

Pantograf Katener Sistemlerde Görüntü Bölütleme Tabanlı Adaptif Ark Tespiti

Adaptive Arc Detection Based Image Segmentation in Pantograph Catenary Systems

Mehmet Karaköse, Orhan Yaman, İlhan Aydın, Erhan Akın
Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği, Elazığ
{mkarakose, orhanyaman, iaydin, eakin}@firat.edu.tr

Öz

Son yıllarda elektrikli trenlerin gelişmesiyle birlikte raylı sistemler popüler bir ulaşım türü haline gelmiştir. Bu ulaşım türü diğer ulaşım türlerine göre düşük maliyetli ve güvenilirdir. Ayrıca elektrikli trenlerin ortaya çıkmasıyla birlikte demiryolu ulaşımı daha çok tercih edilmiştir. Elektrikli trenlerin kullandığı elektrik enerjisinin temin edilmesi için pantograf katener sistemleri geliştirilmiştir. Pantograf sistemi, trenin üzerinde bulunan katener telinden aldığı elektriği trene ileten sistemdir. Katener sistemi ise, demiryolu hattı boyunca bulunur ve trafo merkezinden alınan elektriği pantograf sistemine iletir. Pantograf ve katener sistemlerinin birbiri ile teması sırasında çeşitli arızalar ortaya çıkmaktadır. Oluşan arızaların erken teşhis edilmesi daha büyük arızaların oluşmasını engellemektedir. Bu çalışmada, pantograf katener sisteminde ark tespiti için görüntü işleme tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. İki farklı lokomotifin çatısına kamera yerleştirilerek pantograf katener sisteminin 20 fps'de görüntüsü kaydedilmiştir. Alınan görüntülerde oluşan arkların tespiti için görüntü bölütleme kullanılmıştır. Ayrıca pantograf temas bölgesinin tespit edilmesi için Sobel kenar çıkarma algoritması kullanılmıştır. Kenar algılama ve bölütleme yapılarak, görüntü üzerinde özellik çıkarımı yapılmıştır. Pantograf üst bölgesi ile ark bölgesinin düşey konumları ilişkilendirilerek temas bölgesinde oluşan arkların tespiti yapılmaktadır. Önerilen yöntem hem MATLAB hem de FPGA ortamında gerçekleştirilmiştir ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcük: Pantograf Katener Sistemler, Görüntü İşleme, FPGA, Durum İzleme, Arıza Teşhisi.

Abstract

In recent years, through the development of electric trains, the rail system has become a popular mode of transport. This type of transport is reliable and cost-effective compared to other modes of transport. Furthermore, the rail transport is more preferred with the emergence of the electric train. In order to provide the electrical energy used by electric trains, pantograph catenary system was developed. Pantograph system, receives power from the catenary wire and transmits to train. The catenary system, located along the railway line, transmits electricity from the substation to the pantograph system. During contact with pantograph and catenary system many failures may occur. Early diagnosis of failures are preventing larger defects. In this study, a new method based on image processing is proposed for arc detection in pantograph catenary system. Video images of the catenary pantograph are captured by cameras placed on the roof of two different locomotives at 20 fps. The image segmentation is used to identify the differences that occur in images taken. Also, the Sobel edge extraction algorithm is used for detecting contact of a pantograph. Edge detection and segmentation were performed to extract features on the image. The vertical positions of the arc region and the upper region of the pantograph are associated with each other and the arcs formed in the contact region are detected. The proposed method has been carried out both in the FPGA environment MATLAB and the results were compared.

Keywords: Pantograph Catenary Systems, Image Processing, FPGA, Condition Monitoring, Fault Diagnosis.

Gönderme ve kabul tarihi: 04.01.2017-24.11.2017

1 Giriş

Pantograf katener sistemi, elektrikli trenlerin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin trene iletilmesini sağlayan sistemdir. Raylı sistemlerin en önemli bileşenlerinden biri pantograf katener sistemleridir. Pantograf katener sistemleri, lokomotifin çatısına yerleştirilen pantograf sistemi ve demiryolu hattı boyunca kurulan katener sisteminden oluşmaktadır. Pantograf katener sistemleri demiryolu ulaşımı için oldukça önemlidir [1].

Elektrikli trenler diğer trenlere göre daha az enerji harcarlar ve hava kirliliğine neden olmazlar. Elektrikli trenlerin çalışma sırasında elektrik enerjisini sürekli bir şekilde alması gerekmektedir. Bu sürekliliğin sağlanması için çeşitli türlerde pantograf katener sistemi geliştirilmiştir. Ancak pantograf katener sistemin birbiriyle teması sırasında ortaya çıkan arızalardan dolayı elektrik iletiminde aksaklıklar yaşanmaktadır. Temas sırasında ortaya çıkan arızalar genellikle çevre koşullarından dolayı oluşmaktadır [2]. Soğuk ve yağışlı havalarda katener telinde biriken nem ve su tabakalarının buz katmanına dönüşmesi sonucunda elektrik iletiminde aksaklıklar oluşmaktadır. Biriken buz katmanları pantograf temas bölgesine zarar vermektedir. Ayrıca sistemin yanlış konumlanması, yanlış aerodinamik yapı ve aşırı sürtünme gibi problemlerden dolayı temas bölgesinde aşırı ısınma ve ark oluşmaktadır [3]. Aşırı ısınma ve ark oluşumu sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık pantograf üst bölgesinde bulunan karbon yapının bozulmasına neden olmaktadır.

Günümüzde, pantograf katener sistemlerindeki arızaların tespiti için yaygın olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Akım gerilim tabanlı arıza teşhis yöntemlerinde, pantograf katener sisteminden lokomotifle aktarılan elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerleri kullanılarak arıza teşhisi yapılmaktadır [4,5]. Ayrıca lokomotifin üzerine yerleştirilen 'phototube' sensör ile sistemde oluşan arklar tespit edilmektedir [6,7]. Diğer arıza tespit yöntemi olan görüntü işleme tabanlı yöntemler ise düşük maliyetli ve kurulumu kolaydır [8,9]. Bu yöntemde, lokomotifin üzerine yerleştirilen kamera ile temas bölgesinin görüntüsü alınmaktadır. Alınan görüntüler kullanılarak görüntü işleme yöntemleri ile arıza teşhisi yapılmaktadır.

Pantograf katener sistemlerinde oluşan arızaların teşhisi için akım, gerilim veya model tabanlı birçok farklı yöntemler geliştirilerek uygulamalar yapılmıştır. Ocoleanu ve diğ., çalışmalarında pantograf ile katener temas noktasındaki aşırı ısınma ve sürtünmeden dolayı oluşan arızaları incelemektedir [10]. Katener temas telinin özellikleri incelenerek

temas telinde oluşan sıcaklık değişimi izlenmiştir. Facchinetti ve diğ., pantograf katener sisteminin birbiriyle temasını sağlayan model geliştirilmiştir [11]. Geliştirilen bu model gerçek zamanlı çalıştırılarak, pantograf katener sisteminde oluşabilecek ark, ısınma ve aşınma problemlerini çözmek için önermiştir. Midya ve diğ., pantograf katener sistemlerinde oluşan ark arızaları için akım ve gerilim değerlerini incelemiştir [12]. Akım gerilim ve model tabanlı arıza teşhis yöntemleri gerçek sistem üzerinde uygulanması oldukça zahmetli yöntemlerdir [13]. Bu nedenle bir diğer arıza teşhis yöntemi olan görüntü işleme tabanlı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Boguslavskii ve diğ., gerçek zamanlı görüntü işleme yöntemi önermiