGEÇMİŞ	171

ÖZET

Günümüzde temiz enerji kullanan, hızlı ve güvenilir bir ulaşım aracı olan elektrikli trenlerde, elektrik enerjisini taşıyan katener hattı ile bu enerjiyi lokomotifte ileten pantograf sistemi arasındaki etkileşimin izlenmesi güvenlik açısından oldukça önemlidir. Özellikle yüksek hızlı trenlerin yaygınlaşması ile yüksek akım ve gerilim altında çalışan pantograf ve katener sistemi arasındaki temas kuvvetinin, pantograf yüzeyinin aşınma durumunun ve oluşabilecek arkların periyodik olarak kontrol edilmesi gerekir. Çevresel şartlar, çalışma koşulları ve sistem parametreleri gibi faktörlerden etkilenen pantograf ile katener arasındaki enerji iletiminin kalitesi için durum izleme, aktif pantograf kontrolü ve olası arızaların tespiti, raylı sistemlerin güvenilirliği açısından zorunlu olarak yapılması gereken işlemlerdir.

Bu tez çalışmasında, bir pantograf-katener sisteminin modellenmesi ve sistem parametrelerinin etkilerinin analizi, pantograf ve katener arasındaki temas kuvvetinin aktif olarak kontrolü ve pantograf yüzeyi ile genel pantograf-katener sistemi üzerinde oluşacak arızaların teşhisine yönelik üç yeni yöntem önerilmiş ve bunlara ait doğrulama sonuçları deneysel veriler üzerinden sunulmuştur. İlk olarak pantograf-katener sistemi matematiksel olarak modellenerek transfer fonksiyonu elde edilmiş, bu modelde bulunan kütle, yay sabiti ve sönümleme katsayıları gibi altı parametrenin değişimi sonucunda genel sistemin nasıl davranacağı analiz edilmiştir. Sistem parametrelerinin olası herhangi bir nedenle değişmesi durumunda modelin simülasyonu sonucu sistemde salınımların oluştuğu, pantograf-katener etkileşiminin olumsuz etkilendiği ve enerji iletim kalitesinin azaldığı ortaya konulmuştur. İkinci çalışma pantograf-katener sistemlerinde sistem parametrelerinin değişmesi durumunda, sistemin kararlı, sağlam ve verimli çalışmasını sağlayacak aktif pantograf kontrolü için yapılmıştır. Tezde bu amaçla pantografin katenere temas kuvvetini tren hareket halinde iken koşullara göre sürekli ayarlayan yeni ve etkili bir yöntem sunulmaktadır. Bunun için geliştirilen adaptif bulanık kontrolör ve pantografin pozisyon bilgisini bulan görüntü işleme algoritması ile pantografin çevrimiçi kontrol edilmesine dayanan bu yeni yöntem literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır. Önerilen yaklaşımda, bir kamera ile alınan pantograf-katener görüntüsünden, görüntü işleme teknikleriyle elde edilen konum bilgisi kullanılarak adaptif bir bulanık kontrolör ile pantografin aktif kontrolü sağlanmaktadır. Sonraki çalışma, katener hattının pantograf yüzeyine temas ettiği noktanın pantografin güvenli bölgesinde olup olmadığını belirlemek, pantograf

yüzeyindeki bölgelerin aşınma oranını bulmak ve buna bağlı oluşabilecek arızalar için bir analiz yaklaşımı önermektedir. Bunun için ilk olarak katener hattının pantograf üzerinde kayarken oluşturduğu yörünge modellenmiş, daha sonra kamera ile katener hattının pantografa temas ettiği nokta görüntü işleme algoritmaları ile sürekli tespit edilerek gerçek veriler üzerinden arıza analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece pantograf yüzeyinin her noktasının istatistiksel kullanım durumu ve ömrü konusunda tespit ve tahmin yapabilme imkanı oluşmuştur. Tezdeki son çalışma ise pantograf-katener sisteminden alınan akım verilerine S-dönüşümü uygulanarak elde edilen özellikler üzerinden bulanık sınıflandırıcı ile arkların tespitine yönelik bir yöntemdir. Öncelikle Mayr ark modeli ile simülasyon üzerinden elde edilen akım verileri kullanılmış, daha sonra bir trenden alınan gerçek akım verileri kullanılarak S-dönüşümü ve buna ait özellikler üzerinden arkların tespit edilmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve çeşitli senaryolar ile doğrulanmıştır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında, elektrikli trenlerde elektrik hattından lokomotif enerji iletimini sağlayan pantograf-katener sistemleri için yeni, etkili, yüksek doğruluklu, sağlam, gerçek zamanlı uygulanabilir ve temassız olarak durum izleme, analiz, kontrol ve arıza teşhis yöntemleri sunulmuştur. Elektrikli trenlerde güvenlik, enerji iletimi kalitesi, verimlilik ve periyodik izleme açısından büyük önem taşıyan bu yeni yöntemler için, bu alandaki çalışmalara ivme kazandıracak sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca temassız izleme çalışmalarının yapılmış olması, yüksek hızlarda bile tren hareket halinde iken, etkili sonuçların alınabilmesini sağlayacak görüntü işleme tekniklerinin bu alanda kullanılmasının avantajlı olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, bu tezde yapılan çalışmalar Tübitak-1001 programında yürütülen 112E067 numaralı araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli demiryolu sistemleri, Pantograf-Katener sistemleri, Enerji iletimi, Aktif pantograf kontrolü, Durum izleme, Arıza teşhisi, Görüntü işleme, Ark tespiti.

SUMMARY

Modeling, Simulation and Development of Fault Diagnosis Methods for Pantograph-Catenary System in Railway Systems

Nowadays, monitoring the interaction between the catenary line carrying the electrical energy and the pantograph system transmitting the energy to the locomotive is very important in terms of security in the electric railway that is a fast and reliable means of transport and uses clean energy. Especially with the spread of high-speed trains, the contact force between the pantograph and the catenary working under high current and voltage, the wear status of the pantographs surface and possible arcs must be checked periodically. Condition monitoring, active pantograph control and possible fault detection for the energy transmission quality between the pantograph and the catenary affected from environmental conditions, operating conditions and system parameters are compulsory process in terms of rail systems reliability.

In this study, three new methods for modeling a pantograph-catenary system and analysis of the system parameters effects, the active control of the contact force between pantograph and catenary and fault diagnosis of the pantograph surface and the general pantograph-catenary system have been proposed and their validation results have been presented in the experimental data. First, transfer function of the pantograph-catenary system has been obtained by mathematical modeling. The system behavior according to the variation effects of the six parameters as mass, spring constant and the damping coefficient used in this model were analyzed for overall system. When the parameters of the system changed for any reason, it has been demonstrated that the oscillations occur in the system, pantograph-catenary interaction is adversely affected and the quality of energy transmission reduces as a results of the model simulation. The second study has been performed for active pantograph control that ensures the stable, reliable and efficient operation of the system in case of the system parameters variations in pantograph-catenary systems. For this purpose, a new and effective method is presented by adjusting the contact force of the pantograph according to the conditions constantly while the train is in motion in this thesis. Therefore, this new method based on the developed adaptive fuzzy controller and the image processing algorithm that finds and online checks the position information of the pantograph will make an important contribution to the literature. In the proposed

approach, active control of the pantograph has been provided by using location information obtained from image processing techniques with an adaptive fuzzy controller in a pantograph-catenary image taken with a camera. Next study suggests an analysis approach in order to detect the regions of contact point and determine the wearing ratio of the pantograph regions and faults. Initially, the trajectory generated by catenary line when it is sliding on the pantograph has been modelled and then the fault analysis was carried out through the actual data by determining the point of the pantograph touched to catenary line with the camera and image processing algorithms. Thus, the possibility of the determination and prediction for the statistical usage status of each point and service life of the pantograph surface has been occurred. Recent study is to perform a method for detection of the arcs with fuzzy classifier by applying S-transformation to the current data received from pantograph-catenary system. Mayr arc model and current data obtained from simulation were used. A new method was developed by using actual current data of a train for detecting the arc via S-transformation and the corresponding properties of S-transformation and it was confirmed with various scenarios.

Consequently new, efficient, highly accurate, robust, real-time applicable and non-contact condition monitoring, analysis, control and fault diagnosis methods for pantograph catenary systems that provide energy transmission to the locomotive from the electric line in the electrical trains have been presented. Results have been obtained for these new methods which have great importance in terms of security, energy transmission quality, efficiency and periodic monitoring in electrical trains and they will accelerate studies in this area. In addition, non-contact monitoring studies have been performed, while the train is in motion at high speeds, the advantage of the image processing techniques usage which allows obtaining effective results has been indicated.

Additionally, the studies realized in this thesis are supported by the research project of 112E067 conducted at TUBITAK-1001 program.

Keywords: Electrical railway systems, Pantograph-Catenary systems, Energy transmission, Active pantograph control, Condition monitoring, Fault diagnosis, Image processing, Arc detection.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Elektrikli bir demiryolu sisteminin bileşenleri.....	5
Şekil 1.2. Kontrol sisteminin blok diyagramı	7
Şekil 1.3. Üç kütleli pantograf modeli	8
Şekil 1.4. Pantograf ve katener için oluşturulan hibrid test cihazı	10
Şekil 1.5. PAK sistemi için oluşturulan PID kontrolörün kapalı çevrim blok şeması	12
Şekil 1.6. PID aktif kontrol sisteminin blok şeması	14
Şekil 1.7. Bulanık aktif kontrol sisteminin blok şeması.....	15
Şekil 1.8. Aşınma modeli şeması	20
Şekil 2.1. Elektrikli demiryolu sistemi elektrifikasyonu	29
Şekil 2.2. Bir elektrikli demiryolu hattı için PAK sistemi.....	30
Şekil 2.3. Pantograf bileşenleri.....	31
Şekil 2.4. Pantograf	32
Şekil 2.5. Katener sistemi bileşenleri	33
Şekil 2.6. Katener sistemi konsol-hoban donanımı bileşenleri	34
Şekil 2.7. Gerçek bir katener sisteminin konsol-hoban donanımı.....	35
Şekil 2.8. PAK sistemi ve tren-ray birleşimi.....	37
Şekil 3.1. Pantografin fiziksel ve matematiksel eşdeğeri	39
Şekil 3.2. Genel yay şekli	42
Şekil 3.3. Atalet elemanı.....	42
Şekil 3.4. Sönüm elemanı değişkenleri	43
Şekil 3.5. Kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki.....	44
Şekil 3.6. Sisteme dışardan bir kuvvet uygulanması durumu	46
Şekil 3.7. Sisteme bozucu bir kuvvet uygulanması durumu.....	47
Şekil 3.8. PAK modeli.....	49
Şekil 3.9. Önerilen sistemin blok diyagramı	52
Şekil 3. 10. Farklı pantograf tepe kütlesi (m_t) değerleri için temas kuvveti değişimi	55
Şekil 3. 11. Farklı pantograf tepe kütlesi (m_t) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	55

Şekil 3. 12. Farklı pantograf çerçeve kütlesi (m_c) değerleri için temas kuvveti değişimi ..	56
Şekil 3. 13. Farklı pantograf çerçeve kütlesi (m_c) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 3. 14. Farklı pantograf yay kütlesi (k_{pan}) değerleri için temas kuvveti değişimi	57
Şekil 3. 15. Farklı pantograf yay sabiti (k_{pan}) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 3. 16. Farklı pantograf tepe yay kütlesi (k_t) değerleri için temas kuvveti değişimi ...	58
Şekil 3. 17. Farklı pantograf tepe yay sabiti (k_t) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 3.18. Farklı pantograf tepe sönümleme katsayısı (c_t) değerleri için temas kuvveti değişimi.....	59
Şekil 3. 19. Farklı pantograf tepe sönümleme katsayısı (c_t) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 3.20. Farklı pantograf çerçeve sönümleme katsayısı (c_c) değerleri için temas kuvveti değişimi.....	60
Şekil 3.21. Farklı pantograf çerçeve sönümleme katsayısı (c_c) değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 4.1. Pasif bir PAK sistemi için blok diyagramı.....	65
Şekil 4.2. Aktif bir PAK sistemi için blok diyagramı	65
Şekil 4.3. Pasif ve aktif kontrol sistemlerinin Matlab-Simulink modeli	66
Şekil 4.4. Pasif ve aktif kontrol sisteminde, 100 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi.....	67
Şekil 4.5. Aktif kontrol sisteminde iki farklı referans kuvveti için temas kuvveti değişimi	67
Şekil 4.6. Aktif kontrol sisteminde, farklı referans kuvvetleri için temas kuvveti değişimi	68
Şekil 4.7. Önerilen aktif bulanık kontrol algoritmasının blok diyagramı.....	70
Şekil 4.8. Bulanık kontrolör parametreleri	71
Şekil 4.9. Kural tablosu ve dilsel değişkenler	71
Şekil 4.10. Önerilen yöntemin Matlab-Simulink blok diyagram	72
Şekil 4.11. 100 N'luk referans kuvveti için PI, bulanık ve adaptif bulanık kontrolör simülasyon sonuçları	73
Şekil 4.12. [67] ve [68] nolu referanslardan karşılaştırma için alınan temas kuvveti değişimi grafikleri.....	74
Şekil 4.13. İki farklı referans kuvveti değerinde PI ve adaptif bulanık kontrolör için	

simülasyon sonuçları	75
Şekil 4.14. Farklı referans kuvveti değerlerinde PI ve adaptif bulanık kontrolör için simülasyon sonuçları	75
Şekil 4.15. Önerilen sistemin şematik diyagramı	76
Şekil 4.16. Önerilen görüntü işleme tabanlı yöntem için blok diyagramı	77
Şekil 4.17. Görüntü işleme algoritması için blok şeması	78
Şekil 4.18. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının blok şeması.....	81
Şekil 4.19. Hough Dönüşümü'nün blok şeması	83
Şekil 4.20. Hough Dönüşümü	84
Şekil 4.21. Uygulamada kullanılan örnek görüntü	85
Şekil 4.22. Pantograf görüntüsü için kenarların ve doğruların tespiti	85
Şekil 4.23. Gerçek görüntü üzerinde sınırlayıcı alan ve pantograf üst çizgisi	86
Şekil 4.24. 500 görüntü karesi için pantograf yüksekliği	86
Şekil 4.25. Pantograf durum izleme ve yükseklik tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntüleri	87
Şekil 4.26. Önerilen yöntemde kullanılan pantograf görüntülerinden kenar çıkarımının elde edilmesi.....	88
Şekil 4.27. Kenar çıkarımı sonucu elde edilen görüntülerden Hough Dönüşümü ile pantograf temas şeridinin tespit edilmesi	88
Şekil 4.28. Önerilen yöntem sonucunda tespit edilen pantograf temas bölgeleri.....	89
Şekil 4.29. Temas bölgeleri kullanılarak elde edilen görüntüler	90
Şekil 4.30. Önerilen yöntemin dört farklı video görüntüsü için uygulanması sonucunda elde edilen pantograf yükseklik grafiği	90
Şekil 4.31. İki farklı düşük referans yükseklik değeri için simülasyon sonuçları	93
Şekil 4.32. İki farklı referans yükseklik değeri için simülasyon sonuçları.....	94
Şekil 4.33. Farklı referans yükseklik değerleri için simülasyon sonuçları	94
Şekil 5.1. Analiz yaklaşımının blok diyagramı	98
Şekil 5.2. Pantograf-katener teması ve pantograf bölgeleri.....	99
Şekil 5.3. Temas noktası değişimi	100
Şekil 5.4. Gerekli değişkenler	102
Şekil 5.5. 20 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi	103
Şekil 5.6. 50 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi	104
Şekil 5.7. 200 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi	104

Şekil 5.8. Sekiz farklı seneryo için temas noktaları değişimi.....	106
Şekil 5.9. Birinci bölgeye doğru kayan bir arıza için temas noktası değişimi	107
Şekil 5.10. Beşinci bölgeye doğru kayan bir arıza için temas noktası değişimi	108
Şekil 5.11. Temas noktasının sürekli değiştiği bir arıza için simülasyon sonuçları	109
Şekil 5.12. Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek	111
Şekil 5.13. Temas teli ve pantograf arasındaki tarama alanı	112
Şekil 5.14. Önerilen yöntemin blok şeması	113
Şekil 5.15. Önerilen yöntemin akış şeması.....	114
Şekil 5.16. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının sözde kodu	115
Şekil 5.17. Hough Dönüşümü'nün sözde kodu	115
Şekil 5.18. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının örnek pantograf görüntüsüne farklı eşik değerleri için uygulanması.....	116
Şekil 5.19. Hough Dönüşümü'nün örnek pantograf görüntüsüne farklı eşik değerleri için uygulanması.....	116
Şekil 5.20. Örnek PAK görüntüsünde doğruların elde edilme aşamaları.....	117
Şekil 5.21. Pantograf temas şeridi ve katener temas telinin tespit edilmesi.....	117
Şekil 5.22. İki noktası bilinen iki doğrunun kesişim noktasının analitik düzlemde gösterilmesi.....	118
Şekil 5.23. Pantograf videosundan belirli aralıklarla alınan görüntü çerçevelerinden temas noktasının izlenmesi	120
Şekil 5.24. Durum izleme aşamaları.....	121
Şekil 5.25. Üç farklı pantograf türü için kullanılan videolardan alınan görüntüler.....	121
Şekil 5.26. Temas noktasının üç farklı pantograf videosu için tespit edilmesi	122
Şekil 5.27. Temas noktasının üç farklı pantograf videosu için pantograf bölgelerine göre ayrıştırılması	123
Şekil 5.28. Üç farklı pantograf videosu için temas noktasının yatay ve dikey eksenlerdeki konumu ve bölgesel dağılımı.....	125
Şekil 6.1. Önerilen yöntemin akış şeması	130
Şekil 6.2. Doğrusal interpolasyon yöntemi	131
Şekil 6.3. S-Dönüşümünün yapısı	133
Şekil 6.4. Öznitelik çıkarımı.....	134
Şekil 6.5. Bulanık sistemde kullanılan üyelik fonksiyonları ve dilsel değişkenler	135
Şekil 6.6. Önerilen yöntemde kullanılan MATLAB kod parçacığı.....	137

Şekil 6.7. Mayr Ark Modeli	138
Şekil 6.8. Kontakların açılmaya başlaması ile elde edilen gerilim ve akım eğrisi	139
Şekil 6. 9. Oluşturulan Mayr Ark Modeli.....	140
Şekil 6. 10. Oluşturulan Mayr Ark Modeli ile elde edilen akım sinyali.....	141
Şekil 6. 11. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı durumlar için akım sinyalleri ...	142
Şekil 6.12. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı akım sinyallerinde üst noktaların elde edilmesi	143
Şekil 6.13. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı akım sinyalleri için tepe noktalarından elde edilen sinyaller	144
Şekil 6.14. Model tabanlı elde edilen sağlam ve arızalı akım sinyallerinin S-Dönüşümü ve bulanık sistem sonucu (d)S-sütun giriş üyelik fonksiyonu değeri (e) S-satır giriş üyelik fonksiyonu değeri (f) Çıkış üyelik fonksiyonu değeri (g) Sonuç	145
Şekil 6.15. Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek	146
Şekil 6.16. Lokomotiften sağlam ve arızalı durumlar için alınan akım sinyalleri.....	147
Şekil 6.17. Örnek bir akım sinyali üzerinde gürültünün yok edilmesi	148
Şekil 6.18. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinde üst noktaların elde edilmesi.....	149
Şekil 6.19. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinin tepe noktalarından elde edilen sinyaller	150
Şekil 6.20. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinin S-Dönüşümü ve bulanık sistem sonucu (d)S-sütun giriş üyelik fonksiyonu değeri (e) S-satır giriş üyelik fonksiyonu değeri (f) Çıkış üyelik fonksiyonu değeri (g) Sonuç	151

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. PAK sistemlerinde kullanılan yöntemler	22
Tablo 3.1. PAK sistemi değişkenleri	50
Tablo 3.2. PAK sisteminin referans ve farklı parametre değerleri	53
Tablo 4.1. Önerilen yöntemde kullanılan videolar için pantograf temas bölgesinin boyutu ve işlem süresi.....	91
Tablo 4.2. Özellik çıkarım bloğunda kullanılan aşamaların önerilen yöntemdeki avantajları	92
Tablo 5.1. Sekiz farklı senaryo için pantograf bölgelerindeki temas oranları.....	106
Tablo 5.2. Arıza senaryoları için pantograf bölgelerindeki temas oranları	110
Tablo 5.3. Temas noktası toplam görüntü karesi sayısının bölgelere göre dağılımı ve temas oranları	126
Tablo 6.1. Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu	136
Tablo 6.2. Mayr Ark Modeli'nde kullanılan bileşenler	138
Tablo 6.3. Mayr Ark Modeli'nin Simülasyon Parametreleri.....	139
Tablo 6.4. Önerilen yöntemin ve aşamalarının zaman analizi	152

SEMBOLLER LİSTESİ

F	: Kuvvet
k	: Yayın sertlik sabiti ya da yay sabiti
x	: Uzama miktarı
E_p	: Potansiyel enerji
m	: Kütle
a	: Yerçekimi ivmesi
v	: Hız
c	: Sönümleme (amortisör) elemanının sürtünme katsayısı
A	: Genlik
ω	: Açısal frekans
f	: Frekans
T	: Basit harmonik hareketin periyodu
γ	: Sönüm frekansı
m_t	: Pantografin tepe kütlesi
m_ζ	: Pantografin çerçeve kütlesi
c_t	: Pantografin tepe sönümleme katsayısı
c_ζ	: Pantografin çerçeve sönümleme katsayısı
k_{kat}	: Katenerin yay sabiti
k_{pan}	: Pantografin yay sabiti
k_t	: Pantografin tepe yay sabiti
x_{kat}	: Katener yer değiştirmesi
x_t	: Pantograf tepe yer değiştirmesi
x_ζ	: Pantograf çerçeve yer değiştirmesi
F_y	: Kaldırma kuvveti
m	: Eğim
α	: Eğim açısı
y_1, y_2	: Doğrunun düşey eksenindeki değerleri
x_1, x_2	: Doğrunun yatay eksenindeki değerleri
b	: Kesişim

F_g	: Gauss maskesi
S_x	: x eksenini için sobel matrisi
S_y	: y eksenini için sobel matrisi
G	: Gradient matrisi
r	: Kutupsal koordinat parametresi
θ	: Kutupsal koordinat parametresi
l_t	: Tren uzunluğu
v_t	: Tren hızı
h	: Saniye olarak ölçüm adımı
l_s	: İki direk arasındaki mesafe (Boşluğun uzunluğu)
d	: Dezaksman
l_p	: Pantograf uzunluğu
x'	: Normalize edilmiş veri
x_i	: Girdi değeri
μ_i	: Girdi değerinin ortalaması
σ_i	: Girdi değerinin standart sapması
τ	: Gaussian penceresinin konumunu kontrol eden parametre
M	: Dizi boyutunu belirleyen değişken
N	: Dizi boyutunu belirleyen değişken
X_{ort}	: Dizin ortalaması
t	: Zaman
P	: Arkın soğutma gücü
g	: Ark iletkeni

KISALTMALAR LİSTESİ

TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları
UIC	: International Union of Railways, Uluslararası Demir Yolları Derneği
HT	: Hızlı tren
MAGLEV	: Magnetic Levitation, Manyetik Yükselme
TGV	: Train Grand Vitesse, Fransızca hızlı tren
YHT	: Yüksek Hızlı Tren
PAK	: Pantograf-Katener
DA	: Doğru Akım
AA	: Alternatif Akım

1. GİRİŞ

Ulaşım, insanların ve nesnelerin bulundukları yerden gitmeleri gereken yere nakledilmesi anlamına gelmektedir. Ulaşım sistemlerinde, en kısa sürede, en ucuz ve en güvenli şekilde taşıma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bir ülkenin gelişmişlik düzeyini gösteren en önemli unsurlardan biri ulaşım sektöründeki gelişmelerdir. İnsan hayatının çok önemli bir parçası olan ulaşım, kendi içinde yük ve yolcu taşımacılığı şeklinde sınıflandırılabilir. Yaşam standartlarının, nüfusun ve teknolojinin gelişmesiyle ulaşım şekillerinde de çeşitlenmeler meydana gelmiştir. Bu çeşitlilik içerisinde en önemli unsurlardan biri zamandır. Ulaşım süresini kısaltmak için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Ancak sadece süre açısından bir yenilemenin yapılması yeterli değildir. Aynı zamanda yapılan yenilik ülkeye ve topluma ucuz bir şekilde yansıtılmalı, taşımacılık alanında oluşacak talepleri karşılayabilmeli, yolculara güvenli ve konforlu bir seyahat ortamı sağlayabilmelidir. Ayrıca ulaşım sektörünün sadece kendi içinde etkileri yoktur diğer birçok sektörü de ciddi manada etkilemekte ve etkilenmektedir.

Tüm alanlarda olduğu gibi ulaşım alanında da en büyük ihtiyaç enerjidir. Modern hayatın gereklilikleri, artan rekabet ortamı, kültürel ve sosyal gelişmeler gibi nedenlerden dolayı enerji tüketimi her geçen gün artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için yeni enerji kaynaklarının bulunması ve var olan enerji kaynaklarının en verimli ve tasarruflu şekilde kullanılması gerekmektedir. Enerjinin en çok harcandığı alanlardan biri olan ulaşım sistemlerinde de ciddi bir enerji tasarrufuna ihtiyaç vardır. Ayrıca, enerjinin uygun şekilde elde edilerek kullanılması ve ulaşım hizmetlerinin yeterliliği bir ülkenin kalkınma seviyesini gösteren en önemli unsurlardandır. Daha verimli ve çevreye daha az zarar veren bir ulaşımın sağlanabilmesi için alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisi bunlar içerisinde en verimli, güvenilir ve temiz olanıdır. Fosil kaynaklı yakıtların azalması ve çevreye verdikleri zararlardan dolayı her alanda olduğu gibi ulaşım alanında da elektriğin kullanımı giderek artmaktadır. Ulaşım sistemlerinde elektrik enerjisinin kullanılabileceği en uygun alan demiryolu sistemleridir. Aslında elektrikli demiryolları sistemleri uzun yıllardır ulaşım alanında önemli bir yere sahiptir. Ülkemizde de petrol fiyatlarının artması ve petroldeki dışa bağımlılığımız nedeniyle hem yük hem de yolcu taşımacılığında karayollarından ziyade elektrikli demiryollarına önem verilmesi gündeme gelmiştir [1,2].

1.1. Demiryolu Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

Demiryolu sistemlerinde ilk örnek, maden ocaklarında yüklerin taşınması için insanlar ya da hayvanlar tarafından çekilen küçük araçlar olmuştur. Demiryolları alanında yapılan ilk buluş ise 1804 yılında buharlı lokomotifin icat edilmesidir. Yapılan bu ilk buharlı lokomotif 20 km hızla yol alan ve o zamanki şartlar içerisinde düşünüldüğünde büyük rahatlık sağlayan bir taşıttı.

Ülkemizde, Osmanlı İmparatorluğu kendi gücüyle demiryolu kuramadığı için, o dönemlerde demiryolu sistemleri Avrupa ülkeleri tarafından kurulmuş ve işletilmiştir. Cumhuriyetin ilk yıllarında demiryolu ulaşımına büyük önem verilmiş ve yabancı ülkelerin kontrolünde olan hatlar devletleştirilmeye çalışılmıştır. 1950'li yıllardan sonra, motorlu taşıtların da icat edilmesiyle demiryolu ulaşımı önemini kaybetmeye başlayıp, karayolları ulaşımı gelişmeye başlamıştır.

Dünyada ilk elektrikli raylı sistem 1881 yılında Almanya'da kullanılmıştır. Ancak bunlar bataryalı sistemlerdi ve pek kullanışlı değillerdi. 1930'lu yıllarda 160 km/sa hıza ulaşan trenler Amerika ve Avrupa'da kullanılıyordu. Ancak İkinci Dünya Savaşı'nın başlamasıyla demiryollarındaki gelişmeler sekteye uğramıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Japonya dar hat aralığında 145 km/sa hızla giden trenler imal etmiş ve dar hat aralığı için bir ilk meydana gelmiştir.

Elektrikli demiryolu sistemlerinin ve hızlı tren (HT) sistemlerinin teknolojik gelişimi uzun zamandır çok iyi bir şekilde ilerlemektedir. Hatta elektrikli HT sistemleri ulaşım alanında hava yolu ulaşımından bile daha avantajlı durumdadır. Hızlı trenler için sistem altyapısı çok önemlidir. Bu tür sistemler ya kendi yapılarına uygun imal edilmiş yerlerde ya da var olan sistemlerin geliştirilip hızlandırılmasıyla kullanılabilirler.

UIC'e (International Union of Railways, Uluslararası Demir Yolları Derneği) göre, eski sisteme göre yapılmış hatlarda 200 km/sa, yeni sisteme göre yapılmış hatlarda 250 km/sa hızla gidebilen trenlere HT denilmektedir. HT sistemlerini geliştiren ilk ülke Japonya'dır ve şu anda da en çok yolcu taşımacılığı yapan ülkedir. Dünya'da ilk HT, Japonya'da 1959 yılında yapılmaya başlanmış ve 1964'de yapımı bitirilmiştir. Bu tren yapılan denemelerde 200 km/sa hıza ulaşabilen bir trendi. Ayrıca Japonya 2003 yılında MAGLEV (Magnetic Levitation, Manyetik Yükselme) sistemlerinde, 581 km/sa hıza çıkarak bir ilke daha imza atmıştır. Avrupa'da ise 1981 yılında, Paris-Lyon arasında saatte 300 km hıza ulaşabilen ilk HT uygulaması gerçekleştirilmiştir.

1994 yılında Paris ve Londra, Manş Denizi'nin altından TGV(Train Grand Vitesse) hattı kullanılarak birbirlerine bağlanmıştır ve aralarındaki mesafe iki saat on beş dakikada kat edilmiştir [1-4]. Hızlı trenlerin çoğu elektrik ile bir kısmı ise motorin ile çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde raylar kaynak yapılmaktadır. Bunun nedeni her bir ray arasında açılma olmasını engellemek ve titreşimi azaltmaktır.

Türkiye'nin ilk hızlı treni, Yüksek Hızlı Tren (YHT) adını almıştır [5]. Ülkemizin ilk HT hattı, 2003 yılında yapılmaya başlanmış, 2007 yılında deneme seferlerine başlamış ve 13 Mart 2009'da Ankara-Eskişehir arasındaki 245 km'yi bir saat yirmi beş dakikada alarak ilk yolcu seferini gerçekleştirmiştir. Bu hat, iki etaptan oluşan bir projedir. İlk etabı Ankara-Eskişehir hattı olan projenin, ikinci etabı ise Eskişehir-İstanbul hattıdır. Marmaray'la birleştirilmesi düşünülen proje 2013 yılı sonunda tamamlanarak, 533 km uzunluğunda olan İstanbul-Ankara arasındaki mesafenin, normalde yedi saat olan seyahat süresi üç saat gibi kısa bir sürede kat edilerek günlük sefer yapılmaktadır. Ankara-Eskişehir arasındaki hattın seferlerinin başlamasıyla Türkiye HT teknolojisini kullanan dünyada sekizinci, Avrupa'da altıncı ülke olmuştur. Türkiye'deki mevcut demiryolu ağı toplam 10.922 km olup bu ağın 8.430 km'si ana hattır. Mevcut toplam demiryolu ağının 2.305 km'si elektrikli olup 25 kV, 50 Hz tek faz AA'dır ve 2.665 km'si sinyallidir [5, 6].

1.2. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinin Avantajları

Dünya genelinde elektrikli demiryolu sistemlerinin önemi birçok avantajından dolayı giderek artmaktadır. Bu avantajlar sıralanacak olursa;

- *Çevresel faydalar:* Karayolu ve havayolu taşıtları, yaydıkları karbondioksit miktarı ile çevreye çok zarar verirken, elektrikli trenler yakıt olarak elektrik kullandıkları için, çevreye çok daha az zarar vermektedirler.
- *Maliyet:* Aynı uzunlukta karayolu ve demiryolu hattının yatırım maliyeti karşılaştırıldığında, demiryolu hattının karayoluna göre çok daha az maliyetli olduğu görülmektedir. Havayolu ulaşımının maliyeti ise diğerlerine kıyasla oldukça fazladır. Ayrıca demiryolu sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri biraz fazla gibi görünse de bu bedeli kısa sürede karşılamaktadır. Hareket kabiliyeti için gerekli olan enerjiyi elektrik enerjisinden sağladıkları için maliyeti düşük bir yapıları vardır.

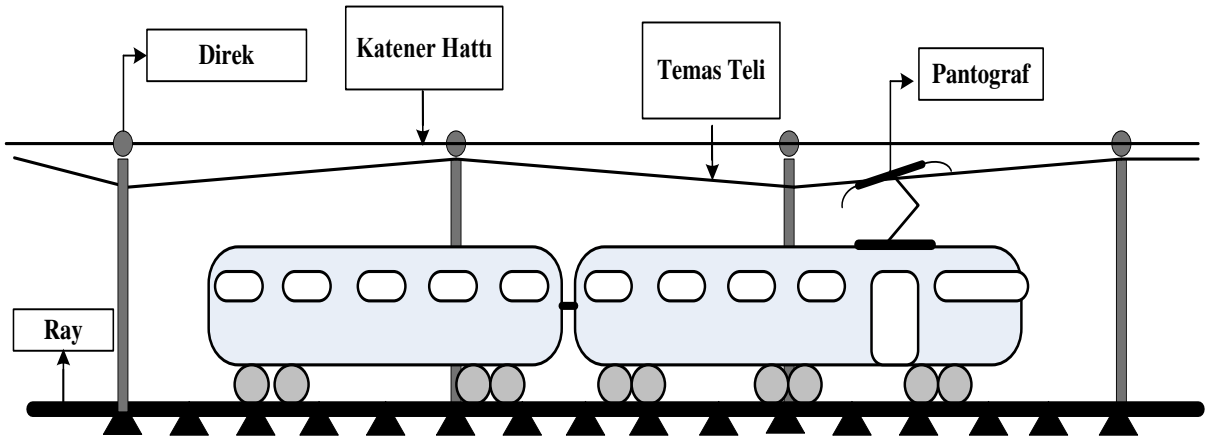
- *Verim:* Elektrikli trenlerde kullanılan motorlar dizel ve buharlı olanlara göre daha verimlidirler. Isıya karşı daha dayanıklı ve daha güçlüdürler. Ayrıca yapıları daha basit ve daha küçüktürler.
- *Bakım ve onarım:* Kullanılan motorların yapıları nedeniyle daha az arıza oluşmakta ve bakım masrafları düşmektedir. Bir demiryolu hattının kullanım ömrü diğer ulaşım türlerine göre çok daha uzundur.
- *Yük taşıma kapasitesi:* Kullanılan motorlar daha verimli ve güçlü olduğu için daha fazla yük taşınmasına imkan sağlamaktadır.
- *Hız:* Motorları daha verimli olduğu için daha yüksek hızlara ulaşabilmektedirler. Bir otomobilin kullanılamayacağı hızlarda çok güvenli bir şekilde ulaşım sağlanmaktadır.
- *Süre:* Daha hızlı oldukları için seyahat süresi kısaltmakta ve bu da tercih edilme oranlarını arttırmaktadır..
- *Konfor:* Özellikle yeni geliştirilen hızlı trenler içerisinde yolcuların daha konforlu bir yolculuk yapması sağlanmaya çalışılmıştır. Hız ve süre avantajından dolayı büyük rahatlık sağlamaktadır.
- *Yakıt tasarrufu:* Hareket edebilmek için gerekli olan enerji mevcut elektrik şebekesinden sağlandığı ve petrol ürünleri kullanılmadığı için dışa bağımlılığı daha azdır. Elektriğin elde edilmesi ve taşınması daha kolaydır. Ayrıca diğer yakıtlardaki depolama problemi elektrik için geçerli değildir. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) verilerine göre aynı gücü üreten elektrikli bir lokomotifin yakıt sarfıyatı dizel lokomotifin % 33' ü kadardır. Bu durumda elektrik kullanmanın ne kadar faydalı olduğu bir kez daha görülmektedir.
- *Güvenilirlik:* Karayolu trafiğinde meydana gelen kazalar ve sıklığı düşünüldüğü zaman çok güvenilir bir ulaşım sistemi olduğu daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Karayollarında oluşan kazalara neden olan faktörler çok fazladır ve bu nedenlerin çoğu insan kaynaklı olduğu için de çok fazla bir iyileştirme yapılamamaktadır.
- *Gürültü:* Özellikle şehir içi ulaşımında motorlu araçlar çok ciddi bir gürültü kirliliği oluşturmaktadır ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir.

- *Arazi kullanımı:* Bir otoyol ya da havaalanı yapmak için gerekli olan arazi miktarı çok fazladır. Oysa demiryolu sistemleri için kullanılan arazi miktarı çok daha azdır ve kullanılabilir verimli tarım arazilerine daha az zarar vermektedir.
- *Trafik yoğunluğunda azalma:* Gelişmiş ülkelerde ve özellikle büyük şehirlerde trafik yoğunluğunu azaltmak amacıyla demiryolu sistemlerinin kullanımı büyük kolaylık sağlamaktadır [3, 6].

1.3. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinin Bileşenleri

Bir elektrikli demiryolu sistemi temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır ve bu bileşenler Şekil 1.1’de görülmektedir. Bunlar:

- Trenin üzerinde gitmesi için gerekli olan raylar,
- Elektrikli motorlara sahip tren,
- Elektrik kaynağı olarak kullanılan iletim hatları (katener hattı),
- İletim hatları ile tren arasında enerji iletimini sağlayan pantograf.



Şekil 1.1. Elektrikli bir demiryolu sisteminin bileşenleri

Elektrikli demiryolu sistemlerinde enerjinin alınması için gerekli olan en önemli kısımlar pantograf ve katenerdir. Ancak diğer tüm bileşenler de sistem için farklı bir öneme sahiptir. Pantograf-katener (PAK) sisteminde enerji akışı, katenerin temas telinden pantograf aracılığıyla alınan elektrik enerjisinin trenin elektrikli çekiş araçlarına iletilmesiyle sağlanır. Bu enerjinin kesintisiz olması çok önemlidir.

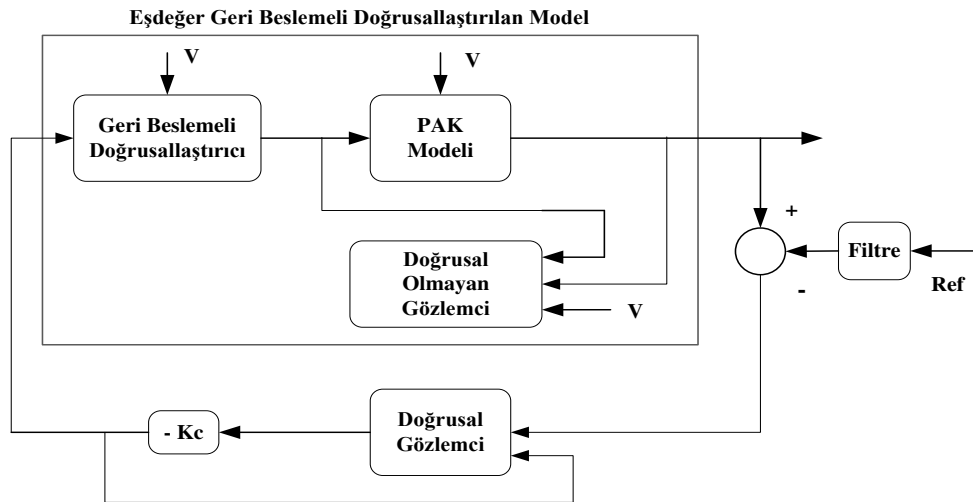
Pantograf ve katener arasındaki uyumluluk, bu sistemlerdeki en önemli konulardan biridir. Pantograf hareket eden, katener ise sabit çok karmaşık iki dinamik sistemdir. Dolayısıyla bunlar arasında bir temasın olması sistemi daha karmaşık bir hale getirmektedir ve incelenmesi zorunlu hale gelmektedir.

Akım toplama işlemi elektrikli demiryolu sistemlerinde en önemli unsurdur. Pantograf, trenin çatısının üstündedir ve havai katener hattından akım toplar. Katener hattı demiryolu hattı boyunca düzenli aralıklarla destek noktaları olan direklere sabitlenir. Tren hareket ettiği zaman, pantograf katener hattı boyunca kayar ve elektrik enerjisini trene alır. Aralarındaki teması sağlamak için katenera pantograf tarafından uygulanan kuvvet yeterli olmalıdır. Tren hızı artarsa katener hattında titreşimler oluşur ve pantografla katener arasındaki etkileşim daha önemli hale gelir. Bu titreşimler, pantograf ve katener arasındaki teması etkiler. Pantograf ile katener arasındaki temas kesildiği zaman elektriksel temasta kesileceği için, aşınma ve ark oluşabilir [4, 7-10].

1.4. Pantograf–Katener Sistemlerinin Modellenmesine İlişkin Literatür Özeti

Elektrikli demiryolu sistemlerinin modellenmesi oldukça zor ve karmaşıktır. Çünkü sistem birçok yapıdan oluşmaktadır. Sistemi oluşturan bu yapılar, mekanik, dinamik ve elektriksel olabilir. Uygun yazılım simülasyonunun gerçekleştirilebilmesi için sistemin adım adım ve ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu tür sistemler kurulması çok zor ve pahalı olan sistemler oldukları için mevcut sistemlerin en iyi şekilde kullanılıp değerlendirilmesi gerekmektedir. Elektrikli demiryolu sistemlerindeki esas amaç, diğer tüm sistemlerde olduğu gibi verimliliği arttırmaktır. Verimin artmasıyla sistemin bakım ve onarım masrafları da düşecektir. Akım toplama kalitesini etkileyen sistemin içyapısından kaynaklanan ya da harici birçok etken vardır. Sistemin çalışma hızı, parametre değişimi, uygulanan kuvvetin genliği, hava şartları, ray veya yol kaynaklı titreşimler ve pantograf ile katenerin birbirine teması sonucu oluşan titreşimler, bu etkenler içerisinde en önemlileridir. Temas kuvvetinin uygun değerden daha yüksek ve daha düşük olması ark oluşumu ya da aşınma gibi birçok olumsuz duruma neden olmaktadır. Literatürde yapılan birçok çalışmadaki ana unsur temas kuvveti değişimini en aza indirerek akım toplama kalitesini arttırmaktır. Literatürde katener ve pantograf arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır.

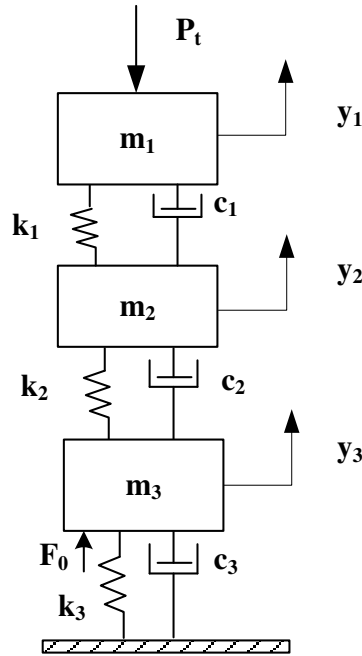
İde [11], temas kuvvetinin sabit bir değerde kontrol edilebilmesi için PAK sistemlerinde doğrusal olmayan bir durum geri besleme kontrol yaklaşımı kullanarak durum tahmini yapmıştır. Doğrusal olmayan gözlemci kullanılarak durum tahmini yapılmış ve tahmin edilen durumlar geri besleme ile alınarak daha sonra doğrusallaştırılmıştır. Şekil 1.2’de kontrol yaklaşımının blok diyagramı görülmektedir. PAK sisteminde kontrolör tasarımı zorlaştırmaması için, birçok ihmal yapılarak iki kütleli yapı ile ikinci dereceden bağımsız pantograf mekanik modeli oluşturulmuştur ve zamanla değişen katener yay sabiti değeri ile katener modellenmiştir. Temas kuvveti ve tren hızı için gerçek değerler kullanılmıştır. Sabit tren hızı için elde edilen sonuçlar değişken olanlara göre daha iyi bir performans göstermiştir. Değişken hız değeri için elde edilen sonuçların iyileştirilmesi ve PAK sistemi için yapılan ihmallerin daha aza indirilmesi daha gerçekçi bir model oluşturulmasını sağlayacaktır.



Şekil 1.2. Kontrol sisteminin blok diyagramı [11].

Mahajan [12], pantograf katener sisteminde temas kuvveti ile temas teli yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi ikinci dereceden bağımsız sistem modeli oluşturarak incelemiştir. Pantograf parametrelerinin sistem üzerindeki hassasiyet analizi gözlemlenmiştir. Açık ve kapalı çevrim modeller oluşturularak, frekans ve zaman cevabına bakılmıştır. Kapalı çevrim kontrol ile açık çevrim kontrole göre zaman cevabı açısından aşma değeri azalmıştır. Frekans cevabının ise belirli bir kazanç değerinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Ancak parametrelerin her birinin değişiminin sistem üzerindeki etkisi açık bir şekilde verilmemiştir.

Yifeng [13] çalışmasında, PAK sisteminin dinamik modelini oluşturmak ve temas analizi yapabilmek için tek bir pantograf için doğrusal olmayan üç kütleli eşdeğerini ve basit katenerin temas teli için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Oluşturduğu üç kütleli pantograf modeli Şekil 1.3’de görülmektedir. Bu kütleler pantograf tepe, alt çerçeve ve üst çerçeve kütleleridir. Modeldeki diğer bileşenler yay ve sönümleme elemanlarıdır. Temas telinin tasarım parametrelerini, farklı hızlarda değiştirerek temas kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ancak pantograf parametre değişiminin temas kuvveti üzerindeki etkilerine değinilmemiştir. Temas teli parametre değişiminin etkilerinin yanı sıra pantograf parametre değişimi etkilerinin incelenmesi de verimli olacaktır.



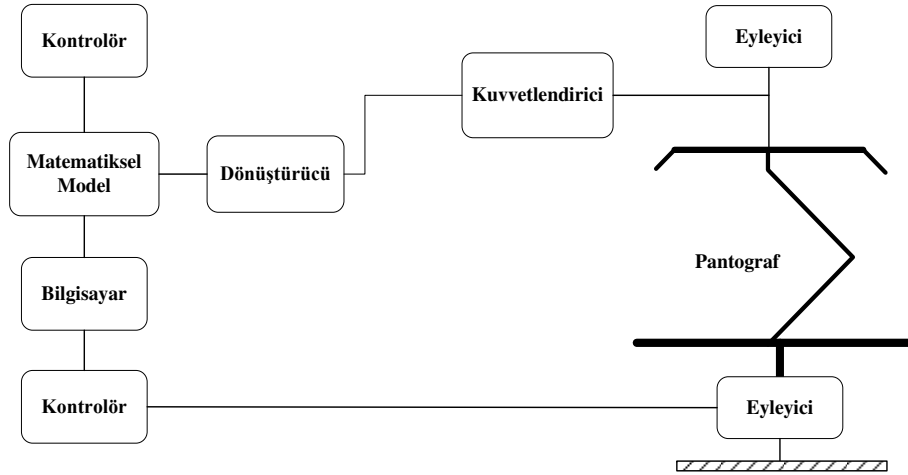
Şekil 1.3. Üç kütleli pantograf modeli [13].

Zhang [14], pantograf ve katener sistemlerinde akım toplama kalitesini belirleyen akım akışını iyileştirmek için pantograf parametrelerini ayarlamıştır. Diğer parametreleri sabit tutup pantograf tepe kütlelerini değiştirerek sayısal simülasyon üzerinden etkilerini incelemiştir. Tepe ağırlığı 8-10 kg arasında tutulduğunda temas kuvveti açısından daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmiştir.

Farhangdoust [15], ikinci dereceden bağımsız matematiksel model ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kararlılık analizi yapmaya çalışmıştır. Pantograf ve katener etkileşimi üzerinde dış kuvvetlerin etkilerini incelemiştir. Kütle, gerginlik, hız ve sönümleme parametrelerinin değişiminin kararlılık üzerindeki etkisini analiz etmiştir. İki farklı hız değerindeki (50 ve 100 m/s) temas kuvveti değeri hesaplanmıştır. Statik ve dinamik davranışları analiz ederek teorik verilerle karşılaştırmıştır.

Ambrosio [16], pantograf ile katener arasındaki etkileşimi optimize etmeye çalışmıştır. Pantografin tepe süspansiyonu üzerinde çalışarak ve onu geliştirmeye çalışarak temas kuvvetini optimize etmiştir. Temas kalitesini etkileyen en önemli faktör, temas kuvveti değişimidir. Bu nedenle bu çalışmada temas kuvvetinin standart sapması azaltılmaya çalışılmıştır. Optimizasyon işlemi genetik algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katener için sonlu elemanlar yöntemi, pantograf için ise toplu kütle yaklaşımı kullanılmıştır. Elde edilen model ve sonuçlar deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Ayrıca temas kuvvetinin standart sapmasının pantografin mekanik sınırlamaları nedeniyle %10- 15'den daha fazla azaltılamayacağı bilgisine ulaşılmıştır. Ancak sadece pantograf parametrelerinin optimize edilmeye çalışılmasının sistem performansı açısından yeterli olamayacağı, katener içinde optimize çalışmalarının yapılması ve farklı işletim şartlarının da dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Zhou [17], PAK sistemi için belirlenen parametrelerin değişiminin sistemin dinamik performansı üzerindeki etkilerini incelemiş ve parametreleri en uygun şekilde seçmeye çalışmıştır. Bu çalışmada da katener için sonlu elemanlar yöntemi, pantograf için toplu kütle modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında model 250 km/sa hız değerine kadar iyi çalışmakta, bu hız değerinden daha yüksek hız değerlerinde ise temas kayıpları oluşmaktadır. Bu sonuçlar, gerçek bir pantograf ve katenerin matematiksel modelinden oluşan hibrit bir test yönteminden elde edilen test verileri ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Hibrit test cihazı Şekil 1.4'de görülmektedir. Ayrıca kullanılan yöntemin verimli ve hızlı olduğu belirtilmiştir. Tasarım için kullanılan parametreler, pantograf tepe ve çerçevesinin yay sabitleri ve sönümleme katsayıları, statik kaldırma kuvveti ve temas teli gerilme değerleridir. Seçilen bu parametreler sistem performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir ancak daha gerçekçi bir model oluşturmak açısından yeterli gelmeyebilir. Modele kütlelerin değişim etkilerinin eklenmesi PAK sisteminin dinamik davranışının incelenmesi açısından daha iyi olabilir.



Şekil 1.4. Pantograf ve katener için oluşturulan hibrit test cihazı [17].

Rachid [18] çalışmasında hızlı trenlerde akım toplama kalitesini arttırmak için doğrusal matris eşitsizlikleri yaklaşımını kullanarak temas kuvvetinin kontrolünü ve gözlemini sağlamaya çalışmıştır. Bu yaklaşım formülasyonunun kolaylığı ve Matlab Toolbox gibi avantajlarından dolayı kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Burada da bu tür sistemin kontrolü için alternatif bir yöntem olarak sunulmuştur. Ancak sistemin dinamik davranışı tam olarak açıklanamamaktadır, bu nedenle ek önermeler verilmiştir. Referans kuvvet değeri 100 N alınmıştır. Sabit bir hız değeri için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Ancak değişken hızlarda da kullanılabilir olmasının sağlanması sistem davranışı açısından daha iyi olacaktır.

Kia [19], pantograf ve katener arasındaki etkileşimi ve temas gücünü incelemek için farklı katener ve pantograf modellerini araştırarak, aralarında karşılaştırmalar yapmıştır. Pantograf için yine çok kütleli model kullanılmıştır. Katener için üç farklı model kullanarak karşılaştırma yapmıştır. İlk model statik katener modelidir. Bu modelde düşük hızlar için elde edilen sonuçlar oldukça makuldür. Yüksek hızlarda elde edilen sonuçları iyileştirmek için Euler-Bernoulli kiriş modeline dayanan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Gerçek zamanlı olarak uygulayabilmek için modal analizi önermiştir. Elde ettiği sonuçları karşılaştırmış, gerçek zamanlı sistemde uygulanabilirliği ve uyumluluğu üzerinde durmuştur. Hesaplama sürelerini değerlendirmiştir.

Huang [20], sistemin sağamlığını artırmak ve pantograf pozisyon kontrolünü gerçekleştirebilmek için ayırık bulanık değişkenli yapı denetim yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımı, sistemin kendi dinamik yapısından ya da harici şartlardan oluşan düzensizliklere karşı olan duyarlılığını azaltmak için önermiştir. Basit bir yöntemdir ve sistemin kararlılığı sağlanabilmiştir.

Benet [21], farklı temas tellerinin olduğu durumda PAK sistemleri için matematiksel bir model önermiştir. Pantograf bu hatlardan kayarken kusursuz bir temasın sağlanması amaçlanmıştır. Pantograf için iki kteli yapı kullanılmıştır. İki farklı katener hattının bulunduğu ve bunların çakıştığı dşnlerek dinamik davranışları incelenmiştir. Her katener hattının sonundaki iki direk arasındaki boşluk geçiş boşluğudur ve çakışma bölgesi olarak tanımlanmıştır. Pantograf bu bölgede farklı boşlukların iki temas teli ile etkileşmektedir. Pantograf birinden diğerine geçerken düzgün bir temasın olması için temas tellerinde düzenlemeler yapılır. Bu alışma ile en uygun montaj şeklinin belirlenmesi ve Visual C programı kullanılarak hesaplama sresinde düşme sağlanmıştır.

Arias [22], PAK sisteminin statik denge denklemini çözebilmek için matematiksel bir model oluşturmuştur. Katener modeli oluşturulduktan sonra yüksek performanslı bir hesaplama algoritması ile statik denge denklemini çözmeye çalışmıştır. Bu algoritma ile hem hafıza kullanımı hem de işlem yapma süresi kısalırmıştır.

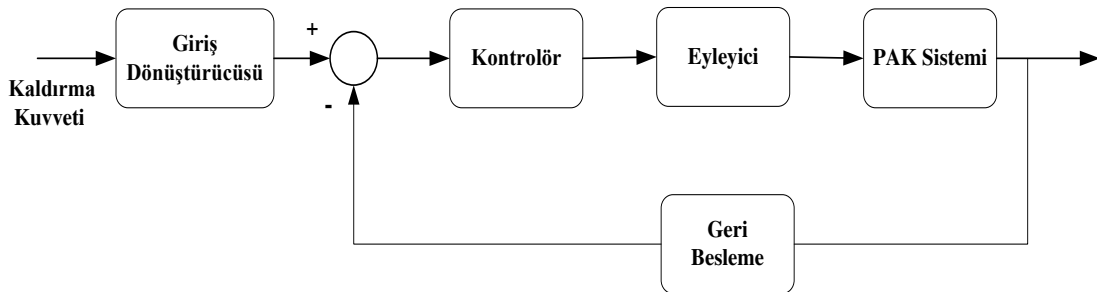
Zhou [23], sistemde iki pantografin bulunması durumunda bu iki pantograf arasındaki mesafenin etkilerini incelemiştir. Tek pantograflı ve çift pantograflı durumun sistem davranışına etkileri ve iki pantografin birbirine olan etkilerini yorumlamış ve karşılaştırmıştır. Pantograflardan ve aralarındaki mesafenin değişiminden oluşan dalga şeklini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, arkadaki pantograf öndekinin dinamik davranışını pek etkilemezken ndeki pantograf arkadakini çok etkilemektedir. n ve arka pantografıta oluşan dalga şekillerinin fazları aynıysa, bu durum titreşimi daha da arttırdığı için temas kalitesinin kötüleştiği yargısına varmıştır. Literatürde, PAK sistemlerini modellemek için toplu kütle, sonlu elemanlar ya da akıllı yöntemler gibi farklı teknikler kullanan birçok uygulama mevcuttur [24-29]. Temas kuvveti ve titreşim kontrolü analizi üzerine çalışılmış birçok çalışma da vardır [30-35]. Ayrıca araştırmacılar tarafından temas kuvvetinin değişimini azaltmak için çok fazla sayıda çalışma yapılmıştır [36-50].

1.5. Pantograf–Katener Sistemlerinde Aktif Kontrol Yaklaşımına İlişkin Literatür Özeti

Aktif pantograf sistemi, elektrikli demiryolu sistemleri için daha güvenilir ve konforlu olmasından, ayrıca daha az sistem arızası oluşmasından dolayı literatürde önemli bir yere sahiptir. Aktif pantograflar ile sistemdeki değişiklikler algılanır ve bu değişiklikler ile sistem davranışı uyumlu hale getirilir. Özellikle yüksek hızlarda aktif pantografların kullanımı daha uygundur. Çünkü hız arttıkça sabit temas kuvvetinin sağlanması zorlaşmaktadır ve daha iyi bir kontrol sağlanması gerekmektedir.

Mokrani [51], temas kuvveti kontrolü için PID kontrol kuralına dayanan, bulanık kayan mod kontrolör mantığını önererek aktif bir sistem geliştirmiştir. PAK sistemi için üçüncü dereceden bağımsız bir model oluşturulmuştur. Ek kompanzatör, modeli iyileştirmek için kullanılmıştır. Kazançlar bulanık mantık ile ayarlanmış ve 350 km/sa hız değeri için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Referans temas kuvveti değeri 100 N alınmış ve simülasyon sonuçları doğrulukla elde edilmiştir.

Garg [52] çalışmasında PAK sisteminin matematiksel modelini elde ettikten sonra PID kontrollü aktif bir model oluşturmuştur. PAK sisteminin açık çevrim ve kapalı çevrim transfer fonksiyonlarını elde etmiş ve kontrolör parametrelerinin etkilerini hassasiyet analizi kullanarak incelemiştir. Kapalı çevrim kontrol için blok diyagramı Şekil 1.5’de verilmiştir. Bunun daha önce literatürle benzerleri olmayan bir çalışma olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca tren hızı dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Temas telindeki dalgalanmaların frekansı artarsa hassasiyetin daha da arttığı belirlenmiştir.



Şekil 1.5. PAK sistemi için oluşturulan PID kontrolörün kapalı çevrim blok şeması [52].

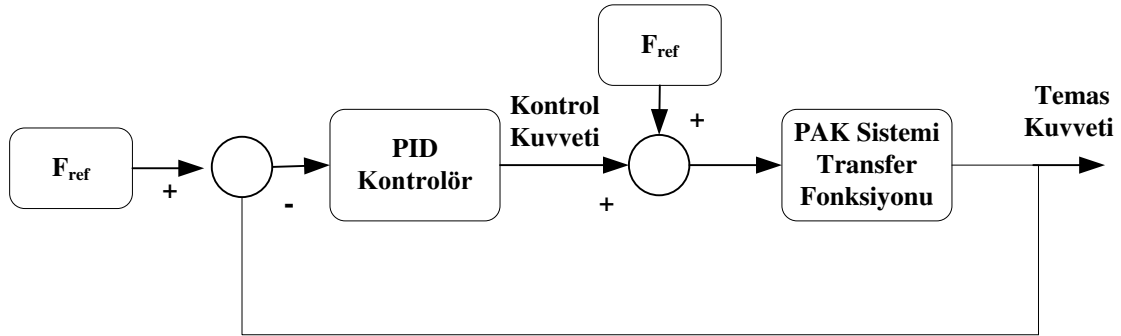
Yamashita [53], YHT’lerde temas kuvveti değişimini azaltmak için modern aktif bir kontrol tekniği sunmuştur. Pantografı hareket ettirici kuvvet, eyleyici tarafından pantograf tepesine ya da çerçevesine uygulanabilir. Tepesine uygulandığı zaman tepe ağırlığından artışa neden olduğu için bu çalışmada çerçeveye uygulanmıştır. Pantograf için iki tip aktif kontrol teknolojisi kullanmıştır. Bunlar PID aktif kontrol ve empedans kontroldür. Her iki kontrol tekniği için ölçüm sonuçları verilmiş ve yapılan karşılaştırmada empedans kontrolün frekans cevabı açısından PID kontrole göre daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak bu her iki yöntemin birbirini tamamlayıcı olduğu kararına varılmıştır. Bu nedenle her ikisinin birbirine olan faydaları ve birleştirilmeleriyle meydana gelecek yeni kontrol tekniğinin avantajları üzerine daha detaylı bir araştırma yapmak faydalı olacaktır.

Rusu [54] PAK sisteminin dinamik davranışını analiz etmek ve temas kuvvetini kontrol etmek için sayısal bir simülasyon yöntemi önermiştir. Analiz Tensi-Cable hesaplama programı ile gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantığa dayalı bir akıllı yönetim sistemi, PAK sisteminin aktif kontrolü için oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde pantografın hızı, anlık pozisyonu ve pantograf ile katenerin dinamik modelleri kullanılmıştır. Burada amaç temas kuvveti değişimini azaltmaktır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre 170 km/sa hız değerinden daha yüksek hızlarda kayıplar oluşabilmektedir. Model basit bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle, modelin geliştirilerek daha yüksek hız değerleri içinde kayıpsız sonuçların alınması daha uygun olacaktır.

Song [55], temas kuvvetini aktif olarak kontrol edebilmek için bağımsız bir çözüm modeli yaklaşımı önermiştir. Esas amaçlar düşük maliyetli ve sistem parametrelerinden bağımsız bir kontrol sistemi oluşturmaktır. Bu nedenle uyarmalı kontrol, yüksek kazançlı gözlemci ve PI kontrolle birleştirilmiştir. Katenerin kütle, yay sabiti ve sönümleme dinamikleri ayrı ayrı verilmiştir. Düzgün ve kaliteli bir temas bu yöntemle sağlanmış ve elde edilen sonuçlar teorik verilerle doğrulanmıştır.

Rebollo [56], çok ölçütlü aktif kontrol ile temas kuvvetinin optimizasyonunu amaçlamıştır. Bunun için genetik algoritma ve farklı yapılandırılan PID kontrolör yaklaşımlarını önermiştir. Kontrol stratejisi, önce toplu kütle PAK yaklaşımına sonra sonlu elemanlar yaklaşımına uygulanmıştır ve her ikisinin kontrol performansı incelenerek simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada referans kuvvet değeri 120N alınmıştır.

PID kontrol için oluşturulan simulink modelinin blok şeması Şekil 1.6'da görülmektedir. Toplu kütle modelinin temas kuvvetinin değişimini % 70 oranında azalttığı belirtilmiş ve oldukça verimli olmuştur. Sonlu elemanlar yönteminin ise değişimi % 10 oranında azaltmasına rağmen tercih edilebilir olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada güçlü bir kontrol stratejisi elde edilmesine rağmen daha geniş manada kullanabilmek için derinlemesine bir çalışmaya ihtiyaç vardır. Ayrıca PID kontrolör yerine PI kontrolör kullanımının daha uygun olacağı belirtilmiştir.



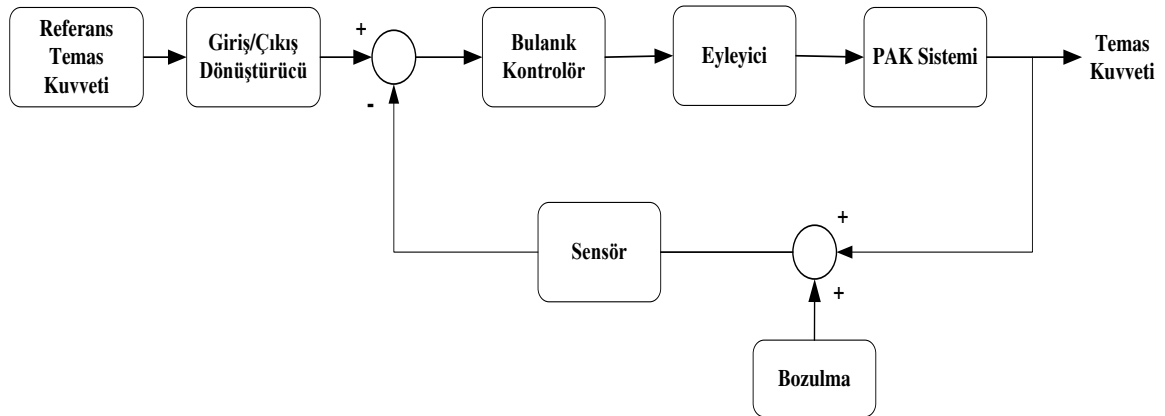
Şekil 1.6. PID aktif kontrol sisteminin blok şeması [56].

Abdullah [57], havai temas teli esnek bir yapıya sahip olduğu için çoklu gövde dinamik analizi yaklaşımını kullanmıştır. Gövdenin dikey titreşimlerinin temas kuvveti üzerindeki etkilerini azaltabilmek için aktif pantograf kontrolü geliştirilmiştir. Çift temas noktalı pantograf dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, titreşim hareketi kontrolörün girişidir ve eyleyici bununla aynı genlikte fakat farklı yönde bir titreşim oluşturarak onu bozar. Ayrıca simülasyon sonuçlarında farklı hız değerlerinde temas kuvvetinin değişimi, kontrolör kullanılan ve kullanılmayan durumlar için verilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile titreşimlerin sönümlenmesi için aktif pantograf kullanılması farklı bir uygulama olmuş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Aynı yazarın aktif pantograflar üzerine başka çalışmaları da vardır [58-60].

Yan [61] çalışmasında dördüncü dereceden bağımsız pantograf matematiksel modelini kullanarak temas kuvveti değişimini azaltmak için aktif bir kontrol sistemi oluşturmuştur. Bu amacı yerine getirebilmek için aktif bir süspansiyon sistemi olan skyhook amortisör ve hat izleme yaylarını kullanmıştır. Skyhook amortisör yayların kütlelerinin etkilerini azaltmak için, hat izleme yayları ise katener hattının hareketini izlemek için kullanılmıştır. Burada pantograf dört kütleli bir yapıya sahiptir.

Bu yapılar, piston, çerçeve ve iki tepe kütlesidir. İki tepe kütlesi olduğundan dolayı iki temas kuvveti oluşmaktadır. Her bir kütlenin pasif ve aktif durumdaki ivmelenmesi, hızı ve yer değiştirmesi hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Pasif kontrollü durumun oldukça kararsız olduğu belirlenmiştir. Bu durum temas kalitesini kötü etkilemektedir.

Walters [62], Matlab’da pantograf katener sistemi için bulanık mantık kullanılan bir esnek aktif kontrol sistemi oluşturmuştur. Basitleştirilmiş mekanik model ile sistem açıklamış ve PAK sisteminin durum uzay formu oluşturulduktan sonra transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Amaçlanan bulanık aktif kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 1.7’de verilmiştir. Temas kuvveti değişimi, temas kuvveti değişimi ile oluşan yer değiştirme miktarı ve temas kuvvetinin oluşması için gerekli eyleyici kuvvet için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışma sistemin modellenmesinde başlangıç aşaması için yeterli olabilir ama daha ayrıntılı bir model oluşturabilmek için geliştirilmesi gerekmektedir. Katener içinde ayrıntılı bir incelemeye ve modellemeye ihtiyaç vardır.



Şekil 1.7. Bulanık aktif kontrol sisteminin blok şeması [62].

Bandi [63], temas kuvvetini düzenlemek için kapalı çevrim geri beslemeli aktif bir kontrol sistemi oluşturmuştur. Aktif kontrollü durum için sistemin köklerinin yer eğrisini ve basamak cevabını çizdirmiştir. Basamak cevabı yetersiz kaldığından, bunu geliştirmek için durum geri besleme yaklaşımını kullanmıştır. Bu yaklaşımı uyguladıktan sonra basamak cevabı için tekrar sonuç almıştır. Yerleşme süresi ve sönümlenme açısından gayet makul bir sonuç elde etmiştir. Ancak kalıcı durum hatasını yok etmek için integral alıcıya gerek olduğunu belirtmiştir.

Pisano [64], çalışmasında temas gücü tahmini için aktif pantografli cebirsel bir yaklaşım kullanmıştır. Temas kuvvetini ölçme yöntemini tercih etmeyip, alt ve üst çerçevenin yer değiştirmesini ölçerek temas kuvvetini tahmin etmeye çalışmıştır. Sistemin girişi olarak düşünülen ve bilinmeyen temas kuvvetini tahmin edebilmek için cebirsel yaklaşımı kullanmıştır. Alt ve üst çerçeve için kontrol algoritmaları oluşturmuştur. Her iki çerçeve için temas kuvveti ve temas kuvveti tahminindeki hata oranları için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre üst çerçeve kontrolörünün kontrol yaklaşımı açısından daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Matvejevs [65] ise, temas gücü etkilerini azaltmak için özel pantografların geliştirilmesini düşünmüş, ancak bunların pratik olarak geliştirilmesi maliyet açısından çok zor olduğundan Matlab-Simulink'te modelleme yapıp aktif ve pasif kontrol sistemlerinin sonuçlarını simülasyon üzerinde görmeye çalışmıştır. Xiaodong [66] titreşimleri azaltmak için kendinden uyarlamalı aktif kontrolü PAK sisteminin süspansiyon sistemine uygulanmasını gerçekleştirmiştir.

Taran [67], kapalı çevrimli aktif bir öngörülü kontrol modeli ve yatay hareket tahmini yaklaşımlarını önermektedir. Pantograf için iki kütleli model oluşturulmuştur. Referans kuvvet değerini 100 N alarak düşük bir hız değeri için öngörülü kontrol yöntemiyle simülasyon sonucunu elde etmiş ve her iki yaklaşım için sonuçlar elde ederek karşılaştırmıştır. Ayrıca, değişken hız değeri için de aynı şekilde sonuçlar elde etmiştir. Öngörülü model katener sertliğinin zamanla değişen karakteristiğini belirlemek için kullanılır. Sabit hız değerleri için model iyi sonuçlar vermektedir. Ancak değişken hızlarda meydana gelebilecek tüm etkileri karşılayamamaktadır.

Literatürde PAK sistemlerinde aktif kontrol sisteminin oluşturulabilmesi için yapılan tez çalışmaları [68, 69] ve aktif kontrol için farklı kontrol teknikleri kullanan birçok çalışma mevcuttur [70-72]. Bu çalışmaların bir kısmı deneysel, bir kısmı gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir [73-81]. Değişik yöntemlerin kullanıldığı ve tanımlama yapılarının oluşturulduğu uygulamalar da bulunmaktadır [82-87].

1.6. Pantograf–Katener Sistemlerinde Arıza Teşhisine İlişkin Literatür Özeti

Elektrikli demiryolu ulaşım sistemlerinde bazı sorunlar ve bunların çözüm yöntemleri mevcuttur. Pantografin yatay yönde hareketi, bu yöndeki dengesi, katenere pantograf tarafından uygulanan temas kuvvetinin değişimi, bu kuvvet değişiminin neden olduğu dalgalanmalar, uygun temas oluşmaması nedeniyle meydana gelen ark ve aşınmalar, bu tür sistemlerde meydana gelen en önemli sorunlardan birkaçıdır.

Pantograf ve katener arasındaki etkileşim uygun değilse, temas ve trenin enerjisi kesilmiş olabilir ya da katener zarar görebilir. Temas telinin titreşimleri ve dış etkiler, temas kuvvetinde değişimlere bu da sistemde kayıpların oluşmasına, kararsızlığa ve arızalara neden olabilir. Elektrikli demiryolu sistemlerinde arıza teşhisinin simülasyon çalışmasını gerçekleştirebilmek için, sistemin ayrıntılı olarak adım adım analiz edilmesi gerekmektedir. Bu tür sistemlerin kurulması çok zor ve pahalıdır. Çevresel koşullar veya beklenmeyen etkiler nedeniyle yanlış bir arıza teşhisi olabilir ve bu arızalar kazalara veya çalışmada kesintiye yol açabilir. Bu nedenle, mevcut sistemleri en iyi şekilde kullanmak ve değerlendirmek gerekmektedir. Dünya genelinde demiryolu sistemlerinde periyodik izleme, arıza tespiti ve gerekli bakımın önceden tahmin edilebilmesi son derece önemlidir. Demiryolu sistemlerinin aylık kontrolleri birçok ülkede kesintisiz bir şekilde yapılmaktadır. Temel olarak, kontroller iki önemli noktada odaklanır. Bunlar ray profilinin ve katener hattının izlenmesidir. Rayların aşınması, kırılması, bükülmesi, katener hattı gerilmesi, temas durumu, katener hattı ile pantograf ekseninin uyumluluğu gibi kazalara neden olan faktörler incelenerek kazalar önceden belirlenmeye çalışılmaktadır.

Araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmaların ana amacı trene iletilen akımın toplama kalitesini arttırmaktır. Özellikle, hız artarken akım toplama kalitesi düşer, hatta temas kaybı bile gerçekleşebilir. Bu nedenle, demiryolu sistemlerinde arızaların tespit edilmesi ve uygun denetim tekniklerinin belirlenmesi çok önemlidir. Wang [88] çalışmasında, pantograf temas şeridi ve temas telinin bir sürtünme çifti oluşturduğunu vurgulamış ve aşınma analizi için incelemeler yapmıştır. Temas basıncı, temas şeridi hızı ve temas akımının, aşınma karakteristiği üzerindeki etkilerini göstermiştir. Deneysel veriler elde etmek için yüksek performanslı kayan temas test makinası kullanmıştır. Bazı test etme ve eğri uydurma yöntemleri kullanarak aşınmanın matematiksel modelini oluşturmaya çalışmıştır. Temas basıncının değişim değerine bağlı olarak elektriksel ve mekanik aşınmadan bahsetmiştir. Temas basıncının küçük değerleri için elektriksel

aşınmanın ve büyük değerleri için mekaniksel aşınmanın oluşacağını belirtmiştir. Bu nedenle uygun temas basıncının önemini anlatmaya çalışmıştır. Hız artınca temas noktaları daha hızlı geçileceği için oluşan ısı daha az olacak ve aşınma azalacaktır. Akımın artmasıyla sıcaklık artacağı için aşınma da artmaktadır. Burada belirtilen üç faktörün dışında diğer faktörlerin de incelenerek yorumlanması ve sistem modelinin bunlara göre oluşturulması daha uygun olacaktır.

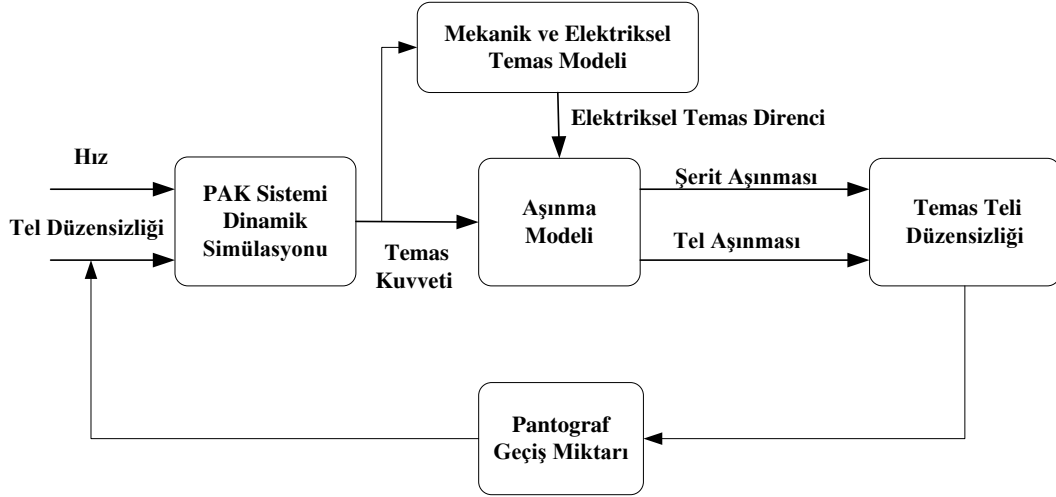
Ding [89], katenerin bakır temas teli ile pantografin karbon temas şeridi üzerinde arkın aşındırıcı etkisini karakterize etmeye çalışmıştır. Bunun için geniş skalalı bir test edici belirleyerek deneysel çalışmalar yapmıştır. Ark karakteristiğini ve aşınma mekanizmasını belirleyen iki durumu göz önüne alarak incelemeler yapmıştır. Bu durumlar ark aşınması ve oksitlenme aşınmasıdır. Elektrik akımındaki değişime bağlı olarak sürtünme katsayısındaki ve aşınma oranındaki değişimi değerlendirmiştir. Ark olduğu zamanki sürtünme katsayısının, ark olmadığı zamankinden daha düşük olduğunu belirlemiştir. Dolayısıyla temas şeridi aşınma oranının, ark olduğu zaman oldukça fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Oksitlenme aşınmasının pantograf ömrü açısından ciddi bir etkisi olduğu, ancak ark aşınmasının daha fazla ömrü etkilediği sonucuna varmıştır. Aynı yazarın aşınma ve sürtünme analizi üzerine de çalışması vardır [90].

Östlund [91], kış mevsiminde pantograf temas şeridi için bir durum izleme yaklaşımı vermiştir. Kış aylarında meydana gelen buzlanma sonucu temas teli ve temas şeridi arasında oluşan ark aşınmaya neden olmaktadır. Bu ark oluşumu aynı zamanda akımda bir DA bileşeni oluşmasına da neden olmaktadır. Akımda oluşan DA bileşeni kullanılarak temas şeridi aşınması izlenmeye çalışılmıştır. Akım, gerilim, hız, ark ışıqlanması durumu gibi sinyaller izlenerek kaydedilmiş, gerekli analiz ve işlemler uygulanmıştır. Ama bu tür sistemlerde aşınma sadece arkten dolayı oluşmamaktadır. Daha detaylı bir aşınma ya da ark analizi yapılması gerekmektedir.

Ocoleanu [92], katener temas telindeki sıcaklık transferinin analizi için tekrarlı deneysel bir kural belirlemiştir. Temas teli bakır ve 100 mm² kesitlidir. Teknik hesaplamalar için Mathcad programı kullanılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen farklı akım değerlerine karşılık sıcaklık katsayı değerleri kullanılmış ve grafikler çizdirilmiştir. Ayrıca olası hata değerleri hesaplanmıştır ve belirli bir akım değerine kadar hata değerinin küçük olduğu belirlenmiştir. Bu değerın sayısal simülasyonlar için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Nituca [93], farklı malzemelerden yapılan temas bileşenleri yani pantograf ve katenerin arasındaki etkileşimin uygunluğunun oluşabilmesi için, temasın termal bir modelini yapmayı önermiştir. Pantografin grafitten, temas telinin de bakırdan yapıldığı temas çifti için model oluşturmuştur. Her iki bileşen için en yüksek temas sıcaklığı ve ısınma dağılımı belirlemeyi amaçlamıştır. Oluşturduğu model ile kalıcı durum şartlarında farklı akım, temas kuvveti ve temas noktası yakınındaki sıcaklık değerleri için termal davranışı analiz etmektedir. Farklı temas kuvveti değerlerinde akıma karşılık, gerilim düşümü, güç kaybı ve termal güç değişimi değerleri için grafikler elde etmiştir. Her seferinde değiştirilerek alınan sabit temas kuvveti değeri için, farklı akım ve uzunluk değerlerindeki sıcaklık dağılımını elde etmiştir. Sabit akım değerine karşılık ise farklı temas kuvveti değerlerindeki sıcaklık dağılımını elde etmiştir. Model farklı şartlarda farklı materyallerden yapılan yeni temas durumlarındaki termal olayların açıklanmasına imkan sağlayabilmektedir.

Bucca [94], pantograf ve katener çiftinin, temas teli ve temas şeridinde oluşacak aşınmanın modeli için bir prosedür önermiştir. Farklı malzemelerden yapılan temas şeridinde farklı hızlarda, farklı temas kuvveti ve akım değerlerinde aşınma analizi yapabilmek için laboratuvar testleri gerçekleştirmiştir. Laboratuvar test cihazından ve aşınma haritalanmasından elde edilen sonuçlar, aşınma modelini düzenlemek için kullanılmıştır. Öncelikle test cihazı belirlenmiş, sonra pantograf ve katener arasındaki etkileşim ve temas modellenmiş, son olarak da aşınma tahmini yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem iki bölüme ayrılmaktadır. Birincisi DA hattında karbon ve grafit malzemeden yapılan temas şeridinin aşınma analizi ve ikincisi temas telindeki mekanik gerilme miktarının değişimiyle oluşan aşınma analizidir. Aşınma modeli için oluşturulan şema Şekil 1.8’de verilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları ile temas teli ve temas şeridi için akım değişimine karşılık, aşınma oranı değişimi elde edilmiştir. Grafit temas şeridi kullanıldığı zaman, akım değişimine karşılık, temas şeridi ve temas teli için bulunan, test cihazı ve aşınma modelinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde bakır temas şeridi için de sonuçlar elde edilmiş ve grafit için elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca direkler arasındaki boşluğun ve temas teli mekanik gerilmesinin değiştiği durumlar için de sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bunların sonucunda bakır temas şeridi kullanıldığı zaman temas telindeki aşınma miktarının ve temas şeridindeki aşınma derinliğinin arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.8. Aşınma modeli şeması [94].

PAK sistemlerinde oluşan arıza türleri üzerine birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, sistemin arıza teşhisi için yeni yöntemler önerilmektedir. Boguslavskii [95] gerçek zamanlı bilgisayar görme sistemleri için yüksek seviyeli görüntü işleme yöntemleri hakkında algoritmalar önermiştir. Ayrıca pantograf görüntüsüne, filtre uyguladıktan sonra Canny Kenar Çıkarım algoritmasıyla birlikte pantografteki nesneleri tespit etmek için ön çalışma yapmıştır. Algoritmalar geliştirerek gerçek zamanlı pantografin konumunu tespit edip yüksekliğini bulmaktadır. Donnel [96] pantograf izlemenin yanı sıra gerçek zamanlı trafik koşullarında denemeler yapmak üzere yenilikçi bir durum izleme teknolojisinin temel özelliklerini tarif ederek, plan ve mevcut durumu anlatmıştır. PAK sisteminin nesiller arası gelişiminden bahsederek kullanılan teknolojileri anlatmıştır. Li [97] pantograf temas şeridinin aşınmasını tespit etmek için bir yaklaşım ve görüntü işleme algoritması geliştirmiştir. Görüntü içinde kenarları elde etmek için dalgacık dönüşümünü ve şeridin alt ve üst kenarlarını elde etmek için Hough Dönüşümünü kullanmıştır. Ayrıca sözde kenarları ortadan kaldırmak için kenar bağlama özelliklerini kullanmıştır. Pratik test ile bu şeridin kenarlarının yüksek doğruluk oranıyla algılandığını belirtmiştir. Xiao-Heng [98] pantograf şeridinde oluşan aşınmaları kenar algılama ve çıkarım algoritmaları üzerinde incelemiştir. Bağıntı türü fotoelektrik sensörler ve kameralara dayanarak, pantograf kızağı sisteminin çevrim içi incelenmesi sunulmuştur. Kurulması uygun olan ve maliyeti düşük olan bir sistem önermiştir. Bu çalışmada kullanılacak kenar algılama ve çıkarım algoritmalarını kullanarak en uygun kenar çıkarım algoritmasını tespit etmiştir.

Midya [99] PAK sistemlerinde oluşan ark arızaları için, akım ve gerilim değerlerini incelemiştir. Pantograf ve katener sistemini temsil eden bir model yapı oluşturarak modelde oluşan ark türlerinin, akım ve gerilim değerleriyle tespit edilebilmesi için akım ve gerilim sinyallerini incelemiştir. Facchinetti [100] PAK sisteminin birbiriyle temasını sağlayan hibrit bir model geliştirmiştir. Geliştirilen bu model gerçek zamanlı çalıştırılarak PAK sisteminde oluşabilecek ark, ısınma ve aşınma problemlerini çözmek için bir uygulama önerilmiştir. Jian-Ping [101] lokomotif tepesi ve pantograf arasındaki mesafeyi ölçerek, lazer faz aralığı prensibi teknolojisine dayanan dinamik bir ölçüm yöntemi geliştirmiştir. Bunlar dışında ark, titreşim, aşınma, sürtünme ve termal analizinin yapıldığı birçok farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [102-118]. Pantograf ve katener sistemleri ve bu sistemlerde oluşabilecek arızaların incelendiği ve değerlendirildiği çalışmalar da mevcuttur [119-125].

Literatürde PAK sistemlerinin modellenmesi, aktif kontrolü ve arıza teşhisi için kullanılan yöntemler ve eksiklikleri Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. PAK sistemlerinde kullanılan yöntemler

Tezin Amaçları	Amaçlarla İlişkili Noktalar	Referanslar	Literatürdeki Eksiklikler
Pantograf -katener sisteminin modellenmesi ve simülasyonu	PAK sistemi için toplu kütle modelinin ve sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanılması.	[11, 13,15, 19, 24, 28]	- Değişken hız değerleri ve yüksek hız değerleri için kararlı çalışamama durumu. - Modelleme yaparken çok fazla ihmal yapılması. - Farklı işletim şartlarının dikkate alınmaması.
	Sistemi oluşturan parametrelerin analizi.	[12, 14,16, 17, 30, 46, 47]	
	Pantograf ve katener arasında oluşan temasın analizi.	[16, 21,22, 27, 32-35, 39, 40, 42, 44, 47]	
	PAK sisteminin modellenmesi ve incelenmesi için farklı ve akıllı yöntemler kullanılması.	[16, 20, 26, 29, 37, 38, 43]	
	Farklı pantograf türlerinin incelenmesi.	[23, 25, 48]	
	Modelleme için Matlab programının kullanılması	[18, 41]	
	Pantograf, katener, ray ve tren modeli birleştirilmesi.	[45, 49, 50, 83]	
Pantograf –katener sisteminde temas kuvveti için aktif kontrol yaklaşımlarının geliştirilmesi	Aktif kontrol için bulanık mantık ve diğer akıllı yöntemlerin kullanılması.	[51, 54,56, 62, 71]	- Etkileşim sonucu oluşan dalgalanmaların sistem üzerindeki olumsuz etkileri. - Yüksek hızlarda kayıpların artması. - Sistemin hassasiyetinin göz önüne alınmaması.
	DeneySEL ve gerçek zamanlı uygulamalar yapılması.	[73-77, 80, 81, 86]	
	Temas kuvveti analizi için tahmini ve yenilikçi yöntemlerin kullanılması.	[66, 67, 69, 70, 85]	
	PID kontrolör kullanımı ve kontrolör parametrelerinin etkilerinin incelenmesi.	[52, 53, 55, 56, 63]	
	Pasif ve aktif kontrol modellerinin oluşturulup karşılaştırılması.	[61, 65, 72]	
	Aktif kontrol için sistem tanımlama yapılması.	[59, 84, 87]	
Pantograf –katener sisteminde durum izleme ve arıza teşhisi için yöntem geliştirilmesi	Arıza teşhisi için durum izleme ve görüntü işleme tekniklerinin kullanılması.	[78, 91, 95-98, 101, 114, 122]	- Pantograf ve katener için sadece birkaç faktörün etkilerinin incelenmesi. - Değişen mevsim ve iklim şartlarının etkilerinin incelenmemesi. - Akım değeri arttıkça hata değerinin de artması.
	Ark analizi yapılması.	[89, 99, 100, 102, 104, 109, 110, 113, 115, 117]	
	Titreşim analizi yapılması.	[57, 66, 83, 108, 118]	
	Sürtünme analizi yapılması.	[90, 107, 108]	
	Aşınma analizi yapılması.	[94, 97, 98, 100, 107, 123]	
	Termal analiz yapılması.	[92, 93, 100, 105, 106]	
	Test yöntemlerinin kullanılması ve deneysel çalışmalar.	[89, 92, 94, 123]	
	PAK sistemi karakteristiklerinin arıza oluşumuna etkisi.	[40, 103, 111, 112, 119-121, 123-125]	

PAK sistemleri için birçok farklı yöntemin uygulandığı Tablo 1.1'den görülmektedir. Bu yöntemlerde PAK sisteminin modellenmesi için yapılan çalışmalar genellikle sabit tren hızı değeri için iyi sonuçlar vermektedir. Ancak değişken hız değerlerinde aynı şekilde çalışmamaktadırlar. Bu nedenle değişken hız değerleri için geliştirmelerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca hız değeri sabit olmasına rağmen yükseldikçe temas kayıpları oluşabilmektedir. Özellikle hız artarken sistemin kararlılığının bozulmaması daha uygun olacaktır. Modelleme yapılırken sistemi oluşturan çok fazla bileşen olduğu ve her biri ayrı bir etkiye sahip olduğu için bazı ihmaller yapılmaktadır. Yapılan ihmalleri en aza indirmek daha gerçekçi bir model elde edebilmek için önemlidir. Ayrıca sistemi etkileyen farklı işletim şartlarının ve parametre etkilerinin incelenmesi gerekmektedir.

Literatürde parametre analizi yapılan çalışmalar mevcuttur. Ancak genellikle temas telinin parametreleri veya pantograf parametreleri üzerinde durulmuştur. Temas teli ve pantograf parametrelerinin beraber değerlendirilmesi daha detaylı bir analiz olması açısından verimli olacaktır. Ayrıca PAK sistemini oluşturan her parametrenin göz önüne alınması ve incelenen her parametrenin etkilerinin tam anlamıyla açıklanması gerekmektedir. Aktif kontrollü bir pantograf modeli oluşturulurken sistem modeli de daha ayrıntılı bir hale gelebilmektedir. Ancak osilasyon frekanslarının etkilerinin detaylı olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Çünkü frekans arttıkça sistem daha duyarlı hale gelmekte ve bu kararlılığı etkilemektedir. Aktif pantograf oluşturmak için kullanılan yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesi, ileride yapılacak çalışmalar için yol gösterici olacaktır.

Bu tür sistemlerde oluşan arızalar ve etkileri büyük bir çeşitlilik göstermektedir. PAK sistemini oluşturan bileşenlerin yapıldığı malzemeler, karakteristik özellikleri, parametre etkileri, mevsim şartları, akım değeri, hız değeri ve temas kuvveti değişimlerinin her birinin sistem üzerindeki etkileri farklıdır. Yapılan çalışmalarda oluşan arızaları irdeleyebilmek için arıza oluşmasına neden olan aşınma, sürtünme, ark, sıcaklık ve titreşim gibi birçok faktör analiz edilmiştir. Bu faktörlerden birinin oluşması aslında diğerlerinin oluşmasına da neden olmaktadır. Bu nedenle sadece birinin değerlendirilmesi tam bir arıza analizi için yetersiz kalmaktadır. Bir faktörün etkileri değerlendirilirken diğer faktörlere olan etkisinin ve birden fazla faktörün aynı anda sistem üzerindeki etkilerinin iyi araştırılıp değerlendirilmesi gerekmektedir.

1.7. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı; Dünya’da ve özellikle Avrupa’da giderek daha popüler hale gelen elektrikli demiryolu sistemleri için kullanılan PAK sisteminin modellenmesi ve tüm sistemde durum izleme ve arıza teşhisi için yeni yöntemlerin geliştirilmesidir. Bu kapsamda tezde hedeflenen çalışmalar aşağıdaki gibi verilebilir.

- *PAK sisteminin modellenmesi ve simülasyonu:*

Demiryolu sistemlerinde yapılacak bilimsel ve endüstriyel araştırmaların gerçek saha koşullarında yapılması, hem maliyet, hem de uygun tren hattının bulunması açısından neredeyse imkansızdır. Bu konuda yapılan çalışmalarda özellikle bilgisayar modellerinin oluşturulması araştırma çalışmalarına önemli katkı sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında sistem kalitesinin geliştirilmesi, ölçüm ve araştırma maliyetlerinin azaltılması ve parametre değişimlerinin sistem davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması için, PAK sisteminin modelinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Şu ana kadar yapılan modelleme çalışmalarında pantograf parametrelerinin etkisi tam olarak açıklanmamıştır. Ayrıca akıllı kontrol teknikleri modelleme için pek kullanılmamıştır.

- *PAK sisteminde temas kuvveti için kontrol yaklaşımlarının geliştirilmesi:*

PAK sistemlerinde, pantografin katener hattına doğru kuvvetle temas etmesi son derece önemlidir. Temas kuvvetinin az veya fazla olması önemli enerji kayıplarına, katener teli ve pantograf yüzeyinde hasar oluşumuna ve tehlikeli seviyede arkların oluşmasına sebep olmaktadır. Katener hattı ve pantograf sistemi esnek sistemler olduğundan, özellikle yüksek hızlarda enerji iletiminde osilasyonların kompanze edilmesi, pantograf yüzeyi ile katener hattı arasındaki gürültü ve aşınmanın azaltılması ve sürekli temasın sağlanması son derece önemlidir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında pantograf ile katener arasındaki temas kuvvetinin aktif ve etkili kontrolü için kullanılabilecek yöntemler geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

- *PAK sisteminde durum izleme ve arıza teşhisi için yöntem geliştirilmesi:*

Dünya’da demiryolu sistemlerinin periyodik olarak izlenmesi, arızaların tespiti ve buna karşılık gerekli bakımların önceden öngörülerek yapılması son derece önemlidir. Birçok ülkede raylı sistemlerde aylık kontroller aksatılmadan yapılmaktadır. Bu kontroller temelde ray profilinin izlenmesi ve katener hattının izlenmesi olmak üzere iki temel noktada yoğunlaşır. Rayların aşınma, kırılma ve burulma gibi durumları incelenirken, katener hattının gerginliği, temas durumu, pantograf eksenine ile katener hattının uyumluluğu

gibi birçok faktör incelenerek kazalara sebep olacak etkenler önceden belirlenmeye çalışılır. Bu nedenle bu tez çalışmasında; geliştirilecek modelleme, kontrol ve analiz yöntemleri ile ilave yöntemler kullanılarak, katener pantograf sisteminde durum izleme ve arıza teşhisi yöntemlerinin sunulması amaçlanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan bütün çalışmaların geliştirilmesi için Matlab-Simulink programı kullanılmıştır. İnternet veri tabanları, TCDD verileri ve bu konu üzerine çalışan araştırmacılardan veriler alınmış ve bu veriler üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Matlab-Simulink'de gerçekleştirilmiş olan simülasyonlar ile elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve gerçek sistemlerde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1.8. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması yedi ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde öncelikle elektrikli demiryolu sistemlerinin genel yapısından ve tarihsel gelişiminden kısaca bahsedilmiştir. Pantograf ve katener hakkında bilgi verildikten sonra tezin amacı kapsamında hedeflenen aşamalar için literatür taraması yapılmıştır. Bazı çalışmalarda kullanılan yöntemler ve blok şemaları incelenerek verilmiştir. Genel olarak ne tür yöntemler kullanıldığı ve bu yöntemlerde görülen eksiklikler bir tablo halinde özetlenmiştir.

İkinci bölümde, öncelikle pantograf ve katener sistemleri ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra birleştirilerek PAK sistemi ayrıntılı olarak incelenmiş ve sistemi oluşturan bileşenler belirtilmiştir. Gerçek fotoğraflar da kullanılarak sistemin tam olarak anlaşılması hedeflenmiştir.

Üçüncü bölümde, PAK sisteminin matematiksel modelini oluşturabilmek için araştırmalar yapılmıştır. Titreşimli sistemleri açıklarken kullanılan yay-kütle sistemleri PAK sistemleri için de kullanılmaktadır. Bu nedenle öncelikle bu sistemin temelini oluşturan yay-kütle sistemleri açıklanmıştır. Daha sonra PAK sistemi tanımlanıp, parametreleri belirlenerek ayrıntılı modeli elde edilmiştir. Matematiksel model elde edildikten sonra sisteme etki eden birçok parametrenin etkisi göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. PAK sisteminin akım toplama kalitesi üzerinde parametre değişimi etkileri açıklanmıştır.

Pantograf parametreleri tek tek değiştirilerek her birinin farklı değerleri için yeni transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Her yeni transfer fonksiyonu için simülasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları birbirleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölümde, temas kuvvetinin kontrol edilebilmesi için aktif pantografların öneminden bahsedilmiştir. Aktif kontrol için geliştirilen algoritmalarda geleneksel tekniklerin yanı sıra akıllı kontrol tekniklerinden de yararlanılmıştır. Bulanık mantık ve görüntü işleme yaklaşımları kullanılarak aktif pantograf sistemleri oluşturulmuş ve temas kuvvet değişimi analiz edilmiştir. Görüntü işleme yöntemleri kullanılarak pantografin olması gereken yüksekliği hesaplanmıştır. PAK sistemlerinde oluşan problemlerin izlenebilmesi için pantograf sisteminin davranışı incelenmiştir. Lokomotifin üzerinde bulunan normal kameralar kullanılarak PAK sisteminin gerçek zamanlı görüntüsü alınmıştır. Alınan görüntü üzerinde Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü uygulanarak pantograf temas bölgesi tespit edilmiştir. Tespit edilen pantograf temas bölgesinden pantograf yüksekliği hesaplanmıştır. Bu işlem gerçek zamanlı çalıştırılarak pantografin davranışı incelenmiştir.

Beşinci bölümde, yapılan çalışmalara ek olarak arıza teşhisi teknikleri kullanılarak sistemin geliştirilmesi sağlanmıştır. Pantograf yüzeyinde oluşan temas, eğer hat uygun şekilde döşenmezse hep aynı noktada oluşmakta, bu da pantografta aşınmaya neden olmaktadır. Elektrikli demiryolu sistemlerinde katenerin temas telinin pantograf yüzeyinde hep aynı noktaya sürtünmesini engellemek için katener hattı ray hattından belirli değerde kaçırılır. Böylece temas pantograf yüzeyinde belirli bir alan içinde sürekli farklı noktalara geçerek gerçekleşir. Belirlenen güvenli bölge dışında olan bir temas sorunlara neden olabilmektedir. Hatta pantografin uç kısımlarına doğru ya da boynuzlarında oluşan bir temas ciddi arızalara neden olabilmektedir. Bu nedenle beşinci bölümde, PAK sistemleri için durum izleme yaklaşımına dayanan bir arıza teşhis yöntemi iki aşamalı olarak oluşturulmuştur. İlk olarak önerilen analiz yaklaşımı ile temas telinin pantograf yüzeyinde değdiği noktalar incelenmiştir. Pantograf yüzeyi bölgelere ayrılarak hangi bölgelerde temasın oluşabileceği ve hangi bölgelerde oluşamayacağı açıklanmıştır. Farklı hız değerleri için simülasyon sonuçları elde edilmiş ve pantograf yüzeyinde temasın olduğu noktalar analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen veriler ile aşınmanın en fazla olduğu bölgeler ve pantografin kullanım ömrü belirlenebilmektedir.

Daha sonra tren üzerine yerleştirilen kameradan alınan gerçek veriler için görüntü işleme teknikleri kullanılarak, temas noktası izleme yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Temas teli ve pantograf temas şeridi Canny Kenar Çıkarım algoritması ve Hough Dönüşümü kullanılarak tespit edilmiştir. Önerilen yöntemde, pantograf temas şeridi ve katener temas telinin tespiti, görüntü üzerindeki doğruların açı değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Tespit edilen bu doğruların keşişim noktaları hesaplanarak temas noktası elde edilmiştir. Temas noktası izleme işlemi, PAK sistemlerinde oluşan arızaların incelenmesi ve durum izleme için oldukça önemlidir. Önerilen yöntemde PAK sisteminin temas noktası izlenerek pantograf temas bölgesinde oluşan temas noktalarının konumlarına göre sistemin çalışması incelenmektedir.

Altıncı bölümde, akım bilgisi kullanılarak ark analizi yapılmıştır. PAK sistemi için sinyal işleme ve S-dönüşümü tabanlı yeni bir ark tespit yöntemi önerilmiştir. PAK sisteminden alınan akım sinyalleri kullanılarak durum izleme ve ark tespiti yapılmıştır. Öncelikle, Mayr ark modeli ile PAK sisteminin model tabanlı akım verileri elde edilmiştir. Daha sonra lokomotiften alınan veriler kullanılarak gerçek zamanlı akım verileri elde edilmiştir. Bu akım verileri kullanılarak, S-dönüşüm tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Akım sinyallerinde oluşan gürültülerin yok edilmesi için alçak geçiren bir filtre kullanılarak sinyal üzerindeki gürültüler ortadan kaldırılmaktadır. Elde edilen gürültüsüz sinyallerin mutlak değeri alınarak sinyallerin belirli frekans aralığında tepe noktaları tespit edilmektedir. Tepe noktalarını oluşturulan veriler normalize edildikten sonra lineer interpolasyon yöntemi ile birleştirilerek yeni bir sinyal elde edilmektedir. Elde edilen sinyal üzerinde S-dönüşümü uygulanarak sinyalin frekans-zaman analizi yapılmıştır. S-dönüşümü sonucunda elde edilen S-matrisinden öznitelik çıkarımı yapılarak, geliştirilen bulanık mantık tabanlı sistemde kullanılmaktadır. Bulanık mantık sistem sayesinde akım sinyallerinin sağlam veya arızalı olup olmadığı belirlenmektedir. Daha sonra önerilen yöntem, bir lokomotiften alınan akım sinyallerine uygulanarak gerçek zamanlı çalışması incelenmiştir.

Yedinci bölümde yapılan tüm modelleme, analiz ve izleme işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Kullanılan yöntemlerin öneminden bahsedilmiş ve literatüre sağladığı faydalar açıklanmıştır.

2. PANTOGRAF-KATENER SİSTEMLERİ

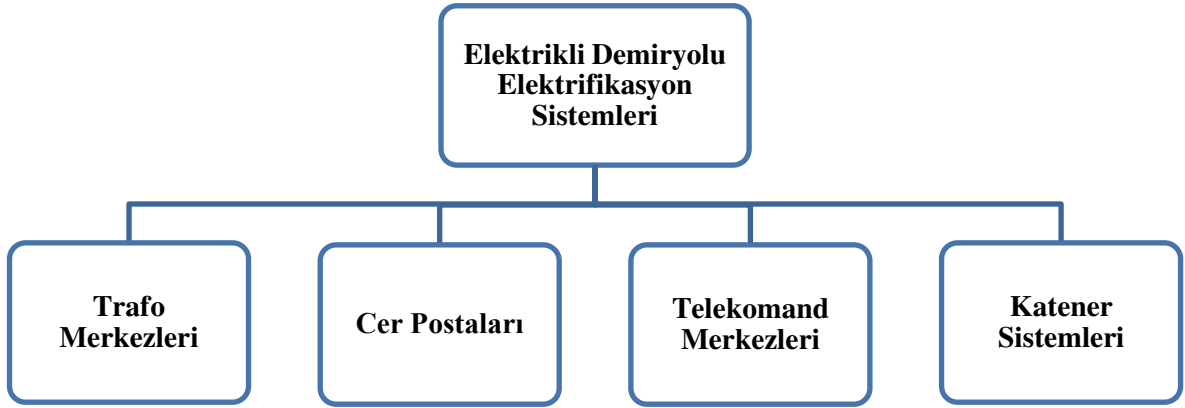
Demiryolu ulaşımında yaygın olarak kullanılan elektrikli trenler için pantograf ve katener sistemleri çok önemlidir. Elektrikli trenlerin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi pantograf ve katener sistemleri sayesinde alınabilmektedir. Bu tür sistemlerde elektrik iletiminin ve temasın düzenli ve sürekli bir şekilde sağlanabilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle elektrikli demiryolu sistemleri için elektrifikasyonun ve bileşenlerinin incelenmesi gerekmektedir.

2.1. Elektrikli Demiryolu Sistemlerinde Elektrifikasyon

Elektrifikasyon, elektrik enerjisinin normal hayat içerisindeki her alanda ve her şartta kullanılabilir hale getirilmesi işlemidir. Yani herhangi bir sistemin elektrikleştirilmesi anlamına da gelmektedir. Elektrikli demiryolu sistemlerinde trene elektrik enerjisinin alınabilmesi için gerekli olan tüm sisteme elektrifikasyon denilmektedir. Bu sistem içerisindeki donanımlar ile enerjinin alınması, iletilmesi ve kontrol edilmesi gerekmektedir.

Elektrikli demiryolu sistemlerinde tren enerjisi iki şekilde alınabilmektedir. Bunlardan birincisi katener sistemi (hava hat) diğeri ise üçüncü ray sistemidir. Katener sisteminde, direkler ve iletim hattıyla enerji sağlanırken, üçüncü ray sisteminde, var olan iki rayın yanına üçüncü bir hat döşenerek enerji bu hattan sağlanmaktadır. Üçüncü ray sistemlerinde 750 V DA gerilim kullanılmaktadır. Üçüncü ray sisteminin özellikle tünellerde yüksekliğin fazla olmasına gerek duymadığı için, kurulumu daha kolay ve maliyeti azdır, ancak güvenlik açısından tehlikeli durumlar oluşturmaktadır. Katener sistemi, 750 V DA, 1500 V DA, 3000 V DA, 15 kV AA 16,7 Hz, 25 kV AA 50-60 Hz, 25 kV AA 50 Hz, 50 kV AA 50-60 Hz gibi gerilimlerle beslenebilmektedir. 750 V DA metrolarda kullanılan gerilimdir. Ülkemizde genellikle 25 kV AA, 50 Hz gerilim seviyesi kullanılmaktadır [2, 6].

Elektrikli demiryolu elektrifikasyon sistemi, dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler trafo merkezleri, cer postaları, telekomand merkezleri ve katener sistemleridir. Şekil 2.1’de elektrikli trenlerin elektrifikasyon sistemlerinin bileşenleri görülmektedir. Bu birçok bölüm içerisinde trenin çalışabilmesi için gerekli olan en temel bölümler pantograf ve katener çiftidir.



Şekil 2.1. Elektrikli demiryolu sistemi elektrifikasyonu [6].

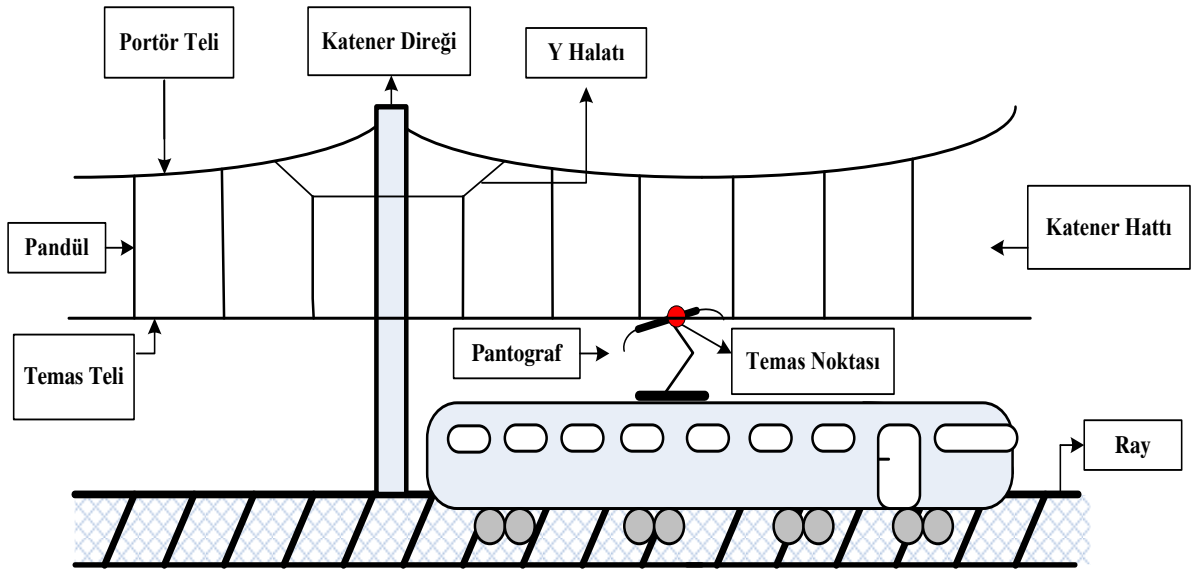
Kurulan transformatör merkezleri ile enerji nakil hatlarındaki 154 kV'luk gerilim, ülkemizde elektrikli demiryolu sistemlerinde kullanılan 25 kV 50 Hz'lik tek faz gerilime dönüştürülmektedir. Bu merkezlerde hem besleme hem de arızaların belirlenip gerekli manevraların yapılacağı teçhizatlar bulunmaktadır. 50 km'lik mesafelerle kurulan bu merkezlerde röleler, panolar, sigortalar ve PLC kontrollü cihazlar bulunmaktadır.

Cer, Arapça kökenli bir kelime olup, sürüklemek, çekmek anlamına gelmektedir. Cer postaları, elektriksel manevraların yapıldığı bölümdür. Katener hattının gerekli besleme ve by-pass işlemleri buradan yapılarak sürekli enerjili kalması sağlanmaktadır. Ayrıca nötr bölgeler ile trafo merkezleri arasındaki işlemlerin gerçekleştirildiği birimdir.

Telekomand sistemi ile tüm demiryolu elektrifikasyonu belirli bir merkezden kumanda ve kontrol edilmektedir. Enerji kesme, verme ve haberleşme işlemleri bu merkezde yapılmaktadır [6, 126].

Elektrikli demiryolu sistemlerinin ve yüksek hızlı sistemlerin teknolojik gelişimi dünya genelinde uzun bir süredir çok iyi bir şekilde devam etmektedir ve bu sistemler modern ulaşım araçları içinde önemli bir yere sahiptirler. İhtiyaç duydukları enerjiyi sağlayabilmeleri için sürekli elektrik kaynağı ile temas halinde olmaları gerekmektedir. Hareket eden bir lokomotifin sürekli elektrik enerjisini alabilmesi için PAK sistemleri geliştirilmiştir. Demiryolu hattı boyunca, hattın yanına yerleştirilen katener sistemi ile trenin üzerine sabitlenmiş pantograf sistemi, tren hareket halindeyken temas etmektedir.

Pantograf hareketli ve katener ise sabit iki ayrı sistem olduğu için aralarındaki herhangi bir temas bu sistemi daha karmaşık hale getirmekte ve bu sistemin analizi daha zor olmaktadır. PAK sistemi ve tren arasındaki enerji akışı katenerin temas telinden pantograf aracılığı ile alınan elektrik enerjisinin trenin çekiş araçlarına aktarılmasıyla sağlanmaktadır. Ancak bu sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için bu iki bileşenin daha ayrıntılı şekilde incelenmesi gerekmektedir. PAK sistemi ve bu sistemin bileşenleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



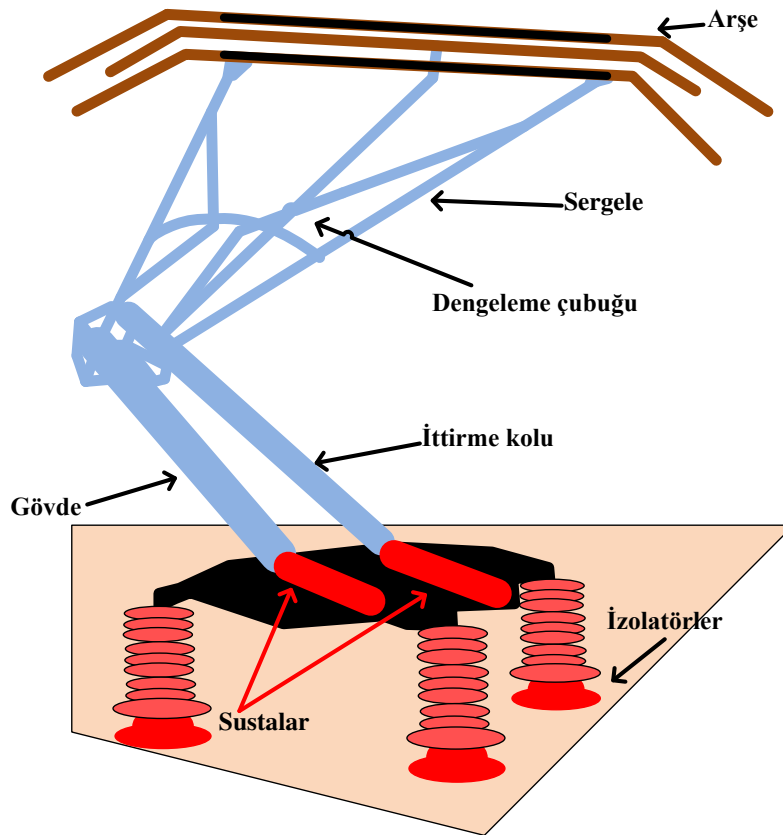
Şekil 2.2. Bir elektrikli demiryolu hattı için PAK sistemi

2.2. Pantograf

Pantograf tanım olarak, bir biçimi büyülterek veya küçülterek, kopya etmek için kullanılan kollu, eklemlili bir tür cetvel, yaylı askı, tıpkı çizerdur. Yunanca panto “tüm” ve graph “yazma” kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur. Elektrikli demiryolu sistemlerinde, trenin çalışması için gerekli olan elektrik, havai hatta asılı olan katenerden pantograf aracılığıyla alınır. Yani pantograf, elektrikli trenlerde katenerin temas telinden elektrik enerjisini alarak taşıta aktaran elemandır. Akan akım devresini geri dönüş iletkeni ve raylar üzerinden tamamlar. Dünyada, ülkelere ve kullanılan lokomotif türlerine göre farklılıklar gösteren pantograf çeşitleri bulunmaktadır.

Pantograf aracın çatısında bulunur ve izolatörlerle çatıdan izole edilmiştir. Bir pantografi oluşturan bileşenler, pantograf arşesi, sergele, dengeleme çubuğu, gövde, susta ve izolatör gibi elemanlardır. Pantograf ve pantografi oluşturan bileşenler Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Pantograf arşesinde, arşe kömürü ve boynuzlar bulunmaktadır. Arşe kömürü karbon grafit malzemeden ve boynuz ise izolasyonlu malzemeden yapılmıştır. Ülkemizde büyük ve küçük olmak üzere iki tip pantograf kullanılmaktadır. Büyük pantografda boynuzlar arası mesafe 1950 mm iken küçük pantografda 1600 mm’dir. Sergele, pantograf çerçevesi ile arşesi arasındaki birleşimi sağlayan elemandır. Dengeleme çubuğu, karbon grafit kömürün her zaman yatay doğrultuda olmasını sağlar. Sustalar pantografin temas teline uyguladığı basınç değerini ayarlamak için kullanılmaktadır [127]. İzolatörlerin görevi ise hem izolasyonu hem de pantografin tren üzerinde sabitlenmesini sağlamaktır.

Pantograf sistemlerinin gerçek çalışma anı için literatürde, ilgili veri tabanlarında ve Google.com ile youtube.com gibi internet sitelerinde çeşitli kullanılabilir resim ve videolar mevcuttur [128]. Şekil 2.4 gerçek bir pantografi göstermektedir.



Şekil 2.3. Pantograf bileşenleri

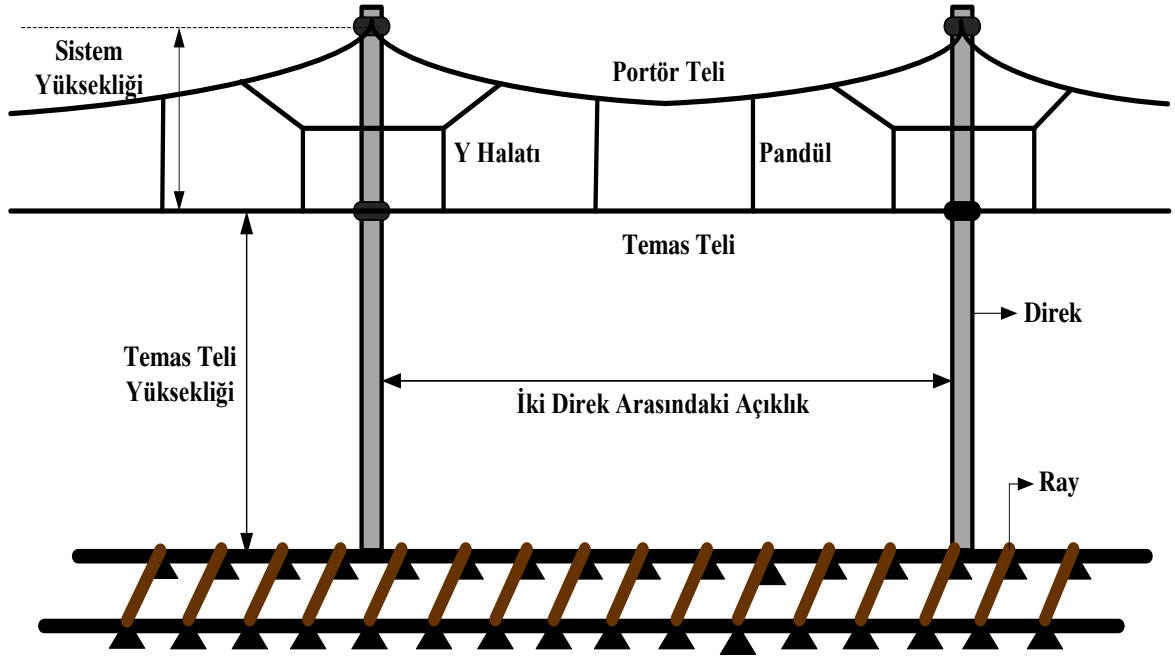


Şekil 2.4. Pantograf

2.3. Katener

Katener tesisleri, pantografin trene enerji sağlamak için sürekli temas halinde olduğu teller ve yardımcı bileşenlerden oluşan sistemdir. Katener sisteminin konvansiyonel ve rijit katener olmak üzere iki çeşidi vardır. Rijit katener sistemi konvansiyonel katener sistemine ve üçüncü raya alternatif olarak kullanılabilen yine havai bir sistemdir. Profili alüminyum kompozit malzemeden yapılmış, temas telinin de bu profile bağlanmasıyla oluşmuş yüksek iletkenlikte bir sistemdir.

Konvansiyonel katener sistemi, direk, portör teli (taşıyıcı tel), Y halatı, pandül, temas teli (seyir teli), konsol-hoban donanımı, rapel, antibalansan, otomatik gergi cihazı ve geri dönüş iletkeni (topraklama teli) gibi bileşenlerden oluşur. Şekil 2.5’de bir katener sistemini oluşturan tüm bileşenler görülmektedir. Şekilde gösterilen bileşenlerin her biri sistem için ayrı bir öneme sahiptir.



Şekil 2.5. Katener sistemi bileşenleri

Direkler, katener bileşenlerinin taşınması ve havada kalması amacıyla kullanılmaktadırlar. Genellikle beton direk kullanılmaktadır. Direkler arasındaki boşluk maksimum 50 m ve 65 m arasında değişmektedir. 50 m den büyük boşluklarda Y halatı kullanılmaktadır. Direk eksenini ile hat eksenini arasındaki mesafe genellikle 3,25 m'dir.

Temas telinin esnekliği her noktada aynı değildir. Portör teli vasıtasıyla temas teli belirli aralıklarla askıya alınır ve böylelikle temas telindeki sehim azaltılmaya çalışılır. Portör teline aynı zamanda taşıyıcı tel de denilmektedir. Portör teli 65 mm² bronz malzemeden yapılmıştır.

Pandül, temas telinin portör teline asılmasını sağlayan elemandır. Böylelikle temas telinin yüksekliğinin belirlenen değerler içerisinde kalması sağlanır. Bakır malzemeden yapılmıştır ve iki pandül arasındaki mesafe en fazla 9 m olabilir.

Temas teli (seyir teli) tren hareket ederken pantografin temas ettiği ve elektrik enerjisinin sağlandığı elemandır. Bu nedenle de iletkenliğinin iyi olması gerekmektedir. Elektrolit sert bakır malzemeden yapılmıştır ve 25 kV-50 Hz olan sistemde kesiti akıma ve hıza bağlı olarak 107 mm², 120 mm² veya 150 mm² olabilmektedir. Genellikle 107 mm² kesitli tel kullanılmaktadır. Temas telinin raydan yüksekliği 530 ± 50 cm'dir. Temas telinin ömrü aşınma oranına göre belirlenmektedir ve % 20 oranında aşınmaya kadar kullanılabilir.

Portör teli, pandül, Y halatı gibi elemanların yanı sıra otomatik gerdirme cihazları da esnekliği sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Temas teli ve portör telinin her ikisi de otomatik gerdirme cihazlarıyla gerdirilerek hava koşulları ya da farklı sebeplerden dolayı değişen tel esneklikleri sabit tutulmuştur.

Rapel temas telini taşımaktadır ve antibalansan rapelin bağlandığı kısımdır.

The diagram illustrates the components of a high-voltage transmission line tower. The main vertical structure is labeled **Direk** (Tower). Two insulator strings, labeled **İzolatör**, are attached to the tower. The top insulator string supports a horizontal crossarm labeled **Hoban**. The bottom insulator string supports a diagonal crossarm labeled **Konsol**. A horizontal crossarm labeled **Antibalansan** is mounted on the diagonal crossarm. A diagonal crossarm labeled **Rapel** is mounted on the horizontal crossarm. The diagram also shows the **Portör Teli** (Porter Cable) and **Temas Teli** (Tension Cable) running along the top and bottom of the tower structure.

34



Şekil 2.7. Gerçek bir katener sisteminin konsol-hoban donanımı

Elektrikli demiryolu sistemlerinde, kullanılan gerilim seviyesi ve oluşan indüksiyon gerilimleri nedeniyle topraklama sistemleri önem kazanmaktadır. Pantografla alınan elektrik enerjisi ana transformatörden tekerlekler aracılığı ile raylara geçerek devresini tamamlamaktadır. Ancak akım raya geçerken toprağa da geçmekte ve geri dönüş akımında azalma olmaktadır. Geri dönüş iletkeni (topraklama teli) kullanılarak bu azalma miktarı düşürülmektedir. Geri dönüş iletkeni olarak kesiti $62,44 \text{ mm}^2$ olan çelik özlü alüminyum tel, direklerin arkasına bağlanmaktadır. Direk ve tüm metal aksam topraklama iletkenine 8 mm^2 kesitli alüminyum ile bağlıdır. Belirli aralıklarda geri dönüş iletkeni ile ray birbiriyle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca belirli aralıklarla topraklama yapılarak geri dönüş iletkeni buna bağlanmıştır. Bu şekilde güvenli bir topraklama sistemi oluşturulmuştur [6, 126-129].

Elektrikli demiryolu sistemlerinde cer motoru olarak doğru akım ya da alternatif akım motorları kullanılabilir. Daha verimli ve uzun ömürlü oldukları için doğru akım motorları yerine asenkron motorlar daha çok tercih edilmektedir. Trafo merkezlerinden alınan tek fazlı 25 kV'luk gerilim öncelikle lokomotif üzerindeki topraklama ayırıcısından ve kesiciden geçerek lokomotif içerisindeki ana transformatöre ulaşmaktadır.

Bu sistemlerde genellikle yağlı tip transformatörler kullanılmaktadır. Ana transformatör ile alınan gerilim daha düşük gerilimlere düşürüldükten sonra ana doğrultma ünitesi ile doğrultulmaktadır. Bu gerilim batarya gibi doğru akımla beslenen üniteleri beslerken, ana ve yardımcı inverter üniteleri ile istenilen frekans ve gerilim seviyesine dönüştürülerek trenin hareketi, ısıtma, soğutma ve diğer yardımcı devrelerde kullanılmaktadır. Güç devreleri için 1500 V alternatif gerilime dönüştürülürken, yardımcı devreler için de yardımcı inverterler kullanılmaktadır. İnverterler ile elde edilen gerilim üç fazlı asenkron çer motorlarına uygulanmakta ve trenin hareketi sağlanmaktadır [130,131].

2.4. Pantograf ve Katener Sisteminin Birleştirilmesi

Elektrikli demiryolu sistemlerinde trene elektrik enerjisi toplamak için havai hat ve ray gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Ancak en güvenilir yol pantograf ve katener sisteminin kullanılmasıdır. Gerçek bir elektrikli raylı sistemde tren ve PAK sisteminin görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir. Tren ilerledikçe pantografin da temas teli boyunca kayması gerekmektedir. Farklı mekanik yapılarda ve farklı sayıda başlıklardan oluşabilen pantografların, katener hattına sağlıklı şekilde temas edebilmesi için üzerinde kontrol sistemleri mevcuttur. Bu tür sistemlerde, pantograf ve katener arasındaki uyumluluk en önemli konulardan biridir.



Şekil 2.8. PAK sistemi ve tren-ray birleşimi

Burada önemli olan, hareket eden pantografin sürekli olarak katenere değmesi için uygulanması gereken kaldırma kuvvetinin yeterliliğidir. Pantografin katenere temas noktasında uyguladığı kuvvetin etkileri bu tür sistemlerde karşılaşılan en önemli problemlerden biridir ve özellikle elektrik enerjisinin iletilmesi konusunda çok büyük etkileri vardır. Pantograf ile katener arasındaki temas uygun şekilde olmazsa temas kesilebilir, dolayısı ile trene gelen enerji kesilebilir ya da pantograf ile katener zarar görebilir.

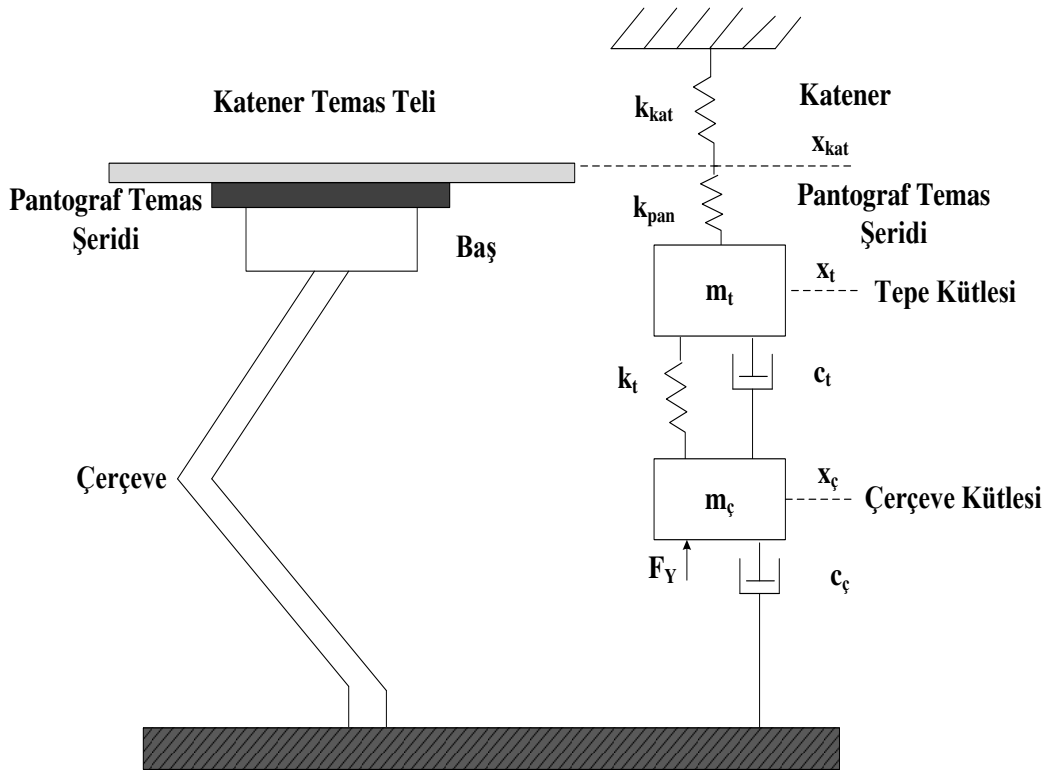
Hızla ilerleyen bir tren hattında enerjinin kesintisiz alınması ve pantograf ile katener arasındaki temasın kesilmemesi amacıyla sistemin çok iyi tasarlanıp imal edilmesi gerekmektedir. Pantograf ve katener arasındaki etkileşim bunları oluşturan elemanlara ve bu elemanların parametrelerinin katsayı değişimlerine bağlıdır. Bu sistemlerde karşılaşılan ve araştırmacıların en çok üzerinde durduğu konulardan biri de özellikle yüksek hızlarda temas telinde oluşan sehimdir. Pantograf ve katener arasında meydana gelen titreşimler ve temas telindeki osilasyonlar, aralarındaki ilişkiyi bozabilir ve temas kaybına bile neden olabilir. Temas telinde meydana gelen titreşimler ve dış kuvvetler temas kuvvetinde değişime neden olmaktadır. Bu durum sistemde dengesizlikler ve kayıplar oluşturmaktadır. Bu sebeple de temas kuvvetinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Temas kuvvetinin olması gereken değerden büyük olması, pantografin temas noktasında mekanik aşınmalara ve bozulmalara neden olur. Bu değerden daha düşük olan bir temas kuvveti ise elektriksel ark oluşmasına neden olmaktadır. Bütün bunların yaşanmaması için sistemin dinamik davranışının çok iyi analiz edilip, modellenmesi gerekir. Bu sebeple pantograf ve katener arasındaki titreşim azaltılmalı ve her şartta sabit temas kuvveti sağlanmaya çalışılmalıdır. Sabit temas, temas telinin gerilmesi artırılarak sağlanabilir, ama bu yöntemin kullanılması pek kolay ve mümkün değildir. Temas kuvvetinin değişimi dışında, hem dahili hem de yoldan ya da raydan kaynaklanan harici etkilere dolayısı ile sistemi oluşturan elemanların parametrelerinde değişimler olabilir. Temas kaybolabilir, ark oluşabilir, katenerde ya da pantografta mekanik hasar meydana gelebilir. Parametre değişimi ile sistemin dinamik modelinde belirsizlikler oluşabilir. Bu nedenle elektrikli raylı sistemler, karmaşık ve modellenmesi zor sistemlerdir. Sistem kendi iç değişimleri ve dış etkilere karşı ne kadar dayanıklı ve duyarsız olursa o kadar iyidir. Literatürde birçok araştırmacı geliştirdikleri değişik kontrol yöntemleriyle pantografin pozisyonunu kontrol etmeye çalışmışlardır. Sistem modeli oluşturulduktan sonra temasın sağlanabilmesi için pantografin tepesi ile katener arasındaki yer değiştirme miktarının azaltılması gerekmektedir.

Bu tür sistemler, elektrik, elektronik, bilgisayar ve mekanik bileşenlere sahip karmaşık sistemler olduğundan, yapılan çalışmalar da oldukça fazladır. Özellikle son yıllarda elektrikli raylı sistem uygulamalarının teorik ve pratik alanlardaki çalışmaları üzerine birçok araştırmalar yapılmıştır. Sistemde sönümleme düşükse, katenerde titreşimler meydana gelir ve bunlar sadece temas noktası civarında ortaya çıkmazlar. Ayrıca daha başka sorunlara da neden olurlar. Oluşan salınımın yayılımı bütün kateneri kapsar. İhtiyaç duyulan enerjinin sağlıklı bir şekilde temin edilip lokomotiflere iletilmesi gerekmektedir. Çünkü trenlerde oluşan arızalar ekonomik açıdan, can güvenliği açısından ve demiryolu trafiği açısından sonuçları büyük olan arızalardır. Hızlı tren seyahat sistemi ve bir saniyede kat ettiği mesafe göz önüne alındığında, kesintisiz enerji sağlanmasının önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Bu nedenle, sistemin temas kuvvetinin en uygun değerini ve PAK sistemleri arasındaki kesintisiz teması elde edecek şekilde imal edilmesi gerekmektedir [4, 20, 92].

3. PANTOGRAF- KATENER SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

PAK sisteminin dinamik performansını geliştirmek için en uygun çözüm yönteminin bulunup uygulanması gerekmektedir. Sistemin deneysel uygulamalar üzerinden incelenmesi çok zor ve pahalı olduğundan, PAK sisteminin modellenmesi zorunlu hale gelmiştir. Çeşitli yöntemler kullanılarak oluşturulan matematiksel model üzerinde gerekli çalışmalar yapıp, sonuçlar elde edildikten sonra, pratik modelin oluşturulması daha uygun olacaktır. Raylı sistemlerde sürtünmeden dolayı aşınmalar, katenerde titreşimler, temas kayıpları ve ark sonucu bozulmalar oluşmaktadır. Bunları azaltmak ve oluşabilecek diğer sorunların önüne geçmek için modelleme çok önemlidir. Pantograf ve katener sisteminin modelini oluşturmadan önce sistemi oluşturan bileşenlerin fiziksel karşılıklarının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Gerçek pantograf ve katenerin fiziksel şekline karşılık eşdeğer devresi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Pantografin fiziksel ve matematiksel eşdeğeri

Pantografin katenerin temas teline değen kısmına pantograf temas şeridi (pantograf pabucu), araca değen kısmına ise çerçeve denilmektedir. Burada, pantograf çerçeve ve tepe olarak adlandırılan iki kütleli bir sistem olarak modellenmektedir. Literatürde çerçeveyi alt ve üst çerçeve olarak ayıran üç kütleli modeller ya da iki temas telinin bulunduğu sistemler için daha fazla kütleli modeller mevcuttur [23, 38, 51, 85]. Ancak en fazla kullanılan model iki kütleli modeldir [62,63].

Bu bölümde PAK sistemlerinin modellenmesine yönelik yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmaktadır.

- *Yay-kütle sistemleri:*

Titreşimli sistemler modellenirken yay-kütle sistemi kullanılarak incelemeler yapılır. Elektrikli demiryolu sistemlerinde kullanılan PAK sistemleri de titreşimli sistemler olduğundan, bu tür sistemler modellenirken yay-kütle sistemlerinden faydalanılır. Bu nedenle PAK sisteminin modelinin oluşturulmasından önce yay-kütle sistemlerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

- *Pantograf ve katenerin matematiksel denklemlerinin elde edilmesi:*

Pantograf ve katenerin modellerinin gerçekteşirebilmesi için matematiksel denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde yay-kütle sistemlerinde verilen denklemlerden yola çıkarak PAK sisteminin modeli oluşturulmuştur. Pantograf için iki kütleli yapı kullanılmıştır. Daha sonraki bölümlerde de bu model kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.

- *PAK sistemlerinde parametre analizi:*

Bu bölümde, sistemin herhangi bir parametresindeki değişime karşılık verdiği cevap analiz edilmiştir. Sistemin referans kuvvet değeri ve bir parametre değiştiği zaman diğer parametreler sabit tutulmuştur. Her parametre için yüksek, düşük ve ara değerler belirlenmiş ve değişimlerine karşılık yeni transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Yeni transfer fonksiyonu için simülasyon çalıştırılarak sonuçlar gösterilmiştir. Daha yüksek ve daha düşük değerlerde, sistem cevabının referans değere göre ne kadar farklı olduğu yorumlanmıştır.

3.1. Yay-Kütle Sistemleri

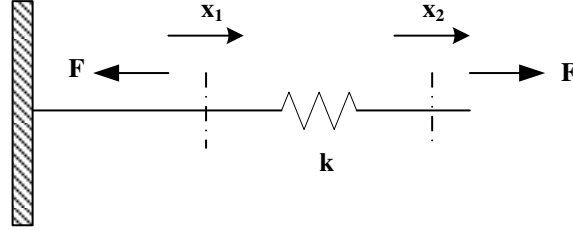
Titreşim, cisimlerin belirlenen referans noktası etrafında tekrarlanan hareketi olarak ifade edilir. Eğer hareket belirli bir süre içerisinde kendisini tekrarlıyorsa bu harekete periyodik hareket denir. Sinüs veya kosinüs şeklinde kendini tekrarlayan en basit periyodik harekete harmonik hareket denir. Herhangi bir kuvvet etkisinde olmadan hareketsiz duran cismin konumuna, denge durumu denilmektedir. Titreşen cisimlerin referans noktası aslında bu denge konumundayken bulundukları noktadır. Herhangi bir dış kuvvetin etkisiyle denge konumundan çıkarılan sistem basit harmonik hareket yapmaktadır.

Titreşim olayı, sisteme etkiyen dış etkiler ve sistemin bu etkilere verdiği cevaplardan oluşmaktadır. Titreşim hareketi, mekanik sistemlerde gürültüye, aşınmaya ve malzemede yorulmaya sebep olduğundan istenmeyen ve zararlı etkileri olan bir olaydır. Bu yüzden de mühendislik çalışmaları için titreşim hareketlerinin incelenmesi, azaltılması ve kontrol edilmesi önemli bir ilgi alanıdır.

Titreşimli sistemler sönümlü, sönümsüz, serbest, zorlanmış, doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde sınıflandırılabilirler. Salınım yapan kütle yay sistemi eğer korunumlu ortamda ise yani herhangi bir sürtünme ve iç direnç etkisi yok ise bu sisteme sönümsüz titreşimli sistem denir ve böyle bir sistem sonsuza kadar titreşim yapmaya devam eder. Sürtünme kuvveti genellikle hava direncinden ya da sistemin kendi iç kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Sistem sönümlü ortamda ise ve üzerine sürtünme kuvveti etki ederse titreşim hareketinin genliği yavaş yavaş azalır ve en sonunda sıfır olur. Bu tür harekete sönümlü harmonik hareket, böyle sistemlere de sönümlü titreşimli sistemler denir. Sistem herhangi bir dış kuvvete maruz kalmadan kendi başlangıç şartlarıyla titreşiyorsa serbest, dış kuvvet etkisinde titreşiyorsa zorlanmış titreşimli sistem adını alır. Sistemde bulunan elemanların doğrusallık özelliklerine göre de sistemin doğrusal ya da doğrusal olmayan titreşimli sistem olup olmadığı konusunda karar verilir.

Titreşim hareketinin temelini potansiyel enerjinin kinetik enerjiye, kinetik enerjinin de potansiyel enerjiye dönüşümü oluşturmaktadır. Bu sebeple titreşim hareketi yapan sistemler tasarlanırken kullanılacak elemanlar bu enerjileri depolayabilecek elemanlar olmalıdır. Yaylar ve elastik elemanlar potansiyel enerjiyi depolayabilen, kütle ve atalet ise kinetik enerjiyi depolayabilen elemanlardır. Örneğin yay-kütle sisteminde yay potansiyel enerjiyi depolarken, kütle kinetik enerjiyi depolamaktadır.

Yaylar potansiyel enerjiyi depolayan ve kütleleri birbirine bağlayan elemanlardır. Doğrusal veya doğrusal olmayan karakteristik gösterebilirler. Genel yay şekli Şekil 3.2’de verilmiştir. Yaylara ait denklemler aşağıda verilmiştir.



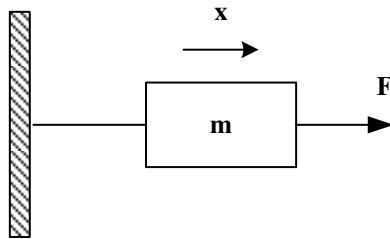
Şekil 3.2. Genel yay şekli

$$F = k(x_2 - x_1) \quad (3.1)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (x_2 - x_1)^2 \quad (3.2)$$

Burada F : kuvvet, k : yayın sertlik sabiti ya da yay sabiti (esneklik katsayısı da denir), x : uzama miktarıdır. E_p ise potansiyel enerjiyi göstermektedir.

Atalet elemanları kinetik enerji depolayan öteleme ve dönme hareketleri yapabilen elemanlardır. Atalet elemanı ile ilgili durum Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Atalet elemanlarına ait denklemler aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3. Atalet elemanı

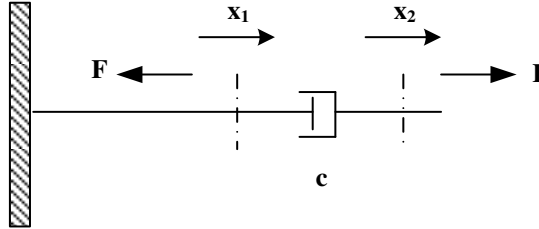
Newton'un ikinci kanunu gereği sisteme etkiyen toplam kuvvet sistemin kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir.

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m \cdot \ddot{x} \quad (3.3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2 \quad (3.4)$$

m : kütle, a : yerçekimi ivmesi, v : hız. E_k ise kinetik enerjiyi göstermektedir.

Sistemin çalışması esnasında oluşan sarsıntı ve titreşim hareketlerinin etkisini azaltmak için kullanılan elemanlar sönümlleme (amortisör) elemanlarıdır. Bu tür elemanlar hız ile orantılı ve hareket yönüne ters bir direnç gösterirler. Sönümlleme elemanları akışkan sürtünmesi ile enerji kaybını sağlarlar ve titreşim genliklerini üstel olarak azaltırlar. Titreşim veya sarsıntı sonucu oluşan mekanik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek yutarlar. Eleman denklemi aşağıda verilmiştir. Sönümlleme elemanı değişkenleri Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Sönüm elemanı değişkenleri

$$F = c \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.5)$$

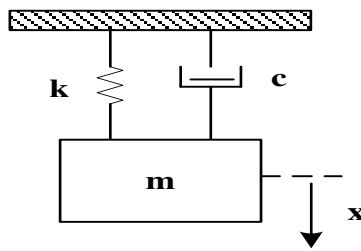
Burada, c : sönümlleme (amortisör) elemanının sürtünme katsayısıdır.

Hareket halindeki sistemin elemanlarının belirli bir noktaya göre durum ve konumlarını belirleyen parametrelere koordinat denir. Bir sistemi oluşturan tüm parçaların herhangi bir anda konumlarının belirlenebilmesi için gerekli olan birbirinden bağımsız minimum koordinat sayısına serbestlik derecesi denir. Sonlu sayıda serbestlik dereceli sistemlere ayrık sistem denir. Serbestlik derecesi sonsuz olan sistemlere sürekli sistem denir.

Yay-kütle sisteminde kütle konumu sadece x koordinatı ile ifade edilebilir. Dolayısı ile yay-kütle sistemi tek serbestlik dereceli sistemdir. Yaylar ve sönümleyiciler ile ayrılmış noktasal kütlelerden oluşan sistem çok serbestlik dereceli bir sisteme örnek olarak gösterilebilir.

Titreşimli sistemin hareketinin tanımlanmasında ve matematiksel modelin oluşturulmasında kütle bulundugu ortamın ve dış kuvvetlerin de etkisi dikkate alınır. Kütle, yayın direngenliği, sönümleme etkisi gibi parametreler ve dış kuvvetlerin etkisi düşünülerek matematiksel model oluşturulur. Matematiksel model oluşturulduktan sonra sistemi oluşturan elemanların diferansiyel denklemleri kullanılarak hareket denklemi elde edilir. Titreşimli sistemler modellenirken yay kütle sistemi kullanılarak incelemeler yapılır.

Kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki cisimlerin elastik yapılarına bağlı olarak Robert Hooke tarafından incelenmiştir. Hooke kanununa göre, esnek bir cisme kuvvet uygulandığında cismin konum değiştirme miktarı uygulanan kuvvetle orantılıdır. Denge durumunda bulunan yay-kütle sisteminde, x kadar sıkıştırılan ya da gerilen yay tarafından kütleye $F = -k \cdot x$ kadar geri getirici bir kuvvet uygulanır. Bu kuvvetin etkisiyle sistem ileri geri hareket etmeye başlar, yani basit harmonik hareket yapmaya başlar. Yer değiştirme miktarı x yerçekimi kuvveti ile doğru orantılıdır. (-) işareti kuvvetin yönünün yer değiştirme ile ters orantılı olduğunu, böylece geri getirici bir kuvvet olduğunu gösterir. Kuvvetle yer değiştirme arasındaki ilişki Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki

$$F = -k \cdot x = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.6)$$

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = 0 \Rightarrow m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = 0 \quad (3.7)$$

Duran bir yayın üzerine kütle bağlandığında yayda bir miktar sıkışma gerçekleşir. Bu sıkışma miktarı yerçekimiyle orantılıdır. Kütle bağlanmadan önce sabit duran sistem kütlenin ve oluşan geri getirici kuvvetin etkisiyle basit harmonik hareket yapmaya başlar.

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad (3.8)$$

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.9)$$

Burada A : genlik, ω : açısal frekanstır.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.10)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.11)$$

f : frekans, T : basit harmonik hareketin periyodudur.

Kütlenin bağlanmasıyla basit harmonik hareket yapmaya başlayan sistemde, kütlenin aynı yönde aynı noktadan iki kez geçmesiyle tam salınım oluşur. Tam salınım için geçen süre bir periyottur. Buradan yay sabiti ya da F ile x arasındaki orantı katsayısı olarak ifade edilen k yazılırsa;

$$k = m \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \quad (3.12)$$

Görüldüğü gibi kütle büyüdükçe yay kuvvet etkisinde daha rahat hareket eder, T büyür, böylelikle basit harmonik hareketin periyodu büyümüş olur. k küçüldükçe T küçülür, ileri geri hareket yani basit harmonik hareket daha çabuk olur.

Sistem sönümlü ortamda ise sürtünme kuvvetinin etkisi de dikkate alınmalıdır. Sürtünme kuvveti hız ile orantılıdır, hız doğrultusunda ve hıza zıt yönlüdür. Kütleye etki eden F kuvveti, yay tarafından sağlanan geri getirici kuvvet ve sürtünme kuvvetinin sebep olduğu sönüm kuvvetinin toplamına eşittir. Bu durum;

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -k \cdot x - c \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.13)$$

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = 0 \quad (3.14)$$

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = 0 \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem yeniden yazılırsa;

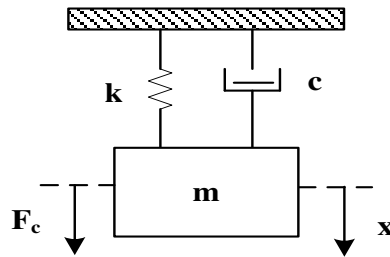
$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} \cdot x = 0 \quad (3.16)$$

$$\gamma = \frac{c}{m}, \omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{dx}{dt} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad (3.17)$$

$$\ddot{x} + \gamma \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = 0 \quad (3.18)$$

denklemini elde edilir. Burada γ , sönüm frekansını ifade eder. Denklem ikinci dereceden, sabit katsayılı, doğrusal, homojen bir diferansiyel denklemdir.

Sisteme Şekil 3.6'daki gibi dışarıdan bir F_c kuvveti uygulanırsa hareket denklemini yine Newton' un kanunlarına göre;

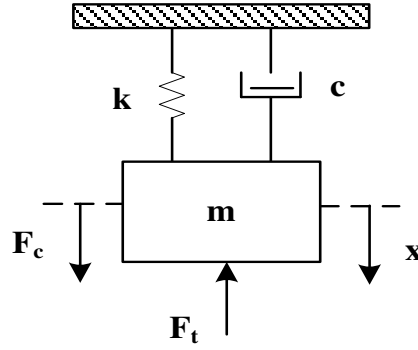


Şekil 3.6. Sisteme dışarıdan bir kuvvet uygulanması durumu

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F_c \quad (3.19)$$

halini alır. Burada uygulanan kuvvetin $m.\ddot{x}$ kadarı kütleyi ivmelendirmek için, $c.\dot{x}$ kadarı sürtünme kuvvetini yenmek için, $k.x$ kadarı da yayın sıkıştırılması için harcanmıştır.

F_c kuvvetinin dışında sisteme herhangi bir bozucu kuvvet F_t , Şekil 3.7'deki gibi uygulanırsa, sistemin yer değiştirme miktarı ilk duruma göre farklı olacaktır.



Şekil 3.7. Sisteme bozucu bir kuvvet uygulanması durumu

Bu sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi olacaktır;

$$m.\ddot{x} + c.\dot{x} + k.x = F_c - F_t \quad (3.20)$$

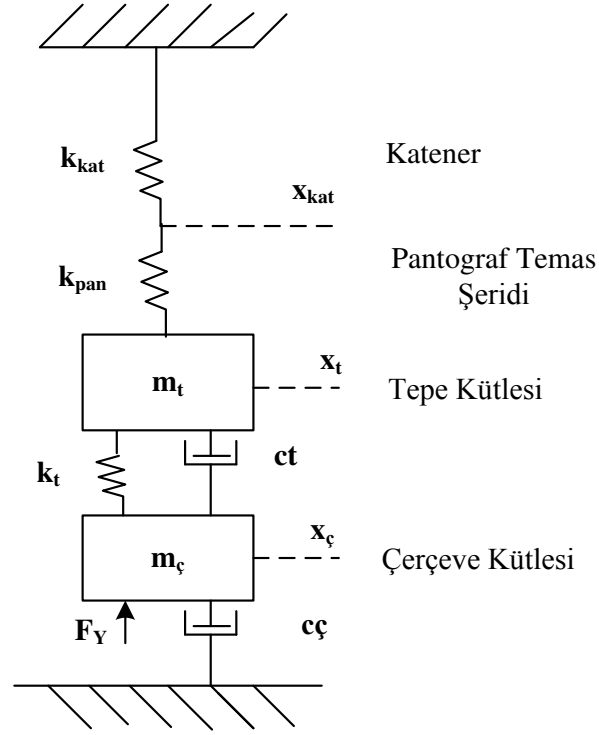
Matematik modeli bulunan sistemin hareket denklemi elde edildikten sonra giriş değerlerine göre çıkış değerlerini bulmak için çözüm yapılır. Buradaki sistemde, F_c giriş değerine göre hız ya da yer değiştirme miktarı çıkış seçilerek çözüm yapılır [132-135].

3.2. Pantograf-Katener Sistemlerinin Matematiksel Denklemleri

Matematiksel model oluşturulurken öncelikle giriş ve çıkış büyüklükleri belirlenir ve daha sonra bu değerlere bağlı olarak dinamik model oluşturulur. Giriş büyüklükleri olarak genelde kuvvetler ve momentler alınır. Sistem geometrisi, kütlelerin büyüklüğü ve konumu gibi bileşenler dikkate alınarak dinamik model oluşturulur. Böyle bir sistemin çıkış büyüklükleri; harici etkiler, hareket, rotasyon, osilasyon ve titreşim etkileri olabilir [33]. Literatürde pantograf ve katenerin modellenmesi için farklı teknikler kullanılan çalışmalar mevcuttur.

Pantograf ve katener iki ayrı dinamik sistemdir ve modelleri oluşturulmadan önce her ikisinin de tam olarak analiz edilip anlaşılması gerekmektedir. PAK sisteminde istenmeyen bir durum oluştuğunda bu hem pantografı, hem kateneri hem de ikisi arasında oluşan teması kötü etkilemektedir. Katenerin temas telinde oluşan herhangi bir yükselme veya çökme titreşimlere neden olmaktadır. Temas teli gerginliğinin değişmesi bu tür sistemlerde titreşime neden olan en büyük etmendir. İki direk arasındaki boşluğun her noktasında temas teli gerginliği aynı değildir. Direğe yakın yerlerde gerginlik fazlayken orta noktalara doğru gerginlik azalmaya başlamaktadır. Pantograf temas teli boyunca hareket edip katenerle temas ettiği için bu gerginlik değişimi temas telinde dalgalanmalara neden olmaktadır. Aynı şekilde pantografda da titreşimler oluşmakta ve hareketini etkilemekte, bu nedenle temas kuvvetinde de değişimler oluşmaktadır. Bu tür sistemlerde temas açısından karşılaşılan en önemli problemlerden biri temas kuvveti değişimidir. Temas teli titreşimleri ve harici kuvvetler de temas kuvvetinde değişime neden olabilmektedir.

Pantograf ve katener başlangıçta ayrı ayrı modellenerek ve daha sonra bu modeller birleştirilerek PAK sistemi modeli oluşturulmaktadır. Pantograf modellenirken, aktif ve pasif pantograf modeli olarak iki matematiksel modelden bahsedilebilir. Yapılan uygulamalarda genellikle pasif pantograf modeli kullanılmıştır. Ancak günümüz koşullarında trenlerin hızlarının artmasıyla birlikte pantografin pasif kontrol modeli yetersiz kaldığından, son yıllardaki çalışmaların büyük çoğunluğu aktif pantograf kontrol yaklaşımlarının geliştirilmesini sağlamıştır. PAK sisteminin mekanik modeli Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. PAK modeli [62, 63].

PAK sisteminin mekanik modeli oluşturulurken katener elastik yapısından dolayı bir yay olarak modellenmiştir. Pantografla katenerin arası da bir yay ile modellenmiştir. Pantograf ise tüm çerçevenin (alt ve üst) tek bir gövdeden oluştuğu kabul edilerek iki kütleli olarak modellenmiştir. Pantograf toplu kütle modeli ile yaylar, kütleler ve sönümleyiciler kullanılarak, aktif ve pasif kontrollü olarak modellenebilmektedir. PAK sisteminde kullanılan değişkenlerin tanımlamaları ve referans değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. PAK sistemi değişkenleri [62].

	Değişkenlerin tanımları	Referans Değer
m_t	Pantografin tepe kütlesi	9.1 kg
m_ç	Pantografin çerçeve kütlesi	17.2 kg
c_t	Pantografin tepe sönümleme katsayısı	130 Ns/m
c_ç	Pantografin çerçeve sönümleme katsayısı	30 Ns/m
k_{kat}	Katenerin yay sabiti	1.535*10 ⁶ N/m
k_{pan}	Pantografin yay sabiti	82.3*10 ³ N/m
k_t	Pantografin tepe yay sabiti	7*10 ³ N/m
x_{kat}	Katener yer değiştirmesi	
x_t	Pantograf tepe yer değiştirmesi	
x_ç	Pantograf çerçeve yer değiştirmesi	
F_y	Kaldırma kuvveti	

Bu sistem için PAK modelinin hareket denklemi, basit ikinci dereceden diferansiyel denklem şeklinde yazılırsa [65];

$$m_{\check{c}} \cdot \ddot{x}_{\check{c}} + c_{\check{c}} \cdot \dot{x}_{\check{c}} + c_t \cdot (\dot{x}_{\check{c}} - \dot{x}_t) + k_t \cdot (x_{\check{c}} - x_t) = F_Y \quad (3.21)$$

$$m_t \cdot \ddot{x}_t + c_t \cdot (\dot{x}_t - \dot{x}_{\check{c}}) + k_t \cdot (x_t - x_{\check{c}}) + k_{pan} \cdot (x_t - x_{kat}) = 0 \quad (3.22)$$

$$k_{pan} \cdot (x_{kat} - x_t) + k_{kat} \cdot x_{kat} = 0 \quad (3.23)$$

Burada F_Y kaldırma kuvvetini ifade eder. Bu denklemler durum uzay formunda yazılmak istenirse;

$$x_1 = x_t, x_2 = \dot{x}_t, x_3 = x_{\check{c}}, x_4 = \dot{x}_{\check{c}}, \text{ alınarak;}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{m_t} & \frac{0}{m_t} & \frac{0}{m_t} \\ \frac{1}{m_t} \left(\frac{k_{pan}^2}{k_{pan}+k_{kat}} - (k_t + k_{pan}) \right) & \frac{c_t}{m_t} & \frac{k_t}{m_t} & \frac{c_t}{m_t} \\ 0 & \frac{c_t}{m_\zeta} & 0 & 1 \\ \frac{k_t}{m_\zeta} & -\frac{k_t}{m_\zeta} & -\frac{(c_t+c_\zeta)}{m_\zeta} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_\zeta} \end{bmatrix} \cdot F_Y \quad (3.24)$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{k_{kat}}{(k_{pan}+k_{kat})} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

elde edilir. x 'lere göre transfer fonksiyonu Tablo 3.1'de verilen referans değerler kullanılarak yazılırsa,

$$G(s) = \frac{0.7883s+42.44}{s^4+23.589s^3+9785s^2+119e004s+3.493e006} \quad (3.26)$$

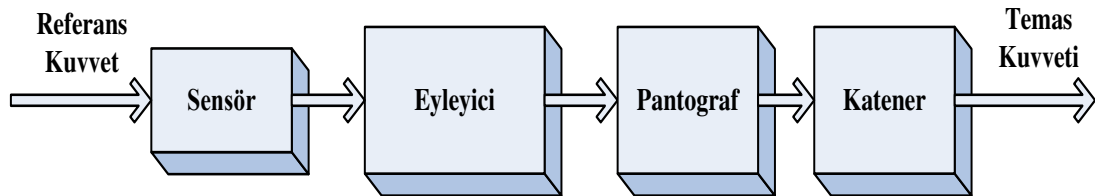
elde edilir [62-65].

Bu transfer fonksiyonu bundan sonraki bölümlerde, pantograf ve katener sistemi modeli için kullanılmaktadır.

3.3. Pantograf-Katener Sistemlerinde Parametre Etkilerinin Analizi

Elektrikli demiryolu sistemlerinde akım toplama işlemini gerçekleştiren pantograf ve katener sistemlerinde ana amaç akım toplama kalitesini yükseltmektir. Pantograf ve katener arasındaki etkileşimi etkileyen birçok faktör ve parametre vardır. İçsel ya da harici birçok etmen sistemin dinamik davranışını etkilemekte ve parametre değişimine neden olmaktadır. Gerçek pratik uygulamalarda da sistem parametreleri çok çabuk değişebilmektedir. Sistemin parametre değişimlerine karşılık gösterdiği hassasiyet çok önemlidir. Bu nedenle bu bölümde, PAK sistemlerinde parametre değişimlerinin sistem üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sabit referans kuvveti için parametre değişimi ile oluşan sistem cevabı incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Her parametre değişiminde diğer parametreler sabit tutularak, yeni bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Yeni transfer fonksiyonu vasıtasıyla elde edilen simülasyon sonucu, referans değer için elde edilen simülasyon sonucu ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bir parametre değişiminin sistem cevabı üzerindeki etkisi diğer parametre değişimleri ile karşılaştırarak yorumlanmıştır. Sistem cevabı üzerinde parametre etkileri analiz edildikten sonra uygun kontrol tekniği belirlenerek modelleme yapılabilir. Ancak her parametre değişiminde denetleyici parametrelerini değiştirmektense, aktif kontrol tekniklerinin kullanılması daha uygun olacaktır.

Parametre değişiminin sistem üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için önerilen sistemin blok diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir. Her parametre değişimine karşılık diğer parametreler sabit tutularak yeni bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Yeni transfer fonksiyonu pantograf bloğunda yerine yazılarak sistemin verdiği cevaplar analiz edilmiştir.



Şekil 3.9. Önerilen sistemin blok diyagramı

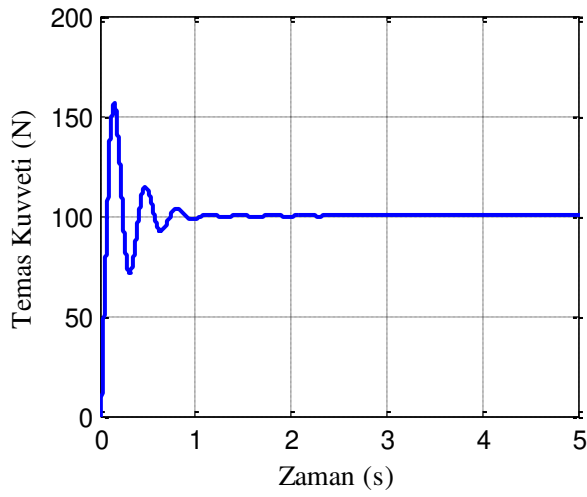
Burada, her parametrenin sistem davranışını nasıl etkilediğini anlayabilmek için incelemeler yapılmıştır. Referans değer kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları, rastgele seçilen referansın daha yüksek ve daha düşük değerleri için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ara değerler için elde edilen simülasyon sonuçları da parametre etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kullanılmış, ancak karşılaştırma sadece en yüksek, en düşük ve referans değer arasında yapılmıştır. Tablo 3.2’de PAK sistemi için seçilen referans parametre değerleri ve her parametreye karşılık daha düşük, ara ve daha yüksek değerler gösterilmektedir. Referans kuvveti gerçek şartlarda ve birçok uygulamada genellikle 100 N civarında ayarlanmaktadır. Eyleyici (hareket ettirici) pantografin yukarı doğru hareket etmesini sağlayan elemandır ve simülasyonda bir kazanç bloğuyla modellenmiştir. PAK sisteminin Şekil 3.8’de verilen modeli ve Denklem (3.26)’da verilen transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

Tablo 3.2. PAK sisteminin referans ve farklı parametre değerleri

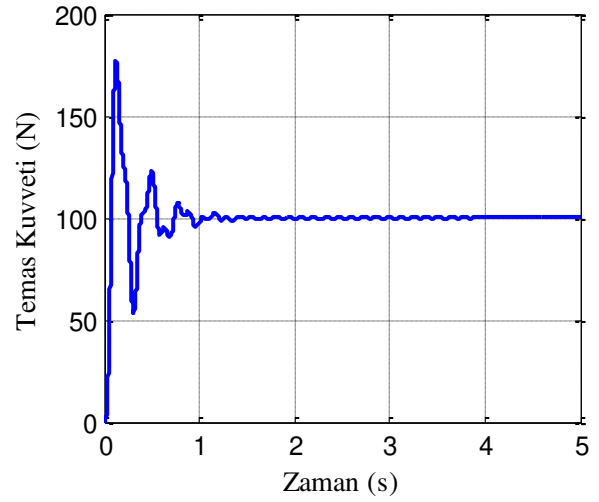
	Referans Değer	Düşük Değerler	Ara Değerler	Yüksek Değerler
m_t	9.1 kg	3 kg	7 ve 35 kg	50 kg
$m_ç$	17.2 kg	13 kg	16 ve 22 kg	25 kg
k_{pan}	$82.3 \cdot 10^3$ N/m	$42.3 \cdot 10^3$ N/m	$62.3 \cdot 10^3$ ve $102.3 \cdot 10^3$ N/m	$122.3 \cdot 10^3$ N/m
k_t	$7 \cdot 10^3$ N/m	$4 \cdot 10^3$ N/m	$6 \cdot 10^3$ ve $8 \cdot 10^3$ N/m	$10 \cdot 10^3$ N/m
c_t	130 Ns/m	60 Ns/m	100 ve 160 Ns/m	200 Ns/m
$c_ç$	30 Ns/m	5 Ns/m	15 ve 45 Ns/m	60 Ns/m
k_{kat}	$1.535 \cdot 10^6$ N/m	--	--	--
F_Y	100 N	--	--	--

Elde edilen sonuçlar, kütle, yay sertlikleri ve sönümleme faktörlerinin değişmesinin sistem üzerindeki etkilerini göstermektedir. Altı tane parametrenin değişimi için simülasyon sonuçları verilmiştir. Bu parametreler, pantograf tepe kütlesi (m_t), pantograf çerçeve kütlesi ($m_ç$), pantograf yay sabiti (k_{pan}), pantograf tepe yay sabiti (k_t), pantograf tepe sönümleme katsayısı (c_t) ve pantograf çerçeve sönümleme katsayısı ($c_ç$)’dir.

Her parametre için beş farklı grafik çizdirilmiştir. İlk iki grafik her parametrenin ara değerleri için elde edilen sonuçları göstermektedir. Üçüncü grafik ise en düşük ve en yüksek değerler ile bu değerlerin referans değere göre farkını göstermektedir. Bu grafikte bir parametrenin referans değeri için elde edilen simülasyon sonucu siyah renk ile gösterilmiştir. Mavi ve kırmızı renk ile gösterilenler sırasıyla referans değerinden daha düşük ve daha yüksek sonuçları göstermektedir. Dördüncü ve beşinci grafikler ise referans değer ile daha düşük ve daha yüksek değerler arasındaki farkı, yani hata değerini göstermektedir. Şekil 3.10'da pantograf tepe kütlesi (m_t) değişiminin etkileri görülmektedir. Şekil 3.10 (a)'da tepe kütlesinin 7 kg ve Şekil 3.10 (b)'de tepe kütlesinin 35 kg olduğu simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 3.11'de tepe kütlesi değerinin en düşük değeri olarak alınan 3 kg, en yüksek değeri olarak alınan 50 kg ve referans değer için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir. Şekil 3.10 (a) ve Şekil 3.10 (b)'den görüldüğü gibi kütle değerinin artmasıyla osilasyon çok artmaktadır. Ayrıca maksimum aşma değeri de artmaktadır. Şekil 3.11 (a)'da pantograf tepe kütlesi değerinin en düşük değeri ile referans değeri için elde edilen sonuçlar neredeyse aynı, fark değeri de azdır. Ancak en yüksek değeri için yerleşme zamanı ve maksimum aşma değeri oldukça fazladır.

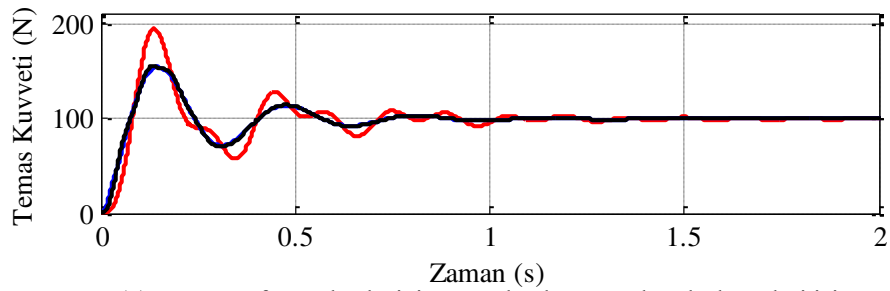


(a) $m_t = 7 \text{ kg}$

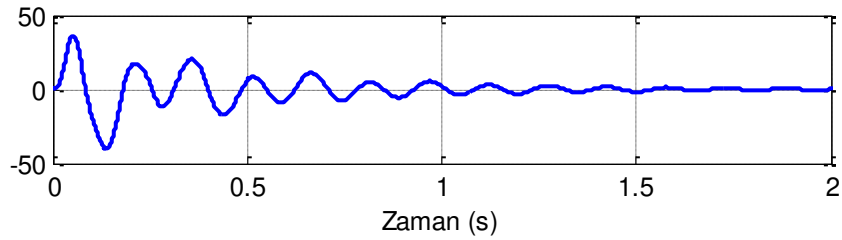


(b) $m_t = 35 \text{ kg}$

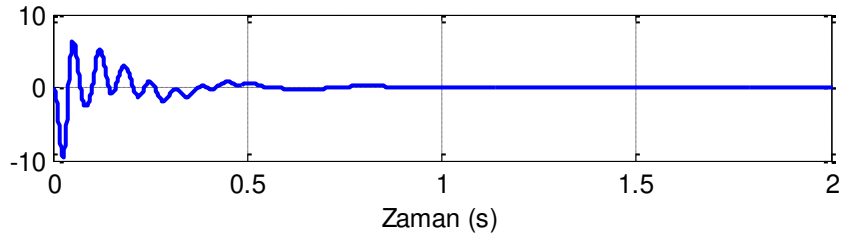
Şekil 3. 10. Farklı pantograf tepe kütlesi (m_t) değeri için temas kuvveti değişimi



(a) Pantograf tepe kütesinin en yüksek ve en düşük değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması



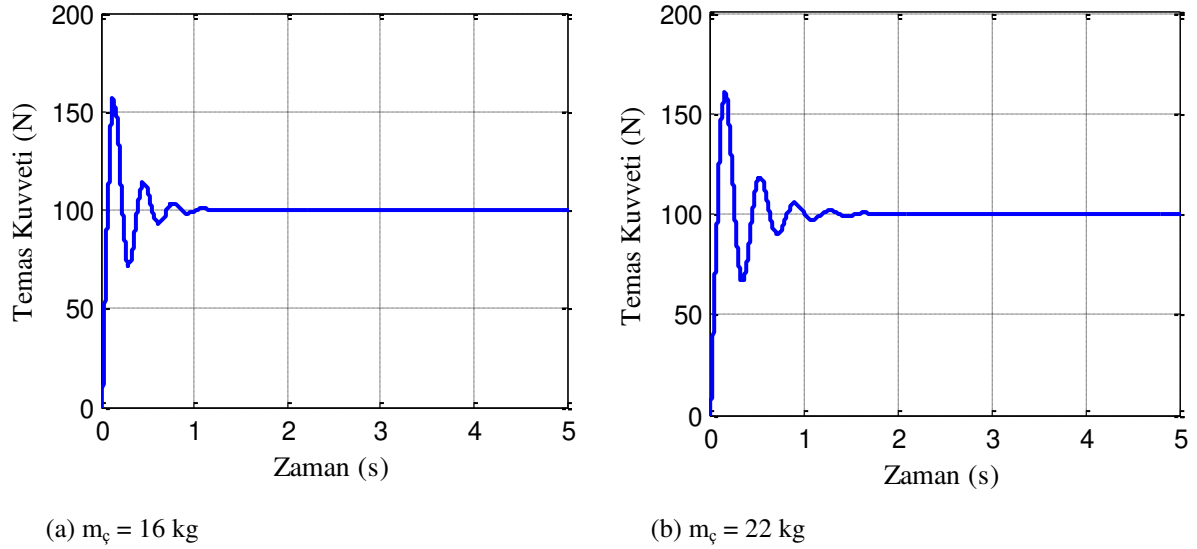
(b) Referans ve en yüksek tepe kütesi değerleri için temas kuvvetleri farkı



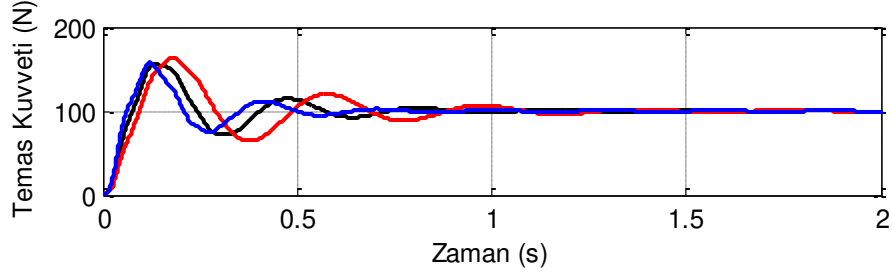
(c) Referans ve en düşük tepe kütesi değerleri için temas kuvvetleri farkı

Şekil 3. 11. Farklı pantograf tepe kütlesi (m_t) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

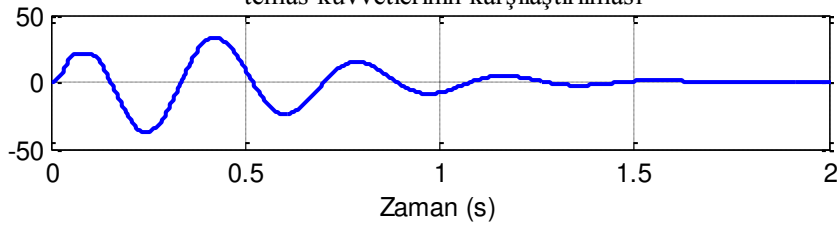
Şekil 3.12’de pantograf çerçeve kütlesi (m_c) değişiminin temas kuvveti üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.13’de çerçeve kütlesi değerinin en düşük değeri olarak alınan 13 kg ve en yüksek değeri için alınan 25 kg için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir.



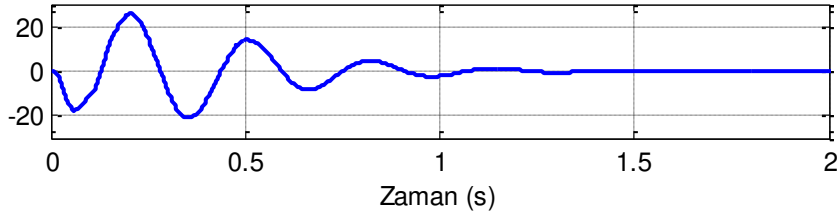
Şekil 3. 12. Farklı pantograf çerçeve kütlesi (m_c) değeri için temas kuvveti değişimi



(a) Pantograf çerçeve kütlesinin en yüksek ve en düşük değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması



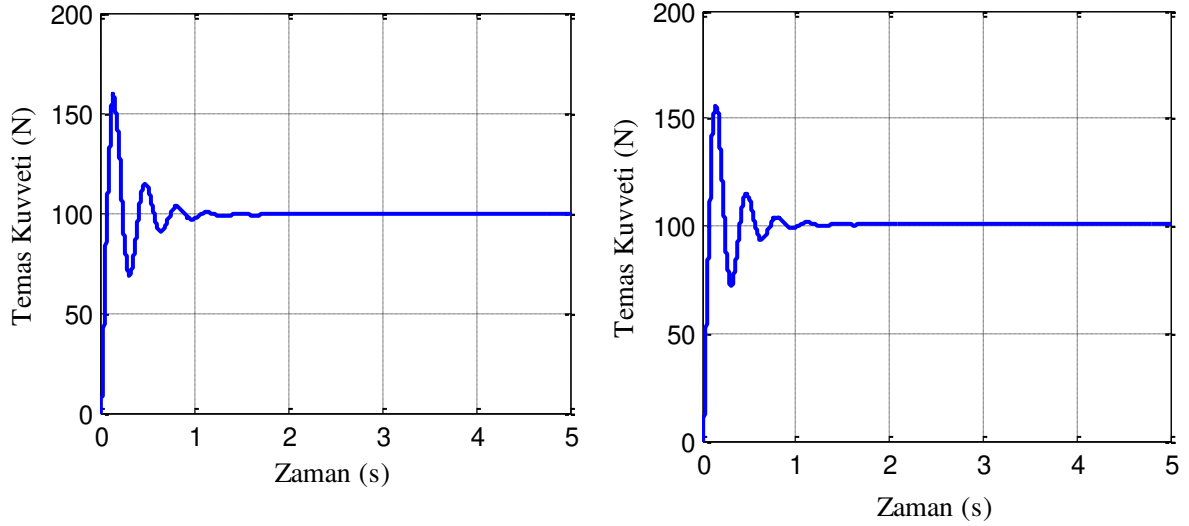
(b) Referans ve en yüksek çerçeve kütlesi değerleri için temas kuvvetleri farkı



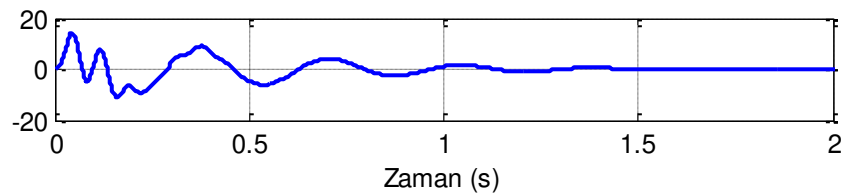
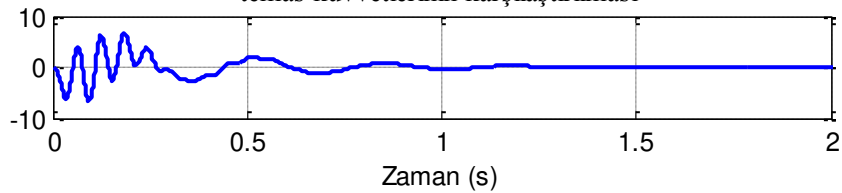
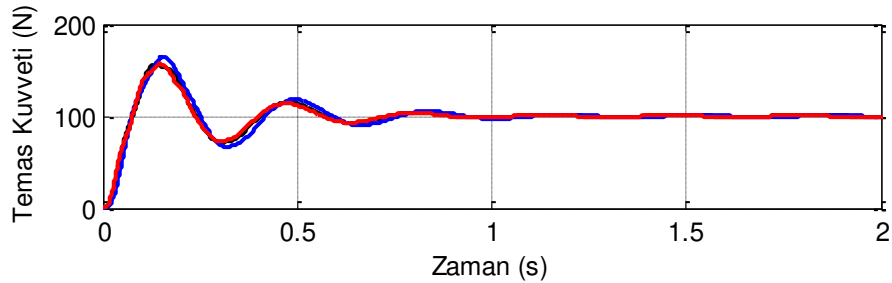
(c) Referans ve en düşük çerçeve kütlesi değerleri için temas kuvvetleri farkı

Şekil 3. 13. Farklı pantograf çerçeve kütlesi (m_c) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.14’de pantograf yay sabiti (k_{pan}) değeri değişiminin temas kuvveti üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.15’de yay sabiti değerinin en düşük değeri olarak alınan $42.3 \cdot 10^3$ N/m ve en yüksek değeri olarak alınan $122.3 \cdot 10^3$ N/m için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir.

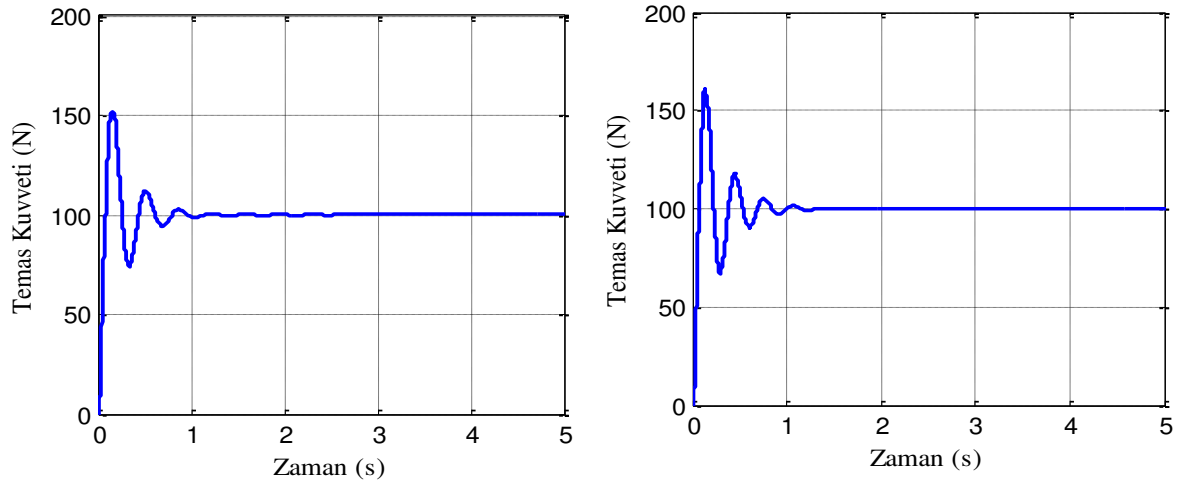


Şekil 3. 14. Farklı pantograf yay sabiti (k_{pan}) değeri için temas kuvveti değişimi



Şekil 3. 15. Farklı pantograf yay sabiti (k_{pan}) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

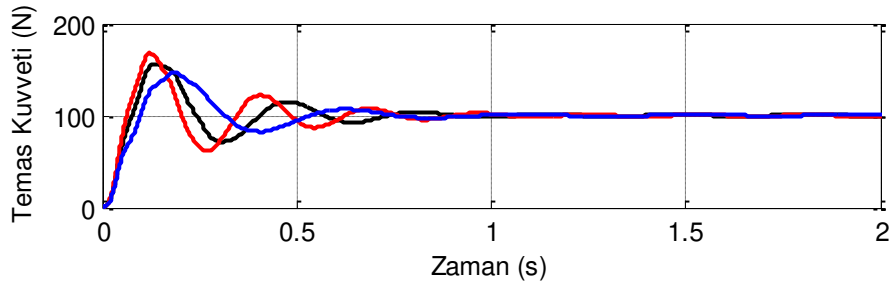
Şekil 3.16’da pantograf tepe yay sabiti (k_t) değeri değişiminin temas kuvveti üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.17’de tepe yay sabiti değerinin en düşük değeri olarak alınan $4 \cdot 10^3$ N/m ve en yüksek değeri olarak alınan $10 \cdot 10^3$ N/m için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir.



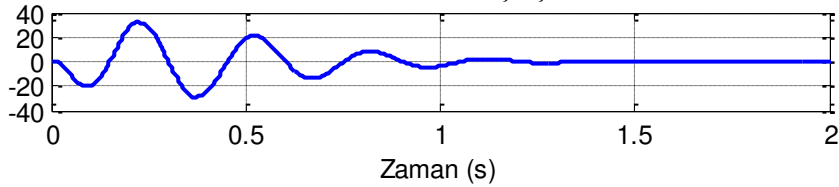
(a) $k_t = 6 \cdot 10^3$ N/m

(b) $k_t = 8 \cdot 10^3$ N/m

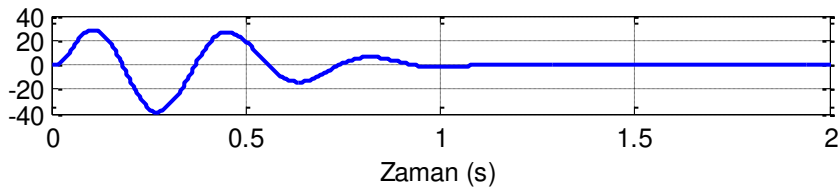
Şekil 3. 16. Farklı pantograf tepe yay sabiti (k_t) değeri için temas kuvveti değişimi



(a) Pantograf tepe yay sabitinin en yüksek ve en düşük değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması



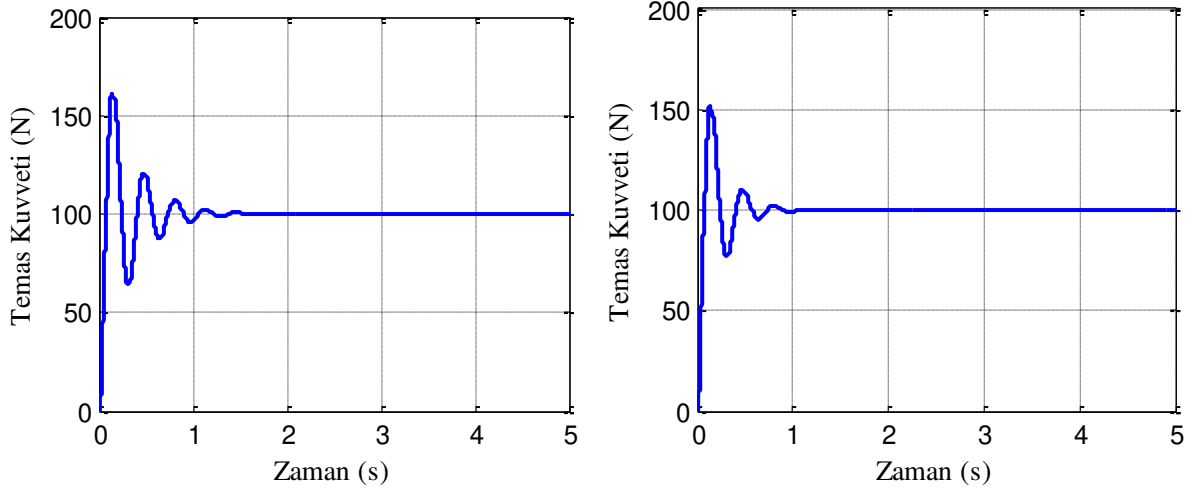
(b) Referans ve en yüksek pantograf tepe yay sabiti değerleri için temas kuvvetleri farkı



(c) Referans ve en düşük pantograf tepe yay sabiti değerleri için temas kuvvetleri farkı

Şekil 3. 17. Farklı pantograf tepe yay sabiti (k_t) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

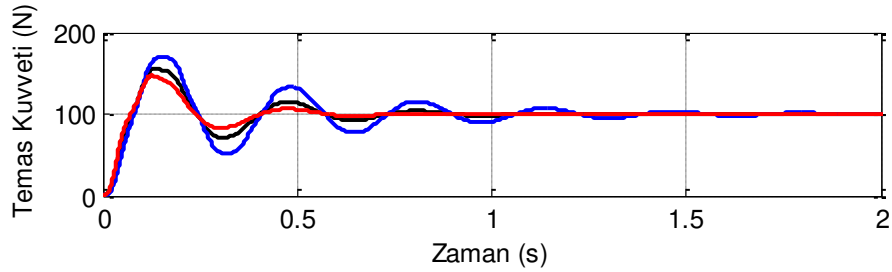
Şekil 3.18’de pantograf tepe sönümleme katsayısı değeri değişiminin temas kuvveti üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 3.19’da tepe sönümleme değerinin en düşük değeri olarak alınan 60 Ns/m ve en yüksek değeri olarak alınan 200 Ns/m için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir.



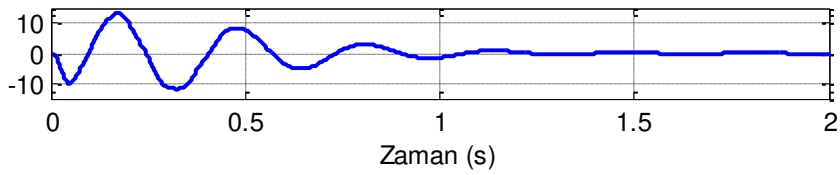
(a) $c_t = 100$ Ns/m

(b) $c_t = 160$ Ns/m

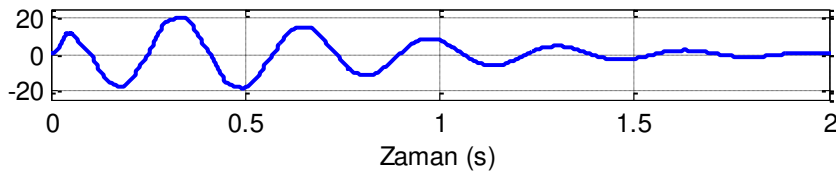
Şekil 3. 18. Farklı pantograf tepe sönümleme katsayısı (c_t) değeri için temas kuvveti değişimi



(a) Pantograf tepe sönümleme katsayısının en yüksek ve en düşük değerleri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması



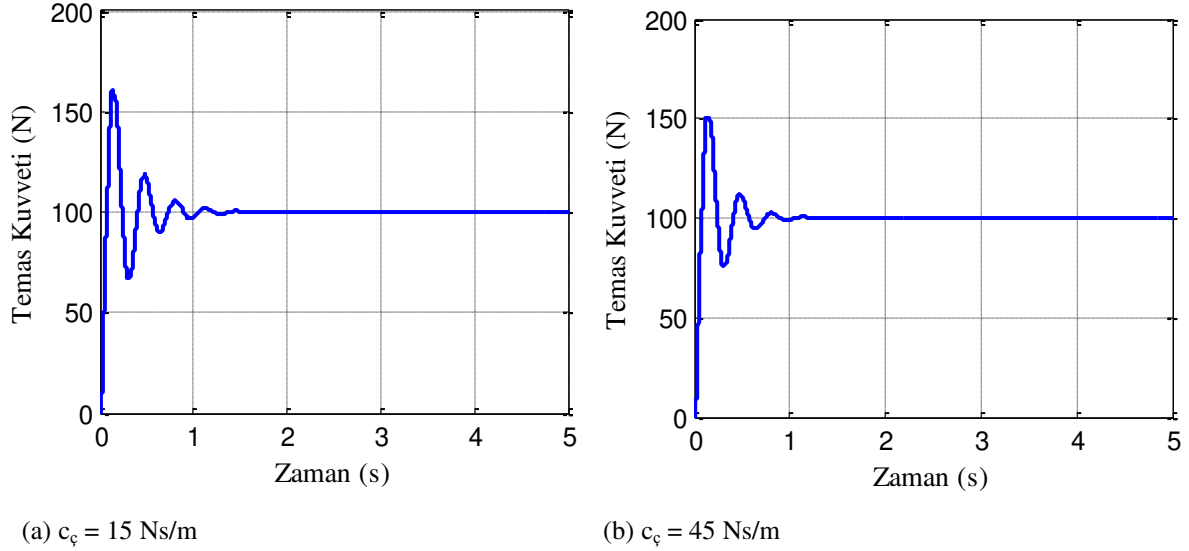
(b) Referans ve en yüksek pantograf tepe sönümleme katsayısı değerleri için temas kuvvetleri farkı



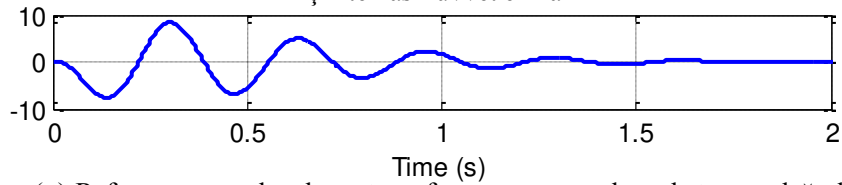
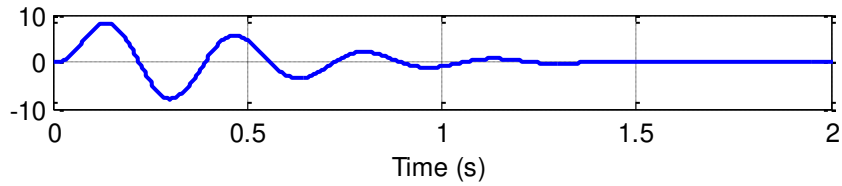
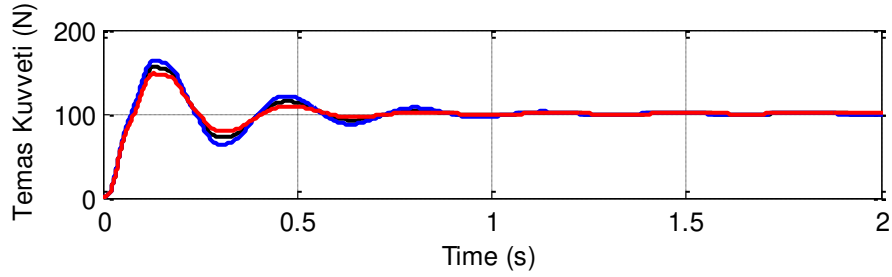
(c) Referans ve en düşük pantograf tepe sönümleme katsayısı değerleri için temas kuvvetleri farkı

Şekil 3.19. Farklı pantograf tepe sönümleme katsayısı (c_t) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.20’de pantograf çerçeve sönümleme katsayısı değeri değişiminin etkisi görülmektedir. Şekil 3.21’de çerçeve sönümleme değerinin en düşük değeri olarak alınan 5 Ns/m ve en yüksek değeri olarak alınan 60 Ns/m için elde edilen simülasyon sonuçları ve fark değerleri görülmektedir.



Şekil 3. 20. Farklı pantograf çerçeve sönümleme katsayısı ($c_{\text{ç}}$) değeri için temas kuvveti değişimi



Şekil 3.21. Farklı pantograf çerçeve sönümleme katsayısı ($c_{\text{ç}}$) değeri için temas kuvvetlerinin karşılaştırılması

Kütlenin artmasıyla birlikte sistemde salınımlar artacağından fark oranının daha da yükselmesi beklenir. Şekil 3.11 ve 3.13’de görüldüğü gibi daha yüksek kütle değeri için fark oranı, hem tepe hem de çerçeve kütlesi parametreleri değişimi için artmaktadır. Aynı şekilde daha düşük kütle değerlerinde fark oranı oldukça düşmektedir. Ayrıca bazı harici şartlarda, örneğin kış aylarında pantografin üzerine kar ve buz birikmesi kütle değerinin artmasına neden olacaktır. Böyle bir durumda temas kalitesi bozulacak, hatta belki kesilecektir.

Yay sabiti değeri artırılarak pantografla katenerin etkileşimi sonucu oluşan titreşimler azaltılacaktır. Böylelikle gerginliğin az olması nedeniyle oluşan sehimler de azalmış ve akım toplama kalitesi artmış olacaktır. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi pantografin katenere temas eden kısmı pabucu olduğu için, buradaki gerginliğin artması ile fark oranı daha da düşmektedir. Tepe yay sabiti (k_t) değişimi için elde edilen fark oranları ise daha yüksek ve daha düşük değer için Şekil 3.17’de görüldüğü gibi neredeyse aynıdır. PAK sistemlerinde sönümleyici değerinin artmasıyla oluşacak olan osilasyonlar ve sarsıntıları daha çabuk absorbe edilecektir. Ayrıca, ani şoklar ve darbelerin de etkisi yavaşça yutularak daha güvenli bir enerji akışı sağlanacaktır. Bu durum Şekil 3.19’da tepe sönümleme parametresi (c_t) için ve Şekil 3.21’de çerçeve sönümleme katsayısı (c_c) için görülmektedir.

Kütlenin artması sistemin çalışmasını kötü etkilerken, yay sabiti ile sönümleyici değerinin artması iyi etkilemektedir. Ancak gerginlik çok fazla arttırılırsa bu pantografin gereğinden fazla sertleşmesine ve temasın kötüleşmesine, hatta belki de kesilmesine neden olmaktadır. PAK sistemlerinde esas amaç her ne şartla olursa olsun temasın kesilmemesidir. Bu nedenle parametre ayarlanarak yapılan kontroldense, aktif kontrol kullanılması daha uygun olacaktır.

4. YENİ AKTİF PANTOGRAF KONTROL YAKLAŞIMLARI

4.1. Giriş

PAK sistemlerinde pantografin katener hattına ne kadarlık bir kuvvetle temas ettiği sistemin güvenilir çalışması açısından son derece önemlidir. Birçok sistemde pantografin yüksekliği dolayısıyla da katener hattına olan temas kuvveti bir defaya mahsus ayarlanarak çalışma anında sürekli sabit kalmaktadır. Ancak hem çevresel şartlardan hem de çalışma koşullarından dolayı katener hattı ile pantograf arasındaki temas artabilmekte veya azalabilmektedir. Bu temas kuvvetinin gereğinden yüksek olması pantograf yüzeyinin kısa sürede aşınmasına ve ömrünün azalmasına sebep olurken, düşük olması ise pantograf ile katener arasında arkların oluşmasına sebep olur. Bunun için pantograf çalışma anında sürekli kontrol edilerek, yüksekliğinin dolayısıyla temas kuvvetinin ayarlanması sağlanır. Bu tür sistemlere aktif pantograf sistemleri denir. Bu bölüm kapsamında aktif pantograf sistemlerinin kontrolü için, ayrıntıları aşağıda verilecek olan üç temel çalışma yapılmıştır.

- *Pasif ve aktif pantograf sisteminin karşılaştırılması:*

Öncelikle PAK sisteminin mekanik modelinden yola çıkarak matematiksel modeli oluşturulmuştur. Pantograf ve katener arasındaki temas kuvveti kontrolü için pasif ve aktif kontrol yöntemleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Aktif kontrol için PI denetleyici sistemi belirlenerek, tüm sistem modeli Matlab’da oluşturulup çözüme gidilmiştir. Pasif ve aktif kontrol algoritmaları için elde edilen simülasyonlar sonuçları analiz edilerek, karşılaştırılmalı bir şekilde verilmiştir.

- *Adaptif bulanık mantık tabanlı aktif pantograf kontrolü:*

Pantograf ve katener arasında oluşan temas kuvvetinin aktif kontrolü için yeni ve etkin bir yöntem olarak adaptif bulanık kontrol sistemi önerilmiştir. Aktif PI kontrolör ve adaptif bulanık kontrolör için sonuçlar elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Adaptif bulanık kontrol sisteminin geleneksel yöntemlere göre üstünlüklerinden bahsedilmiştir.

- *Görüntü işleme tabanlı aktif pantograf kontrolü:*

PAK sistem davranışı yeni bir yaklaşım olarak görüntü işleme yöntemleri ile izlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen görüntülerde kenar çıkarım yöntemleri kullanılarak temas bölgesi ve pantograf yüksekliği belirlenmiştir. Pantograf yüksekliği kontrol edilerek, aslında temas kuvveti kontrolü de gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, PAK sistemleri için literatüre önemli katkılar sağlanmıştır.

Geliştirilen aktif kontrol teknikleriyle pantografin katenere en uygun kuvvetle temas etmesi sağlanmaktadır. Pasif kontrol durumunda pantografin temas kuvveti sürekli sabit kalarak ark veya aşınma arızalarına sebep olabilmektedir. Ayrıca teknik özellikleri nedeniyle yenileme veya düzenleme işlemleri yapılamamaktadır ve sistem hızının artmasıyla modellenmesi daha zor bir hale gelmektedir. Pasif pantograf sistemlerinde, katenerin dalgalanması yüzünden yüksek hızlarda hasar meydana gelmekte ve sonuç olarak temas kaybı ve arklar oluşmaktadır. Temas kuvveti değişimini azaltmak için pasif yerine aktif pantograf kullanılması daha uygun olacaktır.

Farklı katener yapılarına ve çalışma koşullarına uygunluk aktif kontrollü pantograflar ile sağlanabilir ve aynı zamanda temas kuvvetindeki değişiklikler de kontrol edilebilir. Böylece, temas kuvveti değişimleri azaltılabilir, teknik ve mekanik problemlerin önüne geçilebilir ve pahalı ölçüm ve bakımlara olan gereksinim azaltılabilir. Meydana gelen arızaları ve sistem maliyetlerini azaltmak için, pantograf ve katener arasındaki etkileşim en uygun şekilde olmalıdır. Model geliştirilirken, sabit temas durumunun hedeflenmesi gerekmektedir [17, 20, 39, 54].

Pantograf gövdesi eklemleri bir yapıdan oluşan mekanik bir sistemdir. Bu eklemler çerçeve üzerinde farklı bölgelere yerleştirilen eyleyici ile aktif pantograf sistemi oluşturulabilmektedir. Pantografin aktif kontrolü ile daha kaliteli bir akım toplama sistemi ve temas sağlanarak hız artışı için de imkan sağlanmış olmaktadır. Ama bu eyleyicilerin yerleştirildiği bölge çok önemlidir. Çünkü bulundukları yere göre bazı durumlar gelişebilmektedir. Ayrıca eyleyiciyi hareket ettiren sistemin yapısı, kontrolü, gerekli enerjinin büyüklüğü ve nasıl sağlanacağı çok önemlidir. Eyleyicinin farklı bölgelerde kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, eyleyicinin bulunduğu bölgeye göre avantajları ve dezavantajlarından, verimliliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca eyleyicinin bulunduğu bölgeye göre boyut, kütle veya çeşidinin uygun seçilmesi de önemlidir. Çünkü her bölge için çalışabileceği frekans ve hız değerleri değişebilir. Bunun dışında, eyleyiciler hidrolik, pnomatik veya elektronik gibi farklı yapılarda da olabilirler [36, 81]. Aktif pantograflar farklı şekillerde tasarlanabilirler. Pantografin yukarı doğru hareketini sağlayan eyleyiciler tarafından uygulanan kuvvet pantografin alt çerçevesine, üst çerçevesine ya da her iki çerçeveye de uygulanabilir.

Trenin çatısından direkt pantograf tepesine kaldırma kuvvetinin uygulanmasıyla gerçekleştirilen aktif pantograflar da mevcuttur. Ayrıca basit bir kontrolörle bile bu eyleyiciler kontrol edilerek temas kuvvetinin belirlenen bir değerde tutulması sağlanmaktadır [70, 73, 77].

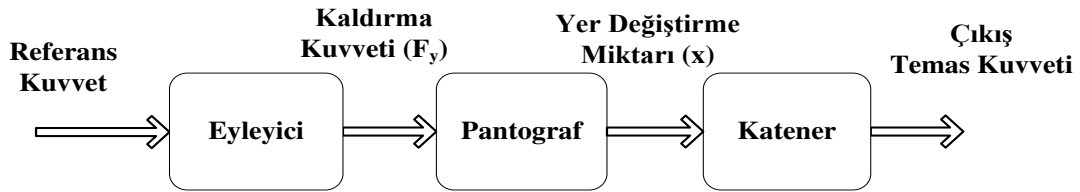
Elektrikli demiryolu sistemlerinde her ne şartta olursa olsun temasın kesilmemesi, kaliteli akım toplama işlemi için çok önemlidir. Ayrıca sistemin verimli bir şekilde çalışması, performansının artırılması ve tehlikeli durumların oluşmaması için de önemlidir. Eski sistemlerde temasın kesilmemesi için temas teline pantograf tarafından uygulanan temas kuvvetinin artırılması uygulanan yöntemlerden en yaygınıydı. Ancak bu çok etkili ve güvenilir bir yöntem değildir. Bu şekilde temas telinde gereğinden fazla bir yükselme oluşabilir ve pantograf ile katenerde fazla aşınma oluşabilir. Pantografin tepe kütlelerinin artırılmasına yönelik çalışmalarda mevcuttur. Fakat bunlar çok verimli olmayan ve maliyet, aşınma gibi etkenler açısından dezavantajları olan yöntemlerdir. Bu nedenle temas kalitesini arttırmak için en uygun ve ucuz yöntem aktif pantografların kullanılmasıdır. Böylece yeni bir hat ve sistem kurmaya gerek kalmadan, var olan sistem etkinleştirilmektedir. Aktif pantograflar normal çalışma standardını yakalamak için sistemin iç yapısından kaynaklanan ya da harici hava şartları gibi olumsuz şartlara uyum sağlarlar. Böylece oluşabilecek kötü durumlar ve telde oluşan salınımlar azaltılmaktadır [4, 86].

Aktif kontrollü pantograflar kullanılarak:

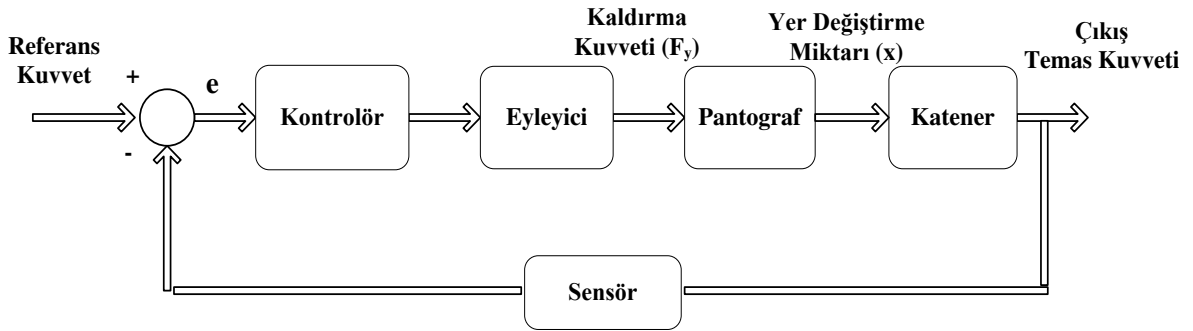
- Sistemin dinamik cevabı iyileştirilmekte, etkileşimler ve değişimler azaltılmaktadır.
- Daha yüksek hızlara çıkmaya imkan sağlanmaktadır.
- Mevcut sistem verimliliği artırılmaktadır.
- Yeni bir sistem kurmaya gerek kalmadığı ve verimlilik artırıldığı için maliyet açısından büyük avantaj sağlamaktadır.
- Temas kuvveti değişimi azaltıldığı için sistemin mekanik yapısı daha az etkilenmekte, oluşan hasar ve aşınmalar azalmaktadır. Dolayısıyla bakım ve onarım masrafları düşmektedir.
- Daha güvenilir bir çalışma şekli sağlanmaktadır.

4.2 Pasif ve Aktif Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, PAK sistemleri için kullanılan aktif ve pasif kontrol tekniklerinin simülasyon sonuçları üzerinden karşılaştırmaları verilmiştir. Öncelikle PAK sistemi modellenmiş, sonrasında pasif ve aktif kontrol algoritmaları verilerek Matlab’da simülasyonları yapılmıştır. Kullanılan PAK sistemi, bir önceki bölümde Tablo 3.1’de verilen değerler kullanılarak modellenmiştir [62]. Denklem (3.26)’da verilen transfer fonksiyonu kullanılarak pantograf modeli oluşturulmuştur. Denetleyiciler, elektrikli demiryolu sistemlerinde oluşan belirsizlikleri ve bozulmaları belirleyip minimize etmek için tasarlanmaktadır. Temas kuvvetinin pasif kontrolüne yönelik şematik bir blok diyagramı Şekil 4.1’de, aktif kontrolüne yönelik şematik bir blok diyagramı ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

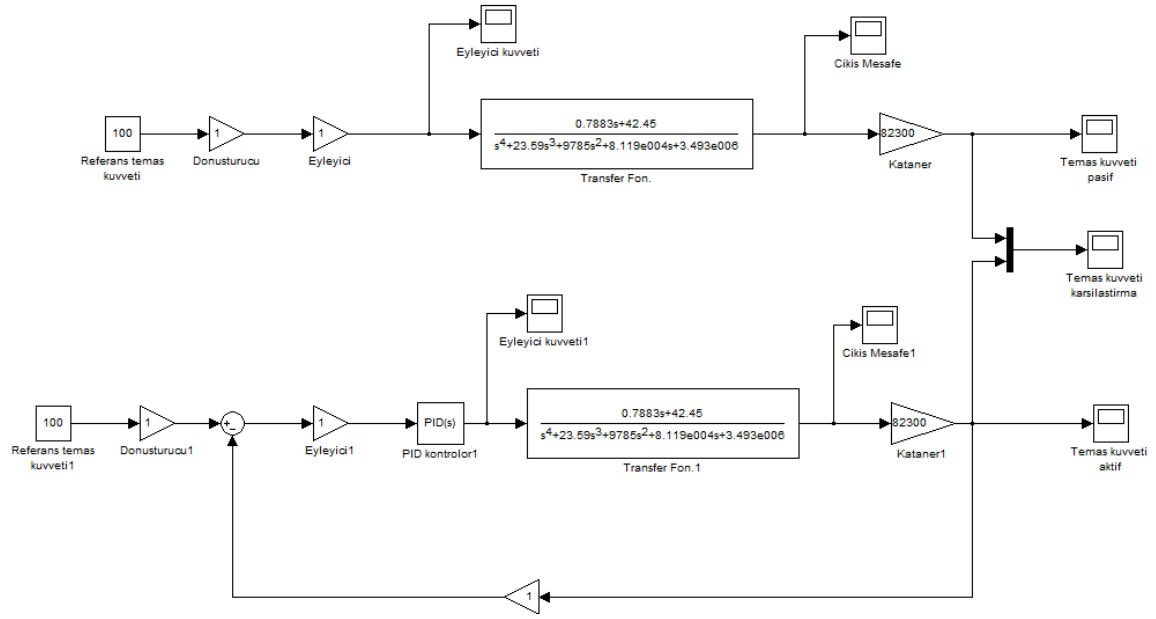


Şekil 4.1. Pasif bir PAK sistemi için blok diyagramı



Şekil 4.2. Aktif bir PAK sistemi için blok diyagramı

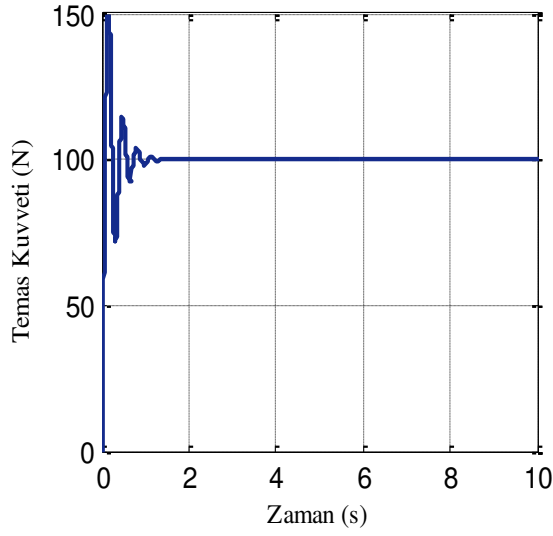
Kontrolör olarak bir PI kontrolör kullanılmıştır. K_p oransal kazanç ve K_i integral kazanç değerleri deneme yanılma yoluyla belirlenmiştir. Eyleyici, simülasyonda bir kazanç bloğuyla modellenmiştir. Katener sabit bir yay sertliği değeri alınarak model tamamlanmıştır. Pasif ve aktif kontrol sistemleri için oluşturulan Matlab-Simulink modeli Şekil 4.3’de verilmiştir.



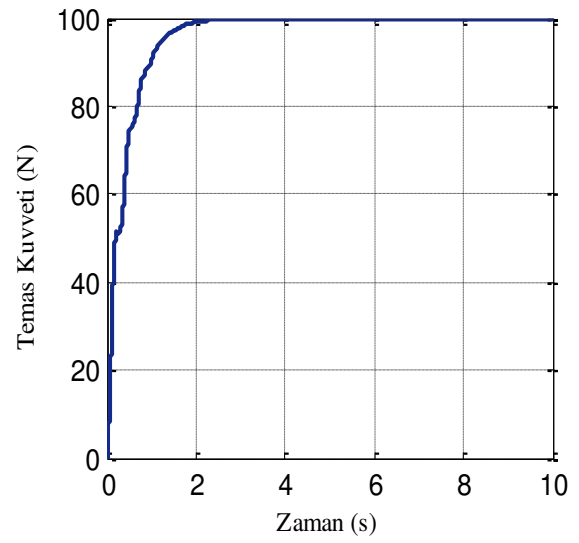
Şekil 4.3. Pasif ve aktif kontrol sistemlerinin Matlab-Simulink modeli

Şekil 4.1'deki blok diyagramında görüldüğü gibi pasif kontrol sistemi, sadece referans kuvvet değerine bağlı olarak değişmektedir ve giriş değeri çıkıştan tamamen bağımsızdır. Böyle bir sistem herhangi bir karşılaştırma işlemi yapmadığı için, kontrol edilebilir bir özelliği yoktur. Pasif sistem, sistemin kendi içinde oluşabilecek arızalardan, parametre değişimlerinden ya da harici bozulmalardan tamamen habersiz bir şekilde çalışmaktadır. Aktif kontrol sistemi ise sistemde oluşan değişimleri algılayarak, gerekli kontrolü sağlayıp çıkışı istenen değere getirmektedir.

Pasif ve aktif kontrol sisteminde 100 N referans kuvvet değeri için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Aktif kontrol sistemi için iki farklı referans kuvvet değerine bağlı olarak elde edilen temas kuvveti değişimleri Şekil 4.5'de verilmiştir.

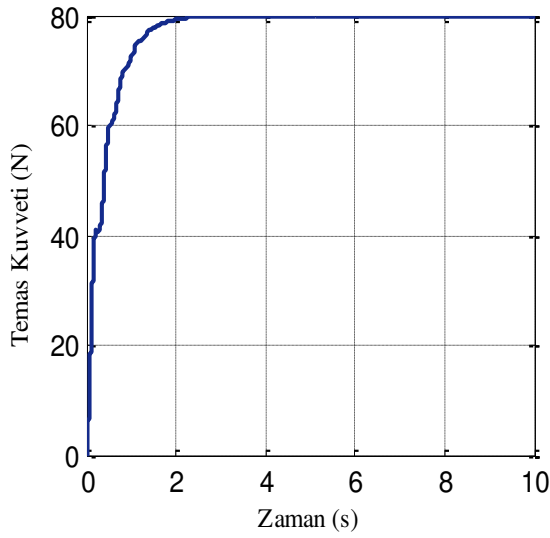


(a) Pasif kontrol sistemi

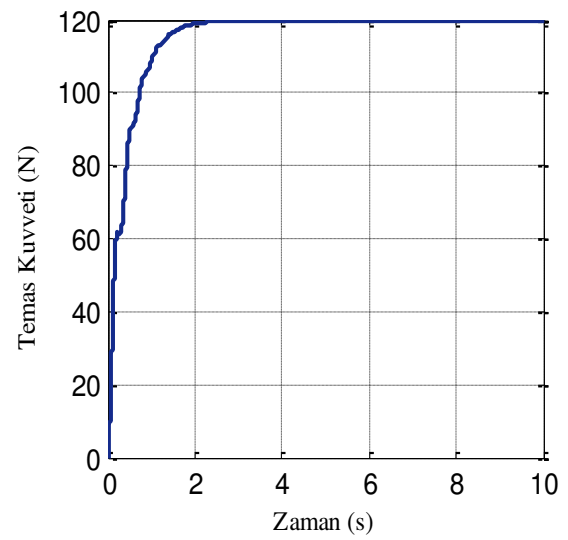


(b) Aktif kontrol sistemi

Şekil 4.4. Pasif ve aktif kontrol sisteminde, 100 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi



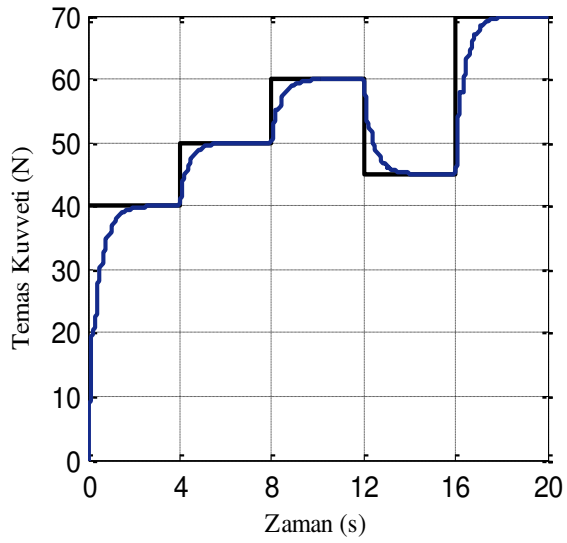
(a) 80 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi



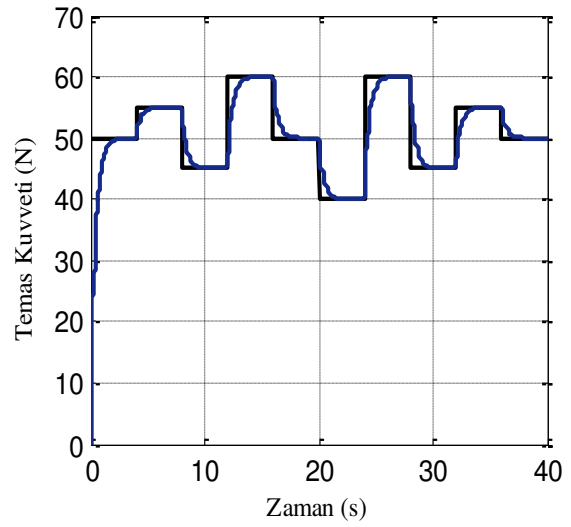
(b) 120 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.5. Aktif kontrol sisteminde iki farklı referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.6'da, belirli bir süre içerisinde referans kuvvetin değişmesi durumunda sistemin buna verdiği cevap gösterilmiştir. Şekil 4.6 (a)'da dört saniye aralıklarla sistemin referans kuvveti 40, 50, 60, 45 ve 70 N olarak değiştirilerek simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekil 4.6 (b)'de on farklı referans kuvveti için simülasyon sonuçları verilmiştir.



(a) Beş farklı referans kuvveti için temas kuvveti değişimi



(b) On farklı referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.6. Aktif kontrol sisteminde, farklı referans kuvvetleri için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.6 hareket halinde olan bir trenin katener hattında farklı gerilmelere maruz kaldığı durumdaki pantografin davranışını göstermektedir. Görüldüğü gibi, PI kontrolör kullanılarak katener hattındaki esneklik değişimlerine karşılık pantografin uyguladığı temas kuvveti değiştirilmektedir. Pantograf her an katener hattına göre hareket ederek katener hattına olan temas kuvvetini en uygun seviyede tutmaya çalışmaktadır. Böylece katener hattının sarkması durumunda pantograf daha az kuvvet uygulamakta, hattın gerilmesi durumunda ise pantograf hatta yaklaşmak için daha fazla kuvvet uygulamaktadır. Böylece pasif kontrole göre arkların ve hızlı aşınmaların oluşması önlenmektedir.

Elde edilen simülasyon sonuçlarından aktif kontrol tekniklerinin sistemin güvenilir çalışması, arızaların oluşmaması ve konfor açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Özellikle elektrikli demiryolu sistemlerinde aktif kontrol tekniklerinin gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmesi için çok hızlı ve etkin çalışan aktif kontrol algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yönden bir ön çalışma niteliğinde olan bu bölüm, çalışma parametrelerinin göz önüne alındığı, etkili, hızlı ve sağlam kontrol algoritmalarının geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır.

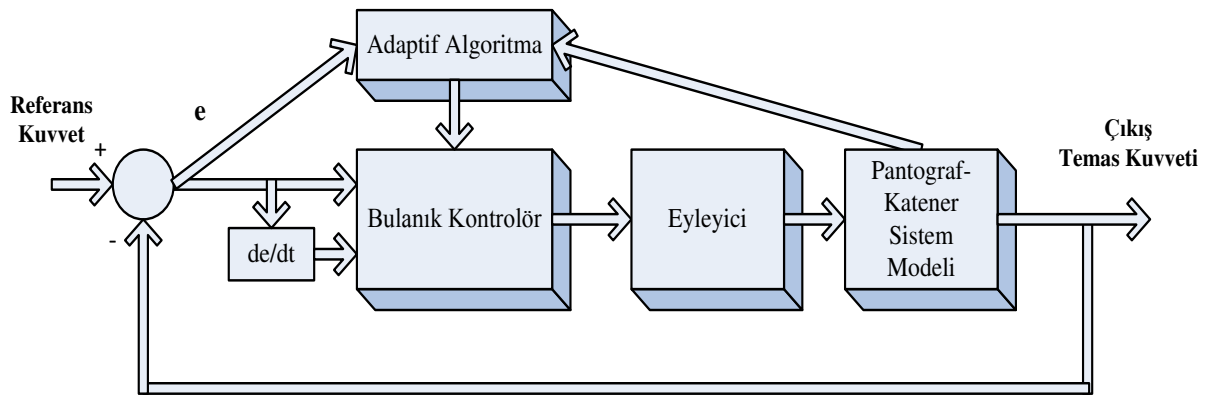
4.3. Adaptif Bulanık Mantık Kullanılan Aktif Kontrol Sistemi

Bu bölümde, PAK sistemi için yeni bir model tasarımı önerilmektedir. Model adaptif bulanık kontrolör kullanılarak oluşturulmuştur. Burada amaç, pantograf ve katener arasındaki temas kuvveti için aktif ve etkin bir kontrol yöntemi geliştirmek ve geleneksel kontrol yöntemleri kullanmadan PAK sisteminin modelini oluşturmaktır. Buna ek olarak, elektrikli demiryolu sistemleri için ayrıntılı bir PAK sistemi modeli verilmiştir. Matlab-Simulink programı kullanılarak model tasarlanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

Geleneksel kontrol tekniklerinin yetersiz olduğu durumlarda, akıllı kontrol sistemlerine dayanan daha ileri kontrol tekniklerinin kullanılması uygun olmaktadır. PID kontrolörlerde, sistem koşullarına bağlı olarak parametre değişiminin ve parametre ayarlamasının zorluğundan dolayı bulanık mantık kontrolörler tercih edilir. Bulanık mantık sistemleri, belirsiz, veri yapısının tam olarak bilinmediği ve insan düşüncesinin önemli olduğu sistemlerde kullanılmaktadır. İnsanların düşünceleri ve günlük yaşamda kullandıkları kelimeler makinelerde kullanılmaktadır. Denetleme matematiksel modellere ve karmaşık işlemlere ihtiyaç olmadan yapılmaktadır. İstenen çıkışları elde etmek için, giriş dilsel ifadeler kullanılarak ayarlanmaktadır.

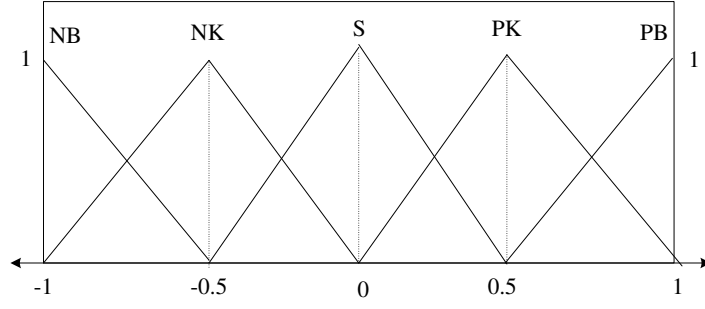
Değişen çevre koşulları ve zaman içinde elemanların yaşlanması ile sistem parametreleri değişmektedir. Sistem dinamiklerinin değişimini dikkate alarak kazanç hesaplaması yapan yöntemler önemlidir. Adaptif bir sistem kazançlarının çevrimiçi ayarlanmasıyla elde edilebilir. Adaptif kontrol sistemleri otomatik olarak sistemdeki değişikliklere göre kontrolör parametrelerini değiştirirler. Sistemde herhangi bir farklı durum oluşursa, bu adaptif kontrolör ile kontrol edilebilir. Çalışma koşulları veya sistemin dış koşullarının değişimlerinin sonucu olarak, kontrol sistemi ayarları sürekli olarak değiştirilmektedir. Ancak, literatürde, PAK sistemi modeli için adaptif bulanık mantık kontrol yöntemini kullanan çalışmalara rastlanmamıştır ve genellikle geleneksel kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Adaptif bulanık kontrolör sistemleri ve akıllı kontrol teknikleri çoğunlukla aktif süspansiyon sistemleri için kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yolcuların araçlarda daha kolay seyahat edebilmesi için tasarlanmıştır [136, 137].

PAK sistemlerinde, süspansiyon sistemlerinin kontrolü çok iyi yapılmalıdır. Bu nedenle, bu bölümde, PAK sistemi için adaptif bulanık mantık kontrolör kullanarak etkin bir kontrol sistemi Matlab-Simulink ortamında oluşturmuştur. Temas kuvveti kontrolü için şematik bir blok diyagramı Şekil 4.7’de verilmiştir. Sistemin girişi istenen referans temas kuvveti değeridir. Referans değeri ile sistemin çıkış değeri arasındaki fark hata değeridir ve bulanık mantık kontrol hata değerini minimize etmektedir. Eyleyici pantografin yukarı doğru hareket etmesi için gerekli kaldırma kuvvetini uygulamaktadır. Bulanık kontrol sisteminin iki girişi ve bir çıkışı vardır. Giriş değerleri hata ve hatanın türevidir. Bulanık kontrolör Mamdani çıkarım türünü kullanır. Mamdani türü daha yaygın olarak kullanılmakta ve her türlü sisteme uygulanabilmektedir. Mamdani çıkarım tipi max-min çıkarım metodu olarak bilinir. Durulaştırma metodu ağırlık merkezi yöntemi olarak seçilir [138, 139].

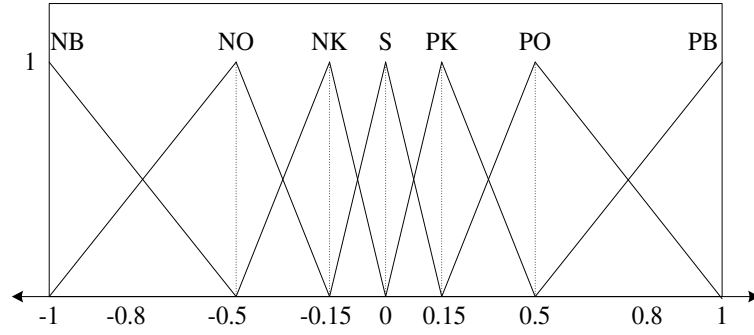


Şekil 4.7. Önerilen adaptif bulanık kontrol algoritmasının blok diyagramı

Bulanık kontrolör parametreleri, Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonları kontrol sistemlerinde daha fazla tercih edilir. Bu nedenle, bu çalışmada, giriş üyelik fonksiyonları düzgün dağılımlı beş üçgen fonksiyon şeklinde seçilmiştir ve Şekil 4.8 (a)’da gösterilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonları düzgün dağılımlı olmayan yedi üçgen fonksiyon olarak seçilmiştir ve Şekil 4.8 (b)’de gösterilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları $[-1, +1]$ aralığında seçilmiştir. Bir elemanın üyelik derecesi bu elemanın üyelik fonksiyonu değerini gösterir ve 0 ve 1 arasında herhangi bir değer olabilir. Kural tablosu ve dilsel değişkenler Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



(a) Giriş değişkenleri, “hata” ve “hata’nın türevi” için üyelik fonksiyonları



(b) Çıkış değişkeni “kontrol olayı” için üyelik fonksiyonları

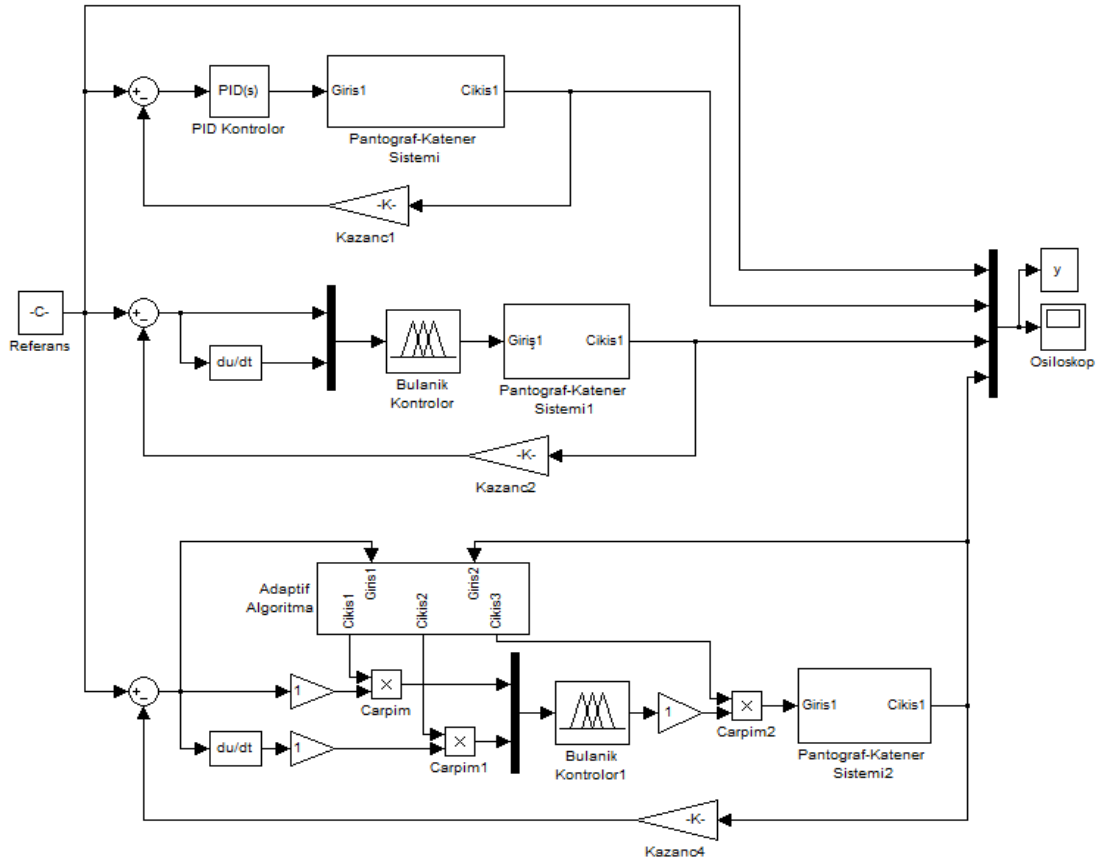
Şekil 4.8. Bulanık kontrolör parametreleri

		Hata				
		NB	NK	S	PK	PB
Hatanın Türevi	NB	PB	PB	PO	PK	S
	NK	PB	PO	PK	S	NK
	S	PO	PK	S	NK	NO
	PK	PK	S	NK	NO	NB
	PB	S	NK	NO	NB	NB

NB: Negatif Büyük
NO: Negatif Orta
NK: Negatif Küçük
S: Sıfır
PK: Pozitif Küçük
PO: Pozitif Orta
PB: Pozitif Büyük

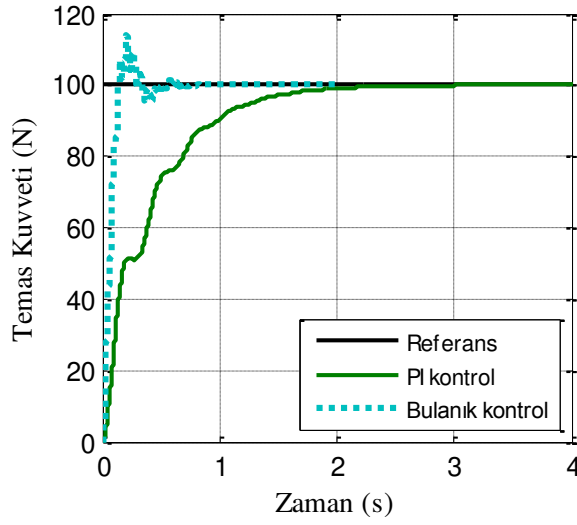
Şekil 4.9. Kural tablosu ve dilsel değişkenler

Şekil 4.10’da Matlab-Simulink’de oluşturulan blok diyagramı görülmektedir. PI kontrolör modeli, kazanç değerleri ayarlanarak oluşturulmuştur. Adaptif algoritma bloğu iki girişli ve üç çıkışlıdır. Giriş değerleri, hata ve sistemin çıkış değerleridir, çıkış değerleri giriş ve çıkış ölçekleme faktörleri ile çarpılır.

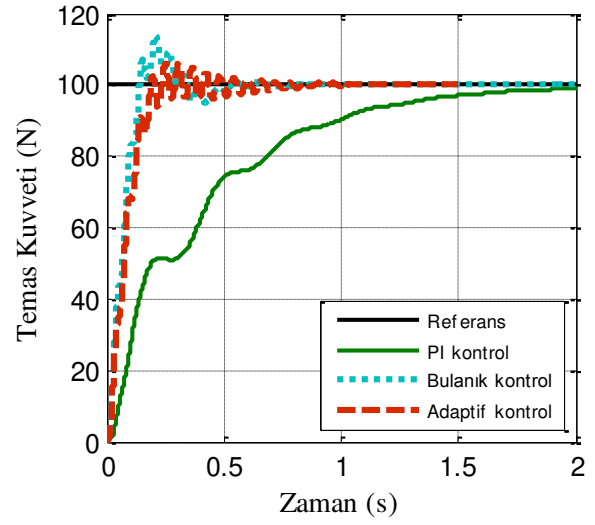


Şekil 4.10. Önerilen yöntemin Matlab-Simulink blok diyagramı

Simülasyon sonuçları PI, bulanık mantık ve adaptif bulanık mantık kontrolör için elde edilmiştir ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11 (a)’da 100 N’luk referans kuvveti için PI ve bulanık kontrolörün simülasyon sonuçlarını göstermektedir. İki model arasındaki farkları daha açık görebilmek için PI ve bulanık kontrolörün simülasyon sonuçlarının birleşimi verilmiştir. Her üç kontrolör için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.11 (b)’de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, bulanık ve adaptif bulanık kontrol için elde edilen simülasyon sonuçlarında referans temas kuvveti değerini yakalama süresi daha kısadır. PI kontrolör için yakalama süresi diğerleriyle karşılaştırıldığı zaman oldukça uzundur.



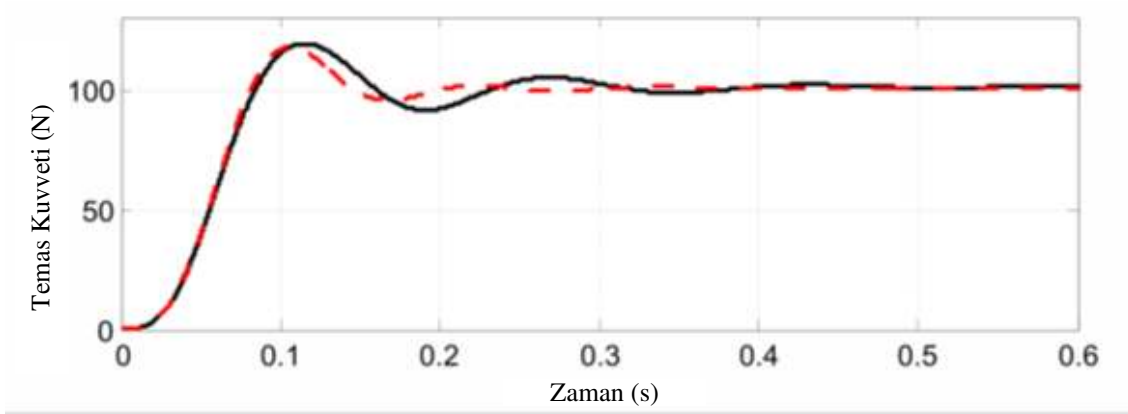
(a) PI ve bulanık kontrolör için simülasyon sonuçları



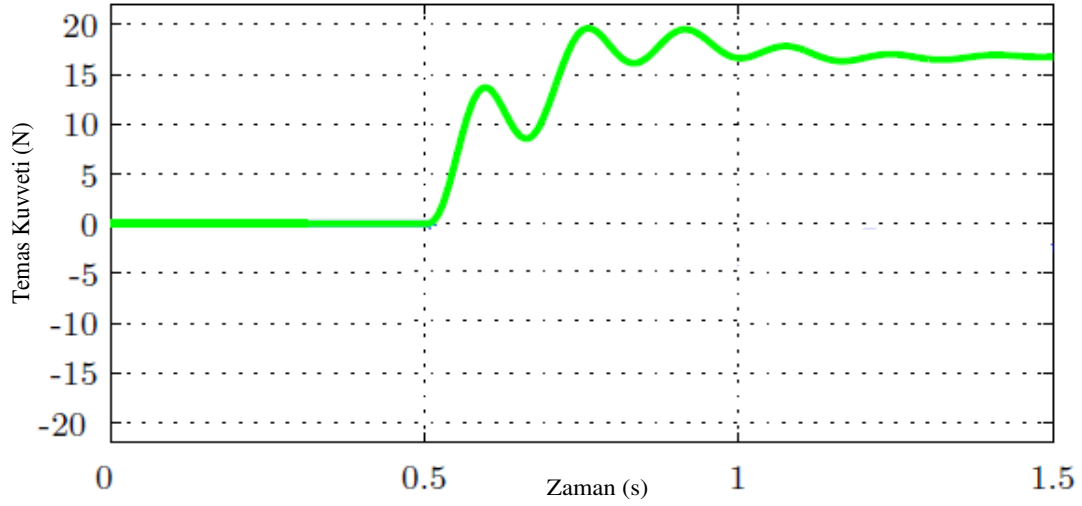
(b) PI, bulanık ve adaptif bulanık kontrolör için simülasyon sonuçları

Şekil 4.11. 100 N'luk referans kuvveti için PI, bulanık ve adaptif bulanık kontrolör simülasyon sonuçları

Şekil 4.12 (a), [67] nolu referansta öngörülü kontrol modeli ve yatay hareket tahmini yaklaşımları önerilerek oluşturulan aktif kontrol sistemleri için elde edilen temas kuvveti değişimi grafiklerini göstermektedir. Düşük hız değerinde ve 100 N referans temas kuvveti değeri için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekilde kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen eğri öngörülü kontrol modelinin, siyah çizgi ile gösterilen eğri ise öngörülü kontrol ve yatay hareket tahmini yaklaşımlarının birleştirilmesiyle elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.11'de verilen grafikler, maksimum aşma ve yerleşme süresi açısından [67] nolu referans için verilen grafikler ile karşılaştırıldığında daha avantajlı oldukları görülmektedir. Şekil 4.12 (b)'de, [68] nolu referansta 20 N temas kuvveti değerinde H_{∞} aktif kontrol modeli için elde edilen temas kuvveti değişim grafiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi referans değeri yakalama süresi oluşturulan bulanık ve adaptif bulanık kontrolörler ile elde edilen sonuçlardaki referans değeri yakalama sürelerinden oldukça uzundur.



(a) [67] nolu referanstan alınan temas kuvveti değişimi grafiği

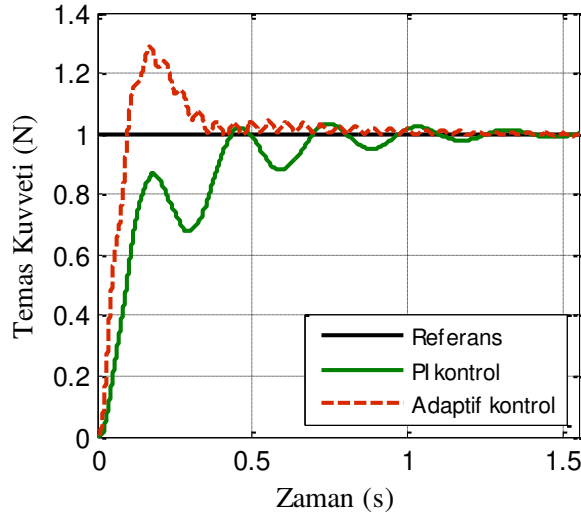


(b) [68] nolu referanstan alınan temas kuvveti değişimi grafiği

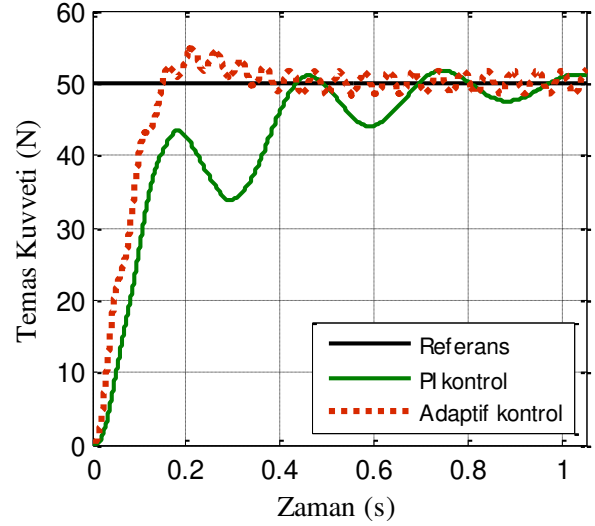
Şekil 4.12. [67] ve [68] nolu referanslardan karşılaştırma için alınan temas kuvveti değişimi grafikleri

Şekil 4.13’de 1 N ve 50 N referans kuvvet değerleri için PI ve adaptif kontrolörün simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4. 14 (a)’da 200 N referans kuvvet değeri için PI ve adaptif kontrolörün simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.14 (b)’de, belirli bir süre içerisinde referans kuvvetin değişmesi durumunda sistemin buna verdiği cevap gösterilmiştir. Bir saniye aralıklarla sistemin referans kuvveti değeri sırasıyla 100, 150, 75, 50 ve tekrar 100 N olarak değiştirilerek simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.14 farklı işletim şartlarının olduğu durumlarda ve tren hareket ederken, sistem davranışını örneklendirmekte ve adaptif kontrolörün PI kontrolöre karşı avantajını göstermektedir.

Şekillerden görüldüğü gibi, tasarlanan model pantograf ve katener hattı arasında oluşan temas kuvvetini en uygun seviyede tutmaya çalışmaktadır. Böylelikle tehlikeli durumların ve arızaların önüne geçilmekte ve akım toplama kalitesi artırılmaktadır.

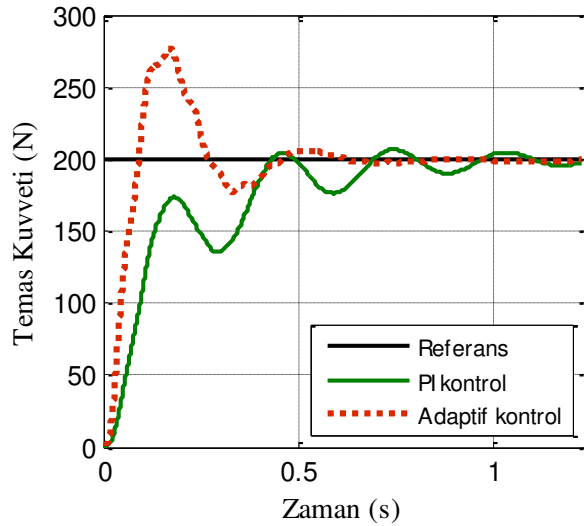


(a) 1 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

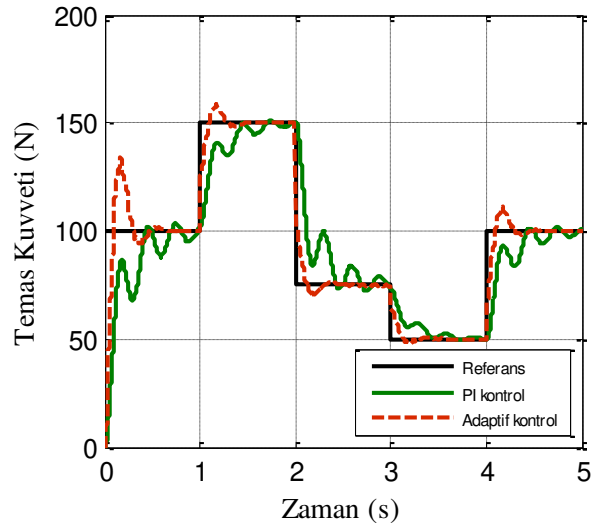


(b) 50 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.13. İki farklı referans kuvveti değerinde PI ve adaptif bulanık kontrolör için simülasyon sonuçları



(a) 200 N'luk referans kuvveti için temas kuvveti değişimi

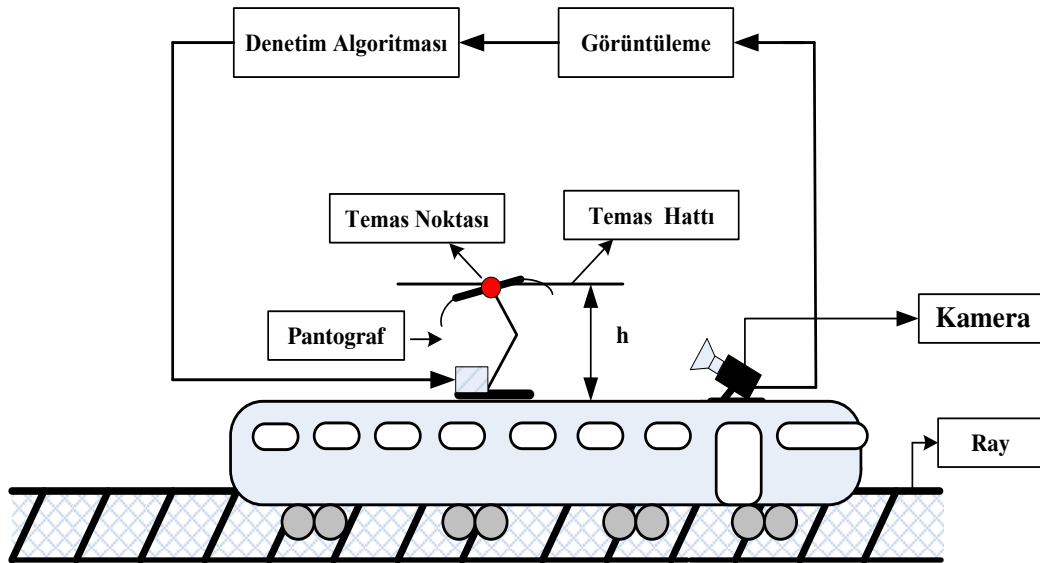


(b) Çoklu referans kuvvet değeri için temas kuvveti değişimi

Şekil 4.14. Farklı referans kuvveti değerlerinde PI ve adaptif bulanık kontrolör için simülasyon sonuçları

4.4. Görüntü İşleme Tabanlı Aktif Kontrol Sistemi

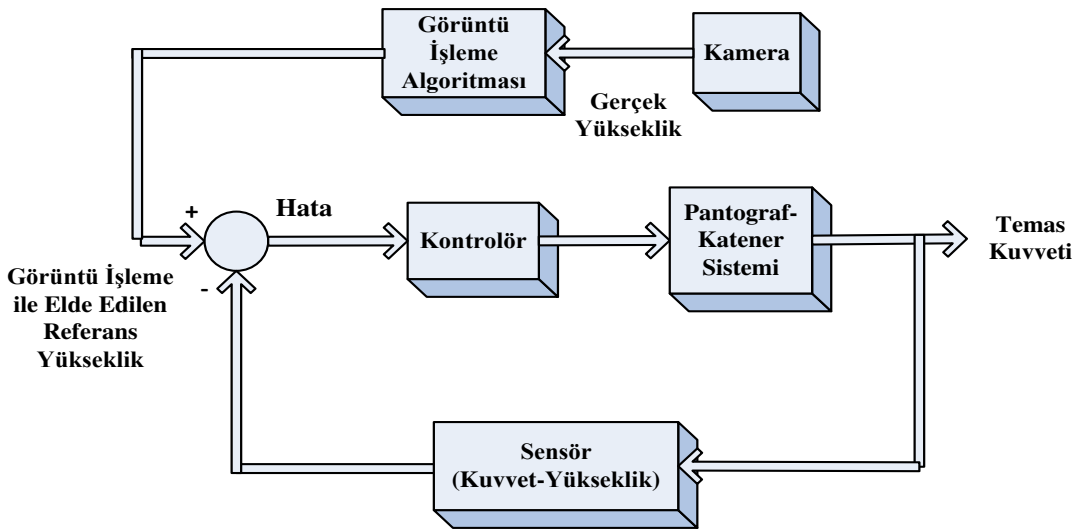
Bu bölümde, PAK sistemlerinde oluşan sorunların ve arızaların izlenebilmesi için pantograf sisteminin davranışı incelenmektedir. PAK sisteminin gerçek zamanlı görüntüsü kullanılarak, pantograf yüksekliğini belirlemek için yeni bir yöntem önerilmektedir. Pantografin olması gereken yükseklik değerini hesaplayabilmek için görüntü işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Lokomotifin üzerine yerleştirilen normal kameralar ile PAK sisteminin gerçek zamanlı görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntü üzerinde Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü uygulanarak pantograf temas bölgesi tespit edilmektedir. Tespit edilen pantograf temas bölgesinden pantograf yüksekliği hesaplanmaktadır. Bu işlem gerçek zamanlı çalıştırılarak pantografin davranışı incelenmektedir. Pantografin olması gereken yüksekliği tespit edildikten sonra, pantograf yüksekliğini istenilen düzeyde tutmak için aktif bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Şematik diyagram ve önerilen sistemin bileşenleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



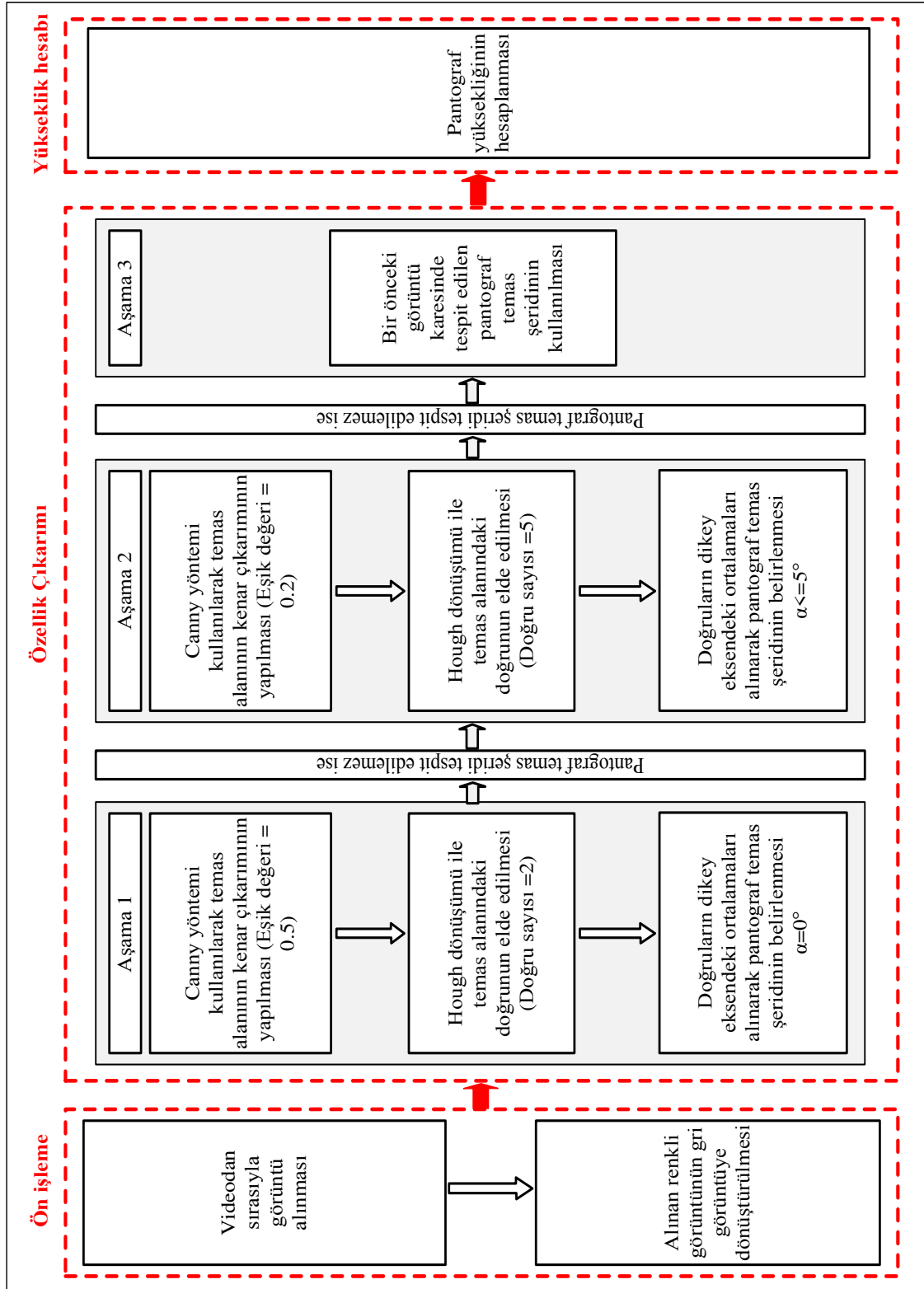
Şekil 4.15. Önerilen sistemin şematik diyagramı

Pantograf ve temas teli arasındaki yüksekliğin uygun bir değerde olması, aynı zamanda, doğru temas için de gereklidir. Uygun olmayan bir yükseklik aralarındaki temas etkileşiminde uyumsuzluk sorunlarına yol açar. Hem yüksek hem de düşük yükseklik seviyeleri akım toplama kalitesinin bozulmasına neden olur.

Burada, pantograf ve temas teli arasındaki uygun yükseklik görüntü işleme kullanılarak belirlenmiş ve aktif pantograf sistemi için PI kontrolör kullanılmıştır. Şekil 4.16, önerilen görüntü işleme tabanlı aktif kontrol sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Şekil 4.16'dan görüldüğü gibi, görüntü işleme tabanlı pantograf durum izleme yönteminde lokomotif üzerine yerleştirilen kameralardan PAK sisteminin görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntüler üzerinde yöntem uygulanarak pantograf için durum izleme yapılmakta ve pantograf yüksekliği tespit edilmektedir. Pantograf yüksekliğinin kullanılan kontrolör sayesinde verilen referans değerde kalması sağlanmaktadır. Önerilen görüntü işleme yöntemi genel olarak ön işleme, özellik çıkarımı ve yükseklik hesabı olmak üzere üç temel bloktan oluşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan görüntü işleme yönteminin blok şeması Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Önerilen görüntü işleme tabanlı yöntem için blok diyagramı



Şekil 4.17. Görüntü işleme algoritması için blok şeması

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, videolardan görüntülerin alınması ve bu renkli görüntülerin gri formatlı görüntüye dönüştürülmesi işlemi ön işleme bloğunda gerçekleştirilmektedir. Özellik çıkarımı bloğunda ise gri görüntüye kenar çıkarımı uygulanarak görüntüde bulunan kenarlar elde edilmektedir. Elde edilen kenar çıkarımı görüntüsü üzerinde, Hough Dönüşümü ile pantograf üst çubuğu tespit edilmektedir. Pantograf üst çubuğunun tespit edilmesi işlemi görüntüdeki doğruların açısı dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu işlem genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Aşama 1’de belirli bir eşik değerine göre kenar çıkarımı yapılır, kenar çıkarımı elde edilen görüntü üzerinde belirtilen doğru sayısı kadar doğru tespit edilir ve tespit edilen doğruların açı değerleri dikkate alınarak pantograf üst çubuğu tespit edilir. Önerilen yöntemde, eğer Aşama 1’de pantograf üst çubuğu tespit edilmezse Aşama 2 kullanılarak görüntü üzerinde daha detaylı özellik çıkarımı yapılmaktadır. Eğer Aşama 2’de de pantograf üst çubuğu tespit edilmezse bir önceki görüntüde elde edilen özellikler kullanılmaktadır. Yükseklik hesabı bloğunda ise görüntü üzerinde pantograf üst çubuğunun konumu dikkate alınarak pantograf yüksekliği hesaplanmaktadır. Ayrıca önerilen yöntemde, tespit edilen pantograf üst çubuğunu içeren bir temas alanı oluşturulmaktadır. Bir sonraki görüntü karesinde görüntünün tamamı yerine sadece pantograf temas bölgesi kullanılarak işlem yapılmaktadır.

Pantograf yüksekliğini hesaplayabilmek için öncelikle pantografin üst çizgisi her karede alınmalıdır ve pantografin konumu tespit edilmelidir. İlk aşamada, pantograf üst çizgisi temas alanı içerisindeki pantograf çizgilerinden bulunur. Bir sınırlama alanı algoritmada belirtilir. Pantografin üst çizgisi bu sınırlayıcı alan içerisindeki çizgilerin eğim değerleri dikkate alınarak belirlenir. Pantograf üst çizgisi Denklem (4.1)’de verilen doğru formülünün eğiminden hesaplanır.

$$eğim = m = \tan \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.1)$$

Burada m eğimi, y_1 ve y_2 doğrunun düşey eksenindeki değerleri ve x_1 ve x_2 doğrunun yatay eksenindeki değerleri göstermektedir. Görüntüde pantograf üst çizgisinin yüksekliği elde edildikten sonra pantografin gerçek yüksekliği tespit edilmektedir. Tespit edilen pantografin üst çizgisi üzerinde bulunan doğrunun koordinat değerleri kullanılarak bu doğruyu da içinde barındıran yeni bir sınırlayıcı alan oluşturulmaktadır. Bu alanın konum bilgisi bir sonraki görüntüde kullanılarak, pantograf üst çizgisi sadece bu sınırlayıcı

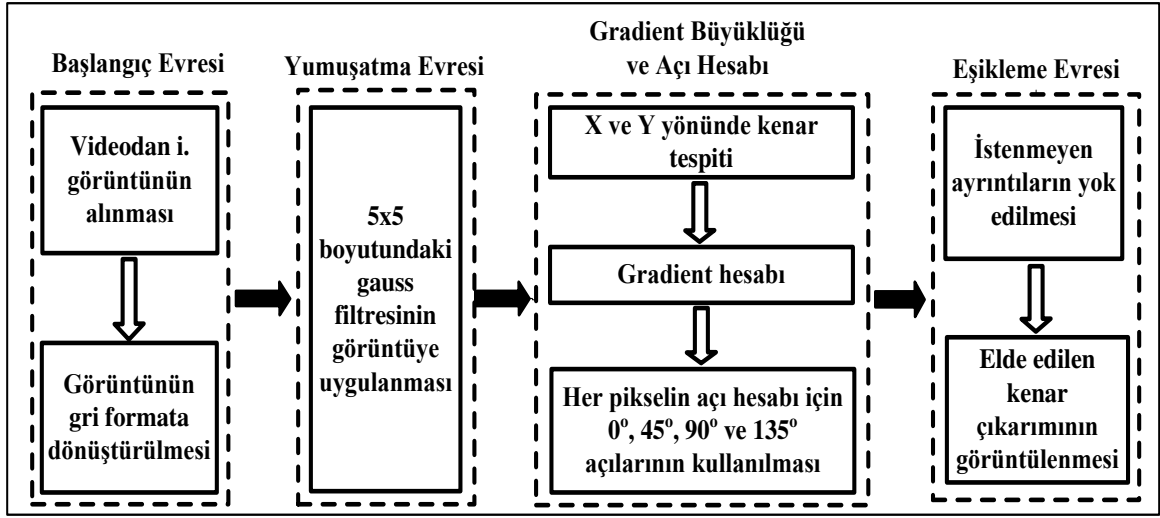
alan içerisinde aranmaktadır. Sınırlayıcı alanın konumu her görüntüde değiştirilerek pantograf üst çizgisinin daha kolay tespit edilmesi hedeflenmiştir. Dinamik yapıya sahip bir sınırlayıcı alanı oluşturularak pantograf üst çizgisi tespit edilmektedir. Böylece, yöntemin doğruluğu arttırılmakta ve daha hızlı sonuç vermesi hedeflenmektedir. Kullanılan görüntü işleme tekniklerinin ayrıntılı açıklaması aşağıdaki bölümde verilmiştir.

4.4.1. Kullanılan Görüntü İşleme Algoritmaları

Günümüzde görüntü işleme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte birçok alanda yeni yöntemler ve uygulamalar geliştirilmiştir. PAK sistemlerinde pantografin yüksekliğinin belirlenmesi veya temas telinin takip edilmesi gibi daha birçok uygulamada görüntü işleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu bölümde pantograf yüksekliğinin belirlenmesi için görüntü işleme yöntemleri olan Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü kullanılmıştır. PAK sisteminin gerçek zamanlı görüntüsü tren üzerine yerleştirilmiş bir kamera ile elde edildikten sonra, alınan görüntü gri-seviyeli görüntüye dönüştürülmüştür. Görüntüdeki doğrular Canny Kenar Çıkarım algoritması ve Hough Dönüşümü uygulanarak elde edilmiştir. Elde edilen bu doğrular genellikle pantograf doğrularını temsil etmektedir. Pantograf doğruları kullanılarak yüksekliği belirlenmektedir.

4.4.1.1. Canny Kenar Çıkarım Algoritması

Kenar çıkarım yöntemleri, görüntü işleme uygulamalarında özellik çıkarımı için oldukça önemlidir. Özellik çıkarımı adımıyla kullanılan Canny Kenar Çıkarım yöntemi kenar çıkarım algoritmaları içerisinde en yaygın olarak kullanılan algoritmadır. Canny Kenar Çıkarım algoritması, görüntü üzerindeki parlaklık değerlerinin ani değiştiği pikselleri tespit ederek kenar çıkarımı yapmaktadır. Bu algoritma, ön işlem olarak görüntüye gauss filtresi uyguladığı için diğer kenar çıkarım algoritmalarına göre daha iyi sonuç vermektedir. Kenarlar, sınırları karakterize ettiği için bu durum görüntü işlemede önemli bir konudur [140-141]. Bir görüntüde bulunan kenarlar, kenar bölgelerinde bulunan piksel değerlerinin ani değişmesi olarak tanımlanmaktadır. Canny Kenar Çıkarım algoritması çok aşamalı olarak gerçekleşen bir kenar çıkarım algoritmasıdır ve diğer kenar çıkarım algoritmalarına göre daha avantajlı bir yöntemdir. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının genel akış şeması Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4.18. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının blok şeması

Canny Kenar Çıkarım algoritmasının blok şemasında dört temel adım bulunmaktadır. Başlangıç evresinde videodan bir görüntü alınmakta ve alınan görüntü gri formata dönüştürülmektedir. Elde edilen gri görüntüye yumuşatma evresinde 5x5 boyutundaki Gauss filtresi uygulanmaktadır. Böylelikle görüntüde istenmeyen küçük çizgiler yok edilerek, sadece belirgin çizgilerin netleşmesi sağlanmaktadır. Gauss maskesi, Denklem (4.2)'de verilmektedir.

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

Gradient büyüklüğü ve açısı hesabı aşamasında ise öncelikle görüntüde x ve y yönünde kenar tespitleri yapılmaktadır. Bu adımda kullanılan S_x ve S_y sobel matrisleri Denklem (4.3)'de verilmektedir.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

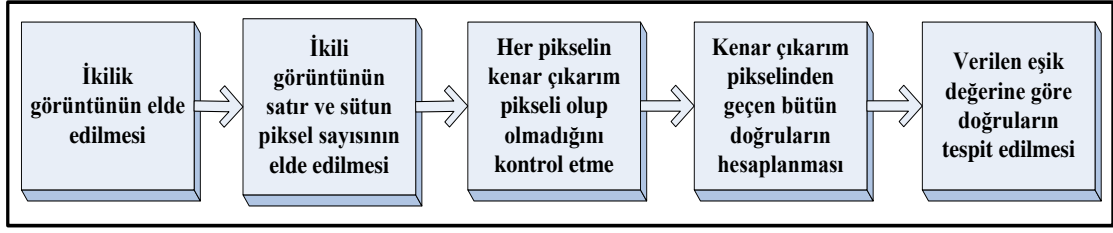
Elde edilen görüntü matrisleri üzerinde gradient büyüklüğü hesaplanarak belirli açılı sınırlamalarına göre görüntü oluşturulmaktadır. Her piksel için hesaplanan gradient büyüklüğü Denklem (4.4)'de verilmektedir.

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

Eşikleme evresinde, elde edilen görüntünün ikili formatta bir görüntüye dönüştürülmesi için eşikleme işlemi yapılmaktadır. Bu eşikleme sonucunda görüntüde bulunan kenarlar belirgin bir şekilde elde edilmektedir. Kenar çıkarımı işleminden sonra elde edilen görüntüde bulunan doğruları elde etmek için Hough Dönüşümü kullanılmaktadır.

4.4.1.2. Hough Dönüşümü

Hough Dönüşümü, sayısal görüntü işlemede matematiksel olarak ifade edilebilen şekillerin konum bilgilerinin, açılı değerlerinin vb. bulunmasında kullanılmaktadır. Yöntem daha çok görüntü üzerindeki doğruların tespitinde kullanılmakla birlikte genelleştirilmiş Hough Dönüşümü matematiksel olarak ifade edilebilen bütün şekillerin tespitinde kullanılmaktadır. Hough Dönüşümü bir görüntüde eş doğrusal çizgilerini belirlemek için kullanılan Radon dönüşümünden elde edilmektedir. İlk olarak, Hough Dönüşümü iki boyutlu bir görüntüde doğruları tespit etmek için kullanılmıştır. Daha sonra daire, kare ve elips gibi düzenli şekillere uyacak şekilde genişletilmiştir. Bu yöntem, konik ve çizgi gibi herhangi bir parametrik eğriyi tespit etmek için de çok kullanışlıdır. Hough Dönüşümü genellikle kenar çıkarımı yöntemleriyle birlikte kullanılarak görüntü üzerinde geometrik modellerin tespit edilmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. 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 dönüştürmektedir [142-145]. Kullanılan Hough Dönüşümünün blok şeması Şekil 4.19'da verilmiştir.

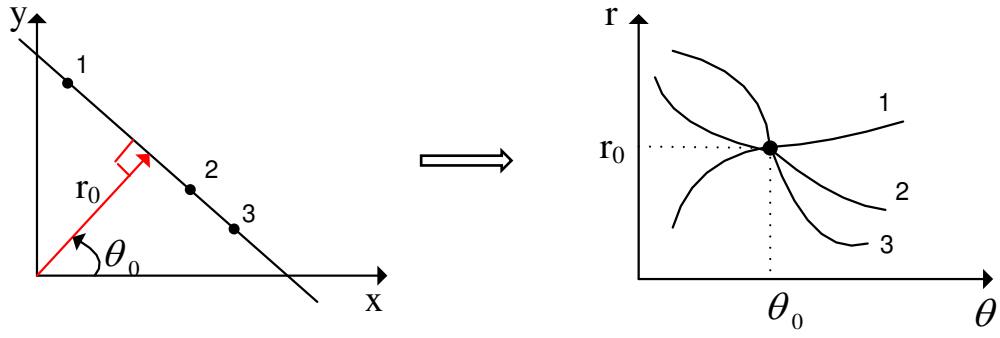


Şekil 4.19. Hough Dönüşümü'nün blok şeması

Hough Dönüşümü ile temel olarak, görüntüdeki noktalar taranarak bunlar içinde aynı doğru çizgisi üzerine düşenler araştırılmaktadır. Hough Dönüşümü'nün en basit şekli, doğru için aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$y = mx + b \quad (4.5)$$

Burada denklemin, herhangi bir doğruyu tanımlamak için iki parametresi vardır. Bu parametreler sırasıyla, eğim (m) ve kesişim (b)'dir. Doğru parametre uzayı içinde (b, m) noktası olarak temsil edilebilir. Ancak, dikey çizgiler m ve b parametrelerinin sınırsız değerlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle, kutupsal koordinat olarak belirtilen farklı bir parametre çifti kullanılmalıdır. Doğru uzayı ve polar dönüşümü Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekilde, doğrusal koordinat sistemi polar koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Burada çizgiye merkezden çizilen en kısa vektör (r, θ) çifti ile gösterilebilir. Hough Dönüşümü, gerçek görüntüde çizgileri tespit etmek için kullanılan algoritmik bir yöntemdir. Şekil 4.20 (a)'da gösterilen her nokta, iki ortak parametreye (r, θ) sahiptir. Her bir nokta Hough uzayında farklı bir eğri çizmesine rağmen Şekil 4.20 (b)'de gösterildiği gibi, nokta kümesinin kesişme noktası ortaktır. Kutupsal koordinat sisteminde doğru bir nokta olarak çizilmiştir. Akümülatör H matrisi elde edildikten sonra, bir tepe konum algoritması, matrisin en büyük elemanlarını tespit etmek için uygulanır. Daha sonra ters Hough Dönüşümü, gerçek görüntüde doğruları elde etmek için tepeye uygulanır.



(a) Doğru uzayı

(b) Hough uzayı

Şekil 4.20. Hough Dönüşümü

Kutupsal koordinatlar;

$$r = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (4.6)$$

4.4.2. Deneysel Sonuçlar

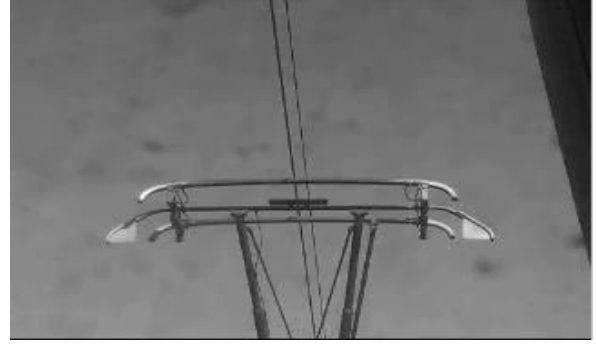
PAK sistemi uygulama sonuçlarını elde etmek için gerçek video görüntülerinden yararlanılır.

TCDD Malatya 5. Bölge Tesisler Müdürlüğü'nde farklı tarihlerde iki kez saha çalışması yapılarak görüntüler ve videolar elde edilmiştir. Bu veriler üzerinde incelemeler yapılarak pantograf yüksekliği ve temas bölgesi değişimi gibi faktörler konusunda bilgi çıkarımı yapılmıştır. Bu saha çalışmalarında elde edilen görüntüler Ek-1'de verilmiştir.

Bu bölümde, hareket eden bir hızlı trene bağlı kameradan alınan video görüntü kareleri kullanılmıştır [128]. Bu kareler birbirleri ile temas halinde olan PAK sisteminin görüntülerini içerir. Her kare için önerilen yöntem uygulanarak pantograf üst çizgisinin konumu belirlenir. Videodan alınan görüntü ve görüntünün gri-seviyeli hali Şekil 4.21'de verilmektedir. Şekil 4.22 pantograf videosunun bir karesine uygulanan Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü sonuçlarını göstermektedir.

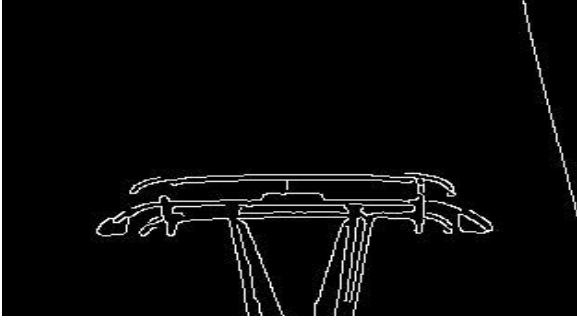


(a) Gerçek görüntü [128]

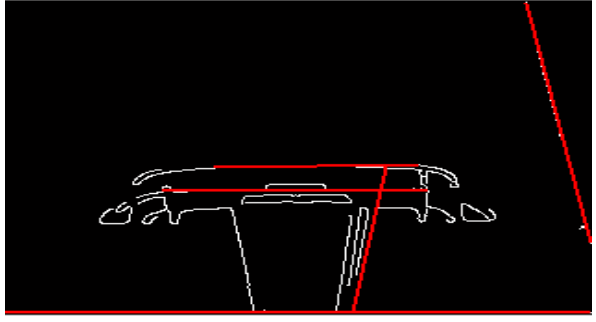


(b) Gri seviyeli görüntü

Şekil 4.21. Uygulamada kullanılan örnek görüntü



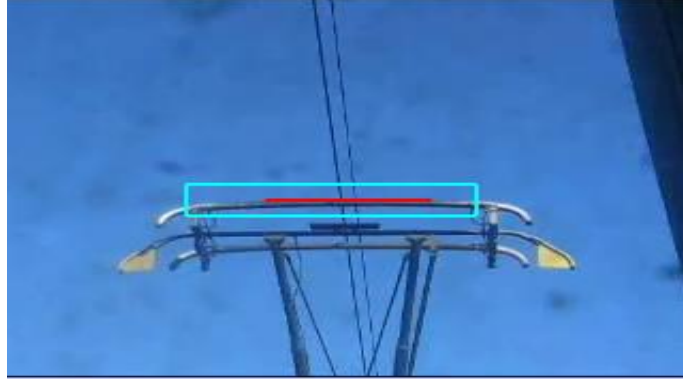
(a) Canny Kenar Çıkarım algoritması ile kenarların belirlenmesi



(b) Hough Dönüşümü ile belirlenen noktalardan doğru oluşturulması

Şekil 4.22. Pantograf görüntüsü için kenarların ve doğruların tespiti

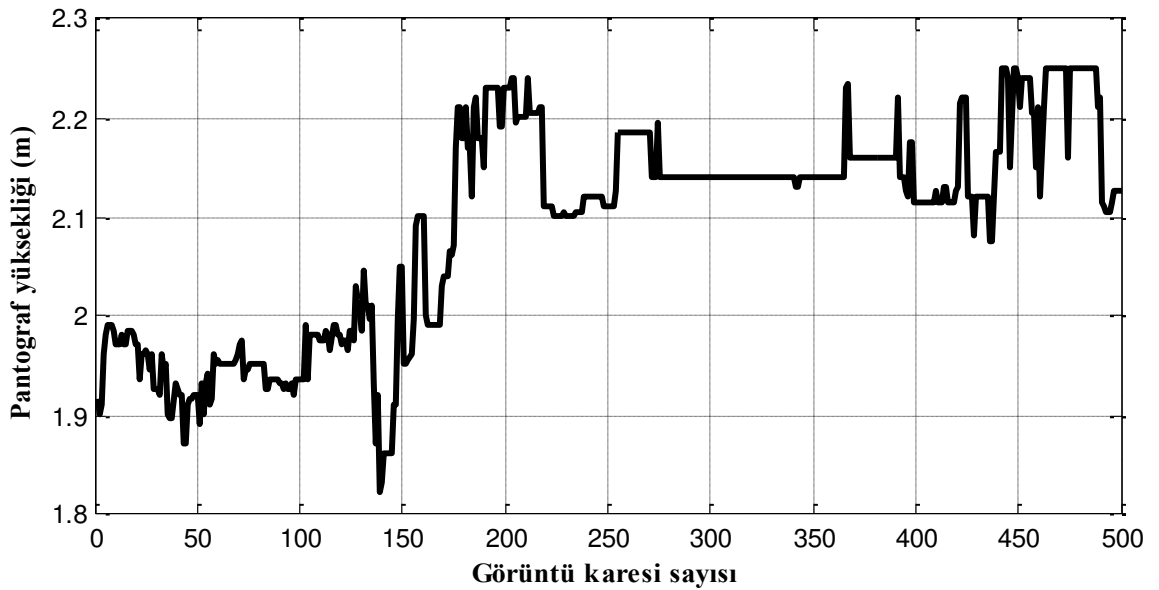
Şekil 4.22 (b)'de verilen görüntüde pantograf çizgilerine ait doğrular oluşturulmuştur. Bu doğrulardan pantografin üst çizgisini temsil eden doğru tespit edilmiştir. Tespit edilen bu doğruyu da içinde bulunduran sınırlayıcı bir alan oluşturulmuştur. Bu sınırlayıcı alan kullanılarak videodan alınan bir sonraki görüntü pantograf üst çizgisini belirlemede kullanılmıştır. Böylece görüntülerde başarılı bir şekilde pantograf üst çizgisi tespit edilmiştir. Sınırlayıcı alan ve pantograf havai hattı videoda tek bir kare için Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23. Gerçek görüntü üzerinde sınırlayıcı alan ve pantograf üst çizgisi

Kameradan alınan bütün görüntüler için bu yöntem uygulanarak gerçek zamanlı pantograf üst çizgisinin konumu tespit edilmektedir. Böylece pantografin yüksekliği kolayca hesaplanmaktadır. Çıkarılan piksel bilgisi, basit bir dönüşüm eşitliği kullanılarak gerçek bir yüksekliğe dönüştürülür. Pantograf yüksekliği Şekil 4.24’de 500 görüntü karesi için çizilmiştir.

Ayrıca, önerilen yöntemin değerlendirilmesi için PAK sistemine ait dört farklı video görüntüsü kullanarak sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan görüntüler yine hareket halindeki bir elektrikli trenin üzerine sabitlenen kameradan çekilen video görüntüleridir. Görüntülerde pantograf ile katener birbirleri ile temas halindedir. Bu çalışmada kullanılan videolardan alınan birinci görüntü karesi Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.24. 500 görüntü karesi için pantograf yüksekliği



(a)



(b)



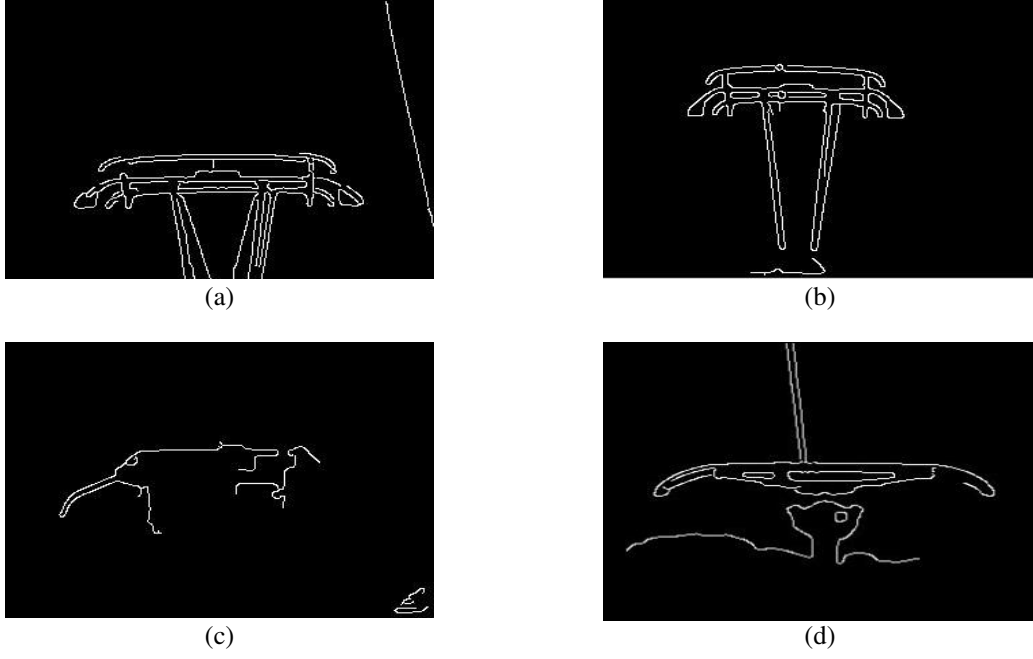
(c)



(d)

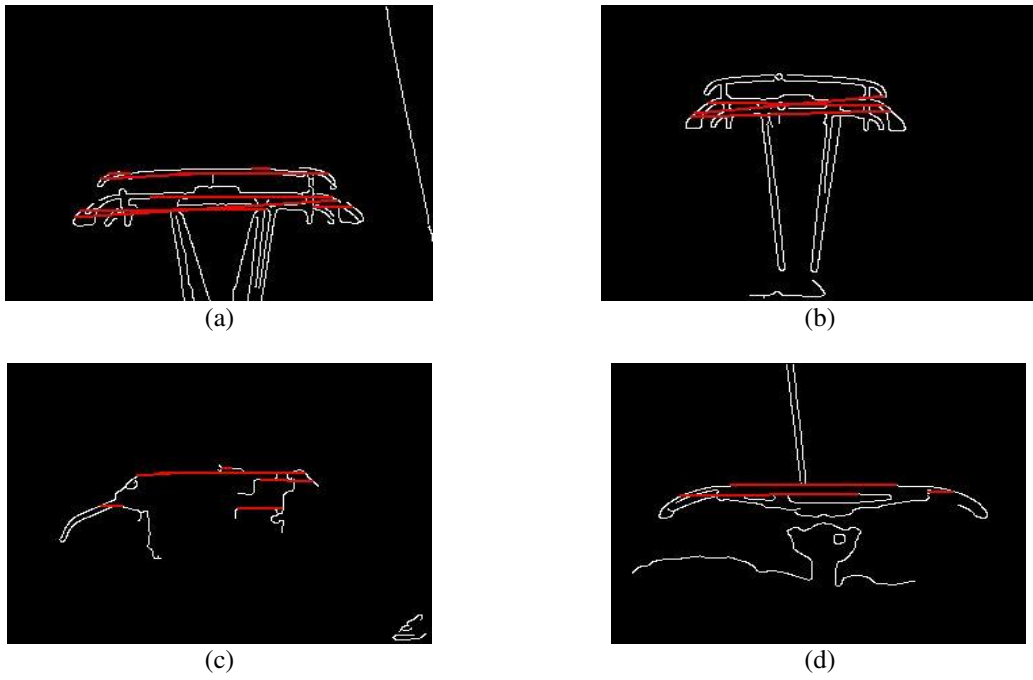
Şekil 4.25. Pantograf durum izleme ve yükseklik tespiti için kullanılan farklı türde pantograf görüntüleri [128]

Verilen pantograf görüntüleri incelendiğinde, videoların birbirinden farklı özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.25 (a)'da verilen görüntü kalitesi yüksek olup pantograf temas bölgesi tespit edilmektedir. Şekil 4.25 (b)'de pantograf temas bölgesinde arklar oluşmaktadır. Temas bölgesinde oluşan arkların şiddetli olması, pantograf temas bölgesinin tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Şekil 4.25 (c)'de ki görüntüde farklı pantograf türüne sahip bir video kullanılmıştır. Şekil 4.25 (d)'de verilen görüntüde görüntü kalitesi oldukça düşük olup kullanılan pantograf sistemi farklı bir pantograf türüne aittir. Verilen bu dört farklı videoya ait pantograf renkli görüntülerine, önerilen yöntemde kullanılan özellik çıkarımı adımları uygulanmaktadır. Öncelikle kullanılan renkli görüntüler gri görüntüye dönüştürülmektedir. Daha sonra gri görüntüler üzerinde kenar çıkarımı yapılmaktadır. Verilen görüntüler üzerinde Canny Kenar Çıkarım algoritmasının uygulanması sonucunda elde edilen kenar çıkarım görüntüleri Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26. Önerilen yöntemde kullanılan pantograf görüntülerinden kenar çıkarımının elde edilmesi

Şekil 4.26’da verilen kenar çıkarımı elde edilmiş pantograf görüntüleri üzerine Hough Dönüşümü uygulanarak pantograf üst çubuğu tespit edilmektedir. Kullanılan dört farklı videonun ilk görüntü karesinden tespit edilen pantograf üst çubuğu görüntüleri Şekil 4.27’de verilmiştir.

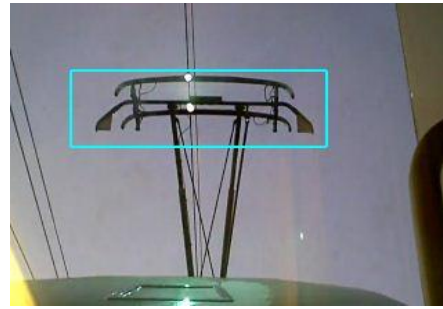


Şekil 4.27. Kenar çıkarımı sonucu elde edilen görüntülerden Hough Dönüşümü ile pantograf temas şeridinin tespit edilmesi

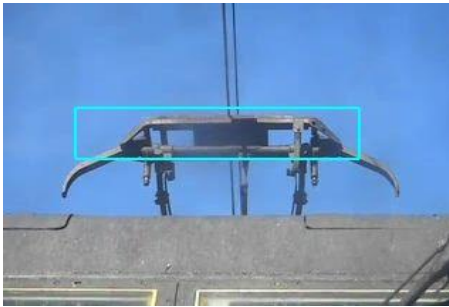
Hough Dönüşümü sonucunda birçok doğru elde edilmektedir. Elde edilen doğruların açı değerleri dikkate alınarak videolardaki ilk görüntü karesi için, temsili pantograf üst şeridi doğruları belirlenmektedir. Belirlenen temsili doğrular birden fazla olabileceği için doğruların dikey eksenindeki konumlarının ortalamaları alınarak pantograf üst çubuğu belirlenmektedir. Bir sonraki görüntü karelerinde pantograf üst çubuğunun daha hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilebilmesi için pantograf temas bölgesi oluşturulmaktadır. Oluşturulan pantograf temas bölgesi tespit edilen pantograf üst çubuğunun konumları dikkate alınarak elde edilmektedir. Her görüntü karesi için kullanılan pantograf temas bölgesi bir önceki görüntü karesinden elde edilmiştir. Bu işlem videolarda birinci görüntü karesi hariç bütün görüntü karelerinde aynı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan videoların birinci görüntü karelerine önerilen yöntemin uygulanması sonucunda tespit edilen pantograf temas bölgeleri Şekil 4.28’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

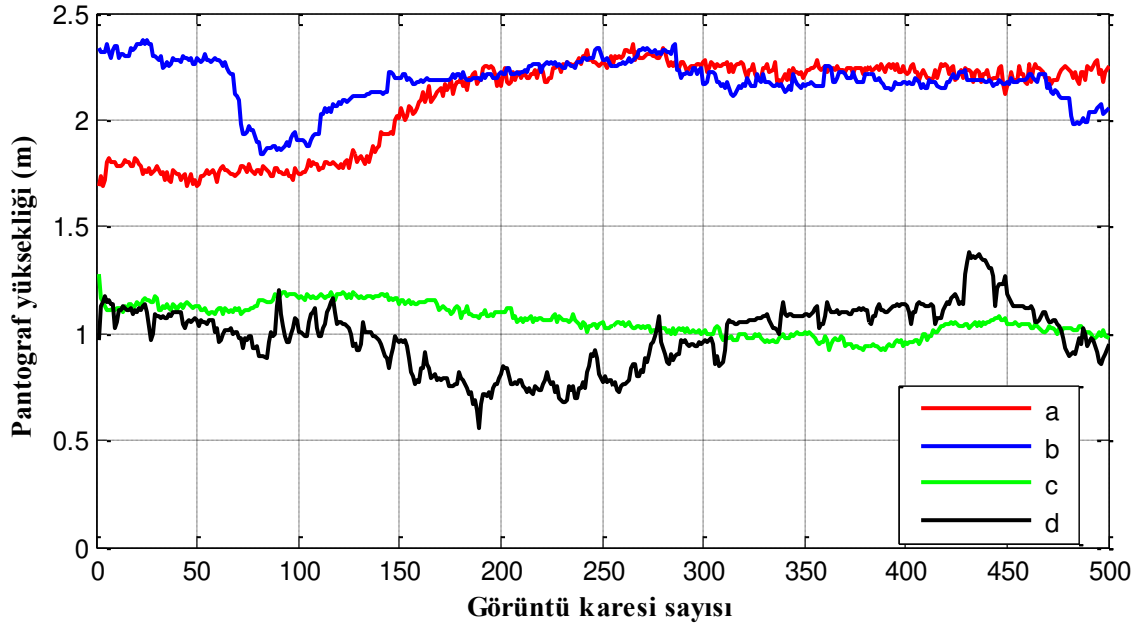
Şekil 4.28. Önerilen yöntem sonucunda tespit edilen pantograf temas bölgeleri

Belirlenen pantograf temas bölgelerinin boyutları tespit edilen pantograf üst çubuğuna göre farklılık göstermektedir. Verilen temas bölgeleri için bir sonraki görüntü karesi kullanılarak elde edilen görüntüler Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. Temas bölgeleri kullanılarak elde edilen görüntüler

Bu görüntüler kullanılarak pantograf üst çubuğu daha hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmektedir. Önerilen bu yöntemde bütün görüntü karelerinde tespit edilen pantograf temas bölgesi, bir sonraki görüntü karesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem dört farklı video görüntüsü için 500 görüntü karesi boyunca gerçekleştirilmiştir. 500 görüntü karesi sonucunda her videoda bulunan pantografların yükseklikleri hesaplanmıştır. Dört farklı video görüntüsü için elde edilen pantograf yüksekliği Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. Önerilen yöntemin dört farklı video görüntüsü için uygulanması sonucunda elde edilen pantograf yükseklik grafiği

Bu grafikte dört farklı video için, pantograf durum izlemesi yapılmaktadır. Verilen grafiğe göre video (a) incelendiğinde pantograf yüksekliğinin 100. ile 200. görüntü karesi arasında arttığı, diğer durumlarda ise ani bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Video (b)' de pantograf yüksekliğinin 50. ile 100. görüntü karesi arasında azaldığı ve tekrar arttığı görülmektedir. Ayrıca video (b)'de oluşan arkların pantograf yüksekliğinin hesaplanmasına engel olmadığı, pantograf yüksekliğinin ark oluşumu sırasında da hesaplandığı görülmektedir. Video (c) incelendiğinde pantograf yüksekliğinin çok daha sabit olduğu görülürken video (d)'de bazı bölgelerde pantograf yüksekliğinin değiştiği görülmektedir.

Önerilen yöntemin avantajlarından biri de pantograf temas şeridini tespit ederken bir görüntünün bütün piksellerini kullanmamasıdır. Bir önceki görüntü karesinde tespit edilen pantograf temas bölgesi kullanılarak görüntü üzerinde küçük bir alan dikkate alınmaktadır. Böylelikle yapılan işlem daha hızlı gerçekleştirilmektedir. Tablo 4.1'de önerilen yöntemde kullanılan pantograf videolarında bir görüntü karesi için tespit edilen pantograf temas bölgesinin boyutu ve işlem süreleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Önerilen yöntemde kullanılan videolar için pantograf temas bölgesinin boyutu ve işlem süresi

Video	Bir görüntünün toplam piksel sayısı	Bir görüntünün işlem süresi (ms)	Temas bölgesinin piksel sayısı	Temas bölgesinin işlem süresi (ms)	İşlem kazancı (%)
a	320x240	261.5	250x60	187.9	28.14
b	320x240	108.9	285x60	58.6	46.18
c	320x240	94.2	200x40	50.68	46.19
d	320x240	414.8	255x60	371.9	10.34

Tablo 4.1'de verilen değerler karşılaştırıldığında temas bölgesinin alanı bir görüntüdeki toplam piksel sayısından oldukça küçüktür. Ayrıca temas bölgesinin işlem süresi bir görüntüdeki toplam piksellerin işlem süresinden daha kısadır. Önerilen yöntemde kullanılan bir görüntünün tamamı yerine sadece görüntüdeki temas bölgesinin işlenmesinin daha avantajlı olduğu, işlem kazancı için verilen değerlerden de görülmektedir.

Önerilen yöntemde, özellik çıkarımı bloğunda üç farklı aşama kullanılarak pantograf temas şeridinin daha hızlı tespit edilmesi sağlanmıştır. Önerilen yöntemde aşama 1’de eşik değeri, doğru sayısı ve açı değeri düzenlenerek, temas şeridi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada sadece iki doğru kullanılarak tespit işleminin daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Pantograf üst çubuğu bu aşama da tespit edilmezse aşama 2 kullanılmaktadır. Aşama 2’de eşik değeri azaltılarak doğru sayısı ve açı değeri artırılmıştır. Böylece pantograf temas bölgesinin kesin bir şekilde tespit edilmesi hedeflenmektedir. Eğer bu iki aşamada pantograf temas şeridi tespit edilmezse, 3. aşamada bir önceki görüntü karesinde tespit edilen değerler kullanılmıştır.

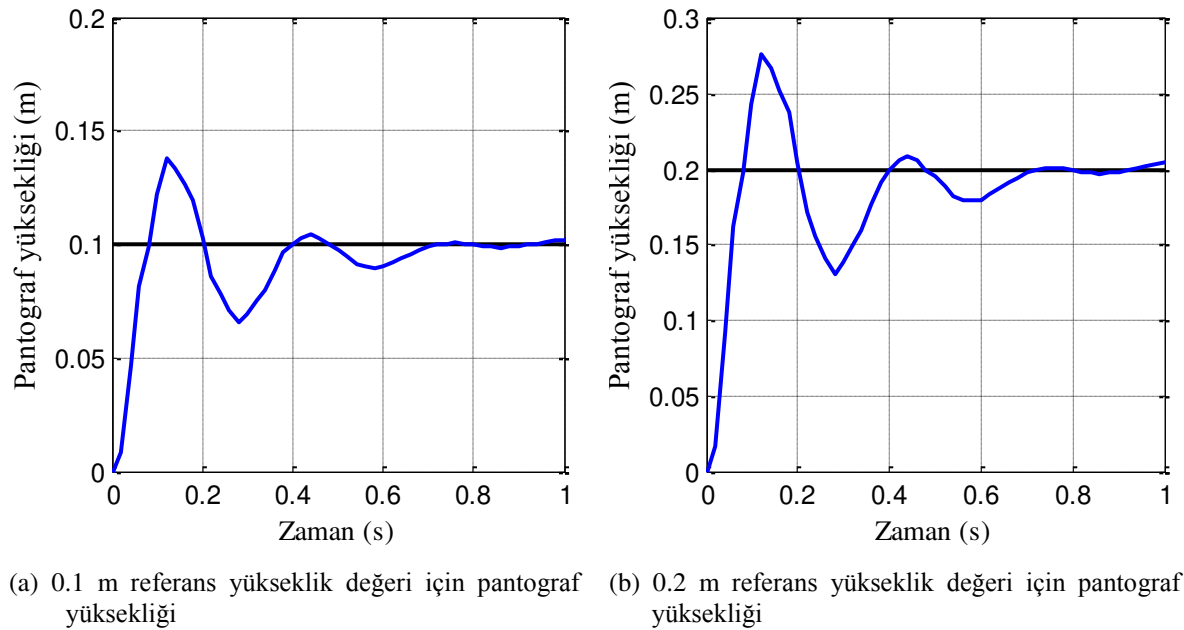
Bu bölümde kullanılan özellik çıkarım bloğunda üç aşamanın olması işlem süresini arttırmış gibi görünse de aslında işlem süresini kısaltmaktadır. Çünkü her bir görüntü karesinde pantograf temas şeridinin tespit edilmesi için düşük eşik değerine, fazla doğru sayısına ve yüksek açı değerlerine ihtiyaç yoktur. Aşama 1’de bu değerler minimum şekilde kullanılarak işlem süresi arttırılmaktadır. Aşama 1’de pantograf temas şeridinin tespit edilemediği görüntü karelerinde aşama 2 devreye girmekte ve temas şeridi tespit edilmektedir. Bu görüntü karesi sayısı bütün videodaki görüntü karesi sayısı ile ilişkilendirildiğinde önemsiz olduğu Tablo 4.2’de görülmektedir.

Tablo 4.2. Özellik çıkarım bloğunda kullanılan aşamaların önerilen yöntemdeki avantajları

	Video	Aşama 1 (Doğru sayısı =2 & $\theta == 0$)	Aşama 2 (Doğru sayısı =5 & $\theta \leq 5$)	Aşama 3
Temas bölgesi kullanılarak yapılan işlem	a	486	14	0
	b	422	78	0
	c	488	12	0
	d	500	0	0
Bir görüntünün bütün pikselleri kullanılarak yapılan işlem	a	307	185	8
	b	341	121	38
	c	488	12	0
	d	479	21	0

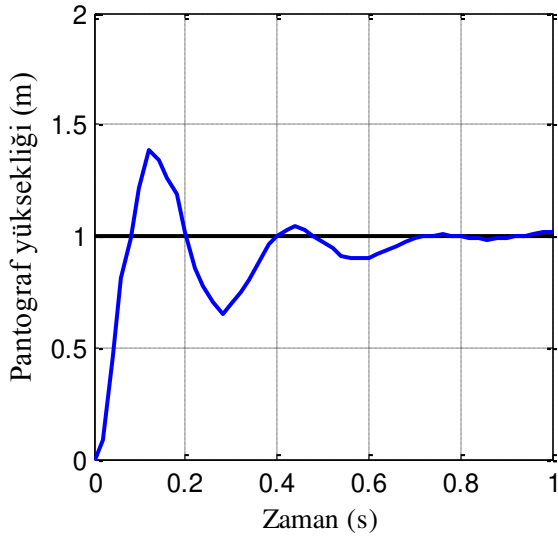
Tablo 4.2 incelendiğinde temas bölgesi kullanılarak yapılan işlemlerin bir görüntünün bütün pikselleri kullanılarak yapılan işlemlerden daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bir görüntüde pantograf temas şeridi tespit edilirken temas bölgesi kullanıldığında Aşama 1’de daha fazla görüntü karesi için temas şeridi tespit edilmiştir. Bu da pantograf temas şeridinin tespit edilmesinde sadece temas bölgesinin kullanılmasının daha avantajlı olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Görüntü işleme tabanlı aktif kontrol sisteminin oluşturulabilmesi için deneysel sonuçlar ile elde edilen referans yükseklik değerleri, sistem çıkışında elde edilen pantograf yükseklik değerleri ile karşılaştırılarak kontrolörün girişine verilmektedir. Elde edilen pantograf yüksekliği kontrol algoritmasında kullanılarak, pantograf yüksekliği aktif olarak kontrol edilmiştir. Bu sistem, gerçek zamanlı olarak daha uygun çalışabilmek için Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Farklı referans yükseklik değerleri için de simülasyon sonuçları verilmiştir. Önerilen yöntemin çok düşük yükseklik değerlerinde bile uyumlu çalıştığını gösterebilmek için 0.1 m ve 0.2 m referans yüksekliği değerlerinin simülasyon sonuçları Şekil 4.31’de verilmiştir. 1 m ve 2 m referans yüksekliği değerleri için sonuçlar Şekil 4.32 (a) ve Şekil 4.32 (b)’de verilmiştir. Değişen zaman aralığında farklı yükseklik değerleri için sistemin tepkisi Şekil 4.33’de gösterilmiştir.

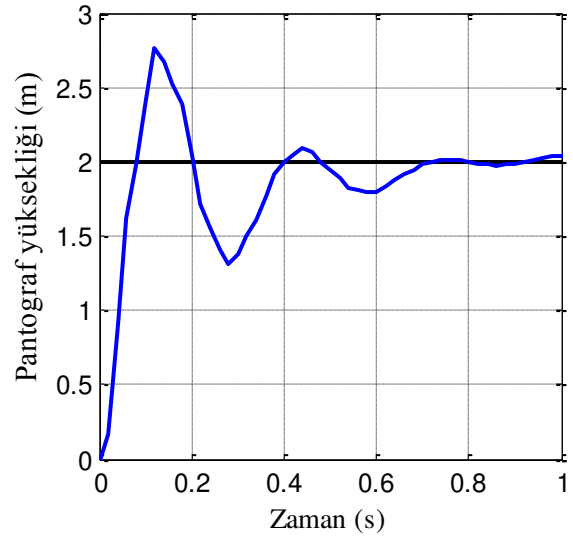


Şekil 4.31. İki farklı düşük referans yükseklik değeri için simülasyon sonuçları

Elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar göstermiştir ki pantograf yüksekliğinin belirlenmesi pantograf ve katener arasında oluşan temas kuvvetinin kontrolü için de oldukça etkili bir yöntemdir. 0.1 ve 0.2 gibi düşük ve 1, 2 ve 3 gibi yüksek referans yükseklik değerleri için bile model gayet uygun sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Yükseklik değerinin düşükten yükseğe değışmesi durumunda da aktif kontrol sistemi referans yükseklik değeri çok kısa bir sürede yakalamaktadır.

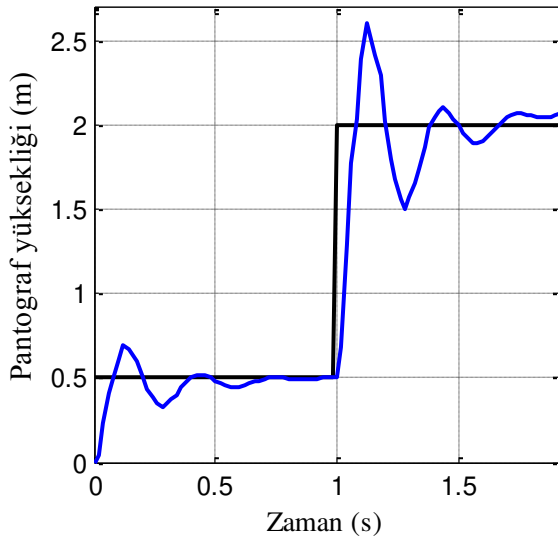


(a) 1 m referans yükseklik değeri için pantograf yüksekliği

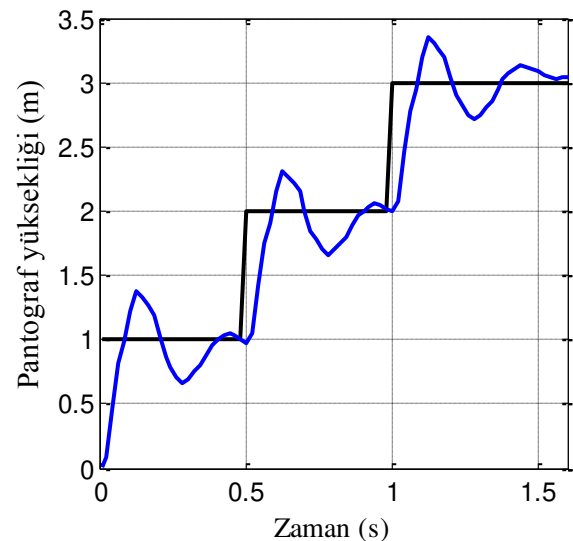


(b) 2 m referans yükseklik değeri için pantograf yüksekliği

Şekil 4.32. İki farklı referans yükseklik değeri için simülasyon sonuçları



(a) İki farklı referans yükseklik değeri için pantograf yüksekliği



(b) Üç farklı referans yükseklik değeri için pantograf yüksekliği

Şekil 4.33. Farklı referans yükseklik değerleri için simülasyon sonuçları

5. PAK SİSTEMLERİ İÇİN ÖNERİLEN İZLEME VE ARIZA TESPİT YAKLAŞIMLARI

5.1. Giriş

Elektrikli demiryolu sistemlerinde kullanılan PAK sistemlerinde sürekli temasın sağlanabilmesinin çok önemli olduğu önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Ancak pantograf ve katener sistemi birbiriyle temas ederken birçok arıza meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bu bölümde geliştirilen model, kontrol ve analiz yöntemleri ile PAK sistemi için durum izleme ve arıza teşhis yaklaşımları önerilmektedir. Çalışmanın iki ana amacı vardır.

- *Arıza teşhisi ve durum izleme için yeni bir analiz yaklaşımının geliştirilmesi:*

Bu bölümde herhangi bir arıza olup olmadığını belirlemek için sistemin düzenli izlenmesi ve ileride arıza meydana gelmesi durumunun ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu nedenle, pantograf temas şeridi ve katener temas teli arasındaki temas noktasının analizi gerçekleştirilmiştir. Pantograf yüzeyi bölgelere ayrılarak temas noktasının her bir bölgedeki durumu incelenmiştir. Temas telinin pantografin uç noktalarına ve boynuzlarına değme durumunun kontrol edilmesi çok önemlidir. Çünkü böyle bir temas ciddi sorunlara neden olabilmektedir. Temas telinin pantograf temas şeridinde en fazla değdiği noktalar belirlenerek istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve pantograf temas şeridinin en aşınmış noktaları durum izleme yöntemi ile tanımlanmıştır. Farklı arıza türleri dikkate alınarak oluşturulan senaryolar için simülasyon sonuçları elde edilmiş ve değerlendirilmiştir.

- *Temas noktası analizi için deneysel veriler üzerinde görüntü işleme tekniklerinin kullanılması:*

Bu bölümde, görüntü işleme teknikleri kullanılarak, tren lokomotifini üzerine yerleştirilen kameradan alınan gerçek veriler ile temas noktası analizi gerçekleştirilmiştir. Kameradan alınan PAK sistemi görüntüsüne, Canny kenar çıkarım yaklaşımı ve Hough dönüşümü uygulanarak pantograf temas şeridi ve temas teli belirlenmiştir. Böylelikle, temasın pantograf yüzeyinde belirlenen bölgelerin her birinde ne kadar oluştuğu deneysel olarak elde edilmiş ve farklı pantograf videoları için incelenmiştir.

PAK sistemlerinde birçok nedenden dolayı arızalar oluşmaktadır. Sistemde yanlış statik temas kuvveti, aşırı sürtünme, aerodinamik etkiler, bileşenlerin aşınması ve zayıf geometrik ayarlamalardan dolayı arızalar oluşabilmektedir. Ayrıca mevsim şartları arıza oluşumuna neden olmaktadır. Havaaların soğuması ya da yağışlı olması pantograf ile temas telinin sürtünmesini arttırdığı için ark ve aşırı ısınma arızalarına neden olmaktadır. Bu tür sistemlerde temas kuvvetinin kalitesi aynı zamanda bu elemanlar arasındaki etkileşimin kalitesini ve akım toplama kalitesini göstermektedir. Temas kuvvetinin kalitesi, uygulanan kuvvetin genliğine, işletme hızına ve pantograf ile katener arasındaki temasın bir sonucu olarak oluşan titreşimlere bağlıdır. Ayrıca, temas teli veya pantograf şeridindeki aşınma da ark oluşmasına yol açmaktadır. Aşınmayı azaltmak için gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Böylece kullanılan donanımın ömrünün uzamasının yanı sıra bakım maliyetleri düşecektir. Pantografa aşırı bir kaldırma kuvveti uygulanırsa, o bölgede yoğun bir temas oluşacak ve hatta pantograf temas telini kaldırabilecektir. Bu durum pantograf ve katenerde büyük hasarlar oluşmasına ve salınımların artmasına neden olacaktır [71,146,147]. Günümüzde PAK sistemlerinde oluşan arızaların tespit edilmesi ve durum izleme için birçok yöntem geliştirilmiştir. Literatürde bulunan mevcut çalışmalar incelendiğinde PAK sistemlerinde oluşan arızaların tespit edilebilmesi için iki ana yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri akım gerilim tabanlı arıza tespiti, diğeri ise görüntü işleme tabanlı arıza tespitidir. Bu arıza tespit yöntemleri üzerinde geliştirmeler yapılarak ve ek sensörler kullanılarak arıza tespit yöntemlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Görüntü işleme tabanlı arıza teşhisi yöntemlerinde, PAK sisteminin birbiri ile teması izlenerek, sistemin arıza oluşturduğu durumlar ve arıza oluşum nedenleri tespit edilmektedir. Görüntü işleme yöntemleri olarak termal ve normal görüntü işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Normal görüntü işleme ile PAK sisteminin temas noktaları ve pantografin yüksekliği tespit edilerek arıza teşhisi yapılırken, termal görüntü işleme yöntemleriyle de sistemde bulunan aşırı ısınma ve ark oluşumları tespit edilmektedir. Ayrıca sistemin besleme gerilimi ve akım değerleri kullanılarak arıza teşhisi yapılmaktadır [95,99,148]. Mevcut çalışmalarda, PAK sistemlerinde oluşan arızalar tespit edilirken erken arıza teşhisi yapılamamaktadır. Erken arıza teşhisi için durum izleme tabanlı yöntemler kullanılarak, büyük arızalar oluşmadan tespit edilmektedir. Böylece hem bakım ve onarım maliyetleri düşmekte hem de demiryolu ulaşımının aksamaması sağlanmaktadır. Pantograf ile katener arasındaki etkileşim ve mekanik temasın tam anlamıyla sağlanabilmesi için periyodik durum izleme, arıza tahmini ve arıza tespiti son derece önemlidir.

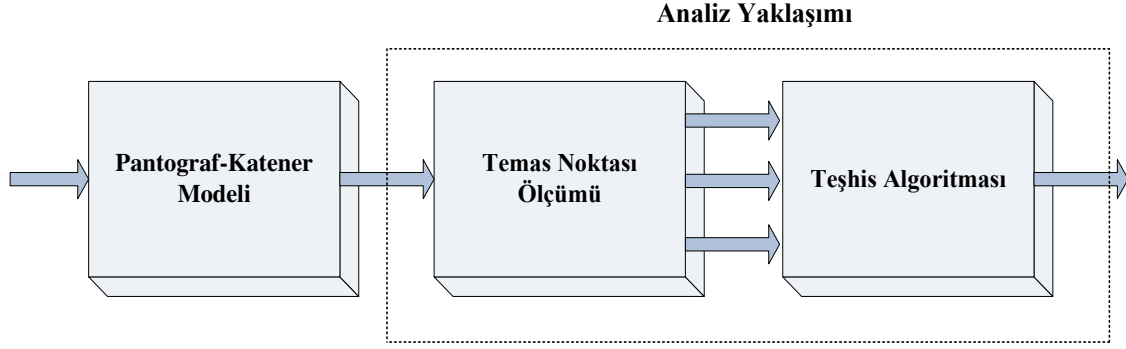
5.2. Arıza Teşhisi ve Durum İzleme için Analiz Yaklaşımı

Temas teli esnekliği ve sehimi bu tür sistemlerde çok önemlidir. Temas teli düzenli aralıklarla direklerin üzerine sabitlenir. Direklere bağlandığı noktalara yakın bölgelerde telin esnekliği azdır, iki direk arasındaki boşluğun ortasına denk gelen bölgelerde esneklik artmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek hızlarda sorunlar oluşmasına, hatta sabit temas teli ile etkileşim içinde bulunan pantografta kırılma meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu sorunu önlemek için, temas telinin sehimi azaltılmaya çalışılır ve esnek bir yapı oluşturmak için çeşitli yapılar tasarlanır. Bu tür sistemlerde çok çeşitli arızalarla karşılaşılabilir. Pantograf ve katener arasındaki temasın pantograf yüzeyinde belirli bir bölge içerisinde olması gerekmektedir. Ancak bazı nedenlerden dolayı temas bu belirli bölgede olmayabilir [16, 149]. Temasın istenen bölgede oluşamamasının birçok nedeni vardır. Bunlardan birkaç tanesi:

- *Ray ya da zemin:* Ray veya zeminde oluşan anormal bir durum pantograf ve temas teli arasındaki etkileşimi kötü etkiler. Örneğin, tren ileriye hareket edemezse, temas sürekli aynı noktada oluşacaktır. Direk ve ray montajı zeminin çok engebeli olduğu durumlara uygun değilse çeşitli sorunlar oluşabilir.
- *Katener:* Katener sertliğinin ve sehiminin iyi ayarlanması gereklidir.
- *Pantograf:* Özellikle, hız artarken oluşan düzensizlikler ya da pantograf yüzeyindeki çok küçük bir pürüz bile ciddi sorunlara yol açmaktadır.
- *Hava koşulları:* Bu tür sistemler genellikle açık havada çalıştıkları için olumsuz hava koşullarından çok fazla etkilenmektedirler. Aşırı sıcak veya soğuk, rüzgarlı hava ve buz yükü gibi etkiler sistemin normal yapısını bozabilmektedir.

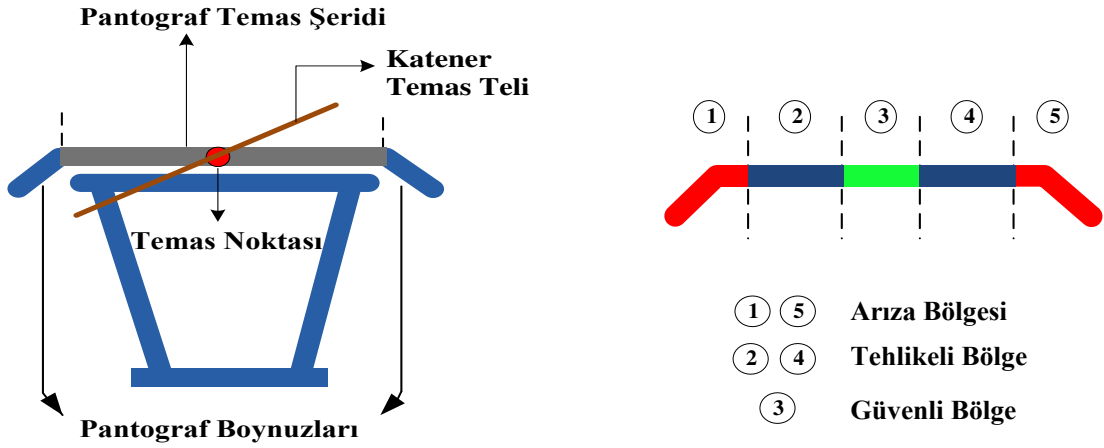
5.2.1. Önerilen Yöntem

PAK sistemi için pantografin temas teline değdiği noktalar çok önemlidir. Sorunların büyük çoğunluğu, pantograf yüzeyinde meydana gelen aşınmalar ve bozulmalar nedeniyle oluşur. Pantograf yüzeyinde sürekli aynı noktada oluşan bir temas güvenilir değildir. Bu nedenle, pantograf yüzeyi belirli bölgelere ayrılmıştır ve her bölge için oluşabilecek durumlardan bahsedilmiştir. Şekil 5.1’de oluşturulan blok diyagramı temas noktası analiz yaklaşım modeli için kullanılmıştır. Pantograf ve katener arasındaki temas noktası değişiminin matematiksel modeli elde edildikten sonra, temas miktarı elde edilerek, teşhis algoritması ile değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. Analiz yaklaşımının blok diyagramı

Pantografin ve pantograf ile katenerin temasını etkileyen kısımlar sembolik olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, pantograf yüzeyinde temas noktası için üç bölge tanımlanmıştır ve her bölgenin önemi incelenmiştir. Bölgeler temas etkilerine bağlı olarak adlandırılmıştır. Pantografin ilk bölgesi arıza bölgesidir. Bu bölge pantografin boynuzlarına ve uç noktalarına karşılık gelmektedir. Bu bölgede herhangi bir temas gerçekleşirse, çok büyük hasarlar, pantograf ve katener üzerinde kırılma veya yırtılma oluşabilir ve temas tamamen kesilebilir. Pantograf için ikinci bölge tehlikeli bölge olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge arıza bölgesi ve güvenli bölge arasındadır. Bu bölgede bir temasın olması büyük sorunlara yol açmaz, ancak istenmeyen bir durumdur. Pantograf ve katener arasındaki temasın güvenli bölgede olması istenmektedir ve bu dezaksman açıklığına bağlı olarak değişmektedir. Temel olarak pantograf yüzeyi üç bölgeye ayrılmıştır. Ancak arızanın tehlikeli ve arıza bölgesi üzerinde hangi bölgede oluştuğu da önemlidir. Güvenilir bölge tektir, ama arıza güvenilir bölgenin sağ tarafında ya da sol tarafında oluşabilir. Daha ayrıntılı bir durum izleme ve arıza teşhisi için bu bölgelerin kendi içinde ayrılması ve numaralandırılması önemlidir. Şekil 5.2 (b)’de arızanın güvenilir bölgenin hangi tarafında oluştuğunun belirlenmesi için pantograf yüzeyinin numaralandırılmış hali görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tehlikeli bölge ve arıza bölgesi kendi içinde ayrılarak numaralandırılmıştır ve güvenilir bölge yeşil, tehlikeli bölge mavi ve arıza bölgesi kırmızı renk ile gösterilmiştir.

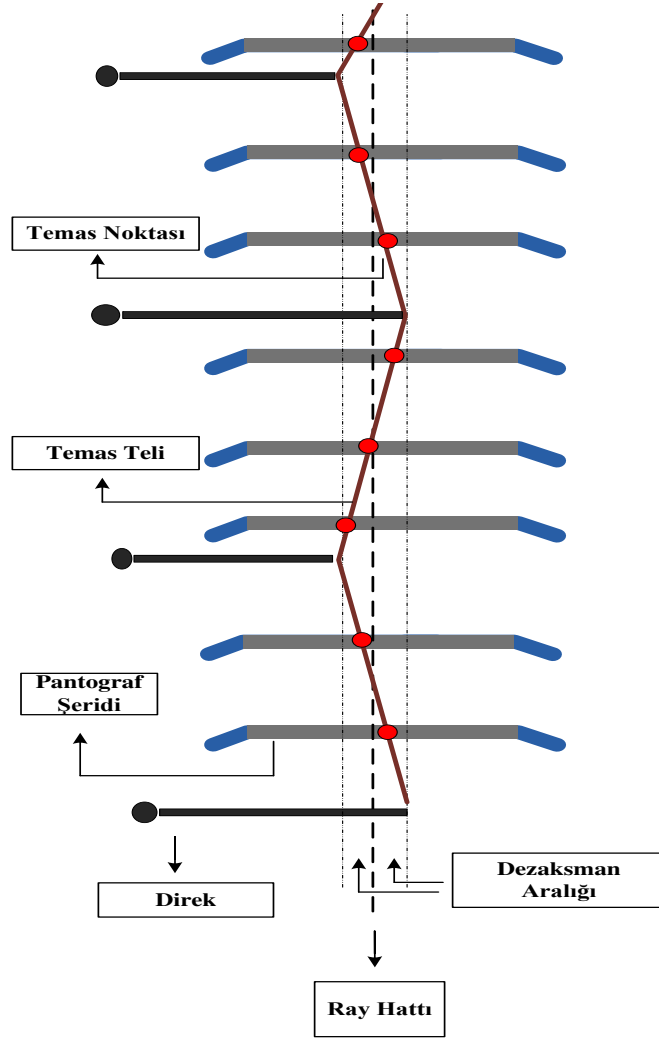


(a) Pantograf ve katenerin sembolik gösterimi

(b) Pantograf bölgeleri

Şekil 5.2. Pantograf-katener teması ve pantograf bölgeleri

Katener hattı, ray hattının yatay ekseninden belirli bir değerde kaçırlır. Bu mesafe, dezaksman açıklığı olarak adlandırılır ve değeri pantograf uzunluğu 1600 mm olduğu zaman 20 cm'dir. Sistemin tasarım aşamasında önceki düzenlemeler bu mesafe dikkate alınarak belirlenir. Direklerin pozisyonları ve kendi aralarındaki ilişkiler, direkler ve demiryolu hattı eksenindeki mesafe ve telin uzunluğu dezaksman mesafesine göre ayarlanır. Hareketli pantograf ve sabit temas teli arasındaki temas sonucu oluşan sürtünme her zaman pantograf yüzeyi üzerinde aynı noktada meydana gelmemelidir. Bu nedenle de dezaksman önemlidir. Ayrıca karbon aşınması, çabuk bozulmaların önlenmesi için eşit olmalıdır. Pantograf hareketine ve dezaksmana göre olan temas noktası değişiminin konumu Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Pantografin yatay hareketi, temel olarak trenin hızına, dikey hareketi ise pantografa eyleyici tarafından uygulanan kaldırma kuvvetine bağlıdır. Bu çalışmada, yeterli miktarda kaldırma kuvvetinin pantografa uygulandığı kabul edilmiştir ve pantografin yatay hareketi üzerine odaklanılmıştır.



Şekil 5.3. Temas noktası değişimi

Modelleme aşamasında, sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Trenin hızına ve süreye bağlı olarak, pantograf temas noktalarının değerleri durum izleme yöntemi ile modelden alınmıştır. Arıza teşhisi bu değerlerin kullanılması ile yapılmıştır. Gerekli denklemler elde edildikten sonra, pantograf hareketine bağlı olarak temas noktası değişimi iterasyon adımına göre bulunmuştur. Bu denklemler:

$$l_t = \frac{v_t \cdot h}{3600} \cdot 1000 \quad (5.1)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_s}{2d}\right) \quad (5.2)$$

$$\Delta x = \frac{l_t}{\tan \alpha} = \frac{l_t}{\frac{l_s}{2d}} \quad (5.3)$$

$$x = x_r + \Delta x \quad (5.4)$$

şeklinde verilir.

Burada,

l_t : Tren uzunluğunu,

v_t : Tren hızını,

h : Saniye olarak ölçüm adımını,

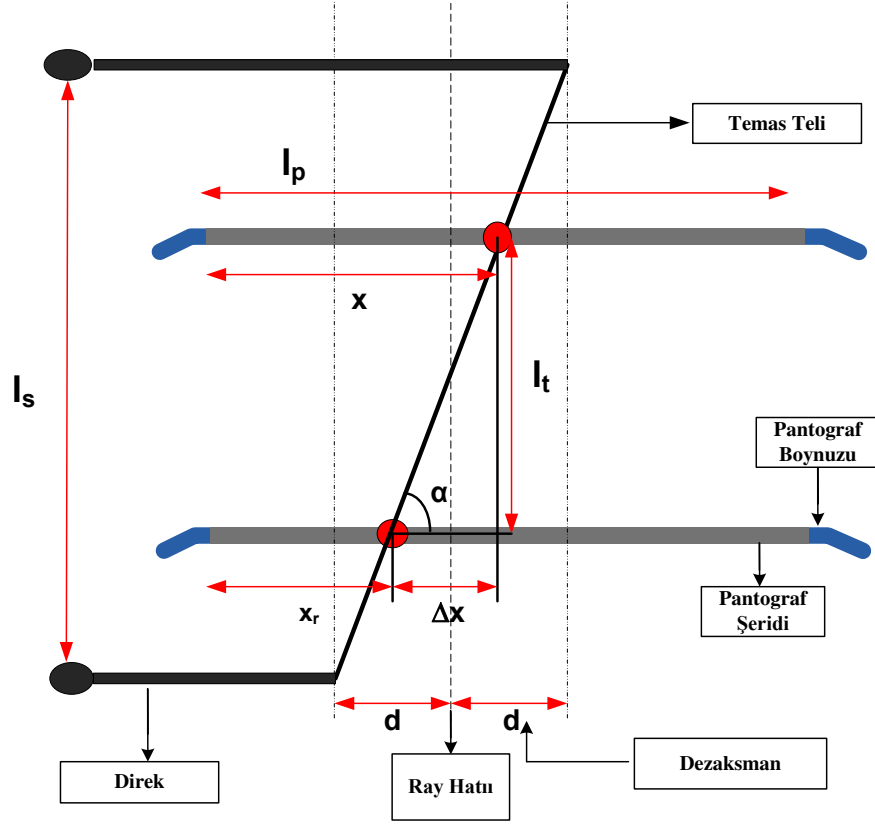
l_s : İki direk arasındaki mesafeyi (Boşluğun uzunluğu),

d : Dezaksmanı,

l_p : Pantograf uzunluğunu,

x_r : Referans mesafesini,

göstermektedir. Bu değişkenler Şekil 5.4’de gösterilen modeli oluşturmak için gereklidir. Temas noktasının yeni konumu her örnekleme adımında x_r değerinin Δx değeri ile toplanmasıyla hesaplanır.



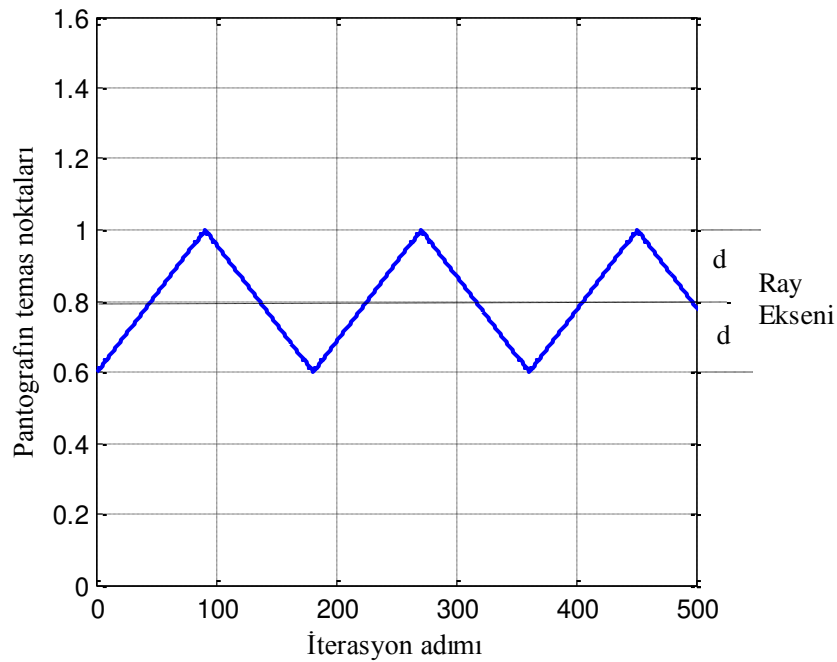
Şekil 5.4. Gerekli değişkenler

5.2.2. Analiz Yaklaşımı için Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

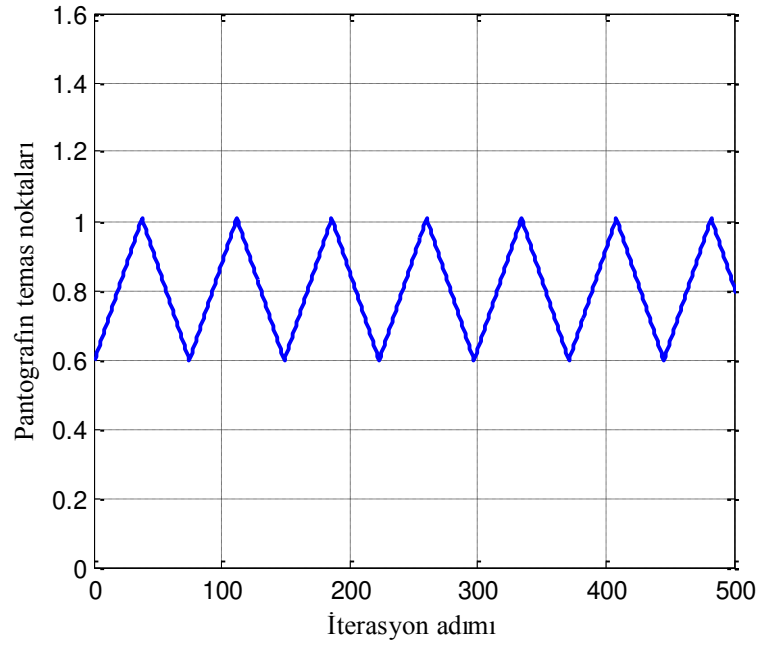
Önerilen algoritma, PAK sistemlerinde oluşabilecek bazı sorunların önüne geçmek ve bir arıza durumunda erken teşhis imkanı sağlamak için geliştirilmiştir. Temas noktası pozisyonu periyodik durum izleme hatalarının belirlenmesi için gereklidir. Bu sistem gerçek zamanlı olarak Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Durum izleme simülasyonda farklı hız değerleri için elde edilmiştir. 500 iterasyon adımı her hız değeri için kullanılmıştır. Kullanılan sistem parametreleri aşağıda verilmiştir:

$$l_s = 50 \text{ m}, l_p = 1.6 \text{ m} \text{ ve } d = 0.2 \text{ m},$$

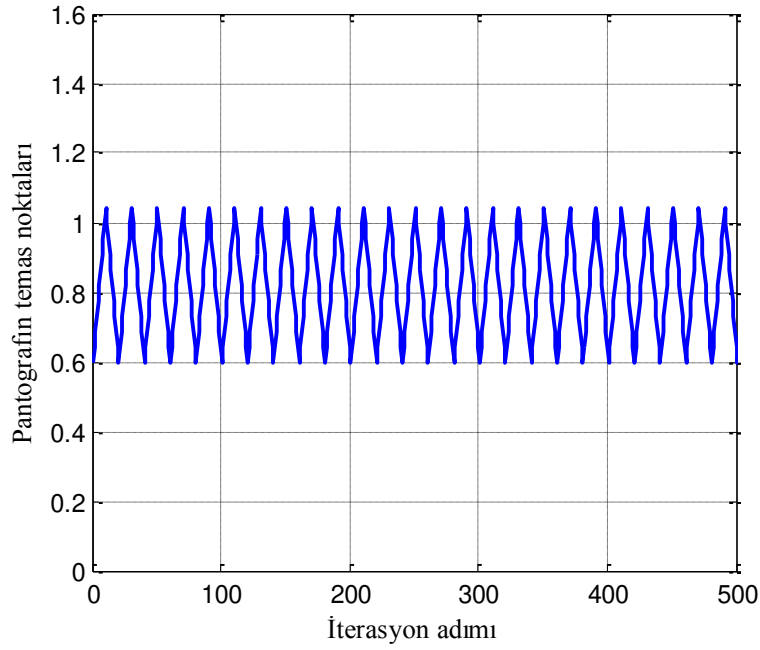
Simülasyon, bir önceki bölümde verilen denklemlerde bu değerleri yerine yazarak gerçekleştirilmiştir. Farklı hız değerleri için simülasyon sonuçları Şekil 5.5-5.7’de verilmiştir. 20 km/sa hız değeri için simülasyon sonucu Şekil 5.5’de verilmektedir. Bu kararlı durumun bir sonucudur ve temas teli güvenli bölgede hareket etmektedir. Ray hattı ve dezaksman eksenini şekilde gösterilmiştir. Ray hattı eksenini aynı zamanda pantograf orta noktasını da göstermektedir. Temas noktası pantograf orta noktasına göre ± 20 cm kadar değişmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7, sırasıyla 50 km/saat ve 200 km/saat tren hız değerleri için temas noktaları değişimini göstermektedir. Temas telinin, dezaksmanın zikzak şeklinden dolayı düzgün bir formu yoktur. Pantografin zikzak hareketi şekillerden açıkça görülmektedir. Hız arttıkça temas noktası değişimi de artmaktadır. Hızın artması veya azalması durumunda, arızalar sürekli durum izleme yapılması ile engellenebilmektedir.



Şekil 5.5. 20 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi



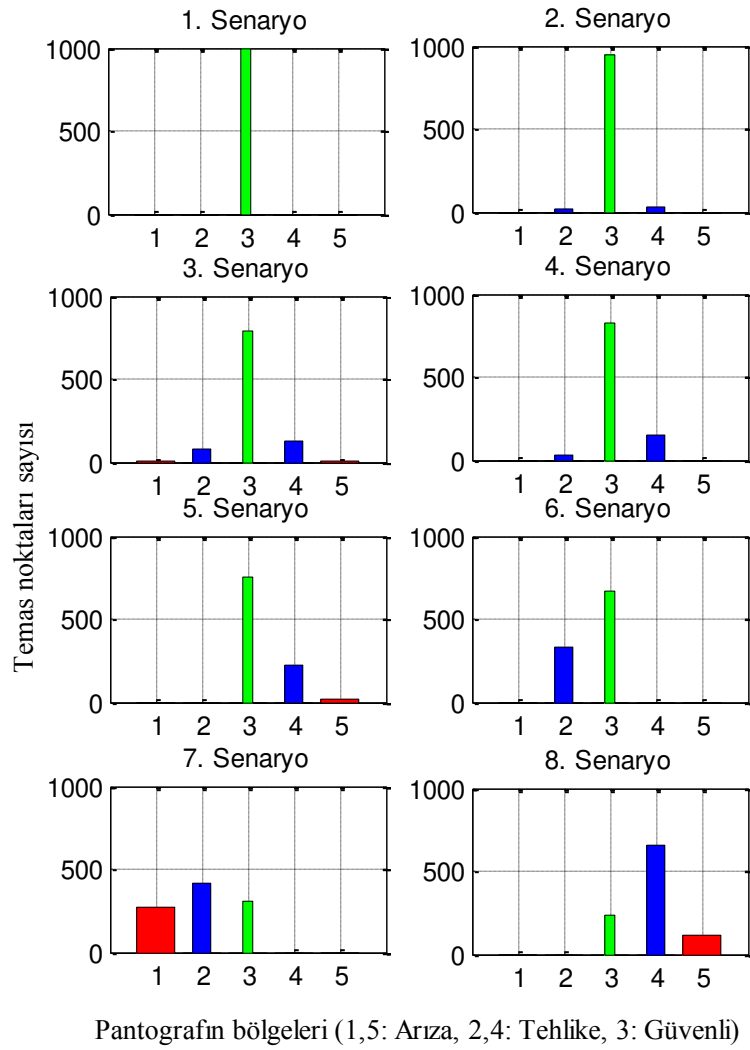
Şekil 5.6. 50 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi



Şekil 5.7. 200 km/sa hız değeri için temas noktası değişimi

Daha sonra, simülasyon sonuçları arızalı ve kararlı durumlar için elde edilmiştir. Pantografin her zaman güvenli bölgede çalışması istenir. Temas telinin değdiği bölgeler simülasyon sonuçları analiz edilerek değerlendirilmiş ve temas noktası değişiminin gerçekleştiği bölgelerin sınıflandırılması teşhis algoritması ile gerçekleştirilmiştir.

Temas noktası bölgelerinin değişimi, sekiz farklı rastgele senaryo için Şekil 5.8’de gösterilmiştir. 1000 temas noktası için pantograf yüzeyindeki bölgeler gözlemlenmiştir. (1) ve (5) arıza bölgesine, (2) ve (4) tehlikeli bölgeye ve (3) güvenli bölgeye karşılık gelmektedir. Şekil 5.8’deki rastgele sekiz senaryo için, pantograf yüzeyi bölgelerindeki temas noktası oranları Tablo 5.1’de verilmiştir. İlk senaryo % 100 kararlı bir durumdur, hiçbir arıza yoktur, temas dezaksman aralığında ve güvenli bölge üzerindedir. İkinci senaryoda, temas tehlikeli bölgeye doğru kayar ama bu sorun yaratacak kadar kötü bir seviye değildir ve temas oranı % 5’tir. Oluşturulan teşhis algoritmasına göre, tehlikeli bölgedeki temas oranı % 5 veya altında ise bu durumda herhangi bir önlem almaya gerek yoktur ve durum ihmal edilebilir düzeydedir. Trenin enerji ihtiyacı açısından birinci ve ikinci senaryolar arasında hiç bir fark yoktur. Her iki durumda da, tren gerekli enerjiyi uygun bir şekilde alabilmektedir. Tehlikeli bölgedeki temas noktası oranı dördüncü ve altıncı senaryolarda olduğu gibi % 5’in üzerinde ise, bu durum yapısal veya dış sebeplerden dolayı sistemde bir sorun olabileceğini göstermektedir. Bu, hemen değerlendirilmesi ve optimize edilmesi gereken bir durumdur. Üçüncü, beşinci, yedinci ve sekizinci senaryolarda arıza zaten oluşmuştur, bu nedenle önemli olan durum ciddi boyutlara ulaşmadan arızayı durdurmak ve arıza kökeninin ne olduğunu belirlemektir.

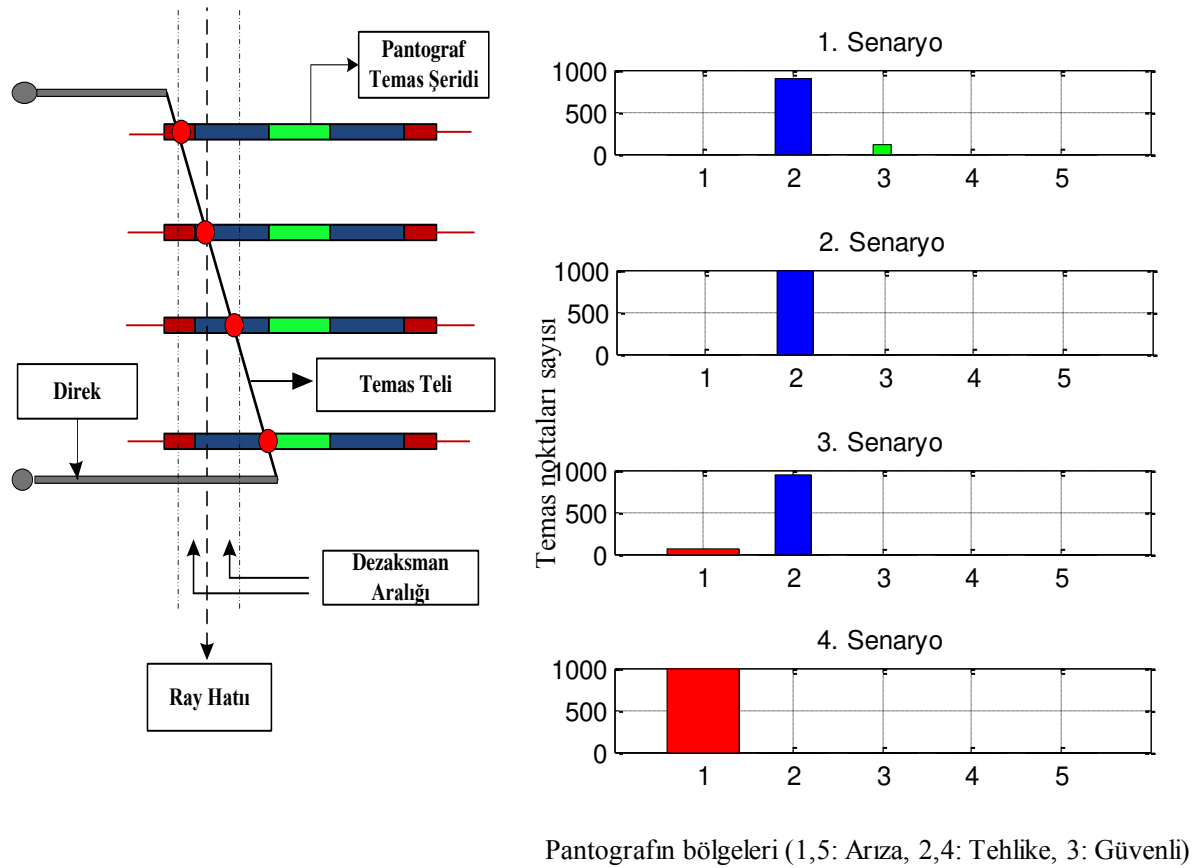


Şekil 5.8. Sekiz farklı senaryo için temas noktaları değişimi

Tablo 5.1. Sekiz farklı senaryo için pantograf bölgelerindeki temas oranları

	Pantograf bölgelerindeki temas oranları (%)		
Senaryo	Arıza	Tehlikeli	Güvenli
1	0	0	100
2	0	5	95
3	1	20	79
4	0	18	82
5	2.2	22.8	75
6	0	33.5	66.5
7	27.5	41.5	31
8	11.5	65.5	23

Şekil 5.8’de tam güvenilir durum, diğer durumlarla beraber incelenmiştir. Pantograf güvenli bölge içerisinde ilerlerken herhangi bir fiziksel ve mekanik etkiden dolayı ya da ray-zemin kaynaklı bir nedenden dolayı kayabilir. Böyle bir durumda temas bir süreliğine güvenilir bölgenin sağında ya da solunda oluşabilir. Hatta eğer arıza tespit edilip giderilmezse pantograf kırılması veya temas telinin takılması gibi nedenlerden dolayı bu bölgelerde sürekli bir temas bile oluşabilir. Pantograf sağa doğru kayarsa, temas sürekli olarak pantograf temas şeridinin sol tarafında oluşur. Güvenli bölgeden başlayan temas, tehlikeli bölgeye kayacak hatta pantograf konumuna bağlı olarak arıza bölgesine geçebilecektir. Böyle bir arıza durumunda pantograf hareketi, temas noktası değişimi ve elde edilen simülasyon sonucu Şekil 5.9’da görülmektedir.

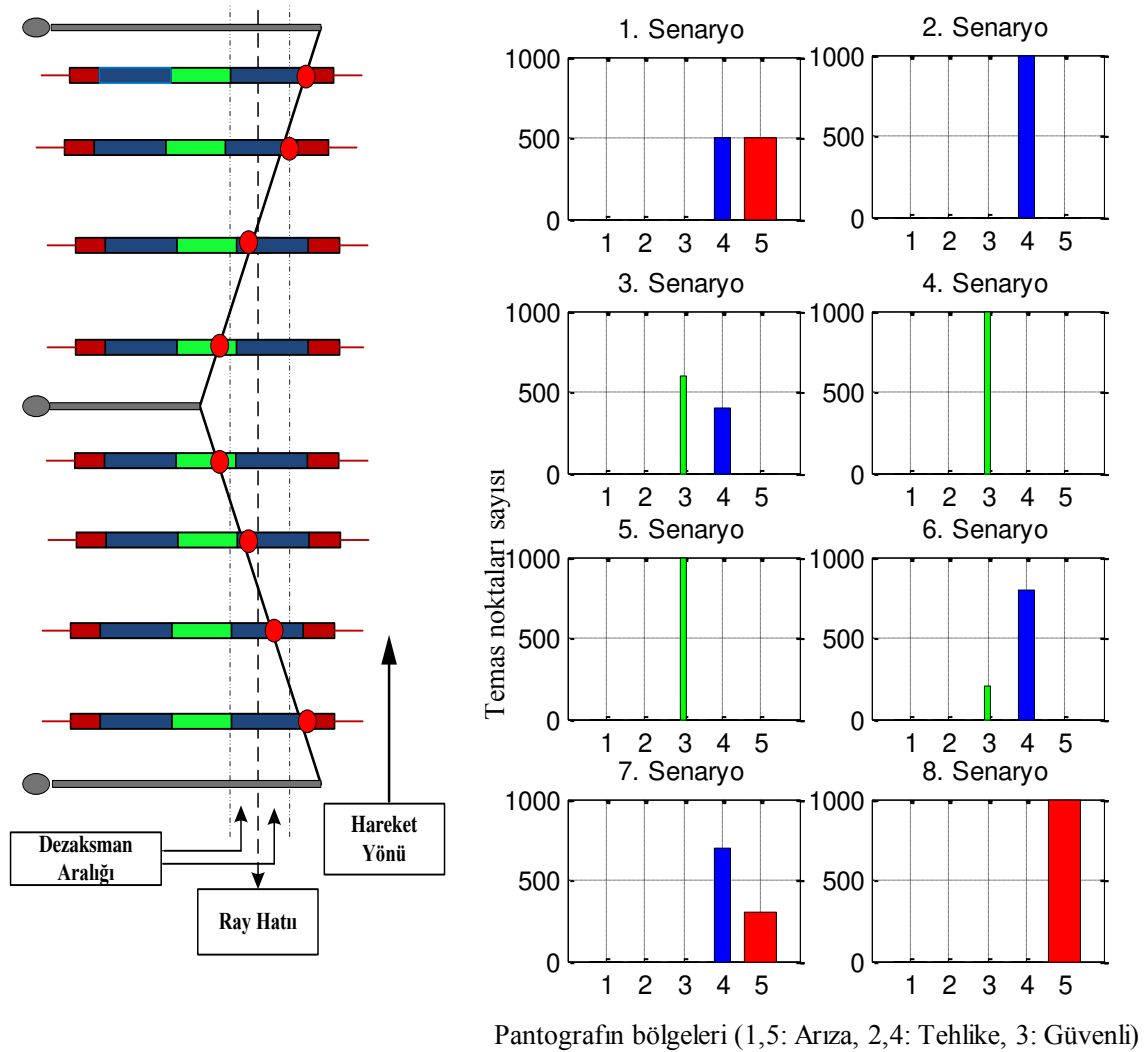


a) Temas noktası değişimi

b) Temas bölgesi değişimi

Şekil 5.9. Birinci bölgeye doğru kayan bir arıza için temas noktası değişimi

Şekil 5.9 (a)'da dört farklı senaryo için temas bölgesi değişimi görülmektedir. Eğer kısa süreli bir kayma oluştuysa temas tehlikeli bölgeye kayacak ve sonra tekrar güvenilir bölgeye dönecektir. Böyle bir durumda temas oranı % 5' in altında ise herhangi bir önlem almaya gerek yoktur. Fakat aynı ray hattının hep aynı kısımlarında böyle bir durum oluşuyorsa, ileride daha büyük sorunlara yol açabileceği için bu durumun giderilmesi gerekmektedir. Sürekli bir durum izleme yöntemi kullanılarak, bu tür sorunların kısa süreli ya da uzun süreli olup olmadığı ve tekrarlanma sıklığı belirlenerek, gerekli bakım ve onarım işlemlerinin yapılması sağlanabilir. Pantografin sola kaydığı durumda da temas sürekli pantograf yüzeyinin sağında oluşacaktır. Şekil 5.10'da pantografin sola doğru kaydığı sekiz farklı senaryo için temas noktası ve temas bölgesi değişimleri görülmektedir.

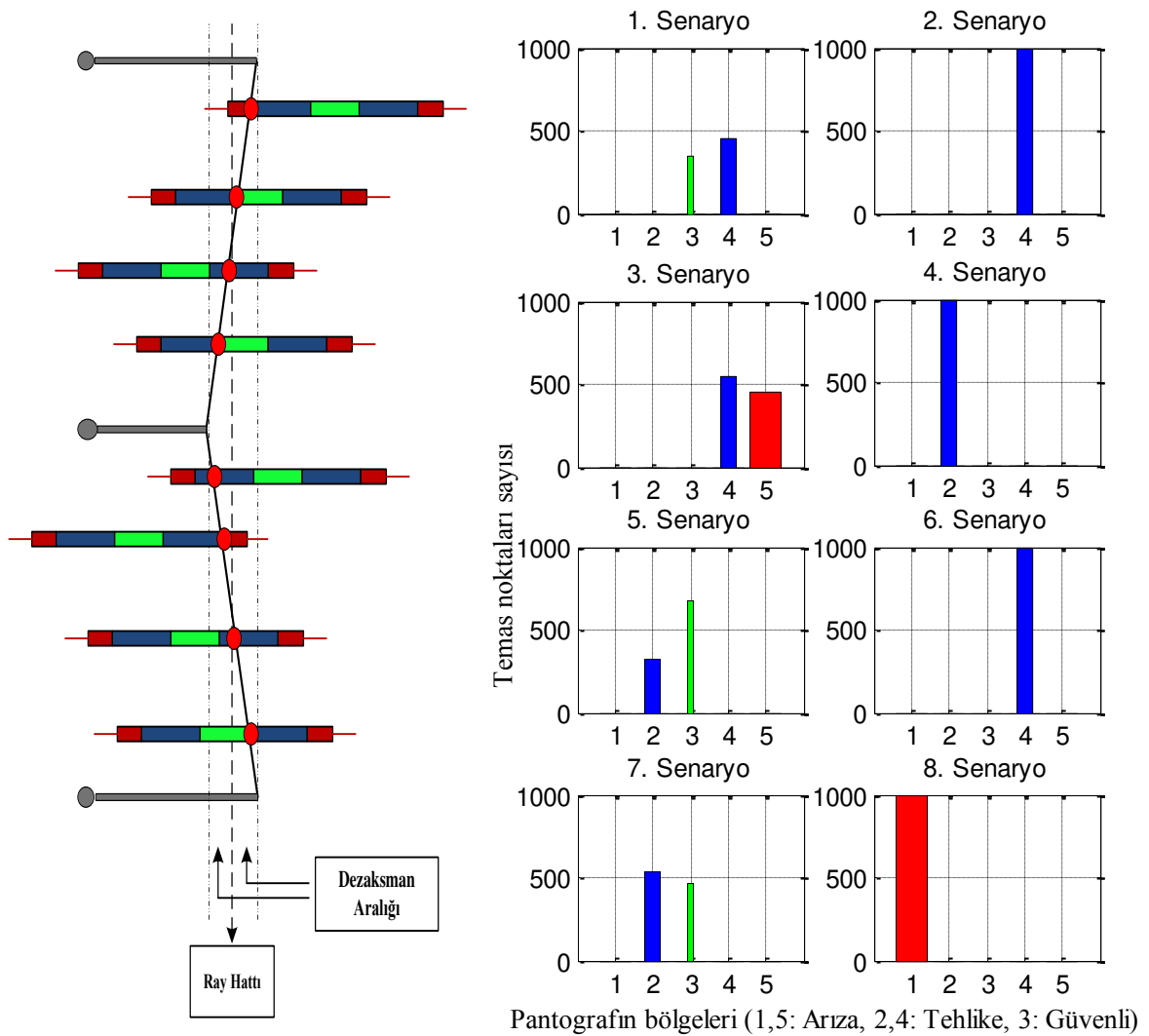


a) Temas noktası değişimi

b) Temas bölgesi değişimi

Şekil 5.10. Beşinci bölgeye doğru kayan bir arıza için temas noktası değişimi

Pantograf hareket eden bir yapıdır, ancak bu hareketini tek başına yapamaz. Çünkü tren üzerine bağlanmıştır ve konumu sabittir. Yatay hareketini tren hızına bağlı olarak düşey hareketini ise eyleyiciye bağlı olarak, yapmaktadır. Pantograf süspansiyon sisteminde ya da trene bağlantı noktalarında bir arıza oluşması durumunda, pantografin tren üzerindeki sabit konumu değişecek ve sürekli hareket etmeye başlayacaktır. Böyle bir durumda elde edilen sonuçlar, temas noktası ve pantograf bölgesi değişimi için oluşturulan senaryolar Şekil 5.11’de görülmektedir. Arızalı durumlar için oluşturulan senaryolardaki pantograf yüzeyi bölgelerindeki temas noktası oranları Tablo 5.2’de verilmiştir.



a) Temas noktası değişimi

b) Temas bölgesi değişimi

Şekil 5.11. Temas noktasının sürekli değiştiği bir arıza için simülasyon sonuçları

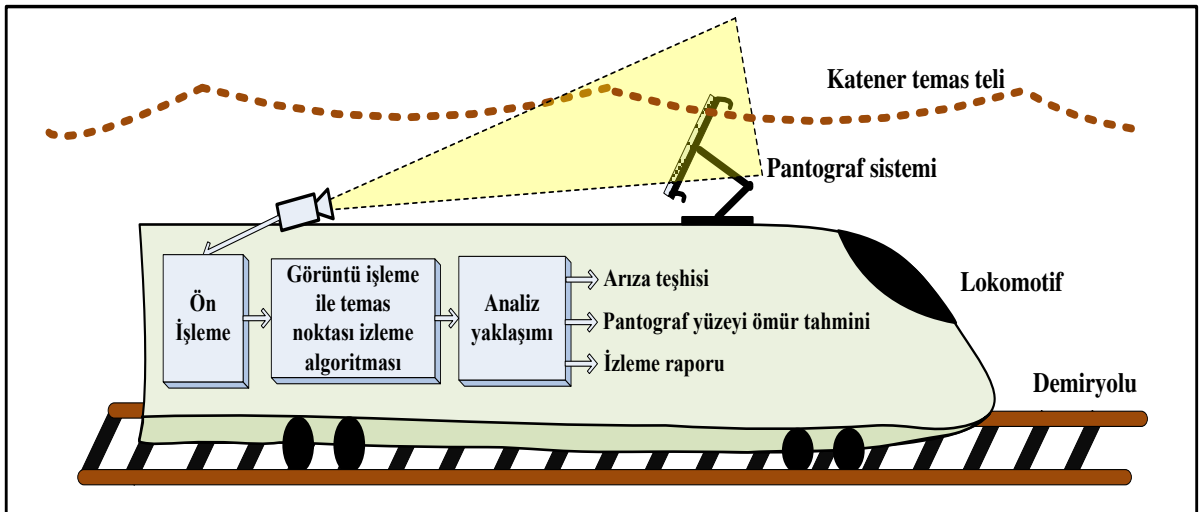
Tablo 5.2. Arıza senaryoları için pantograf bölgelerindeki temas oranları

	Pantograf bölgelerindeki temas oranları (%)			Pantograf bölgelerindeki temas oranları (%)			Pantograf bölgelerindeki temas oranları (%)		
	Şekil 5.9			Şekil 5.10			Şekil 5.11		
Durum	Arıza	Tehlikeli	Güvenli	Arıza	Tehlikeli	Güvenli	Arıza	Tehlikeli	Güvenli
1	0	90	10	50	50	0	0	65	35
2	0	100	0	0	100	0	0	100	0
3	5	95	0	0	40	60	45	55	0
4	100	0	0	0	0	100	0	100	0
5				0	0	100	0	32	68
6				0	80	20	0	100	0
7				30	70	0	0	53	47
8				100	0	0	100	0	0

Tablo 5.2’den görüldüğü gibi tehlikeli bölgelerde oluşan temaslar %5’in çok üstündedir. Hatta birçoğu zaten arıza bölgesindedir. Tehlikeli bölgede oluşan temaslar için arıza bölgesine geçmeden gerekli tedbirlerin alınması ve onarımların yapılması çok önemlidir. Çünkü arıza bölgesine geçtikten sonra, arıza zaten oluşmuş olduğu için sorunların önüne geçmek neredeyse imkansızdır. Tüm bu çalışmalar PAK sistemlerinde durum izlemenin arıza teşhisi için ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Yapılan bu çalışmalar ile herhangi bir sorun arızaya dönüşmeden önlenabilir ve çözülebilir.

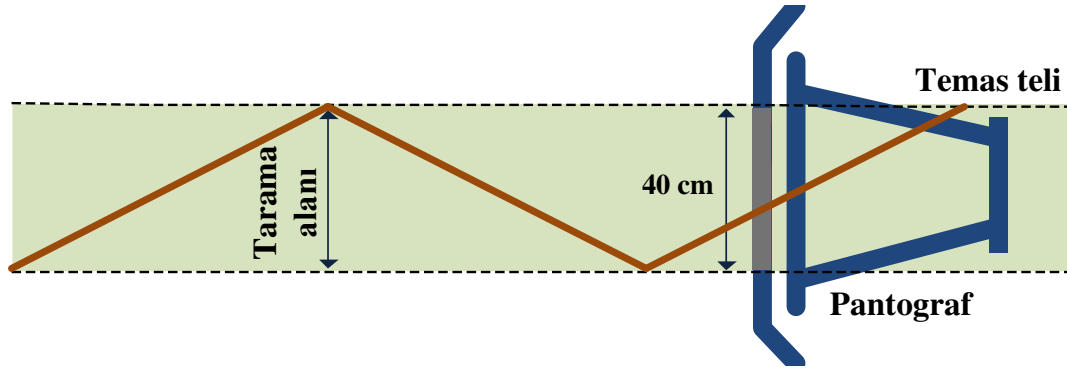
5.3. Temas Noktasının Görüntü İşleme ile İzlenmesi ve Analizi

Bu bölümde, PAK sistemleri için görüntü işleme tabanlı temas noktası izleme yöntemi önerilmiştir. Bu amaçla, pantograf temas şeridi ve katener arasındaki temas noktası analizi, görüntü işleme yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan görüntü işleme teknikleri ile görüntü üzerinden pantograf temas şeridi belirlenmiştir. Pantograf temas şeridi, Canny Kenar Çıkarım algoritması ve Hough Dönüşümü kullanılarak tespit edilmiştir. Tespit işleminin ardından pantograf temas şeridini kapsayan bir temas bölgesi alanı oluşturulmuştur. Daha sonra katener temas teli, pantograf temas bölgesi içerisinde aranarak tespit edilmiştir. Önerilen yöntemde, pantograf temas şeridi ve katener temas telinin tespiti, görüntü üzerindeki doğruların açı değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Tespit edilen bu doğruların kesişim noktaları hesaplanarak, temas noktası elde edilmiştir. Pantograf şeridinde katener hattının en fazla temas ettiği noktalar analiz edilerek istatistiksel veriler elde edilmiştir. Temas noktası izleme işlemi, PAK sistemlerinde oluşan arızaların incelenmesi ve durum izleme için oldukça önemlidir. Böylece, pantograf şeridinin en aşınmış noktaları durum izleme yöntemi ile belirlenmektedir. Önerilen yöntem ile PAK sisteminin temas noktası izlenerek, pantograf temas bölgesindeki temas noktalarının konumlarına göre sistemin çalışması incelenmektedir. Bu yöntem için kullanılan deneysel düzenek Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12. Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek

Geliştirilen temas noktası izleme algoritması ile temas işlemi sırasında aşırı ısınmanın önlenmesi için zikzak yapıda olan temas alanı izlenmektedir. Bu şekilde bir yapı oluşturularak pantograf yüzeyinde tarama alanı oluşturulmuştur. PAK sistemlerinde temas teli ile pantograf arasındaki tarama alanı Şekil 5.13’de verilmiştir.

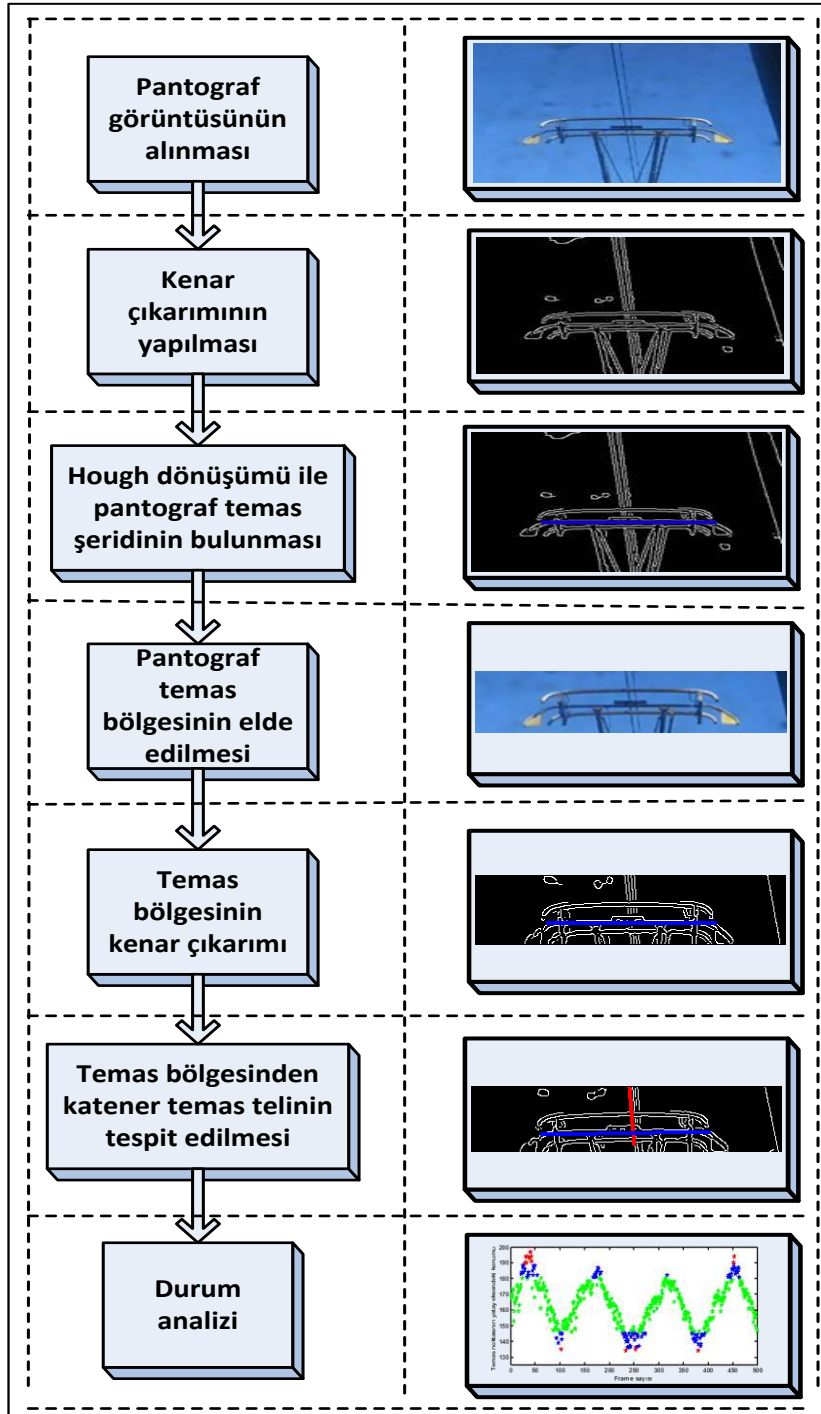


Şekil 5.13. Temas teli ve pantograf arasındaki tarama alanı

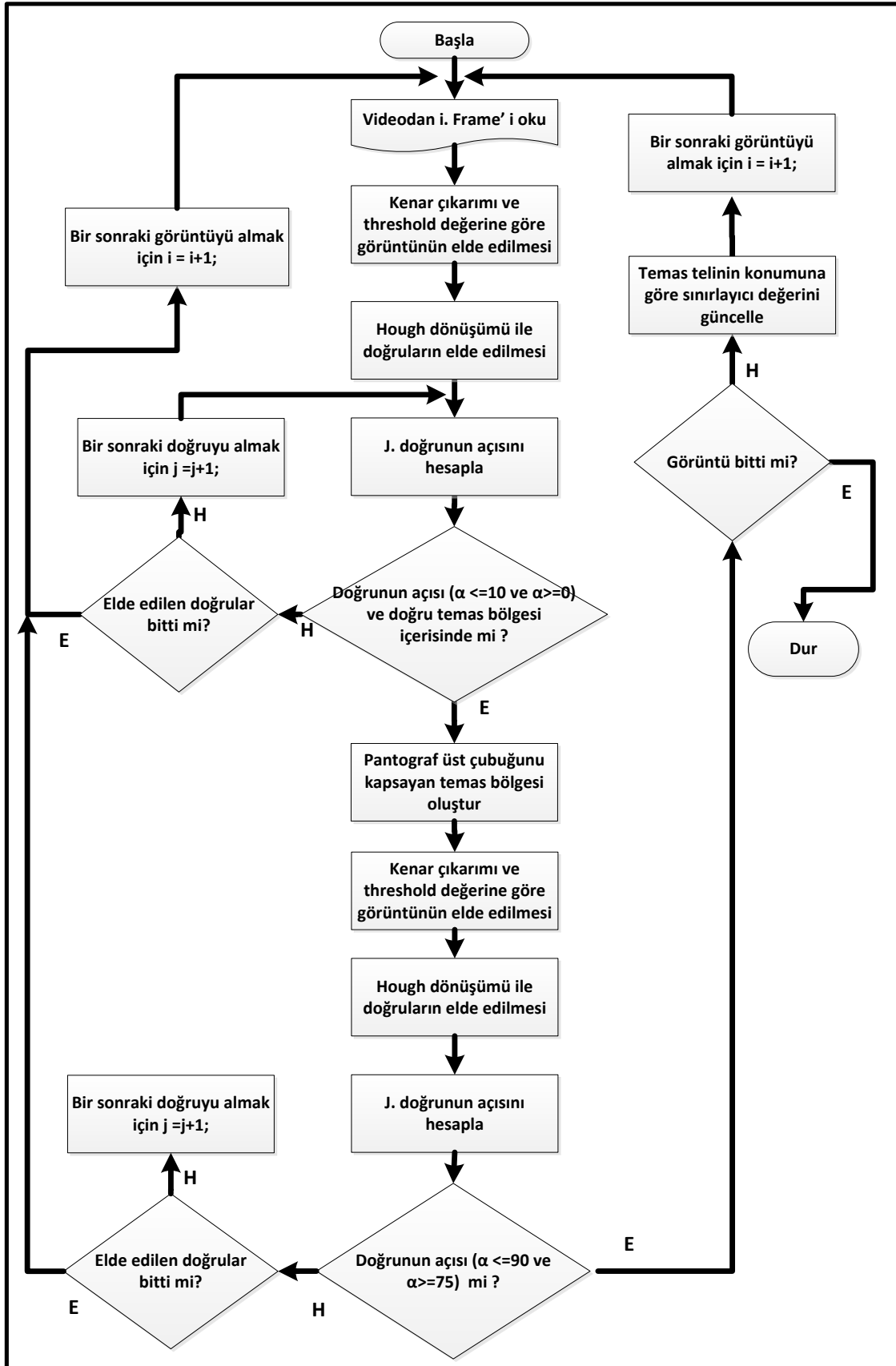
Şekil 5.13’de görüldüğü gibi, pantograf yüzeyi üzerinde bir tarama alanı oluşturularak, katener temas telinin pantograf yüzeyinde sürekli aynı noktaya temas etmesi engellenmektedir. Fakat bu tür bir sistemin kurulumu sırasında meydana gelen yanlış ayarlamalardan veya sistemin çalışması sırasında oluşan küçük problemlerden dolayı tarama alanı istenilen bölgede olmayabilir.

5.3.1 Önerilen yöntem

Katener temas telinin pantograf yüzeyinde istenilen bölgeye temas etmemesi durumunda arızalar artmaktadır. Bu bölümde temas noktası izlenerek istenilmeyen bölgelerde oluşan temaslar tespit edilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar ile pantograf yüzeyinde oluşan arızaların nedenleri tahmin edilerek durum izleme yapılmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntemin blok şeması Şekil 5.14’de, akış şeması ise Şekil 5.15’de verilmiştir.



Şekil 5.14. Önerilen yöntemin blok şeması



Şekil 5.15. Önerilen yöntemin akış şeması

Şekil 5.15’de verilen akış şemasında, öncelikle kameradan PAK sisteminin görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntü üzerinde Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü uygulanarak doğrular elde edilmektedir. Elde edilen doğruların açı değerleri dikkate alınarak pantograf temas şeridi tespit edilmektedir. Temas şeridini kapsayan bir pantograf temas alanı oluşturulup bu alan içerisinde tekrar Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü uygulanarak yeni doğrular elde edilmektedir. Elde edilen yeni doğruların açı değerleri dikkate alınarak katener temas teli tespit edilmektedir. Katener temas telinin belirlenmesi işlemi sırasında katener portör teli ile karıştırılabilmektedir. Bu nedenle ilk görüntü karesinde katener temas teli tespit edildikten sonra, içerisinde katener temas telini kapsayan küçük bir alan oluşturulmaktadır. Bir sonraki görüntü için, katener temas teli bu alan içerisinde aranmaktadır. Kullanılan Canny Kenar Çıkarım algoritmasının sözde kodu Şekil 5.16’da ve Hough Dönüşümü’nün sözde kodu Şekil 5.17’de verilmiştir. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının pantograf görüntüsüne uygulanması ile farklı eşik değerlerine göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.18’de gösterilmiştir.

```

Image ← Gri görüntü
Sutun ← Image'nin piksel genişliği
Satir ← Image'nin piksel yüksekliği
Görüntünün yumusatılması
for i=1:Sutun
    for j=1:Satir
        Kenar çıkarım matrislerinin uygulanması

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

        Gradient büyüklüğünün ve açının hesaplanması

$$G(i, j) = \sqrt{G_x(i, j)^2 + G_y(i, j)^2}$$

        İstenmeyen ayrıntıların yok edilmesi

$$\alpha(i, j) = \tan^{-1} \frac{G_y(i, j)}{G_x(i, j)}$$

    end
end
end

```

Şekil 5.16. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının sözde kodu

```

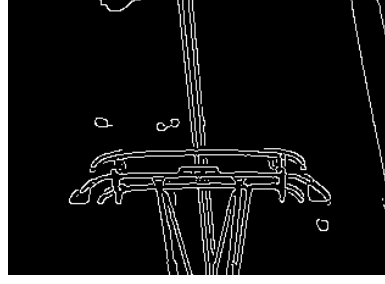
E=imread('pantograf.png');
E=edge(E,'canny',0.1);
[h,w] = size(E);
max_r = round(sqrt(h^2 + w^2));
acilar = -90:1:89;
rho = -max_r:1:max_r;
H = zeros(length(rho),length(acilar));
for i=1:w
    for j=1:h
        if E(j,i) ~= 0
            for k = 1:length(acilar)
                t = acilar(k)*pi/180;
                r = (i-1)*cos(t) + (j-1)*sin(t);
                [d, index] = min(abs(rho-r));
                H(index,k) = H(index,k) + 1;
            end
        end
    end
end
figure, imagesc(acilar,rho,H),impixelinfo;

```

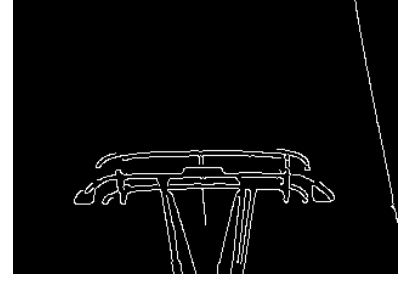
Şekil 5.17. Hough Dönüşümü’nün sözde kodu



(a) Normal görüntü [128]



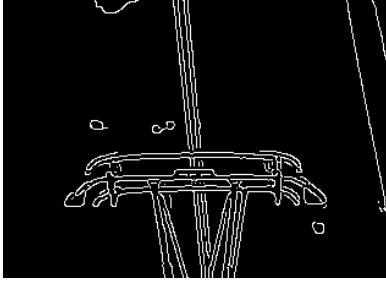
(b) Eşik değeri = 0.1



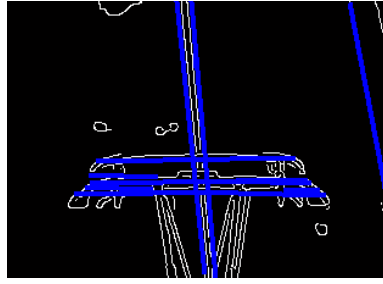
(c) Eşik değeri = 0.5

Şekil 5.18. Canny Kenar Çıkarım algoritmasının örnek pantograf görüntüsüne farklı eşik değerleri için uygulanması

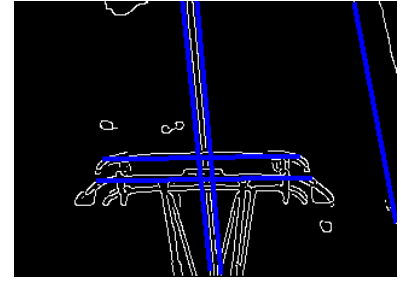
Örnek bir PAK sistemi görüntüsünden, kenar çıkarımı sonucunda elde edilen sonuçlar için Hough Dönüşümü ile farklı eşik değerlerine göre çizilen doğrular Şekil 5.19’da verilmiştir.



(a) Kenar çıkarımı sonucu elde edilen görüntü



(b) Eşik değeri = 0.1



(c) Eşik değeri = 0.5

Şekil 5.19. Hough Dönüşümü’nün örnek pantograf görüntüsüne farklı eşik değerleri için uygulanması

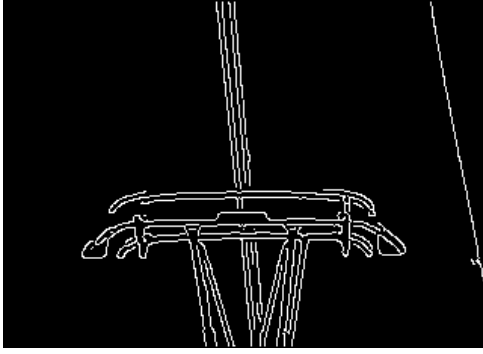
Örnek bir pantograf katener sistemi görüntüsü, bu görüntünün gri formatlı durumu, Canny Kenar Çıkarımı sonucu ve Hough Dönüşümü ile tespit edilen doğrular Şekil 5.20’de verilmiştir.



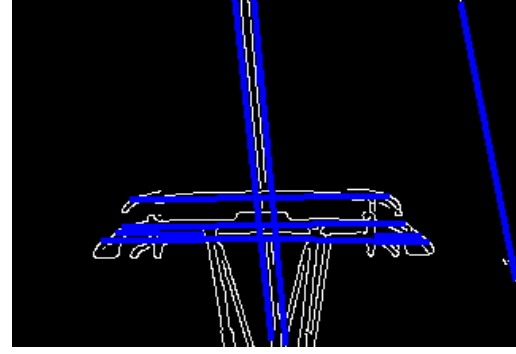
(a) Normal görüntü



(b) Gri görüntü



(c) Canny kenar çıkarım sonucu



(d) Hough dönüşümü ile doğruların tespit edilmesi

Şekil 5.20. Örnek PAK görüntüsünde doğruların elde edilme aşamaları

Şekil 5.20’de elde edilen doğrular içerisinde pantograf temas şeridi ve katener temas teli, mevcut doğruların açı değerleri dikkate alınarak tespit edilmektedir. Şekil 5.21’de pantograf temas şeridi ve pantograf temas alanı içerisinde tespit edilen katener temas teli gösterilmiştir.



(a)

(b)

(a) Pantograf temas şeridinin tespiti

(b) Katener temas telinin tespiti

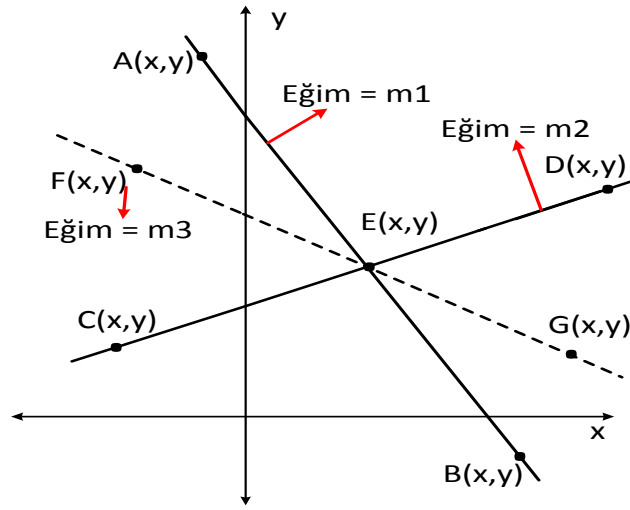
Şekil 5.21. Pantograf temas şeridi ve katener temas telinin tespit edilmesi

Tespit edilen doğruların kesişim noktasının elde edilmesi için Denklem (5.5)’de verilen iki noktası bilinen doğrunun eğimi kullanılmaktadır.

$$m = \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)’de verilen m eğimi, (A_x, A_y) A noktasının konum bilgilerini ve (B_x, B_y) ise B noktasının konum bilgilerini temsil etmektedir. Bu denklem ile PAK görüntüsü üzerinde elde edilen doğruların açı değerine göre katener temas teli ve pantograf

temas şeridi belirlenmektedir. Her bir doğrunun kendisine ait iki noktası bilinmektedir. Bu iki doğrunun kesişim noktası PAK sistemindeki temas noktasını vermektedir. Temas noktasının hesaplanabilmesi için, iki noktası bilinen doğrunun kesişim noktası için gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Katener temas teline ait noktalar A ve B 'dir. Pantograf temas şeridi doğrusuna ait noktalar ise C ve D 'dir. Bu iki doğrunun kesişim noktası E olarak temsil edilmektedir. İki noktası verilen iki doğrunun kesişim noktası analitik düzlemde Şekil 5.22'de gösterilmektedir.



Şekil 5.22. İki noktası bilinen iki doğrunun kesişim noktasının analitik düzlemde gösterilmesi

Şekil 5.22'de verilen E noktasının koordinatlarını hesaplamak için, E, F ve G noktasından geçen başka bir doğru çizilir. Eğimi m_3 olan doğrunun denklemi Denklem (5.6)'da verilmektedir.

$$m_3 = \frac{G_y - F_y}{G_x - F_x} \quad (5.6)$$

F ve G noktalarına ait konum bilgilerinin hesaplanması ile elde edilen Denklem (5.6)'nın son hali Denklem (5.7)'de verilmiştir.

$$m_3 = \frac{((D_y - C_y) * (C_x - A_x)) - ((C_y - A_y) * (D_x - C_x))}{((D_y - C_y) * (B_x - A_x)) - ((B_y - A_y) * (D_x - C_x))} \quad (5.7)$$

Denklem (5.8) ve (5.9)'da m_3 değeri kullanılarak elde edilen E_x ve E_y değerleri görülmektedir. Bu değerler kullanılarak PAK görüntüsü üzerinde temas noktası izlenmektedir.

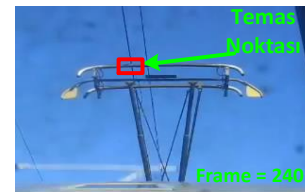
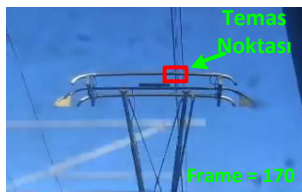
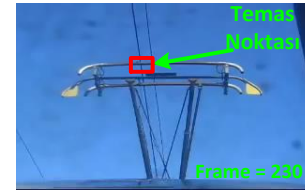
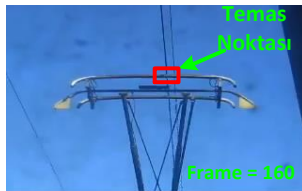
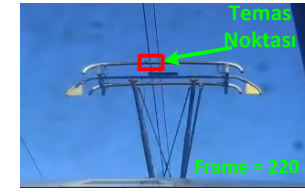
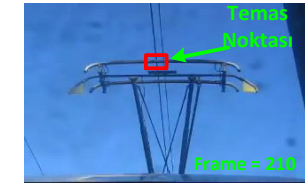
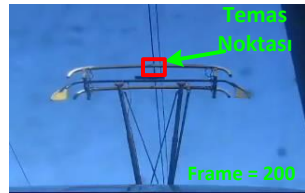
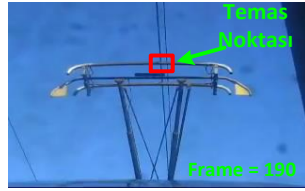
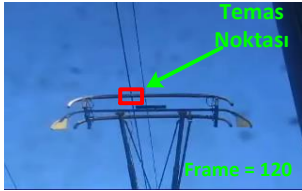
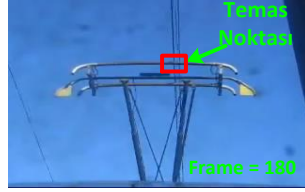
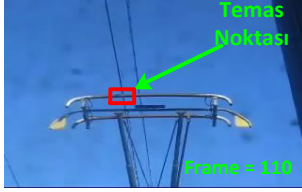
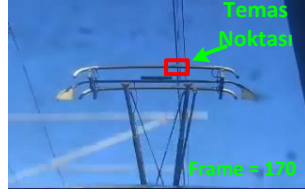
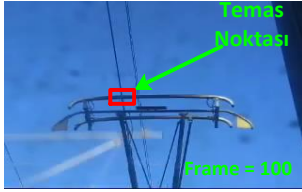
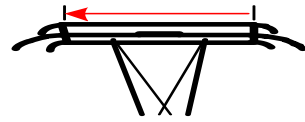
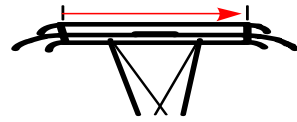
$$E_x = A_x + (B_x - A_x) * m_3 \quad (5.8)$$

$$E_y = A_y + (B_y - A_y) * m_3 \quad (5.9)$$

5.3.2. Önerilen Görüntü İşleme Tabanlı Yaklaşım için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

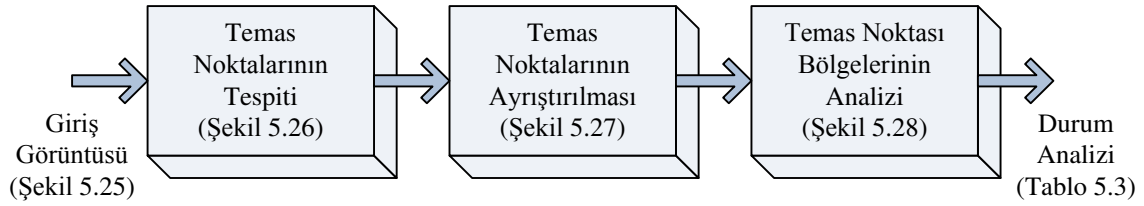
Bu bölümde, PAK sistemleri için durum izleme tabanlı bir arıza teşhis yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde, temas noktası izlenerek pantograf temas bölgelerindeki temas yerleri incelenmektedir. Bu inceleme işleminin ardından, pantograf temas bölgesindeki kritik bölgelerde oluşan temas durumları izlenmektedir. Katener temas telinin, pantografin üst yüzeyindeki kritik bölgelere temas etmesi sonucunda arızaların oluşma olasılığı artmaktadır. Önerilen yöntem ile pantograf üst yüzeyinde temas noktasının konumu izlenerek, güvenli ve kritik bölgelerde oluşan temas durumları tespit edilmiştir. Böylece, oluşabilecek arızalar erken tespit edilerek arıza oluşma olasılıkları hesaplanmıştır.

Deneysel veri olarak, lokomotifin çatısına sabitlenen kameradan alınan PAK sisteminin videoları kullanılmıştır. Şekil 5.23'de, pantograf videosundan belirli aralıklarla alınan görüntü çerçeveleri ile temas noktasının konumu sıralı bir şekilde görülmektedir. Trenin hızına bağlı olarak temas noktasının konumu sürekli değişmekte ve periyodik bir hareket yapmaktadır. Ancak bir arıza oluşması durumunda bu periyodik hareket aksamaktadır.



Şekil 5.23. Pantograf videosundan belirli aralıklarla alınan görüntü çerçevelerinden temas noktasının izlenmesi [128].

Önerilen yöntem, üç farklı pantograf videosuna ait 500 görüntü karesi için uygulanarak, temas noktaları tespit edilmiş ve durum analizi gerçekleştirilmiştir. Durum analizi işleminin aşamaları Şekil 5.24’de verilmiştir. Farklı pantograf videolarına ait görüntüler giriş olarak kullanılmış ve bu görüntülerin temas noktaları belirlenmiştir. Temas noktaları pantograf bölgelerine göre ayrıştırılarak bölgesel analiz yapılmıştır. Kullanılan örnek görüntüler ve durum analizi aşamaları aşağıdaki şekillerde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.24. Durum analizi aşamaları

Üç farklı pantograf videosundan alınan örnek görüntüler Şekil 5.25’de ve tespit edilen temas noktalarının konum grafikleri Şekil 5.26’da verilmiştir. Temasın pantograf yüzeyinde hangi bölgelerde olduğu oldukça önemli olduğundan, verilen temas noktası konum grafiğindeki verilerin pantograf yüzeyindeki bölgelere göre ayrıştırılması Şekil 5.27’de verilmiştir.



(a) Video1

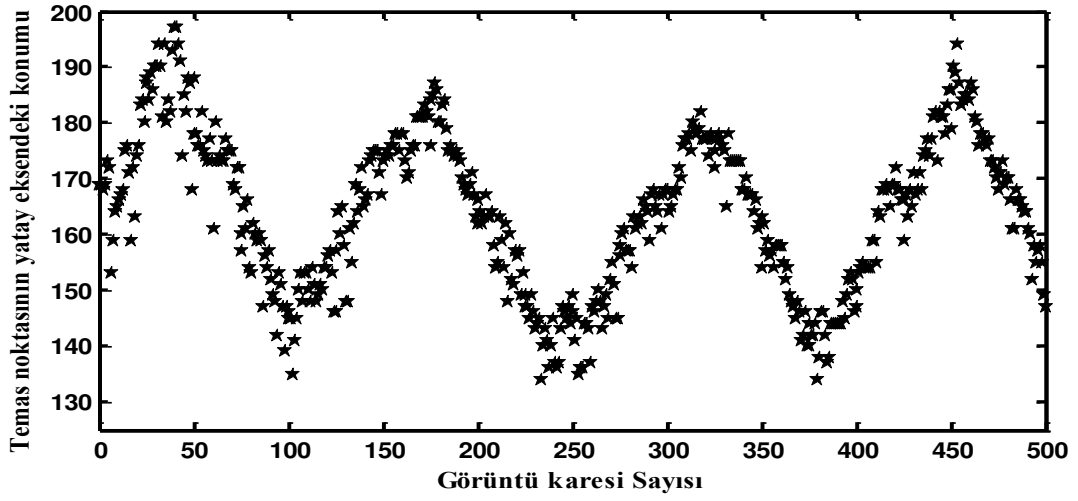


(b) Video 2

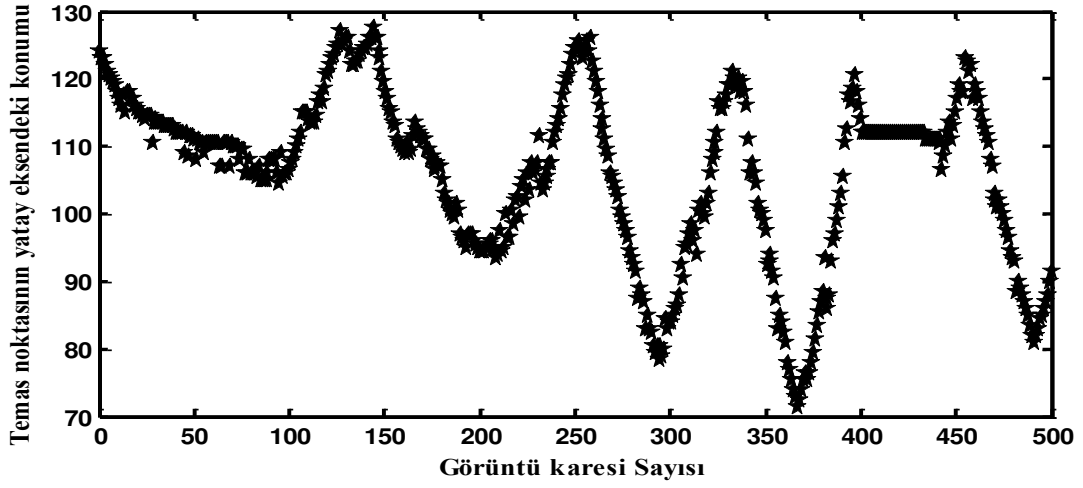


(c) Video3

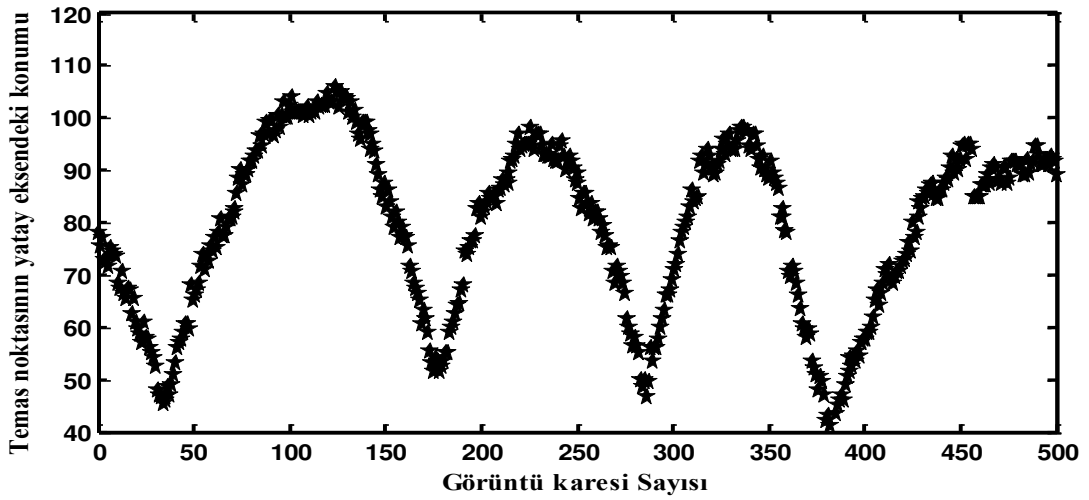
Şekil 5.25. Üç farklı pantograf türü için kullanılan videolardan alınan görüntüler [128].



(a) Video 1

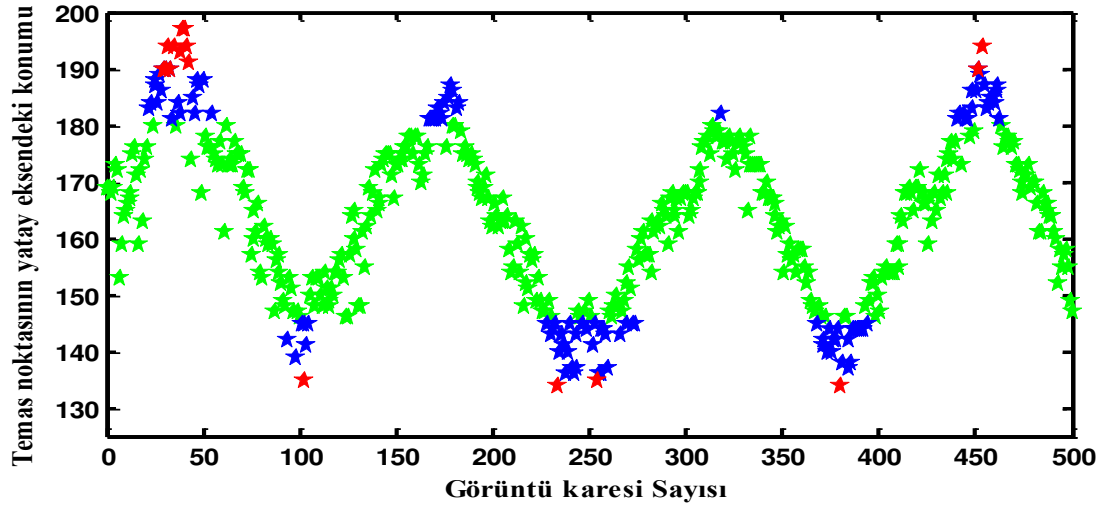


(b) Video 2

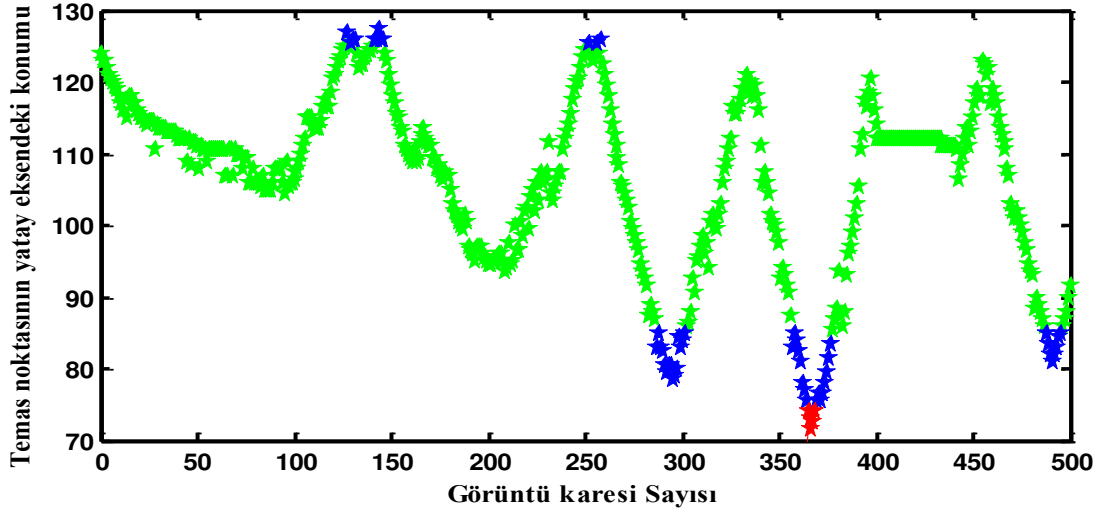


(c) Video 3

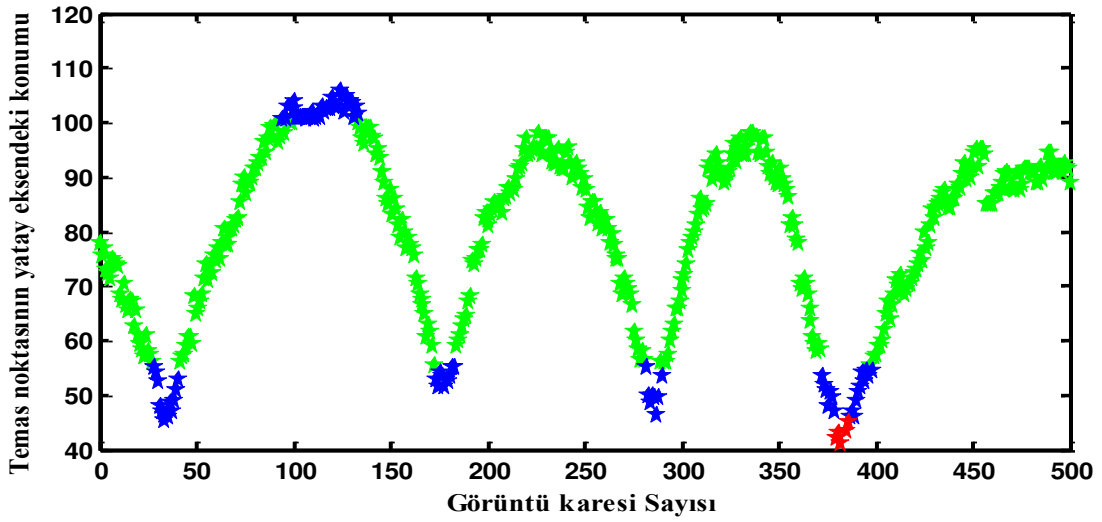
Şekil 5.26. Temas noktasının üç farklı pantograf videosu için tespit edilmesi



(a) Video 1



(b) Video 2



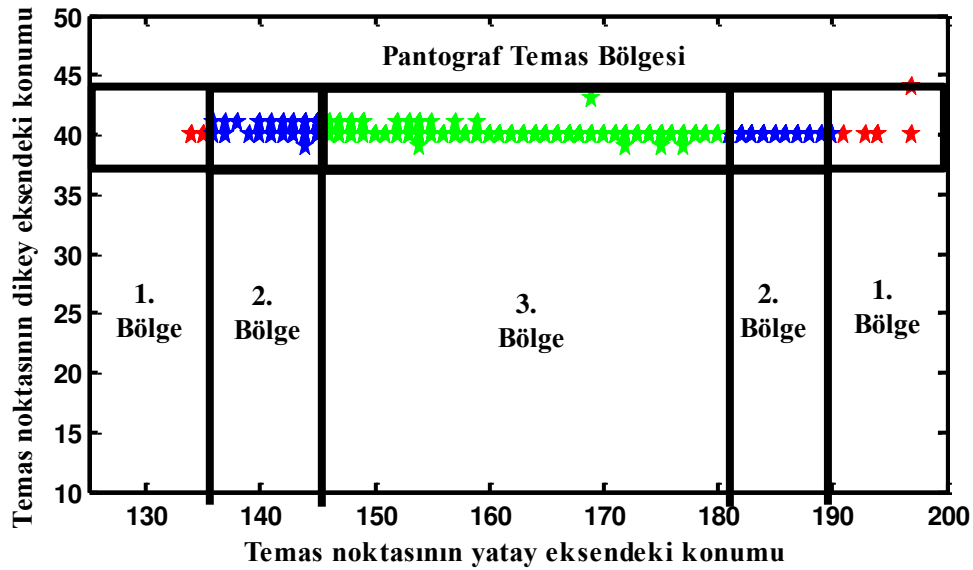
(c) Video 3

Şekil 5.27. Temas noktasının üç farklı pantograf videosu için pantograf bölgelerine göre ayrıştırılması

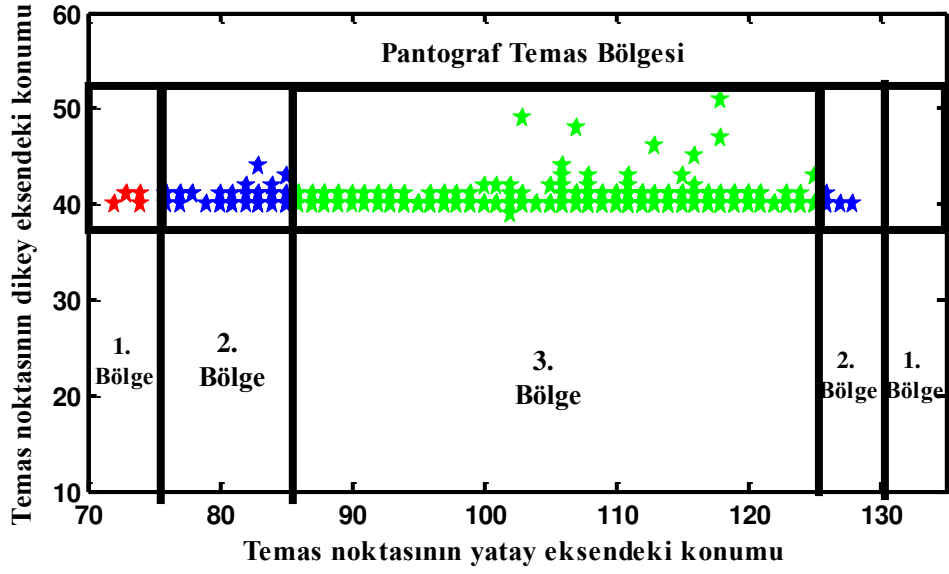
Şekil 5.27’de görüldüğü gibi temas noktası konum değerleri pantograf bölgelerine göre ayrıştırılmıştır. Üç bölgeden oluşan pantograf yüzeyi dikkate alınarak her bölgede bulunan temas noktası farklı bir renkle gösterilmiştir. Pantograf birinci bölgesinde bulunan temas noktaları kırmızı, ikinci bölgede bulunan temas noktaları mavi ve üçüncü bölgede bulunan temas noktaları ise yeşil renk ile gösterilmiştir.

Sağlam bir PAK sisteminde temas noktasının sürekli üçüncü bölgede olması gerekmektedir. Fakat bu çalışmada kullanılan PAK görüntülerinde ikinci ve birinci bölgede de temas noktaları mevcuttur. İkinci bölgede oluşan belirli bir değerin üzerindeki temas pantograf yüzeyine zarar vererek arızaların oluşmasına neden olurken, çok daha kritik bir bölge olan birinci bölgede oluşan temas büyük arızaların oluşmasına neden olmaktadır.

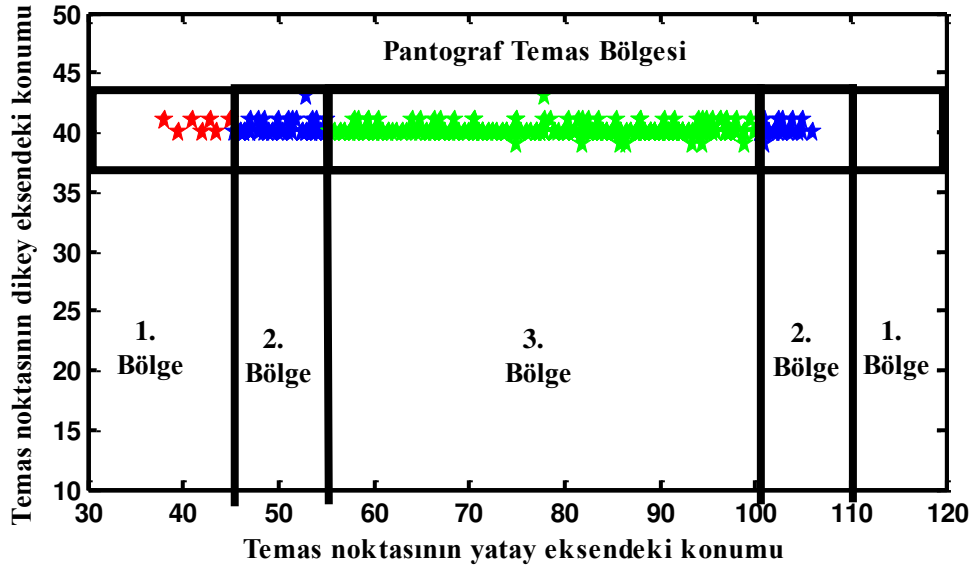
Kullanılan videodan alınan her bir görüntü karesi için temas noktasının yatay ve dikey eksendeki konumları ve bu temas noktalarının bölgesel dağılımları Şekil 5.28’de verilmiştir.



(a) Video 1



(b) Video 2



(c) Video 3

Şekil 5.28. Üç farklı pantograf videosu için temas noktasının yatay ve dikey eksenindeki konumu ve bölgesel dağılımı

Şekil 5.28'den görüldüğü gibi temas noktasının büyük çoğunluğu üçüncü bölgede olup, birinci bölge ve ikinci bölgede de temas noktaları bulunmaktadır. İkinci bölgede bulunan temas noktaları oranı %5'in altında ise arıza oluşma olasılığı çok düşüktür. Ama %5'in üstünde ise arızalara neden olabileceğinden, periyodik olarak izlenmesi ve sürekliliğinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

PAK sisteminde birinci bölgede oluşan temaslar zaten arıza varlığını göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan üç video için 500 görüntü karesinin bölgelere göre temas noktası sayıları ve temas oranları Tablo 5.3’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi her üç bölgede de temasın olması daha iyi bir inceleme yapabilmek için istenmiştir. Birinci bölgede oluşan temas oranları çok düşüktür, ama arıza bölgesi olduğu için düşük olması pek bir şeyi değiştirmemekte, arızanın en kısa sürede giderilmesi gerekmektedir. İkinci bölgede oluşan temas oranları ise %5’in çok üstündedir. Her bir görüntü karesi için ortalama işlem süresi 251.3 ms, standart sapması ise 38 ms olarak hesaplanmıştır.

Önerilen yöntem ile temasın pantograf yüzeyinde hangi bölgelerde olduğu belirlenerek, pantograf ömrü ve aşınma analizi açısından istatistiksel veriler elde edilmiştir. Böylece PAK sistemlerinde periyodik durum izleme ile oluşan arızaların önceden belirlenebilecek ve daha güvenli bir ulaşım sağlanacaktır. Temas noktası izlenerek bu arızaların önlenmesi bakım onarım maliyetinin düşmesine ve ulaşımın aksamamasına da imkan sağlamaktadır.

Tablo 5.3. Temas noktası toplam görüntü karesi sayısının bölgelere göre dağılımı ve temas oranları

Video Adı	Toplam Görüntü Karesi Sayısı	Birinci Bölge		İkinci Bölge		Üçüncü Bölge	
		Görüntü Karesi Sayısı	Temas Oranı (%)	Görüntü Karesi Sayısı	Temas Oranı (%)	Görüntü Karesi Sayısı	Temas Oranı (%)
Video 1	500	10	2	107	21.4	383	76.6
Video 2	500	6	1.2	50	10	444	88.8
Video 3	500	8	1.6	85	17	407	81.4

6. S-DÖNÜŞÜMÜ TABANLI YENİ BİR DURUM İZLEME VE ARK TESPİTİ YAKLAŞIMI

6.1. Giriş

PAK sistemlerinde birçok nedenden dolayı arızalar oluşmaktadır. Pantograf tarafından katenere uygulanan kaldırma kuvvetinin yetersiz olduğu ya da aşınma miktarının fazla olduğu durumlarda, ayrıca kış aylarında katener temas telinde biriken nem ve su tabakasının donması sonucunda temas işlemi aksamakta ve ark oluşmaktadır. Ark hem sistem çalışma performansını etkilemekte hem de ark oluşumu sırasında pantograf üst bölgesinde aşırı ısı meydana gelmektedir. Aşırı ısınmadan dolayı pantograf üst bölgesinde bulunan karbon yapıda çatlaklar oluşarak bozulmaktadır. Karbon yapıda oluşan çatlak kısımlara, katener temas telinin takılması sonucunda çok daha büyük arızalar meydana gelmektedir. Bu nedenle PAK sistemlerinde oluşan arkların belirlenebilmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesi için ark tespiti yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir.

PAK sistemleri ile ilgili yapılan model tabanlı çalışmalarda PAK sisteminin modeli oluşturularak sistemin durumu incelenmiş ve temas takibi yapılmıştır. PAK sistemlerinde oluşan arızaların erken teşhis edilmesi sonucunda daha büyük arızalar önlenerek yüksek maliyetli onarımlar ve ulaşımın aksaması gibi durumlar engellenebilmektedir. Günümüzde PAK sistemi için birçok arıza teşhis yöntemi bulunmaktadır. Araştırmacılar, PAK sisteminde oluşabilecek ark, aşırı ısınma ve aşınma problemlerini çözmek için farklı yöntemler önermişlerdir. PAK sistemini temsil eden bir model yapı oluşturup, modelde oluşan ark türlerini tespit etmişlerdir. Bir kısım araştırmacı, PAK sistemlerinde oluşan ark arızaları için akım ve gerilim değerlerini incelemiştir. Oluşturdukları modellerde oluşan ark türlerini, akım ve gerilim değerleriyle tespit etmişlerdir [99]. Bir kısmı ise Mayr Ark Modeli'ni kullanarak pantograf sisteminde oluşan arkları modellemiş ve tespit etmiştir [150]. Ark tespiti için harmonik akım tabanlı yöntemler ve manyetik bileşenlerin kullanıldığı yöntemler de mevcuttur. Araştırmacılar geliştirdikleri sistemlerde farklı hızlarda ve farklı manyetik etkilerde testler gerçekleştirerek, manyetik bileşenlerin kullanılmasının ark oluşumunu azalttığını deneysel sonuçlar ile desteklemişlerdir [87, 115].

Görüntü işleme tabanlı arıza tespit yöntemleri düşük maliyetli ve kurulumu kolay yöntemlerdir. Bu nedenle, bu yöntemlerin kullanıldığı modeller gerçek zamanlı çalıştırılarak PAK sisteminde karşılaşılan ark oluşumu ve diğer sorunlar azaltılmaya çalışılmıştır [95, 151].

Raylı sistemlerde ulaşımın aksamaması için PAK sistemlerinde durum izleme ve erken arıza teşhisi oldukça önemlidir. Bu bölümde, PAK sistemi için temel sinyal işleme ve S-Dönüşümü tabanlı yeni bir ark tespit yöntemi önerilmiştir. PAK sisteminden model tabanlı ve gerçek zamanlı alınan akım sinyalleri kullanılarak, durum izleme ve ark tespiti yapılmıştır. Öncelikle kullanılan yöntem ana hatlarıyla açıklanmış daha sonra ark tespiti için oluşturulan aşamalar verilmiştir. Önerilen yöntemin aşamaları aşağıda verildiği gibidir:

- *Simülasyon üzerinden Mayr Ark Modeli ile elde edilen akım verilerine S-Dönüşümü uygulanarak ark tespiti:*

Bu aşamada, PAK sistemlerinde oluşan arkların modellenmesinde kullanılabilen Mayr Ark Modeli ile akım verileri elde edilmektedir. Model tabanlı elde edilen akım verileri gürültüsüz sinyaller olduğu için herhangi bir filtreleme işlemine gerek duyulmamıştır. Bu gürültüsüz sinyallerin mutlak değeri alınarak, sinyallerin belirli frekans aralığında tepe noktaları tespit edilmiştir. Tepe noktaları belirlenen sinyaller normalize edildikten sonra doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılarak yeni bir sinyal elde edilmiştir. Bu sinyale S-Dönüşümü uygulanarak ark analizi yapabilmek için gerekli olan veriler elde edilmiştir.

- *DeneySEL akım verileri üzerinden S-Dönüşümü uygulanarak ark tespiti:*

Öncelikle gerçek bir PAK sisteminden elde edilen akım verilerinde oluşan gürültülerin yok edilmesi için, bir filtre kullanılarak sinyal üzerindeki gürültüler ortadan kaldırılmıştır. Simülasyon ile elde edilen sinyallerde olduğu gibi gürültüsüz sinyallerin mutlak değeri alınarak tepe noktaları tespit edilmiş ve normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Doğrusal interpolasyon yöntemi ile yeni bir sinyal elde edildikten sonra bu sinyale S-Dönüşümü uygulanmıştır.

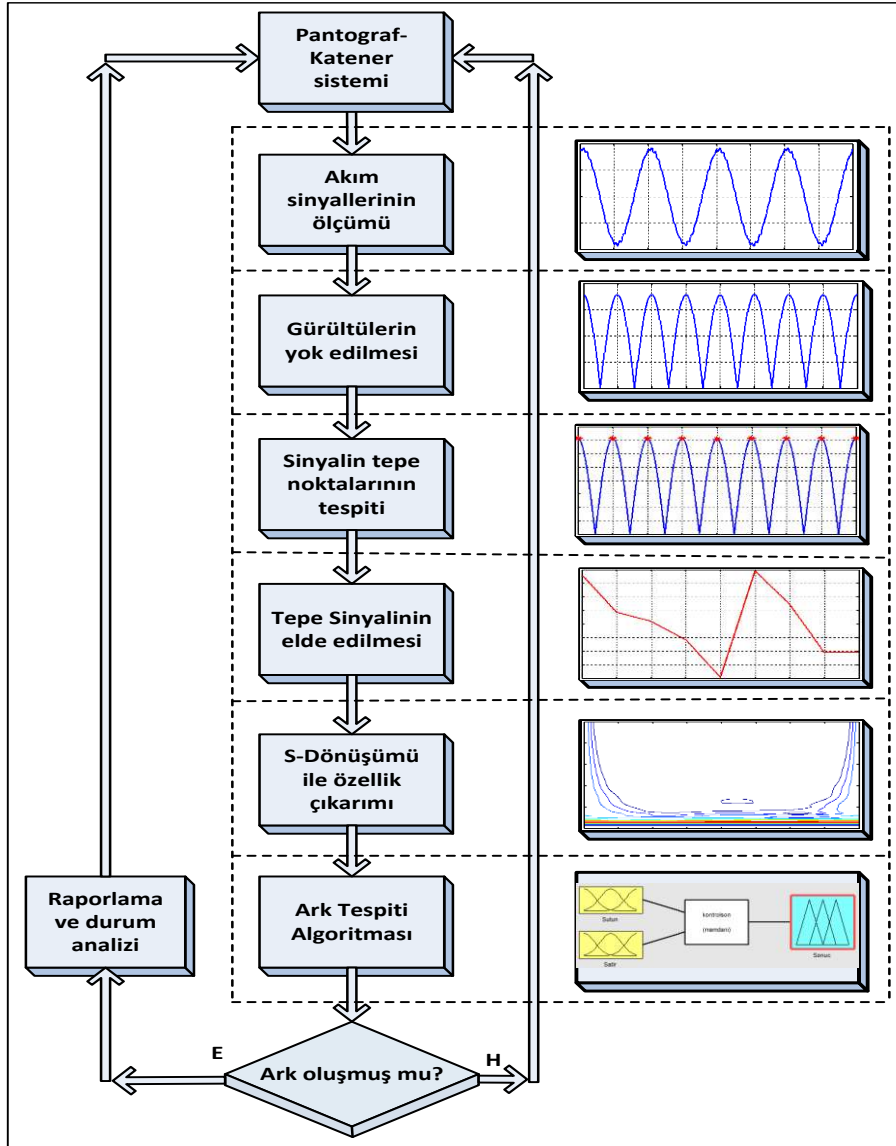
Her iki aşamada da interpolasyon sonucu elde edilen sinyal üzerinde S-Dönüşümü uygulanarak sinyalin frekans-zaman analizi yapılmaktadır. S-Dönüşümü sonucunda elde edilen S-matrisinden öznelik çıkarımı yapılarak, bu veriler geliştirilen bulanık sistemde kullanılmıştır. Bulanık sistem sonucunda akım sinyallerinin sağlam veya arızalı olup olmadığı belirlenmiştir.

6.2. Önerilen Yöntem

Bu bölümde önerilen yöntem ile bir PAK sistemi için ark modeli oluşturularak, sinyal işleme tabanlı ark tespiti yapılmıştır. PAK sisteminde ark oluşumunun modellenebilmesi için, Mayr Ark Modeli kullanılmıştır. Gerçekleştirilen pantograf ve katener modelinde belirli zaman aralıklarında rastgele arklar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu arklar sonucunda akım sinyalleri üzerinde değişiklikler ve farklı bölgeler oluşmaktadır. Bu bölgeler üzerinde incelemeler yapılarak ark analizi gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen akım sinyalleri üzerinde ark tespiti yapabilmek için sinyal işleme tabanlı bir yöntem olan S-Dönüşümü kullanılmıştır. Akım sinyali, S-Dönüşümü ile birlikte kullanılarak sistemin frekans-zaman analizi yapılmıştır. Model tabanlı sinyaller üzerinde gerçekleştirilen bu yöntem, gerçek zamanlı çalışan bir lokomotiften alınan akım sinyalleri kullanılarak doğrulanmıştır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.

Şekil 6.1’de verilen akış şeması temel bir sinyal işleme yönteminin adımlarından oluşmaktadır. Akım sinyallerinin elde edilmesine dayanan bir sistem modeli oluşturulduğu için bu sistem sürekli çalıştırılarak, belirli zaman aralıklarında akım sinyalleri elde edilmiştir. Elde edilen akım sinyalleri üzerinde sinyal işleme yapılmadan önce, varsa sinyaldeki gürültüler yok edilmektedir. Model tabanlı oluşturulan sistemde sinyallerde gürültü oluşmadığı için bu adım göz ardı edilebilir. Fakat gerçek bir lokomotiften alınan akım sinyallerinde gürültüler bulunmaktadır. Bu gürültülerin yok edilmesi için bir filtre uygulanması gerekmektedir.



Şekil 6.1. Önerilen yöntemin akış şeması

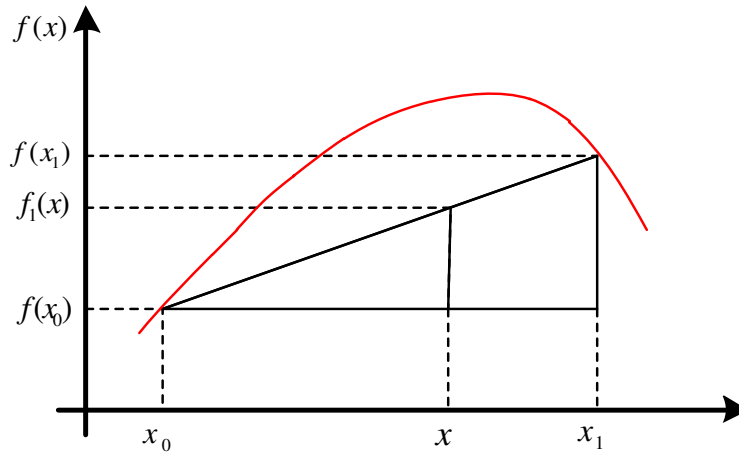
Akım sinyallerinde oluşan gürültüler yok edildikten sonra sinyallerin mutlak değerleri alınarak tepe noktaları tespit edilmiştir. Ark oluşumu sırasında arkın şiddetine göre akım sinyalinde değişimler oluşmaktadır. Bu değişimlerin belirlenebilmesi için akım sinyalinin tepe noktaları tespit edilmektedir. Temiz akım sinyallerinin tepe noktaları elde edildikten sonra bu değerlere normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon bir ayırıştırma işlemidir bir veri dizisini oluşturan satır ve sütünlardaki tekrarlar ayırıştırılarak daha az veriyle işlem yapma imkanı sağlamaktadır.

Normalizasyon işleminde, aynı veri dizisi üzerindeki bazı değerlerin 0'dan küçük, bazılarının ise daha büyük değerlere sahip olması, veriler arasındaki bu uzaklıkların ve özellikle uç verilerin sonuçlar üzerinde daha etkin olacağını göstermektedir. Sinyallerin normalleştirilmesi sırasında, her bir değişkene karşı gelen sütunların aritmetik ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır [152]. Daha sonra, Denklem (6.1)'deki gibi veriler normalleştirilerek, veriler arasındaki uzaklıklar ortadan kaldırılmış ve verilerdeki uç noktalar azaltılmıştır.

$$x' = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (6.1)$$

Burada x' normalize edilmiş veriyi, x_i girdi değerini, μ_i girdi değerinin ortalamasını ve σ_i girdi değerinin standart sapmasını ifade etmektedir.

Normalize işleminin ardından tepe noktaları birleştirilerek, tepe noktalarına ait yeni bir sinyal elde edilmektedir. Tepe noktalarının birleştirilmesi sonucunda yeni sinyalin elde edilmesi için doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Şekil 6.2'de doğrusal interpolasyon yönteminin şekli verilmiştir.



Şekil 6.2. Doğrusal interpolasyon yöntemi [153].

Doğrusal interpolasyon yönteminde Denklem (6.2) kullanılarak iki tepe noktası arasındaki bütün değerler elde edilmektedir [153].

$$f_1(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (6.2)$$

Filtreleme, normalizasyon ve doğrusal interpolasyon işlemlerinden sonra elde edilen akım sinyallerinin analizi için S-Dönüşümü kullanılmaktadır. S-Dönüşümü, Fourier ve dalgacık dönüşümünün bir kısım özelliklerini kullanarak ve eksik kaldıkları yönleri gidermek için geliştirilen bir işaret işleme yöntemidir. Bir sinyali frekans ve zaman bileşenleri ile incelemek için kullanılır. S-Dönüşümünün, Fourier Dönüşümü ve dalgacık dönüşümüne göre önemli farkları ve avantajları aşağıda verilmiştir [154-158]:

- Fourier Dönüşümü gibi frekans ve zaman bileşenleri vardır. Ancak Gaussian pencereleme yöntemini kullanarak frekans değerine göre değişim göstermektedir.
- Daha basittir ve uygun sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.
- Frekansta oluşan değişimlere çok hızlı cevap vermektedir.

Bir $x(t)$ sinyalinin S-Dönüşümü aşağıda verilmiştir.

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-((\tau-t)^2 f^2)} e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.3)$$

Burada τ , Gaussian penceresinin konumunu zaman ekseninde kontrol eden parametre, f ise frekanstır [154]. Denklem (6.3)'de görüldüğü gibi S-Dönüşümü, Ayırık Fourier Dönüşümü'ne benzerdir. Bir $x(t)$ sinyalinin Ayırık Fourier Dönüşümü Denklem (6.4)'de verilmiştir.

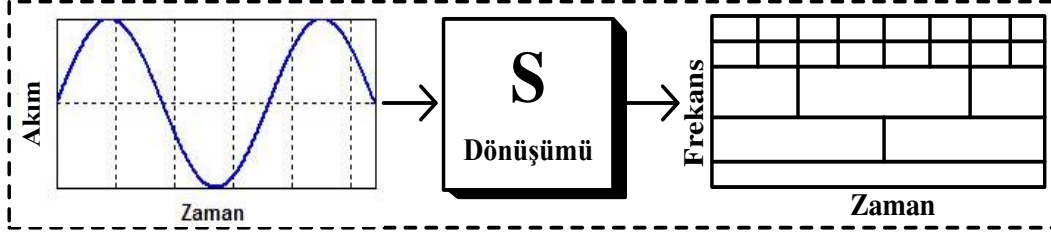
$$H\left(\frac{n}{NT}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-(2\pi i / N) n K} \quad (6.4)$$

Ayırık S-Dönüşümü için gerekli olan denklem ise aşağıda verilmiştir.

$$S(jT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} H\left(\frac{m+n}{NT}\right) G(m, n) e^{i2\pi m j / N} \quad (6.5)$$

$$G(m, n) = e^{-2\pi^2 m^2 / n^2} \quad (6.6)$$

m , n ve i değişkenlerinin değerleri 0 ile $N-1$ arasında değişmektedir [151, 154-157]. Sinüzoidal bir sinyale uygulanan S-Dönüşümü değişimi Şekil 6.3’de verilmiştir.

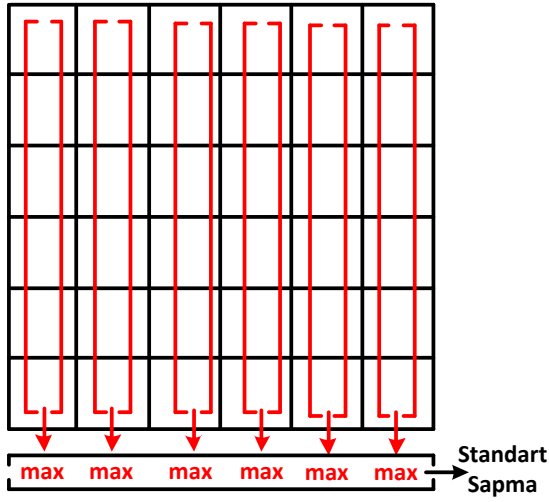


Şekil 6.3. S-Dönüşümünün yapısı [157].

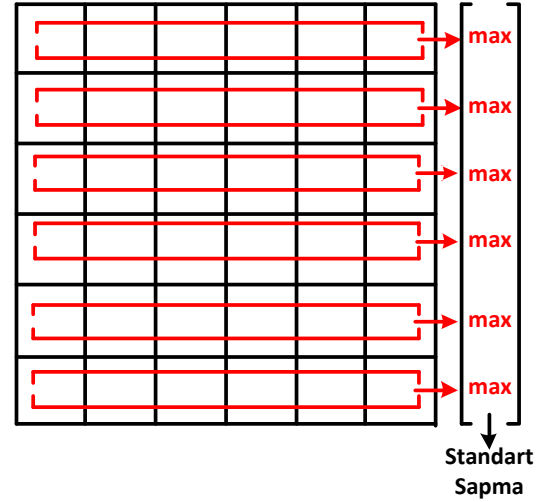
S-Dönüşümü akım sinyallerine uygulandıktan sonra ark oluşumları kolaylıkla tespit edilmektedir. Oluşan arkların büyüklüğüne göre S-Dönüşümü sonuçları farklılık göstermektedir. Önerilen yöntemin S-Dönüşümünü kullanarak ark sinyallerine uygulanması sonucunda bir matris elde edilmektedir. Elde edilen matriste bazı özellikler çıkarılarak akım sinyallerinin durumu tespit edilmektedir. S-Dönüşümü sonucunda elde edilen matristen, iki farklı öznitelik çıkarımı yapılmaktadır.

- S-matrisinin her sütununun maksimum büyüklüğüne karşılık gelen elemanını içeren veri kümesinin standart sapması.
- S-matrisinin her satırının maksimum büyüklüğüne karşılık gelen elemanını içeren veri kümesinin standart sapması.

Önerilen yöntemde, bir S-matrisi üzerinde çıkarılan öznitelikler Şekil 6.4’deki gibi ifade edilmektedir. S-matrisinden öznitelik çıkarımı yapmak için Şekil 6.4’de verilen iki yöntem kullanılmıştır. Şekil 6.4 (a)’da $M \times N$ boyutundaki S-matrisinin her bir sütununda bulunan değerlerin maksimumu hesaplanmaktadır. Bu işlem her sütun için gerçekleştirilerek $1 \times N$ boyutunda X dizisi elde edilmektedir. $1 \times N$ boyutundaki bu dizinin standart sapması Denklem (6.7)’deki gibi hesaplanmıştır.



(a) Her bir sütunun maksimum değerinin standart sapması



(b) Her bir satırın maksimum değerinin standart sapması

Şekil 6.4. Öznitelik çıkarımı

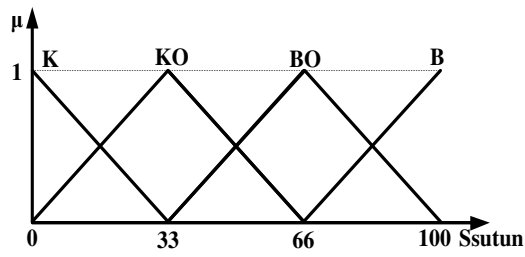
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - X_{ort})^2} \quad (6.7)$$

X değişkeni dizinin i . elemanını, N değişkeni dizinin boyutunu ve X_{ort} değişkeni ise dizinin ortalamasını temsil eder. X_{ort} değişkeni Denklem (6.8)'deki gibi elde edilmektedir.

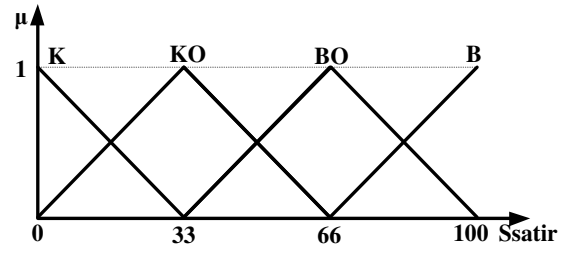
$$X_{ort} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (6.8)$$

Öznitelik çıkarımı için kullanılan bu yöntem Şekil 6.4 (b)'de her bir satır için tekrarlanarak yeni bir öznitelik çıkarımı yapılmaktadır. Her bir satır ve sütunda elde edilen değerlerin standart sapmaları alınarak S-matrisinde ortaya çıkan normal olmayan durumlar tespit edilmektedir. S-matrisinde normal olmayan durumlarda oluşan standart sapma sonuçları, normal şartlardaki standart sapma değerlerine göre farklıdır. Böylece önerilen bu yöntemde elde edilen öznitelik çıkarımının ark tespiti için uygun olduğu görülmüştür.

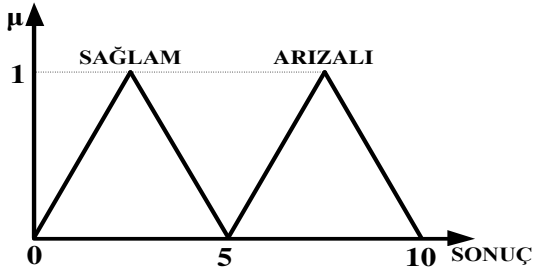
Elde edilen öznitelikler iki girişli bir çıkışlı bulanık sistemde giriş olarak kullanılmaktadır. Bu işlemin sonucunda akım sinyallerinin sağlam ya da arızalı olup olmadığı tespit edilmektedir. Önerilen yöntemde kullanılan giriş-çıkış üyelik fonksiyonları ve dilsel değişkenler Şekil 6.5’de verilmiştir. S-sütun giriş üyelik fonksiyonları Şekil 6.5 (a)’da, S-satır giriş üyelik fonksiyonları Şekil 6.5 (b)’de ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 6.5 (c)’de gösterilmiştir.



(a) S-sütun girişi için üyelik fonksiyonları



(b) S-satır girişi için üyelik fonksiyonları



(c) Çıkış üyelik fonksiyonu



(d) Dilsel değişkenler

Şekil 6.5. Bulanık sistemde kullanılan üyelik fonksiyonları ve dilsel değişkenler

Akım değerlerine göre giriş üyelik fonksiyonlarının değerleri değişmektedir. Giriş üyelik fonksiyonunun sabit bir değere göre oluşturulması için en büyük ve en küçük değerler tespit edilerek değerlerin yüzdelik karşılıkları hesaplanmaktadır. Böylece bütün giriş değerleri 0 ile 100 arasında alınarak sabit bir aralık elde edilmiştir. Şekil 6.5’de verilen giriş üyelik fonksiyonları kullanılarak, net giriş değerleri bulanık giriş değerlerine dönüştürülmektedir. Elde edilen bulanık giriş değerleri bir kural tablosuyla birlikte kullanılarak çıkarım yapılmaktadır.

Önerilen yöntem için kullanılan kural tablosu Tablo 6.1’de verilmektedir. Çıkarım Tablo 6.1’de verilen kural tablosu kullanılarak yapılmaktadır. Çıkarım sonucunda elde edilen çıkış değerlerinden akım sinyalinin durumu hakkında bilgi sahibi olunur.

Tablo 6.1. Önerilen yöntemde kullanılan kural tablosu

Numara	Kural
Kural-1	$SSutun = K \ \& \ SSatir = K \rightarrow TUR = SAGLAM$
Kural-2	$SSutun = K \ \& \ SSatir = KO \rightarrow TUR = SAGLAM$
Kural-3	$SSutun = K \ \& \ SSatir = BO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-4	$SSutun = K \ \& \ SSatir = B \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-5	$SSutun = KO \ \& \ SSatir = K \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-6	$SSutun = KO \ \& \ SSatir = KO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-7	$SSutun = KO \ \& \ SSatir = BO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-8	$SSutun = KO \ \& \ SSatir = B \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-9	$SSutun = BO \ \& \ SSatir = K \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-10	$SSutun = BO \ \& \ SSatir = KO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-11	$SSutun = BO \ \& \ SSatir = BO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-12	$SSutun = BO \ \& \ SSatir = B \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-13	$SSutun = B \ \& \ SSatir = K \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-14	$SSutun = B \ \& \ SSatir = KO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-15	$SSutun = B \ \& \ SSatir = BO \rightarrow TUR = ARIZALI$
Kural-16	$SSutun = B \ \& \ SSatir = B \rightarrow TUR = ARIZALI$

Önerilen yöntemde kullanılan Matlab kod parçacığı Şekil 6.6’da verilmiştir. Bu kod parçacığı hem model tabanlı sinyaller üzerine hem de lokomotiften alınan sinyaller üzerine uygulanmıştır.

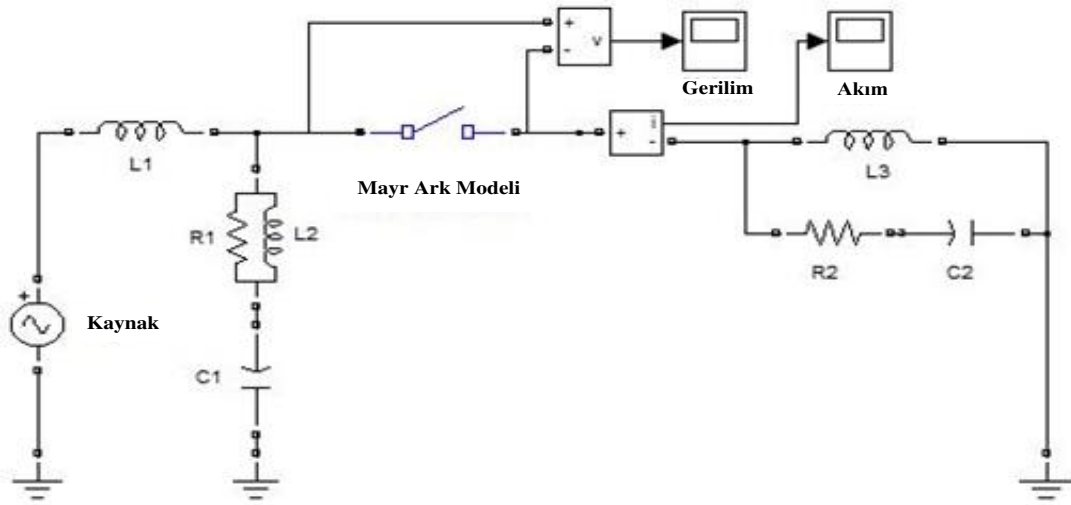
<pre> AnaProgram { OrjinalSinyal = pop.I(1,:); TemizSinyal= GurultuTemizle (OrjinalSinyal); GurultuTemizle { FourierSinyal = (fft(OrjinalSinyal)); FourierSinyal(6:1595) = 0; SonucSinyal = abs(ifft(FourierSinyal)); } EnUstSinyal= EnUstNokta(TemizSinyal); EnUstNokta { sinyal = abs(TemizSinyal); ornekleme = 200; altsinir =0; ustsinir =115; enbuyuk=0; k = 1; for n=1:boyut if n>altsinir && n<=ustsinir if enbuyuk<=sinyal(n,1) deger(k,1) = sinyal(n,1); enbuyuk = sinyal(n,1); x(k,1) = n; end if n==ustsinir altsinir=ustsinir; ustsinir = ustsinir+200; enbuyuk =0; k = k + 1; end end end y(1,:) = deger(:,1); for i=1:n xi(i,1) = i; end yi = interp1(x,y,xi,'linear'); ortlm = mean(yi); stndrt = std(yi); for i=1:n Sdata(i,1)=(yi(i,1)-ortlm)/stndrt; end } figure Sonuc = st(EnUstSinyal); contour(abs(Sonuc)); } </pre>	<pre> % AnaProgram % Akım verisinin alınması % GurultuTemizle Fonksiyonu % Sinyalin FFT'sinin alınması % Gürültünün silinmesi % FFT sinyalinde tekrar sinyalin elde edilmesi % EnUstNokta Fonksiyonu % Sinyalin mutlak değerinin alınması % Sinyalin tepe noktalarında en üst noktaların tespit edilmesi % Elde edilen tepe noktası değerlerinin doğrusal interpolasyon yöntemi ile birleştirilmesi %Doğrusal interpolasyon sonucunda elde edilen sinyalin normalize edilmesi % Normalize edilmiş sinyale S- Dönüşümü uygulanması </pre>
--	--

Şekil 6.6. Önerilen yöntemde kullanılan MATLAB kod parçacığı

6.3. Uygulama Sonuçları

6.3.1. Mayr Ark Modeli ile Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

PAK sisteminde oluşacak arkların incelemesi amacıyla Mayr Ark Modeli kullanılarak akım sinyalleri elde edilmiştir. Matlab-Simulink kütüphanesindeki Mayr Ark Modeli Şekil 6.7’de gösterilmektedir. Model bileşenleri Tablo 6.2’de ve kullanılan parametre değerleri Tablo 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.7. Mayr Ark Modeli [159].

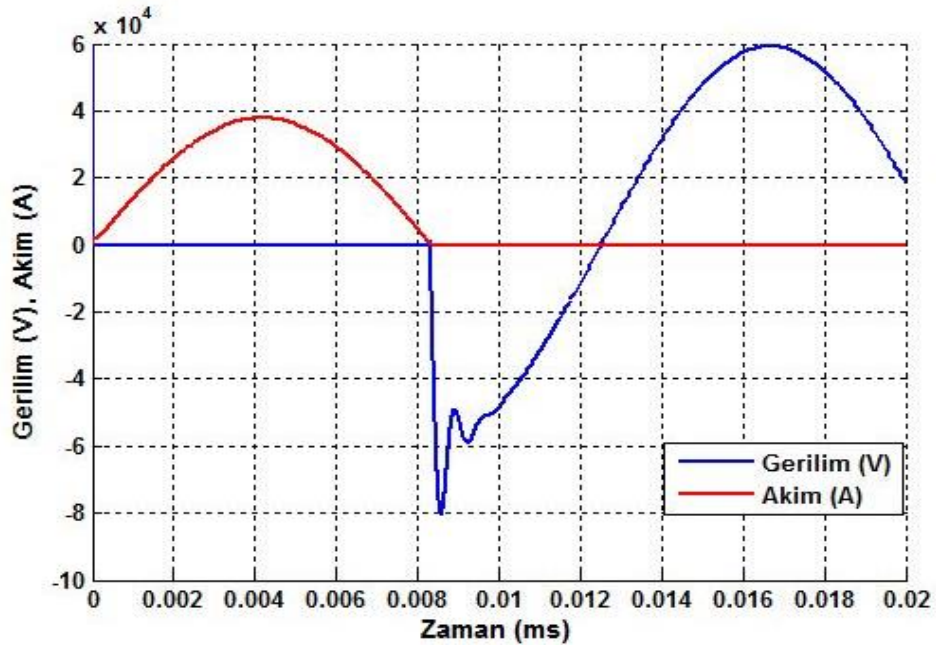
Tablo 6.2. Mayr Ark Modeli’nde kullanılan bileşenler [159-161].

Kullanılan Eleman	Değeri	Birimi
Kaynak	59.196	kV
L1	3.52	mH
L2	5.28	mH
L3	0.6256	mH
R1	29.8	Ω
R2	450	Ω
C1	1.98	μF
C2	1.93	nF

Tablo 6.3. Mayr Ark Modeli'nin simülasyon parametreleri [159-161].

Parametre	Değeri	Birimi
P	30.9	kW
g	1×10^4	S
τ	0.3×10^{-6}	ms
Başlama zamanı	0	ms
Bitiş zamanı	20×10^{-3}	ms
Relatif tolerans	1.5×10^{-4}	-
Mutlak tolerans	1.5×10^{-4}	-

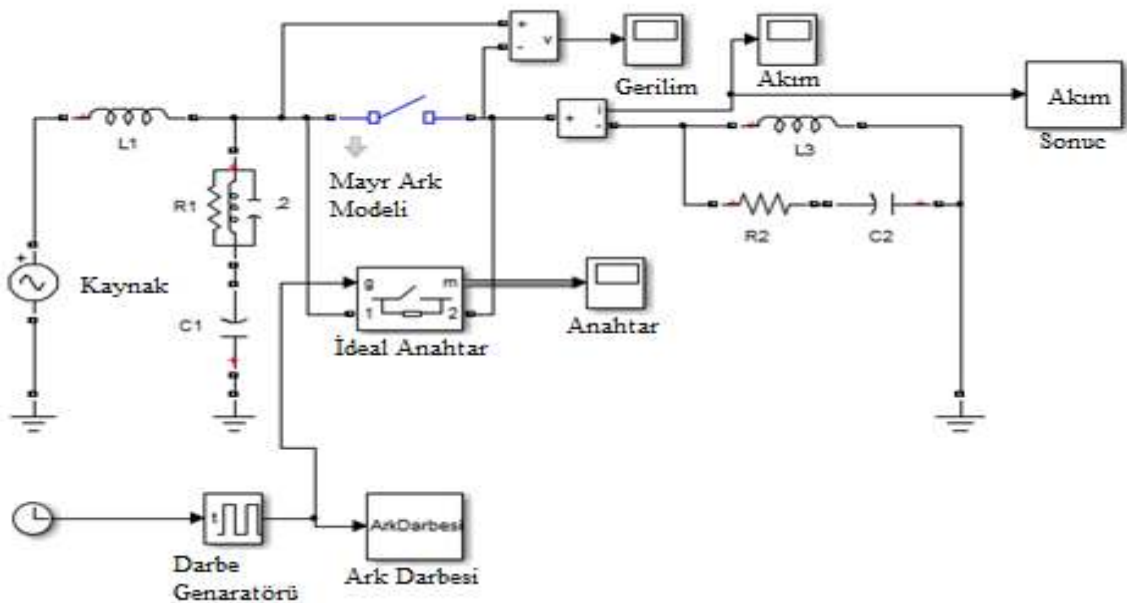
Mayr Ark Modeli için Tablo 6.3'de verilen simülasyon parametreleri kullanılarak model devre oluşturulmuştur. Simülasyon sonucunda Şekil 6.8'de verilen gerilim ve akım eğrileri elde edilmiştir.



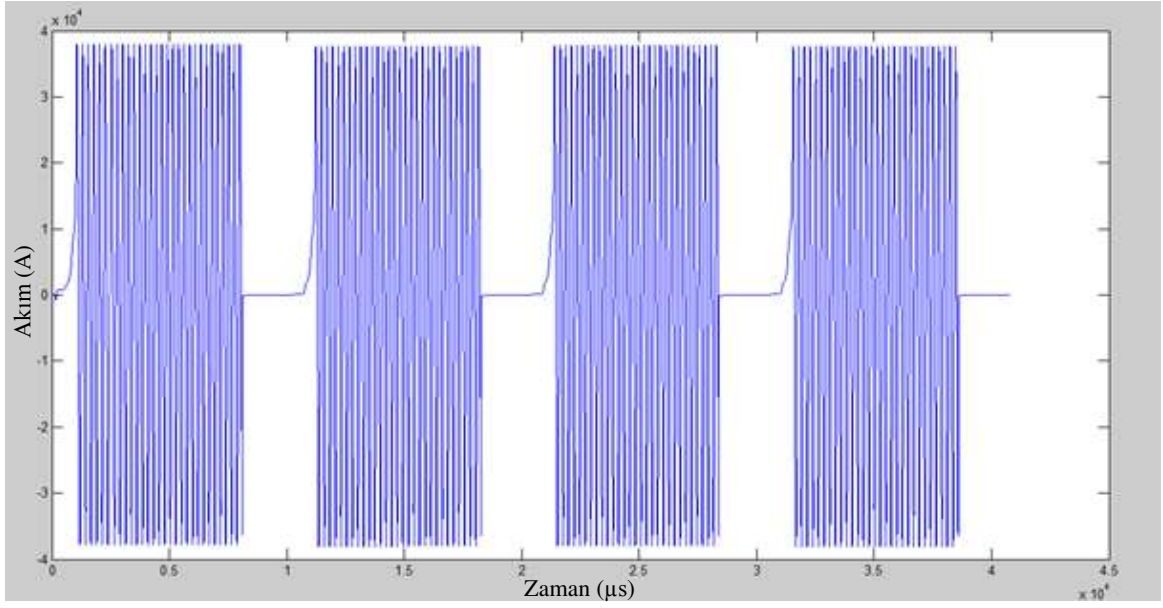
Şekil 6.8. Kontakların açılmaya başlaması ile elde edilen gerilim ve akım eğrisi [159,160].

Şekil 6.8’de verilen açma gerilim eğrisinden, açma tam anlamıyla gerçekleşene kadar anahtarın kontakları arasındaki gerilim ideal şartlar düşünüldüğünde sıfırdır. Yani açmanın başladığı $t=0$ ms’den tam anlamıyla gerçekleştiği $t=0.0083$ ms’ye kadar ark geriliminin sıfır, bu süreden sonra ise kaynak gerilimi ile aynı olduğu görülmektedir. Akım eğrisi incelendiğinde; anahtar açılmaya başladığında ark akımının kaynak ile aynı dalga şekline sahip olduğu, dalganın ilk sıfır geçişinde ise akımın kesileceği, yani açma anından sonra anahtarın kontakları arasından bir akım akmayacağı için sıfır olduğu görülür [160, 161].

Ark tespiti yaparken, arkın oluşum süresi çok önemlidir. Çünkü ark süresi uzadıkça tespit edilmesi kolaylaşmaktadır. Ark süresinin uzun olduğu durumlar için literatürde farklı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, burada zor ve önemli olan kısım kısa süreli arkların tespitidir. Bu bölümde özellikle çok kısa süreli oluşan arkların tespitine yönelik bir algoritma önerilmiştir. Şekil 6.7’de verilen Mayr Ark Modeli çalıştırıldığında sadece tek bir noktada ark oluşmaktadır. Birden fazla noktada ark oluşumunu incelemek için model üzerinde değişimler yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, Mayr Ark Modeli üzerinde bulunan anahtar yapısına ek olarak bir ideal anahtar kullanılmış ve sistem üzerinde birden fazla noktada ark oluşturulması sağlanmıştır. Oluşturulan modelin yapısı Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Bu model ile elde edilen akım sinyali Şekil 6.10’da verildiği gibidir. Simülasyonda ark süreleri çok kısa tutularak Şekil 6.11’de verilen arızalı akım sinyallerinin elde edilmesi sağlanmıştır.

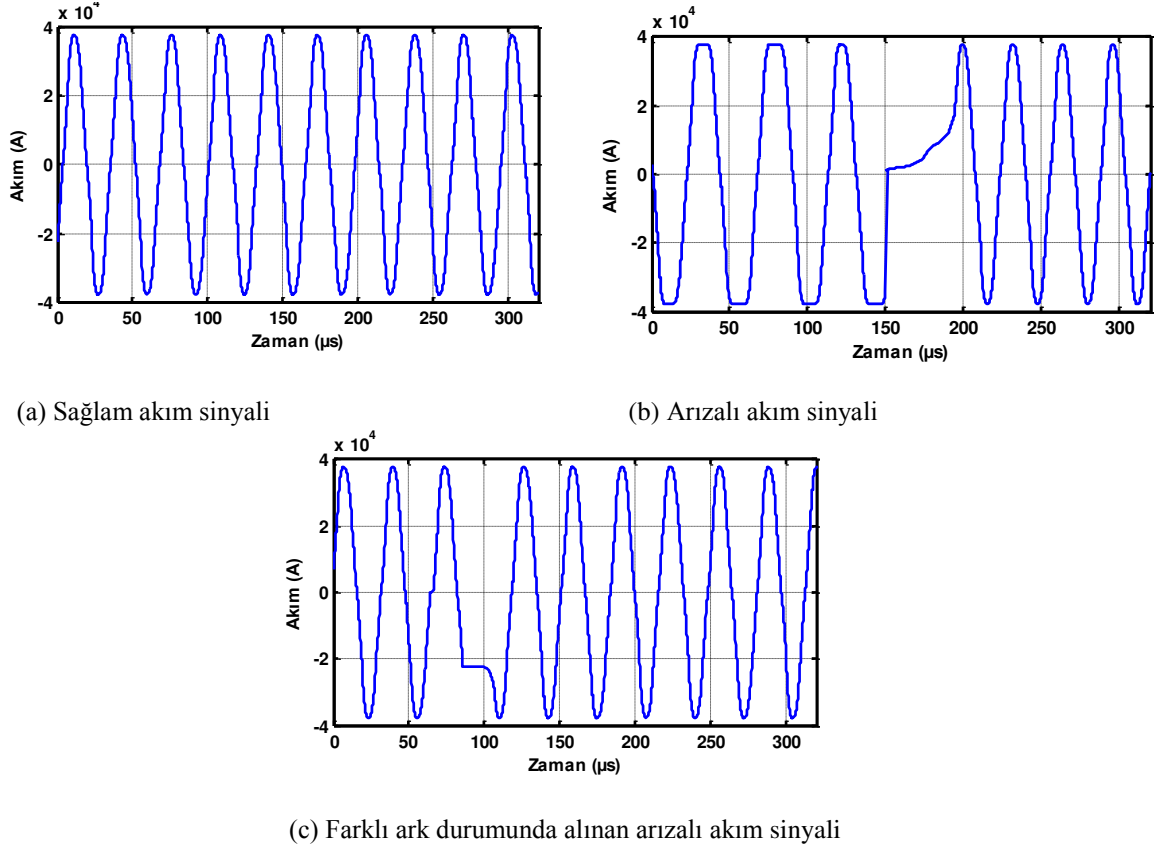


Şekil 6.9. Oluşturulan Mayr Ark Modeli



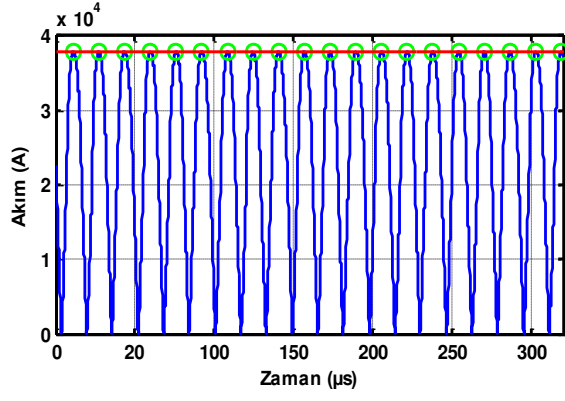
Şekil 6.10. Oluşturulan Mayr Ark Modeli ile elde edilen akım sinyali

Bu bölümde, Mayr Ark Modeli kullanılarak sağlam ve ark oluşumu durumundaki sinyaller elde edilmiştir. Geliştirilen modelde ark rastgele oluşturulmaktadır. Modelin çalışması sırasında Şekil 6.10'da verilen akım sinyalinden 20 kHz'lik örnek sinyaller elde edilmiştir. Elde edilen örnek sinyaller Şekil 6.11'de verilmiştir. Bu örnek akım sinyalleri incelendiğinde, Şekil 6.11 (a)'da verilen akım sinyalinin sağlam bir sinyal olduğu görülmektedir. Şekil 6.11 (b)'de verilen sinyalde 150μs - 200μs aralığında, Şekil 6.11 (c)'de ise 75μs - 100μs aralığında ark oluştuğu görülmektedir. Bu akım sinyallerinin mutlak değerleri alınarak sinyalin belirli aralıktaki en üst noktalarının tespit edilmesi gerekmektedir.

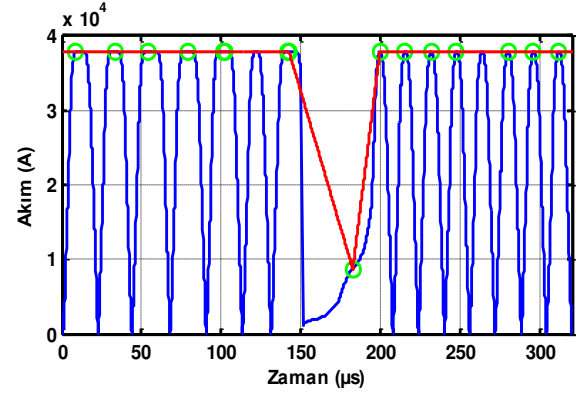


Şekil 6. 11. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı durumlar için akım sinyalleri

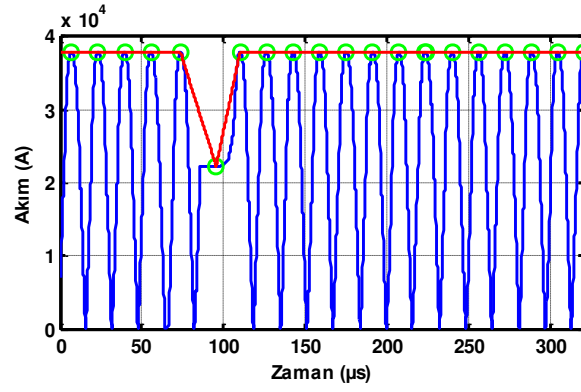
Sağlam ve arızalı akım sinyalleri üzerinde üst noktaların elde edilmesi işlemi Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12’de verilen akım sinyallerinin, belirli zaman aralıklarıyla en üst noktaları belirlendiğinde, ark oluşan bölgede en üst noktanın diğer değerlere göre farklı olduğu gözlemlenmektedir. Sinyallerin en üst noktaları elde edildikten sonra normalizasyon işlemi yapılması gerekmektedir. Normalizasyon işlemi yapılarak sinyaldeki üst noktalar arasındaki uç değerler düzenlenmiştir. Normalizasyon sonucunda sinyalin tepe noktaları birleştirilerek bir sinyal elde edilmektedir. Model tabanlı elde edilen sağlam ve arızalı durumlar için tepe noktalarından oluşturulan sinyaller Şekil 6.13’de verilmiştir.



(a) Sağlam akım sinyali

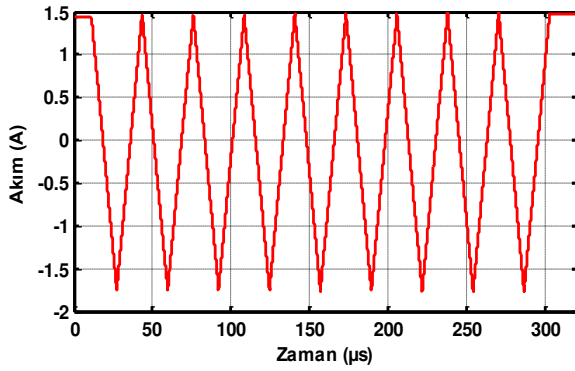


(b) Arızalı akım sinyali

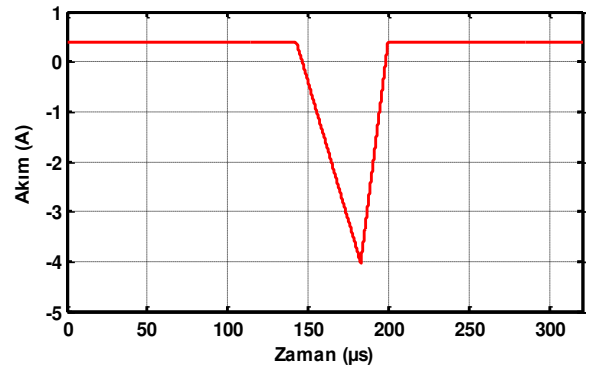


(a) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali

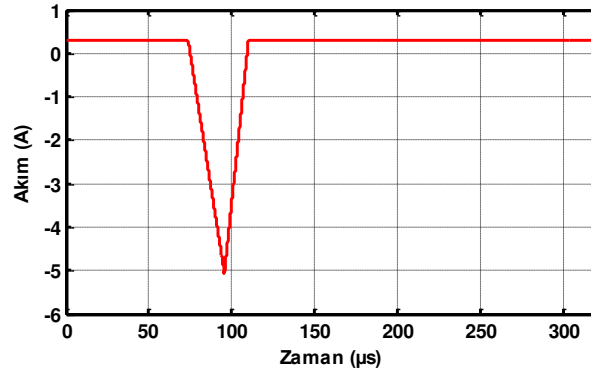
Şekil 6.12. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı akım sinyallerinde üst noktaların elde edilmesi



(a) Sağlam akım sinyali



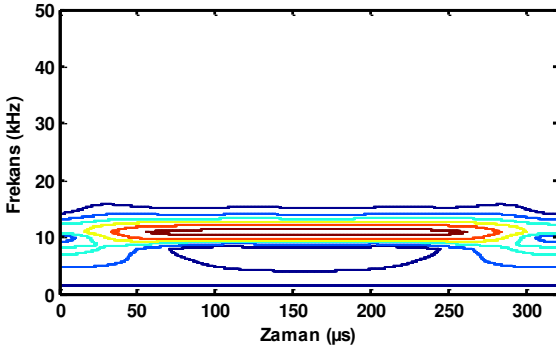
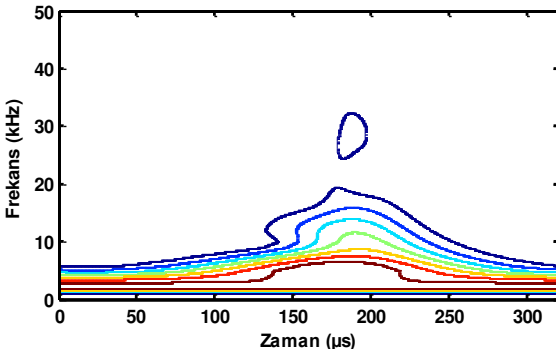
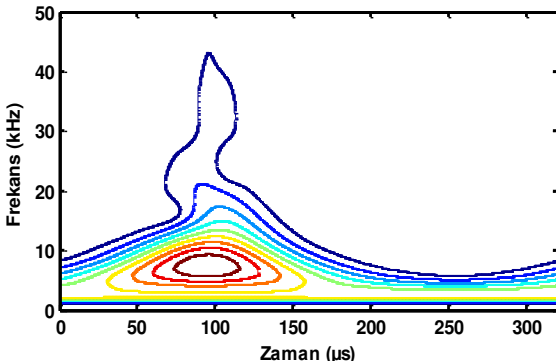
(b) Arızalı akım sinyali



(c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali

Şekil 6.13. Model tabanlı oluşturulan sağlam ve arızalı akım sinyalleri için tepe noktalarından elde edilen sinyaller

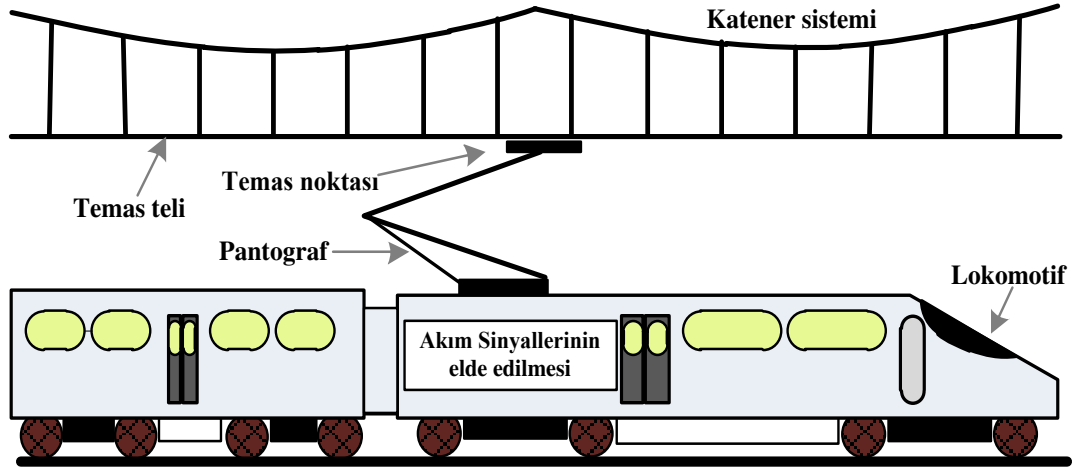
Şekil 6.13'deki sinyaller üzerine S-Dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen frekans-zaman değişimi Şekil 6.14'de verilmiştir. Şekil 6.14 (a)'da sağlam akım sinyali için verilen S-Dönüşümü sonuçları incelendiğinde, belirli zaman ve frekans aralığında, arızalı bir durumun gözlenmediği görülmektedir. Şekil 6.14 (b)'de ilk arızalı akım sinyali için 150 μ s – 250 μ s aralığında ve Şekil 6.14 (c)'de ikinci arızalı akım sinyali için 50 μ s – 150 μ s aralığında frekansta değişimin olduğu görülmektedir. Giriş-çıkış üyelik fonksiyonu değerleri Şekil 6.14 (d), (e) ve (f)'de verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonu değerine bağlı olarak oluşan sonuç durumu Şekil 6.14 (g)'de verilmiştir.

 (a) Sağlam akım sinyali	7.04	44.52	4.37	SAĞLAM
 (b) Arızalı akım sinyali	1.28	55.05	5.52	ARIZALI
 (c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali	8.43	62.39	6.48	ARIZALI
S-Dönüşümü Sonucu	(d)	(e)	(f)	(g)

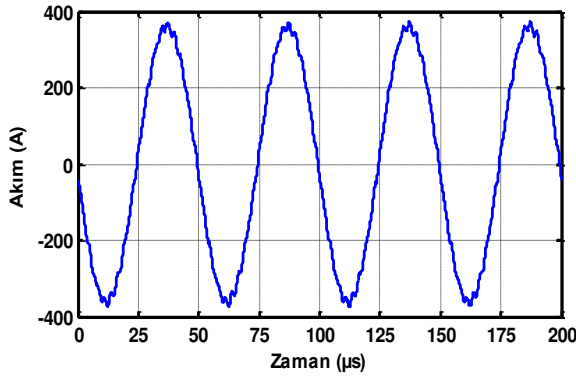
Şekil 6.14. Model tabanlı elde edilen sağlam ve arızalı akım sinyallerinin S-Dönüşümü ve bulanık sistem sonucu (d) S-sütun giriş üyelik fonksiyonu değeri (e) S-satır giriş üyelik fonksiyonu değeri (f) Çıkış üyelik fonksiyonu değeri (g) Sonuç

6.3.2. Gerçek Akım Verileri için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

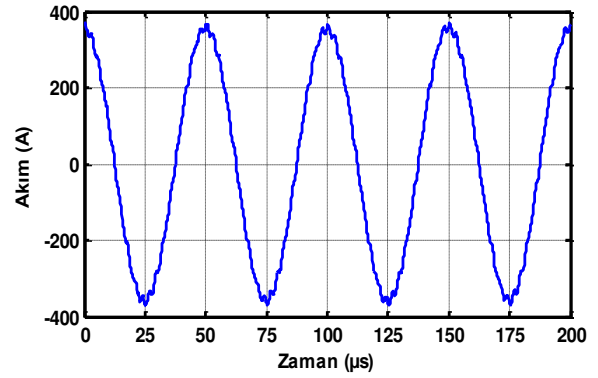
Bu bölümde kullanılan gerçek akım sinyalleri, Şekil 6.15’de verilen deney düzeneği kurularak alınmıştır. PAK sistemlerinde ark tespiti için önerilen bu yöntem, model tabanlı akım sinyalleri ile test edilmiştir. Yöntemin gerçek zamanlı bir sistemde doğruluğunun test edilebilmesi için, bir lokomotiften alınan gerçek zamanlı sağlam ve ark oluşumu sırasındaki arızalı akım sinyalleri kullanılmıştır. Elde edilen sağlam ve arızalı akım sinyalleri üzerinde önerilen yöntem uygulanmış ve doğru sonuçlar elde edilmiştir. Lokomotiften alınan akım sinyalleri 20 kHz’lik sinyallerdir. Kullanılan sağlam ve arızalı akım sinyalleri Şekil 6.16’da verilmiştir.



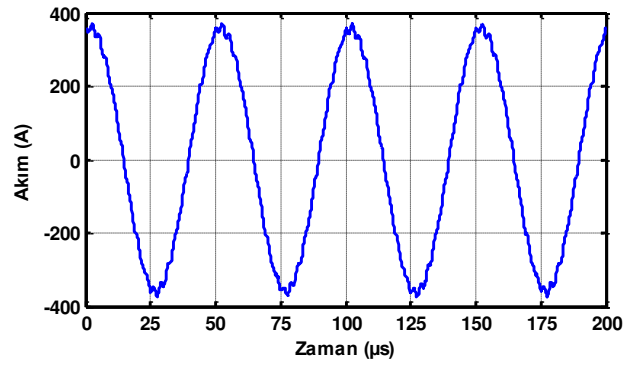
Şekil 6.15. Önerilen yöntemde kullanılan deneysel düzenek



(a) Sağlam akım sinyali



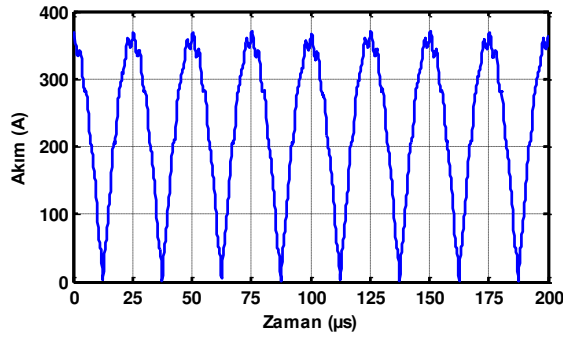
(b) Arızalı akım sinyali



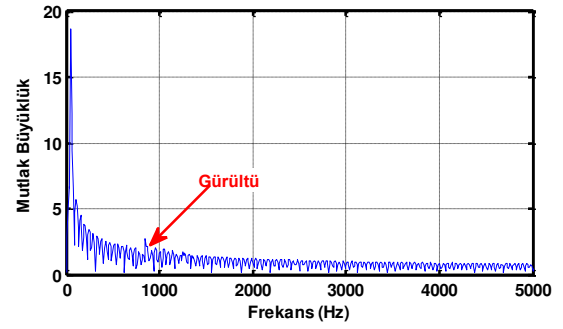
(c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali

Şekil 6.16. Lokomotiften sağlam ve arızalı durumlar için alınan akım sinyalleri

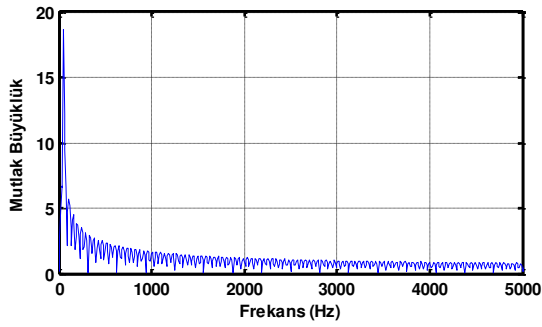
PAK sistemlerinde akım sinyallerinden, ark tespiti için doğru bir şekilde yapılabilmesi için sinyaller üzerindeki gürültülerin yok edilmesi gerekmektedir. Bu işlem oldukça önemli olup ark tespiti yönteminin doğruluğunu arttırmaktadır. Şekil 6.16’da elde edilen gerçek zamanlı akım sinyallerinde bulunan gürültüler, bir alçak geçiren filtre aracılığı ile yok edilmiştir. Filtreleme işleminde, akım sinyallerine ait yüksek frekanslar yok edilerek düşük frekanslar kullanılmıştır. Böylece akım sinyalleri üzerinde yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 6.17’de, örnek bir akım sinyalinden gürültülerin yok edilmesi işleminin adımları verilmiştir. Örnek bir akım sinyalinde bulunan gürültülerin yok edilmesi için, öncelikle gürültülü sinyale Fourier Dönüşümü uygulanmıştır. Elde edilen sinyalde, gürültünün olduğu yüksek frekanslar filtre kullanılarak yok edilmiştir. Bu işlemin sonucunda, Şekil 6.17 (c)’de verilen yeni Fourier Dönüşümü sonucu elde edilmiştir. Tekrar akım sinyalini elde edebilmek için ters Fourier Dönüşümü ile sinyalin tersi alınmıştır. Şekil 6.17 (d)’de elde edilen temiz akım sinyali verilmiştir.



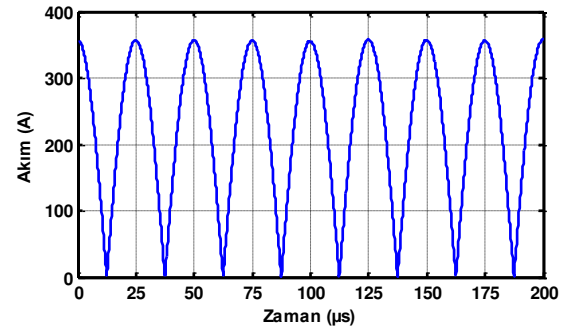
(a) Örnek gürültülü akım sinyali



(b) Gürültülü akım sinyalinin Fourier Dönüşümü sonucu



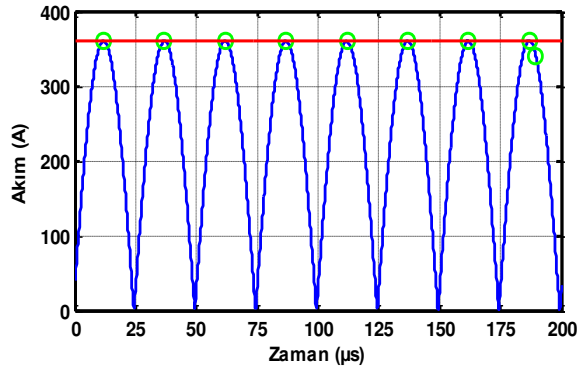
(c) Fourier Dönüşümü sonucuna filtre uygulanarak gürültülerin yok edilmesi



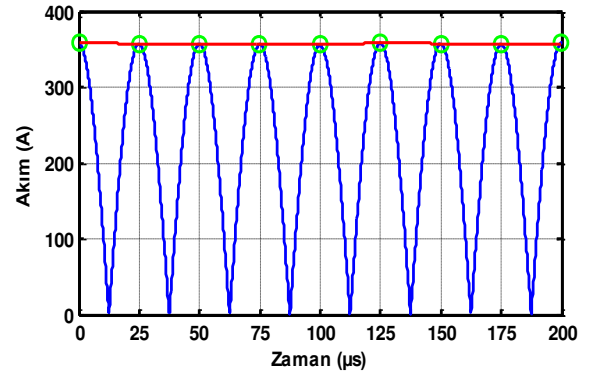
(d) Örnek temiz akım sinyali

Şekil 6.17. Örnek bir akım sinyali üzerinde gürültünün yok edilmesi

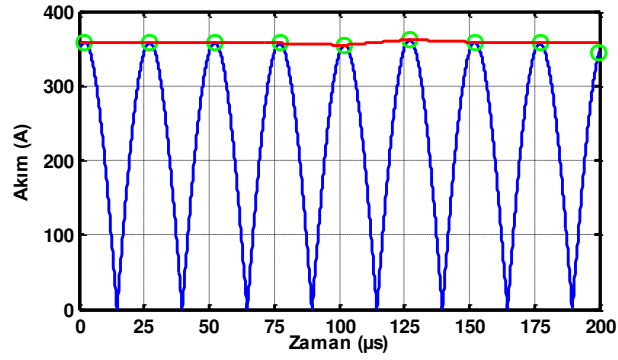
Lokomotiften alınan akım sinyallerinin, simülasyon ile alınan akım sinyallerinde olduğu gibi mutlak değeri alınarak, sinyalin belirli aralıktaki en üst noktaları tespit edilmiştir. Sağlam ve arızalı sinyaller üzerinde üst noktaların elde edilmesi Şekil 6.18’de verilmiştir.



(a) Sağlam akım sinyali



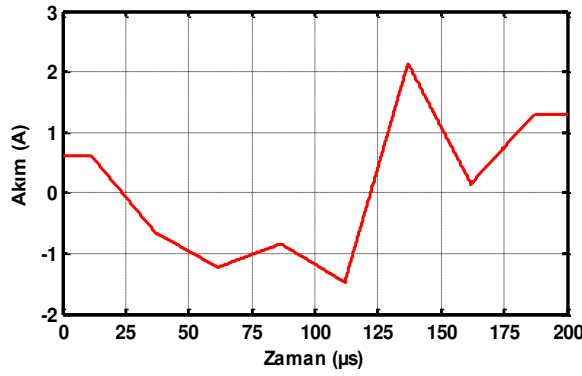
(b) Arızalı akım sinyali



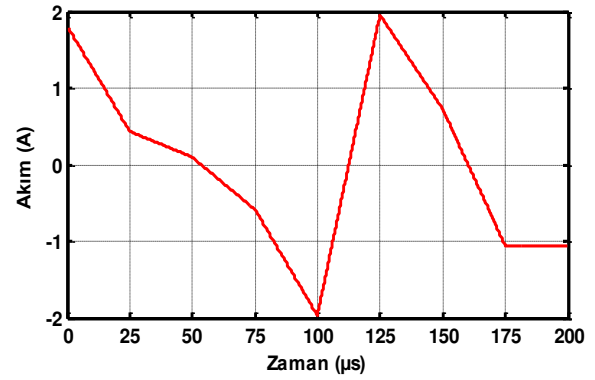
(c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali

Şekil 6.18. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinde üst noktaların elde edilmesi

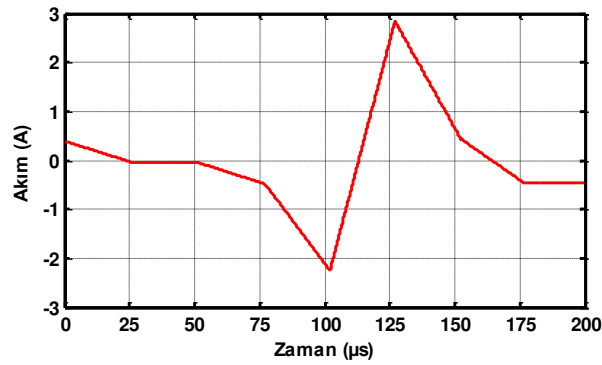
Şekil 6.18’de, lokomotiften alınan akım sinyallerinin üst noktaları elde edildikten sonra yine normalizasyon işlemi yapılmış, sinyaldeki üst noktalar arasındaki uç değerler düzenlenmiş ve tepe noktaları birleştirilerek bir sinyal elde edilmiştir. Gerçek zamanlı elde edilen sağlam ve arızalı durumlar için tepe noktalarından oluşan sinyaller Şekil 6.19’da verilmiştir.



(a) Sağlam akım sinyali



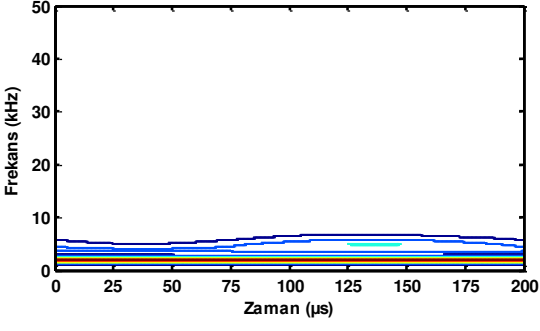
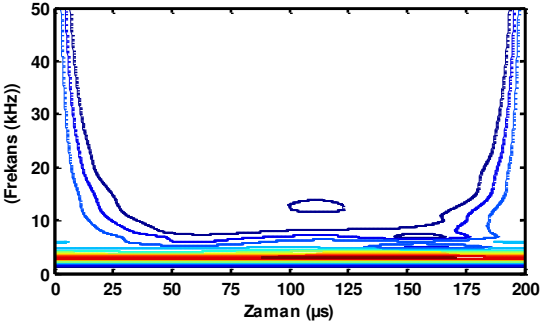
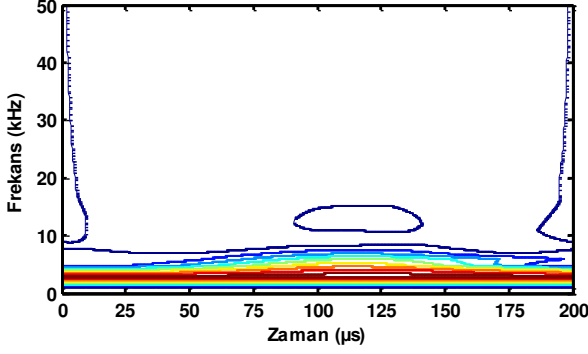
(b) Arızalı akım sinyali



(c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali

Şekil 6.19. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinin tepe noktalarından elde edilen sinyaller

Şekil 6.19'daki sinyaller üzerine S-Dönüşümü uygulanması sonucunda elde edilen frekans-zaman değişimi Şekil 6.20'de verilmiştir. Şekil 6.20 (a)'da sağlam akım sinyali için, S-Dönüşümü sonuçları incelendiğinde, belirli zaman ve frekans aralığında, arızalı bir durumun gözlenmediği görülmektedir. Şekil 6.20 (b)'de ilk arızalı akım sinyali için 100 μ s – 125 μ s aralığında ve Şekil 6.20 (c)'de ikinci arızalı akım sinyali için 75 μ s – 150 μ s aralığında frekansta değişimin olduğu görülmektedir. Giriş-çıkış üyelik fonksiyonu değerleri Şekil 6.20 (d), (e) ve (f)'de verilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonu değerine bağlı olarak oluşan sonuç durumu Şekil 6.20 (g)'de verilmiştir. S-Dönüşümü sonuçları ile akım sinyalleri için durum izlemesi yapılabilmekte ve oluşan arklar tespit edilmektedir. Bu bölümde, modelleme sonucunda elde edilen ve lokomotiften alınan sinyaller karşılaştırıldığında önerilen yöntemin doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

 (a) Sağlam akım sinyali	6.71	44.46	4.42	SAĞLAM
 (b) Arızalı akım sinyali	29.23	2.27	6.55	ARIZALI
 (c) Farklı ark durumunda alınan arızalı akım sinyali	48.8	0.02	7.5	ARIZALI
S-Dönüşümü sonucu	(d)	(e)	(f)	(g)

Şekil 6.20. Lokomotiften alınan sağlam ve arızalı akım sinyallerinin S-Dönüşümü ve bulanık sistem sonucu
 (d) S-sütun giriş üyelik fonksiyonu değeri (e) S-satır giriş üyelik fonksiyonu değeri (f) Çıkış üyelik fonksiyonu değeri (g) Sonuç

Her iki model tabanlı ve lokomotiften alınan akım sinyalleri için arızalı sinyaller incelendiğinde, ark oluşumu sırasında akım sinyalinde değişimler olduğu gözlemlenmektedir. Ark oluşumu sırasında akım sinyallerinde oluşan ani değişimler S-Dönüşümünde daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Önerilen yöntemin her bir aşamasında geçen ortalama zaman ve standart sapma değeri Tablo 6.4’de verilmiştir. Bu çalışmada, lokomotiften 200 μ s’de 1600 veri alınarak işlem yapılmıştır. Tablo 6.4’deki değerler incelendiğinde önerilen yöntemde gerekli olan sürenin büyük kısmının S-Dönüşümü sırasında harcandığı görülmektedir. Sinyalin gürültüsünün giderilmesi ve sinyalde en üst noktaların elde edilmesi adımları temel sinyal işleme adımları olarak kullanılırken, S-Dönüşümü yöntemi ise durum izleme ve ark tespiti için kullanılmıştır.

Tablo 6.4. Önerilen yöntemin ve aşamalarının zaman analizi

Önerilen yöntemin aşamaları	Kullanılan verinin boyutu	Ortalama Zaman (ms)	Standart Sapma (ms)
Gürültünün giderilmesi	1600	0.468	2.7
Üst noktaların elde edilmesi	1600	31.2	13.3
S-Dönüşümü ve bulanık sistem	1600	491.9	35.2
Önerilen Yöntem	1600	523.568	51.2

Bu bölümde, önerilen yöntemin hem model tabanlı hem de lokomotiften alınan gerçek zamanlı akım sinyalleri üzerinde gerçekleştirilmesi önemli bir avantajdır. Bu yöntemin literatürden farkı ve avantajları aşağıda verilmiştir.

- Akım sinyallerindeki küçük değişimler, sistemin oluşturduğu gürültülerden dolayı fark edilemeyebilirken, önerilen yöntemde sinyalde bulunan gürültüler yok edilerek, akım sinyallerindeki küçük değişimler kolaylıkla görülmektedir.
- Kullanılan sinyallerin tamamı üzerinden işlem yapmak yerine, sinyallerin tepe noktaları alınarak daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmiştir.
- Literatürde yapılan çalışmalar çoğunlukla model tabanlı olup gerçek zamanlı çalışmazken, önerilen yöntem hem model tabanlı hem de gerçek zamanlı veriler üzerinde uygulanmıştır.
- Bu çalışmada S-Dönüşümü tabanlı bir yöntem önerildiği için akım sinyallerinde oluşan değişimler hızlı bir şekilde görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, elektrikli demiryolu sistemlerinde enerji iletimini sağlayan PAK sistemleri için modelleme, kontrol ve arıza teşhisi yöntemleri geliştirilmiştir. Kontrol sistemlerinin ve arıza teşhisi yöntemlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle ayrıntılı sistem modeli oluşturulmuştur. Sistemin mekanik yapısı dikkate alınarak modelleme aşamaları belirlenmiştir. PAK sistemlerinde sistemi oluşturan parametrelerin sistem performansını ne derece etkilediğini anlayabilmek için çalışmalar yapılmıştır. Parametrelerde yapılan bazı değişiklikler sistemde salınımların artması, azalması, sistem yapısının bozulması gibi sorunlara neden olmaktadır. Parametre değişimi ile meydana gelen hassasiyeti azaltmak için uygun kontrol tekniğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir kontrolör tasarlanırken, parametre değişiminin sistem performansı üzerindeki etkilerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle de modelleme işlemi gerçekleştirildikten sonra pantograf parametre değişiminin model üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Farklı parametrelerin farklı değerleri için sonuçlar alınmış ve her birinin referans değerine göre farklılıkları verilmiştir. Pantografin tepe ve çerçeve kütledeki artışın sistem performansını kötü etkilediği belirlenmiştir. Yay sabiti ve sönümleme katsayılarındaki artışın olumlu etkisi olmakla birlikte, aşırı bir artış elastik yapıyı bozabilir. Her parametre değişiminde kontrolör parametrelerinin ayarlanması yerine aktif ve adaptif kontrollü pantograflar kullanılarak sistem, parametre değişimine karşı en hızlı şekilde kararlı hale getirilebilmektedir.

PAK sistemlerinde arızaların oluşmasını engellemek ve sistemin sürekli güvenilir çalışmasını sağlamak için pasif kontrol yerine kullanılabilecek aktif kontrol tekniklerinin, temas kuvvetindeki değişimi azalttığı ve akım toplama kalitesini arttırdığı belirlenmiştir. Pasif ve aktif kontrol için simülasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi aktif kontrol teknikleri, sistemin güvenilir çalışması, arızaların oluşmaması, konfor ve gerçek sistemlerde uygulanabilirliği açısından oldukça önemlidir. Pasif ve aktif kontrol tekniklerinin karşılaştırmaları üzerine verilen simülasyon sonuçlarına göre, katener hattının esnekliğindeki değişimlere karşılık, pantografin dinamik olarak temas kuvvetini ayarlaması belirli kontrol algoritmaları ile mümkündür. Bunun sonucunda ark oluşumları veya pantograf aşınmaları gibi arızalar giderilebilmektedir. Bu algoritmaların özellikle yüksek hızlı trenler için önemi büyük olmakla birlikte, kullanılması gereken kontrol algoritmaları hem hızlı hem de sağlam çalışmalıdır.

Bu çalışmada geliştirilen yeni aktif kontrol algoritmaları ile akım toplama kalitesi arttırılmaya çalışılmıştır. PI, bulanık ve adaptif bulanık kontrol sistemleri ile üç farklı kontrolör sistemi oluşturularak her biri için sonuçlar elde edilmiştir. Çıkış temas kuvveti sistemin hareketli oluşundan ve hızından dolayı osilasyon yapmaktadır. Dinamik ve karmaşık sistemler için adaptif bulanık kontrolör kullanımı daha uygun olduğu için, PAK sistemleri için adaptif bulanık kontrolörün kullanılması hem yeni hem daha verimli bir çalışma olmuştur. Adaptif kontrolör için elde edilen simülasyon sonuçlarının PI ve bulanık kontrolöre göre daha iyi ve kararlı hale gelme süresinin daha kısa olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bir kamerayla alınan PAK sistem görüntüsünde görüntü işleme algoritmaları kullanılarak pantograf yüksekliği tespit edilmiştir. Canny Kenar Çıkarım yaklaşımı ve Hough Dönüşümü ile belirlenen pantograf yüksekliği, kontrolör ile aktif olarak kontrol edilmiştir. Böylelikle pantograf ile temas teli arasında oluşan temas kuvvetinin kontrolü de sağlanmıştır. Bu uygulama düşük maliyetli oluşunun yanı sıra, gerçek zamanlı uygulanabilir oluşuyla da literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bu tür sistemlerde oluşan arızaların tespit edilmesi için kullanılabilir bir yöntemdir.

PAK sistemlerinde oluşan arızaları belirleyebilmek için öncelikle pantograf temas şeridi ve katener temas telinin etkileşimi ile oluşan temas noktasının pantograf yüzeyinde değdiği noktalar izlenerek, farklı hız değerlerindeki durumu verilmiştir. Pantograf yüzeyi temas durumuna göre temel olarak üç bölgeye ayrılmış ve her bölgede oluşan temasın sistem performansını nasıl etkileyeceğini belirlemek için teşhis algoritması oluşturulmuştur. Tehlikeli bölgede oluşan temas % 5'in altında ise herhangi bir önlem almaya gerek duyulmadığı teşhis algoritması ile belirlenmiştir. Çünkü bunun geçici bir durum olma olasılığı çok yüksektir ve ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak tehlikeli bölgede %5' in üzerinde oluşan bir temas ileride daha büyük sorunlara yol açabileceğinden bir an önce önlem alınması gerekmektedir. Arıza bölgesinde oluşan bir temasta, arıza zaten oluştuğu için önemli olan bir an önce arızanın sonlandırılması için gerekli işlemlerin yapılmasıdır. Arıza tipi belirlendikten sonra ne tür bir önlem alınacağı ve onarım yapılacağı da belirlenmiş olacaktır.

Bir kamera ile alınan pantograf videolarına farklı eşik değerleri için Canny Kenar Çıkarımı ve Hough Dönüşümü uygulanarak sonuçlar yorumlanmıştır. Üç farklı pantograf videosundan alınan her bir görüntü karesi için önerilen yöntem uygulanarak temas noktası tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, temas noktalarının sadece pantograf yüzeyindeki birinci bölgede olması beklenirken, ikinci ve üçüncü bölgelerde de temasın olduğu görülmüştür. Pantograf yüzeyinin aşınma oranı için istatistiksel veriler elde edilerek analiz yapılmış, pantograf ve katenerin kullanım ömürlerinin belirlenmesine imkan

sağlanmıştır. Geliştirilen durum izleme ve arıza teşhisi algoritmaları ile PAK sistemlerinde karşılaşılan arızalar azalacak, bakım-onarım masrafları düşecek, güvenlik sağlanacak ve ulaşım aksamamış olacaktır.

PAK sistemlerinde karşılaşılan en önemli arızalardan biri de yetersiz temas kuvveti, aşınma ve hava şartları sonucu meydana gelen ark oluşumlarıdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında PAK sistemlerinde oluşan arkların tespit edilmesi için sinyal işleme ve model tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, PAK sisteminde oluşan ark arızalarını tespit etmek ve büyük arızaların oluşmasını önlemek açısından oldukça önemlidir. Hem model tabanlı hem de lokomotiften alınan gerçek zamanlı sinyallerin kullanılması farklı ve yeni bir uygulama olması açısından da önemlidir. Lokomotiften alınan akım sinyallerinde oluşan gürültülerin önlenmesi için sinyale alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Bu filtre ile sinyaldeki gürültüler yok edilerek, ark tespiti işlemi daha doğru bir şekilde yapılmıştır. Gürültüler yok edilen sinyallerin mutlak değerleri alınarak, sinyallerin belirli aralıklarda tepe noktaları elde edilmiştir. Elde edilen tepe noktalarının değerleri normalize edilerek, lineer interpolasyon yöntemi ile tepe noktaları birleştirilmiştir. Daha sonra sinyal üzerinde S-Dönüşümü uygulanarak sağlam ve arızalı sinyaller için sonuçlar elde edilmiştir. S-Dönüşümü sonucunda sağlam sinyaller incelendiğinde ark oluşmadığı, arızalı sinyaller incelendiğinde ise ark oluştuğu görülmektedir. Böylece S-Dönüşümü sonucunda elde edilen S-matrisinden öznelilik çıkarımı yapılarak bulanık sistemde kullanılmaktadır. Bulanık sistemin sonucunda PAK sisteminin durumu izlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen model ve yöntemler PAK sistemlerinin ve bu sistemlerde oluşan arızaların incelenebilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu yöntemler farklı arıza türlerine uygulanarak farklı problemlerin çözümlerinde de kullanılabilirler. PAK sistemi modellenirken daha ileri dereceden toplu kütle modellerinin kullanılması model açısından daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Ancak, işlem karmaşıklığı oluşturmaması açısından modellemeyi daha zor hale getirebilir. Kullanılan aktif ve akıllı teknikler geliştirilerek daha karmaşık sorunların çözümü de sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sertsöz, M.**, 2012. Raylı Sistemlerde Enerji Verimliliği, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi.
- [2] **Dalyan, M.**, 2011. Raylı Sistemlerde Enerji Optimizasyonuna Yönelik Çalışmalar, *Yüksek Lisans Tezi*, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Programı, Yıldız Teknik üniversitesi, İstanbul.
- [3] **Duffy, M.C.**, 2008. Electric Railways, 1880-1990, IEE History of Technology Series, Published by the Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom
- [4] **Kiebling, F., Puschmann, R., Schmieder, A.**, 2001. Contact Lines for Electric Railways, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin and Munich, Germany.
- [5] T.C. Resmi Gazete, Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007 – 2013), (26215 mükerrer), 1 Temmuz 2006.
- [6] TCDD, Raylı Sistemler Katener Tesisleri, *Elektrifikasyon Notları*.
- [7] **Antunes, P. C.**, 2012. Development of Multibody Pantograph and Finite Element Catenary Models for Application to High-speed Railway Operations, *Master Thesis*, Mechanical Engineering, University of Lisbon, Portuguese.
- [8] **Teixeira, T. M. O. V.**, 2007. Dynamics and Control of a High Speed Train Pantograph System, *Master Thesis*, Mechanical Engineering, University of Lisbon, Portuguese.
- [9] **Hallgrimsson, A. K.**, 2013. Dynamic Behavior of Contact Lines for Railways with Laboratorial Model Setup according to Norwegian Conditions, *Master Thesis*, , Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology
- [10] **Navik, P. R.**, 2013. Numerical Analysis of the Dynamic Behavior of Railway Catenary Systems in Accordance with Norwegian Conditions, *Master Thesis*, , Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [11] **Ide, C. K., Olaru, S., Ayerbe, P. R., Rachid, A.**, 2013. A Nonlinear State Feedback Control Approach for a Pantograph-Catenary System, *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2013 17th International Conference*, Sinaia Romania, 268-273.
- [12] **Mahajan, P., Garg, R., Kumar, P.**, 2012. Sensitivity Analysis of Pantograph-Catenary System Model, *Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India International Conference on*, Delhi, 1-4.
- [13] **Yifeng, B., Jian, Z., Wenzheng, L., Xiankai, L.**, 2013. Study on Influence of Contact Wire Design Parameters on Contact Characteristics of Pantograph-Catenary, *Intelligent Rail Transportation (ICIRT), IEEE International Conference on*, Aug. 30 -Sept. 1, 268 – 273.
- [14] **Zhang, J., Yang, J., Song, R.**, 2012. Impact of Parameters of Pantograph on the Dynamics of Pantograph-catenary and Optimization of Parameters, *Power*

Engineering and Automation Conference, PEAM 2012 IEEE, 18-20 Sept, 1-4.

- [15] **Farhangdoust, S., Farahbakhsh, M., Shahravi M.**, 2013. Modeling of Pantograph-Catenary Dynamic Stability, *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, **3-14**, 1486-1491.
- [16] **Ambrosio, J., Pombo, J., Pereira, M.**, 2013. Optimization of High-Speed Railway Pantographs for Improving Pantograph-Catenary Contact, *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, **3**, 013006.
- [17] **Zhou, N., Zhang, W.**, 2011. Investigation on Dynamic Performance and Parameter Optimization Design of Pantograph and Catenary System, *Finite Elements in Analysis and Design*, 288-295.
- [18] **Rachid, A.**, 2011. Pantograph Catenary Control and Observation Using the LMI Approach, *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, Orlando, USA, December 12-15, 2287-2292.
- [19] **Kia, S.H., Bartolini, F., Mpanda-Mabwe, A., Ceschi, R.**, 2010. Pantograph-Catenary Interaction Model Comparison, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 1584 – 1589.
- [20] **Huang, Y. J.**, 2004. Discrete Fuzzy Variable Structure Control for Pantograph Position Control, *Electrical Engineering*, **86**, 171–177.
- [21] **Benet, J., Alberto, A., Arias, E., Rojo, T.**, 2007. A Mathematical Model of the Pantograph-Catenary Dynamic Interaction with Several Contact Wires, *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, **37:2**.
- [22] **Arias, E., Alberto, A., Montesinos, J., Rojo, T., Cuartero, F., Benet, J.**, 2009. A Mathematical Model of the Static Pantograph/Catenary Interaction, *International Journal of Computer Mathematics*, **86-2**, February, 333–340.
- [23] **Zhou, N., Li, R., Zhang, W.**, 2009. Investigation of The Influence of The Space Between Two Pantographs on The Dynamic Performance of Pantograph and Catenary System, *3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure*, Porto/Portugal, 20-24 July.
- [24] **Laurent, C., Massat, J-P., N-Tajan, T. M. L., Bianchi, J-P., Balmes, E.**, 2013. Pantograph Catenary Dynamic Optimization Based on Multibody and Finite Element Co-simulation Tools, *The International Association for Vehicle System Dynamics IAVSD*, 1-10.
- [25] **Song, D., Zhang, W., He, P., Jiang, Y., Zhou, N.**, 2013. Reliability Analysis of TSG19-type Pantograph Based on Time-Dependent Parameters, *Engineering Failure Analysis*, **35**, 153-163.
- [26] **Schröder, K., Ecke, W., Kautz, M., Willett, S., Unterwaditzer, H., Bosselmann, T., Rothhardt, M.**, 2013. Smart Current Collector—Fibre Optic Hit Detection System for Improved Security on Railway Tracks, *Meas. Sci. Technol.*, **24**, 1-9.
- [27] **Huan, R.H., Zhu, W.Q., Ma, F., Ying, Z.G.**, 2013. Vertical Dynamics of a Pantograph Carbon-Strip Suspension under Stochastic Contact-Force Excitation, *Springer Science-Business Media Dordrecht Nonlinear Dyn.*

- [28] **Tur, M., Garcia, E., Baezaa, L., Fuenmayor, F.J.,** 2014. A 3D Absolute Nodal Coordinate Finite Element Model to Compute the Initial Configuration of a Railway Catenary, *Engineering Structures*, **71**, 234–243.
- [29] **Sicre, C., Cucala, A.P., Fernandez-Cardador, A.,** 2014. Real Time Regulation of Efficient Driving of High Speed Trains Based on A Genetic Algorithm and A Fuzzy Model of Manual Driving, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **29**, 79–92.
- [30] **Huan, R. H., Zhu, W. Q., Ma, F., Liu, Z. H.,** 2014. The Effect of High-Frequency Parametric Excitation on a Stochastically Driven Pantograph-Catenary System, *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, **2014**, 1-8.
- [31] **Kim, J. S., Han, J. H.,** 2011. A Test Study on Interface Dynamics of Current Collection System in High Speed Trains, *IJR International Journal of Railway*, **4-2**, June, 34-41.
- [32] **Benet, J., Rojo, T., Tendero, P., Montesinos, J., Gil, M.A., Estevez, F.,** 2011. INDICA: An Efficient Tool to Study the Dynamical Pantograph-Catenary Interaction, *9th World Congress on Railway Research*, May 22-26, 1-10.
- [33] **Alic, C., Miklos, C., Miklos, I.,** 2009. Upon The Actual Tendencies in Modeling and Simulating The Behavior of The Pantograph - Catenary Pairing, *49th Anniversary of The Faculty of Technical Sciences, Machine Design*, May, 85-90.
- [34] **Massat, J. P., Laine, J. P., Bobillot, A.,** 2006. Pantograph–Catenary Dynamics Simulation, *Vehicle System Dynamics*, **44**, p. 551–559.
- [35] **Rauter, F. G., Pombo, J., Ambrosio, J., Chalansonnet, J., Bobillot, A., Pereira, M. S.,** 2007. Contact Model for the Pantograph-Catenary Interaction, *Journal of System Design and Dynamics*, **1-3**.
- [36] **Collina, A., Facchinetti, A., Resta, F.,** 2007. A Feasibility Study of an Aerodynamic Control for a High Speed Pantograph, *Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME international conference on*, Zurich, 1-6.
- [37] **Rusu-Anghel, S., Miklos, C., Topor, M., Demian, D., Mezinescu, S.,** 2011. Pantograph Catenary System Control Using Elements of Chaos Theory, *Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control (PACIFIC)*, Dec. 8, Aimens, France, 1-4.
- [38] **Rusu-Anghel, S., Miklos, C., Topor, M.,** 2012. Chaos Theory based Control of Contact Force in Electric Railway Transportation System, *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*, Venice, 995-999.
- [39] **Poetsch G., Evans J., Meisinger R., Kortum W., Baldauf W., Veitl A., Wallaschek J.,** 1997. Pantograph/Catenary Dynamics and Control, *Vehicle System Dynamics*, **28**, 159- 195.
- [40] **Zhang, Y., Qin, Y., Cheng, X., Jia, L., Xing, Z.,** 2013. An Analysis Method for the Correlation between Catenary Irregularities and Pantograph-Catenary Contact Force, *Transportation Research Board Annual Meeting*.

- [41] **Walters, S., Rachid, A., Mpanda, A.**, 2011. On Modelling and Control of Pantograph Catenary Systems, *Pantograph Catenary Interaction Framework For Intelligent Control (PACIFIC)*, December 2011.
- [42] **Wang, W., Dong, A., Wu, G., Gao, G., Zhou, L., Wang, B., Cui, Y., Liu, D., Li, D., Li, T.**, 2011. Study on Characterization of Electrical Contact between Pantograph and Catenary, *Electrical Contacts (Holm)*, *57th Holm Conference on*, Minneapolis, MN, 1-6.
- [43] **Ambrosio, J., Pombo, J., Pereira, M., Antunes, P., Mosca, A.**, 2012. A Computational Procedure for The Dynamic Analysis of The Catenary-Pantograph Interaction in High-Speed Trains, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, *50th Anniversary of JTAM*, **50, 3**, Warsaw, 681-699.
- [44] **Bobillot, A., Massat, J.-P., Mentel, J.-P.**, 2011. Design of Pantograph-Catenary Systems by Simulation, *9th World Congress on Railway Research*, May 22-26, 1-13.
- [45] **Ramos, A., Jimenez-Octavio, J.R., Such, M., Carnicero, A., Sanchez, C.**, 2011. Dynamic Simulation of the System Pantograph-Catenary-Vehicle-Track, *9th World Congress on Railway Research*, May 22-26.
- [46] **Karakose, E., Gençoglu, M. T.**, 2014. An Investigation of Pantograph Parameter Effects for Pantograph-Catenary Systems, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Alberobello, Italy, June 23-25.
- [47] **Pombo, J., Ambrosio, J., Pereira, M.**, 2011. Influence of Pantograph Characteristics on the Overhead Contact Quality for High Speed Trains, *9th World Congress on Railway Research*, May 22-26.
- [48] **Allotta, B., Pisano, Pugi, A., L., Usai, E.**, 2005. VSC of a Servo-Actuated ATR90-Type Pantograph, *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, December 12-15.
- [49] **Jerrelind, J., Drugge, L., Trigell, A. S., Nybacka, M.**, 2012. Simulation of Vehicle-Overhead Power System Interaction on Electric Roads, *13th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies*.
- [50] **Lee, J. H., Sim, K. S., Park, T. W.**, 2011. Development of the Integrated Railway Vehicle Model Considering Catenary, Bogie and Wheel-Rail Contact, *The 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, October 10-13.
- [51] **Mokrani, N., Rachid, A.**, 2013. A Robust Control of Contact Force of Pantograph-Catenary for the High-Speed Train, *European Control Conference (ECC)*, July 17-19, Zurich, Switzerland, 4568-4573.
- [52] **Garg, R., Mahajan, P., Kumar, P.**, 2013. Effect of Controller Parameters on Pantograph-Catenary System, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 233-239.
- [53] **Yamashita, Y., Ikeda, M.**, 2012. Advanced Active Control of Contact Force between Pantograph and Catenary for High-Speed Trains, *QR of RTRI*, **53, 1**, 28-33.
- [54] **Rusu – Anghel, S., Miklos, C., Averseng, J., Tirian, G.O.**, 2010. Control System for Catenary – Pantograph Dynamic Interaction Force, *Computational*

- [55] **Song, Y., Li, C., Fan, L.**, 2012. Model-independent Solution for Active Contact Force Control of Pantographs in High-Speed Trains, *31. Chinese Control Conference*, 7250-7255.
- [56] **Sanchez-Rebollo, C., Jimenez-Octavio, J.R., Carnicero, A.**, 2013. Active Control Strategy on A Catenary–Pantograph Validated Model, *Vehicle System Dynamics*, **51**, **4**, 554–569.
- [57] **Abdullah, M. A., Ibrahim, A., Michitsuji, Y., Nagai, M.**, 2013. Active Control of High-Speed Railway Vehicle Pantograph Considering Vertical Body Vibration, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, **4** (**6**), 263-274.
- [58] **Abdullah, M.A., Michitsuji Y., Nagai, M., Miyajima, N.**, 2010. Integrated Simulation Between Flexible Body of Catenary and Active Control Pantograph for Contact Force Variation Control, *Journal of Mechanical Systems*, **3** (**1**), 166-177.
- [59] **Abdullah, M.A., Michitsuji, Y., Nagai, M., Venture, G.**, 2011. System Identification of Railway Trains Pantograph for Active Pantograph Simulation, *Journal of System Design and Dynamics*, **5** (**5**), 1141-1154.
- [60] **Abdullah, M.A., Michitsuji, Y., Nagai, M., Miyajima, N.**, 2010. Simulation between Flexible Body of Catenary and Active Control Pantograph for Contact Force Variation Control, *Journal of Mechanical Systems*, **3**, **1**, 166-177.
- [61] **Yan, W., Hao, Z. J., Q.Zheng, T.**, 2009. Optimizing Active Control Scheme of High-speed Pantograph, *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC, IEEE 6th International*, 2622 - 2626.
- [62] **Walters, S.**, 2010. Simulation of Fuzzy Control Applied to a Railway Pantograph-Catenary System, *KES Proceedings of the 14th International Conference on Knowledge-based and Intelligent Information and Engineering Systems: Part II*, 322-330.
- [63] **Bandi, P.**, 2009. High-Speed Rail Pantograph Control System Design, Project Report.
- [64] **Pisano, A., Usai, E.**, 2007. Contact Force Estimation and Regulation in Active Pantographs: An Algebraic Observability Approach, *46th IEEE Conference On Decision And Control New Orleans, LA, USA, Dec. 12-14*, 4341-4346.
- [65] **Matvejevs, A., Matvejevs, A.**, 2010. Pantograph-Catenary System Modeling Using Matlab-Simulink Algorithms, *Scientific Journal of Riga Technical University Computer Science. Information Technology and Management Science*, 38-44.
- [66] **Xiaodong, Z., Yu, F.**, 2011. Active Self-Adaptive Control of High-Speed Train Pantograph, *Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, **3**, 152 – 156.
- [67] **Taran, M-F., R-Ayerbe, P., Olaru, S., Ticlea, A.**, 2013. Moving Horizon Control and Estimation of a Pantograph-Catenary System, *17th International Conference System Theory Control and Computing*, 527 – 532.

- [68] **Schöar, R.**, 2013. Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model, *Master Thesis*, Division of Rail Vehicles Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm and Institute for Dynamic Systems and Control Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich.
- [69] **Tieri, R.**, 2011. Innovative Active Control Strategies for Pantograph Catenary Interaction, *Master thesis*, Politecnico Di Milano School of Industrial Engineering Master of Science in Mechanical Engineering, KTH - Kungliga Tekniska Högskolan Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Railway Division, Italy.
- [70] **Shudong, W., Jingbo, G., Guosheng, G.**, 2008. Research of the Active Control for High-Speed Train Pantograph, *Cybernetics and Intelligent Systems IEEE Conference on*, 749 – 753.
- [71] **Karakose, E., Gencoglu, M. T.**, 2012. Adaptive Fuzzy Control Approach for Dynamic Pantograph Catenary Interaction, 15th International Symposium MECHATRONIKA, 1-5.
- [72] **Karakose, E., Gençoğlu, M. T.**, 2012. Pantograf-Katener Sistemlerinde Aktif ve Pasif Kontrol Teknikleri, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2012 Ulusal Toplantısı, TOK*, Niğde.
- [73] **Bartolini, F., Kia, S. H., Mabwe, A. M., Pugi, L., Allotta, B.**, 2011. Enhancement of Current Collection through Real-Time Implementation of Control Strategies For Active Pantograph, *9th Congress On Railway Research, WCRR*.
- [74] **Vanni, M., Bartolini, F., Mpanda-Mabwe, A., Allotta, B.**, 2012. Experimental Tuning Campaign of Control Strategies for Active Pantograph under Emulated Catenary, *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, Bologna, 1-5.
- [75] **Facchinetti, A., Mauri, M.**, 2009. Hardware-in-the-Loop Overhead Line Emulator for Active Pantograph Testing, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, October, 4071-4078.
- [76] **Facchinetti, A., Mauri, M.**, 2008. Hardware in the Loop Test-rig for Pantograph Active Control Evaluation, *Industrial Electronics, ISIE, IEEE International Symposium on*, Cambridge, 2171-2176.
- [77] **Allotta, B., Pugi, L., Bartolini, F.**, 2008. Design and Experimental Results of an Active Suspension System for a High-Speed Pantograph, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, October, **13**, **5**, 548-557.
- [78] **Aydin, I., Karakose, E., Karakose, M., Gencoglu, M. T., Akin, E.**, 2013. A New Computer Vision Approach for Active Pantograph Control, *Innovations in Intelligent Systems and Applications. IEEE International Symposium (INISTA)*, 19-21 June, Albena, Bulgaria.
- [79] **Allotta, B., Pugi, L., Bartolini, F.**, 2009. An Active Suspension System for Railway Pantographs: the T2006 prototype, *JRRT174, IMechE*, **223 Part F: J. Rail and Rapid Transit**, 15-29.
- [80] **Collina, A., Facchinetti, A., Fossati F., Resta, F.**, 2005. An Application of Active Control to the Collector of an High-Speed Pantograph: Simulation and

Laboratory Tests, *44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Spain, December 12-15, 4602-4609.

- [81] **Resta, F., Collina, A., Fossati, F.**, 2001. Actively Controlled Pantograph: An Application, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings*, July 8- 12, 243-248.
- [82] **Baldauf, W., Blaschko, R., Behr, W., Heine, C., Kolbe, M.**, 2001. Development of an Actively Controlled Acoustically Optimized Single Arm Pantograph, *World Congress Railway Research, WCRR*.
- [83] **Lin, Y-C., Lin, C.-L., Yang, C.-C.**, 2007. Robust Active Vibration Control for Rail Vehicle Pantograph, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **56**, July, 1994-2004.
- [84] **Matvejevs, A., Matvejevs, A.**, 2011. Optimal Control of Pantograph-Catenary System Based on Parametric Identification, *Computer Science. Information Technology and Management Science*, **49**, 17-23.
- [85] **Pisano, A., Usai, E.**, 2007. Contact Force Regulation in Wire-Actuated Pantographs via Variable Structure Control, *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*, Dec. 12-14.
- [86] **Hartland, D. J.**, 1998. Developments towards an Active Pantograph, *Current Collections for High Speed Trains Seminar IEE*, 1-5.
- [87] **Bahrani, B., Rufer, A., Aeberhard, M.**, 2011. Railway Catenary Parameters Identification based on Harmonic Current Injection, *Power Electronics and Applications (EPE), Proceedings of the 14th European Conference on*, 1-10.
- [88] **Wang, Z., Guo, F., Chen, Z., Tang, A., Ren, Z.**, 2013. Research on Current-carrying Wear Characteristics of Friction Pair in Pantograph Catenary System, *59th Holm Conference on Electrical Contacts*, 1-5.
- [89] **Ding, T., Chen, G.X., Li, Y.M., Yang, H.J., He, Q.D.**, 2014. Arc Erosive Characteristics of A Carbon Strip Sliding Against A Copper Contact Wire in A High-Speed Electrified Railway, *Tribology International*, **79**, 8–15.
- [90] **Ding, T., Chen, G., Li, Y., He, Q., Xiaodong, W. X.**, 2012. Friction and Wear Behavior of Pantograph Strips Sliding Against Copper Contact Wire with Electric Current, *AASRI Procedia* 2, 288-292.
- [91] **Östlund, S., Gustafsson, A., Buhrkall, L., Skoglund, M.**, 2008. Condition Monitoring of Pantograph Contact Strip, *Railway Condition Monitoring, 4th IET International Conference on*, 1 – 6.
- [92] **Ocoleanu, C. F., Popa, I., Manolea, G.**, 2013. Iterative Experimental Procedure for Determining of Heat Transfer Coefficient of Catenary's Contact Line Wire, *Advances in Production, Automation and Transportation Systems*, 385-388.
- [93] **Nituca, C.**, 2013. Thermal Analysis of Electrical Contacts from Pantograph–Catenary System for Power Supply of Electric Vehicles, *Electric Power Systems Research*, **96**, 211– 217.
- [94] **Bucca, G., Collina, A.**, 2009. A Procedure for the Wear Prediction of Collector Strip and Contact Wire in Pantograph–Catenary System, *Wear*, **266**, 46–59.

- [95] **Boguslavskii, A. A., Sokolov, S. M.,** 2006. Detecting Objects in Images in Real-Time Computer Vision Systems Using Structured Geometric Models, *Pleiades Publishing, Inc.*, **32**, 177–18.
- [96] **O'Donnell, C., Palacin, R., Rosinski, J.,** 2006. Pantograph Damage and Wear Monitoring System, *The Institution of Engineering and Technology International Conference on Railway Condition Monitoring*, 29-30 Nov., Birmingham, England, 178 – 181.
- [97] **Li, M., Ze-yong, W., Xiao-rong, G., Li, W., Kai, Y.,** 2009. Edge Detection on Pantograph Slide Image, *International Congress on Image and Signal Processing*, Tianjin, China, 17-19 Oct., 1 – 3.
- [98] **Xiao-Heng, Z., Xiao-rong, G., Ze-yong, W., Li, W., Kai, Y.,** 2010. Study on the Edge Detection and Extraction Algorithm in the Pantograph Slipper's Abrasion, *International Conference on Computational and Information Sciences*, 474 – 477.
- [99] **Midya, S., Bormann, D., Schütte, T., Thottappillil, R.,** 2009. Pantograph Arcing in Electrified Railways—Mechanism and Influence of Various Parameters—Part I: With DC Traction Power Supply, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, 1931-1939.
- [100] **Facchinetti, A., Bruni, S.,** 2012. Hardware-in-the-loop Hybrid Simulation of Pantograph–Catenary Interaction, *Journal of Sound and Vibration*, June, 2783-2797.
- [101] **Jian-Ping, P., Yu, Z., Li, W., Xiao-Rong, G., Ze-Yong, W., Quan-Ke, Z., Chao-Yong, P., Kai, Y.,** 2009. Dynamic Detection for the Contact Line Gradient in Electrified Railway, *High-Power Diode Laser Technology and Applications*, San Jose, CA.
- [102] **Midya, S.,** 2009. Conducted and Radiated Electromagnetic Interference in Modern Electrified Railways with Emphasis on Pantograph Arcing, *PhD Thesis*, Electrical Systems, Stockholm, Sweden.
- [103] **Van, O. V., Massat, J-P., Laurent, C., Balmes, E.,** 2013. Introduction of Variability in Pantograph-Catenary Dynamic Simulations, *The International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD)*, 1-8.
- [104] **Plesca, A.,** 2014. Electric Arc Power Collection System for Electric Traction Vehicles, *Electrical Power and Energy Systems*, **57**, 212–221.
- [105] **Plesca, A.,** 2014. Thermal Analysis of Sliding Electrical Contacts with Mechanical Friction in Steady State Conditions, *International Journal of Thermal Sciences*, **84**, 125-133.
- [106] **Plesca, A.,** 2013. Thermal Analysis of a Sliding Electric Contact System Using Finite Element Method, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **76**, 336-342.
- [107] **Ren, W., Wang, P., Song, J., Zhai, G.,** 2014. Effects of Current Load on Wear and Fretting Corrosion of Gold-Plated Electrical Contacts, *Tribology International*, **70**, 75–82.

- [108] **Qian, W. J., Chen, G. X., Zhang, W. H., Ouyang, H., Zhou, Z. R.,** 2013. Friction-Induced, Self-Excited Vibration of a Pantograph-Catenary System, *Journal of Vibration and Acoustics Copyright VC 2013 by ASME*, **135**, October, 1-8.
- [109] **Barmada, S., Raugi, M., Tucci, M., Romano, F.,** 2014. Arc Detection in Pantograph-Catenary Systems by the Use of Support Vector Machines-Based Classification, *IET Electr. Syst. Transp.*, **4**, Iss. **2**, 45–52.
- [110] **Barmada, S., Tucci, M.,** 2011. Use of Advanced Signal Processing Techniques for Arcing Detection on AC Pantograph Catenary Systems, *Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control Conference, PACIFIC*.
- [111] **Pombo, J., Ambrosio, J.,** 2012. Influence of Pantograph Suspension Characteristics on The Contact Quality with The Catenary for High Speed Trains, *Computers and Structures*, **110–111**, 32–42.
- [112] **Pombo, J., Ambrosio, J.,** 2013. Environmental and Track Perturbations on Multiple Pantograph Interaction with Catenaries in High-Speed Trains, *Computers and Structures*, **124**, August, 88-101.
- [113] **Chen, G.X., Yang, H. J., Zhang, W. H., Wang, X., Zhang, S. D., Zhou, Z. R.,** 2013. Experimental Study on Arc Ablation Occurring in a Contact Strip Rubbing Against A Contact Wire with Electrical Current, *Tribology International*, **61**, 88–94.
- [114] **Sacchi, M., Cagnoni, S., Spagnoletti, D., Ascari, L., Zunino, G., Piazzzi, A.,** 2011. PAVISYS: A Computer Vision System for The Inspection of Locomotive Pantographs, *PACIFIC 2011 - International Conference on: Pantograph-Catenary Interaction Framework for Intelligent Control, Conference Proceedings*.
- [115] **Kuo, M-T., Lo, W-Y.,** 2013. Magnetic Components Used in the Train Pantograph to Reduce the Arcing Phenomena, *Industry Applications IEEE Transactions on*, **PP- 99**.
- [116] **Usuda, T., Ikeda, M., Yamashita, Y.,** 2011. Prediction of Contact Wire Wear in High-speed Railways, *9th World Congress on Railway Research*, May 22-26.
- [117] **Midya, S., Bormann, D., Schutte, T., Thottappillil, R.,** 2011. DC Component from Pantograph Arcing in AC Traction System—Influencing Parameters, Impact, and Mitigation Techniques, *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, **53**, **1**, February.
- [118] **Shin, Y-J., You, W-H., Hur, H-M., Park, J-H.,** 2012. Semi-active Control to Reduce Carbody Vibration of Railway Vehicle by Using Scaled Roller Rig, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **26 (11)**, 3423-3431.
- [119] **Kim, Y., Haochuang, L., Seok, C-S., Koo, J-M., Lee, K., Kwon, S-Y.,** 2013. Fatigue Life Prediction Method for Contact Wire Using Maximum Local Stress, *9th International Conference on Fracture & Strength of Solids*, June 9-13, 1-6.
- [120] **Chen, S., Sha, F.,** 2009. Three Types of Electromagnetic Noise between Pantograph and Catenary, *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 3rd IEEE International Symposium on*, 40-43.

- [121] **Stella, E., Mazzeo, P. L., Nitti, M., Distante, A.,** 2011. Non-Destructive Analysis (NDT) of Pantograph and Catenary Interaction, *International Conference on: Pantograph-Catenary Interaction Framework for Intelligent Control (PACIFIC), Conference Proceedings.*
- [122] **Karakose, E., Gencoglu, M. T.,** 2013. An Analysis Approach for Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Pantograph-Catenary System, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, October 13-16, Manchester, UK, 1963-1968.
- [123] **Wang, J., Yang, Z., Lin, F., Cao, J.,** 2013. Harmonic Loss Analysis of the Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograph-OCS Electrical Contact Properties, *Energies*, **6**, 5826-5846.
- [124] **Cantemir, L., Nituca, C., Chiriac, G., Rachid, A.,** 2011. Unconventional Current Collection from a Contact Line for Electric Traction Vehicles, *Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control Conference (PACIFIC)*, 1-6.
- [125] **Shuanbao, Y., Dilong, G., Zhenxu, S., Guowei, Y., Dawei, C.,** 2014. Optimization design for aerodynamic elements of high speed trains, *Computers & Fluids*, **95**, 56–73.
- [126] Raylı Sistemler Teknolojisi Enerji Kesimi ve Emniyet, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Ankara, 2009.
- [127] Raylı Sistemler Teknolojisi Elektrikli Sistemlerde Enerjinin Araca Alınması, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Ankara, 2008.
- [128] http://www.youtube.com/watch?v=bnMcLlv6vao&index=5&list=PL1RnN0AYKd5me380rRA3XHEqNDPA_VTku.
- [129] Raylı Sistemler Teknolojisi Sinyalizasyon Elektrifikasyon ve Haberleşme Tesisler, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Ankara, 2011.
- [130] Raylı Sistemler Teknolojisi Raylı Sistem Araçlarının Yardımcı Devre Elektrik Sistemleri, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Ankara, 2013.
- [131] **J. A. Lozano, J. Felez, J. D. Sanz, J. M. Mera,** 2012. Railway Traction, Reliability and Safety in Railway, **Railway Traction-Chapter 1**, InTech, Madrid University, Spain.
- [132] Fizik Laboratuvarı 1 (Mekanik ve Isı) Deneyleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Yaylı Sarkaç Deneyi.
- [133] **Kıral, Z.,** Mekanik Titreşimler Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
- [134] **Riley, K. F., Hobson, M. P., Bence, S. J.,** 2006. Mathematical Methods for Physics and Engineering, Cambridge University Press.
- [135] **Ross, S. L.,** 2004. Diferansiyel Denklemler, Çeviren Mehmet Can.

- [136] **Lin, J., Lian, R.-J.**, 2010. Intelligent Control of Active Suspension Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **10**, 1-10.
- [137] **Li, H., Liu, H., Gao, H., Shi, P.**, 2012. Reliable Fuzzy Control for Active Suspension Systems with Actuator Delay and Fault, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, **20**, 342-357.
- [138] **Bih, J.**, 2006. Paradigm Shift – an Introduction to Fuzzy Logic, *IEEE Potentials*, **25** (1), pp. 6-21.
- [139] **Mohan, B.M., Sinha, A.**, 2008. Analytical Structures for Fuzzy PID Controllers?, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **16** (1), 52-61.
- [140] **Canny, J.**, 1986. A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8** (6), 679-714.
- [141] **Haghi, A., Sheikh, U. U., Marsono, M. N.**, 2012. A Hardware/Software Co-design Architecture of Canny Edge Detection, *2012 Fourth Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul.*, **2** (2), 214–219.
- [142] **Rujiao, D., Wei, Z., Songling, H., Jianye, C.**, 2011. Automatic Inspection of the Localizer Slope based on Improved Hough Transform, *IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf.*, 1–4.
- [143] **Chiu, S.-H., Wen, C.-Y., Lee, J.-H., Lin, K.-H., Chen, H. M.**, 2012. A Fast Randomized Generalized Hough Transform for Arbitrary Shape Detection, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **8**, 1103-1116.
- [144] **Landi, A., Menconi, L., Sani, L.**, 2006. Hough transform and thermo-vision for monitoring pantograph-catenary system, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, **220**, no. 4, 435–447.
- [145] **Barmada, S., Landi, A., Sani, L.**, 2003. Wavelet Multi resolution Analysis for Monitoring the Occurrence of Arcing on Overhead Electrified Railways, *Journal of Rail and Rapid Transit*, **217**, 177-187.
- [146] **Kia, S. H., Bartolini, F., Mabwe, A. M., Ceschi, R.**, 2011. Real-Time Simulation of Pantograph-Catenary Interaction, *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON*, 258-264.
- [147] **Zhou, L., Shen, Z.**, 2011. Progress in High-Speed Train Technology around The World, *Journal of Modern Transportation*, **19**, 1-6.
- [148] **Zhonghua, C., Lichuan, H., Tiejun, W., Fengyi, G.**, 2012. Modeling Study of the Amount of Wear in Sliding Electric Contact, *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, 146 – 150.
- [149] **Ang, K. K., Dai, J.**, 2013. Response Analysis of High-speed Rail System Accounting for Abrupt Change of Foundation Stiffness, *Journal of Sound and Vibration*, **332**, 2954–2970.
- [150] **Liu, Y., Chang, G.W., Huang, H.M.**, 2010. Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **25** (3), 2025-2027.

- [151] **Aydin, I., Karakose, M., Akin, E.,** 2012, Arıza Teşhisi için S-Dönüşümü ve Görüntü İşleme Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 803-806.
- [152] **Yavuz, S., Deveci, M.,** 2012. İstatiksel Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağın Performansına Etkisi, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, **40**, 167-187.
- [153] **Bayıroğlu, H.,** 2006. Sayısal Yöntemler Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [154] **Bansal, M.,** 2013. Feature Detection using S-Transform, Thesis for the Bachelor of Technology Department of Computer Science and Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India.
- [155] **Adams, M. D., Kossentini, F., Ward, R.,** 2001. Generalized S Transform, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.
- [156] **Mishra, S.,** 2009. Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Probabilistic Neural Network, *Power Systems Conference and Exposition*, **1**.
- [157] **Uyar, M.,** 2008. Güç Kalitesindeki Bozulma Türlerinin Akıllı Örüntü Tanıma Yaklaşımları ile Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [158] **Karagöz, M.,** 2014. Analysis of the Pantograph Arcing and its Effects on the Railway Vehicle, *Master Thesis*, Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara.
- [159] Matlab documentation, mathworks.
- [160] **Yaman, O., Karaköse, M., Aydın, İ., Akın, E.,** 2014. Pantograf Katener Sistemlerde Görüntü İşleme ve Model Tabanlı Ark Tespiti, 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı. 23-25 Nisan.
- [161] **Kürün, E.,** 2006, Dinamik Ark Modelleri ve Devre Kesicilerin Bilgisayar Simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İnönü üniversitesi, Malatya.

EKLER

EK-1. TCDD MALATYA 5. BÖLGE TESİSLER MÜDÜRLÜĞÜ'NDE YAPILAN SAHA ÇALIŞMALARINA İLİŞKİN GÖRÜNTÜLER

08.12.2011 ve 07.05.2013 tarihlerinde TCDD Malatya 5. Bölge Tesisler Müdürlüğü'nde pantograf ve katenerin çalışmasına ilişkin yapılan çalışmalar için elde edilen görüntüler Ek Şekil 1.1'de verilmiştir. Lokomotif üzerine sabitlenen kameradan belirli bir yol güzergahında videolar alınmıştır. Trenin farklı manevraları için de görüntüler elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Ek Şekil 1.1. Saha çalışmaları sonucu elde edilen görüntüler

ÖZGEÇMİŞ

Ebru KARAKÖSE, 1983 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladıktan sonra 2002 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2006 yılında mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2009 yılında mezun oldu. 2007 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak atandı. 2009 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen Fırat Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.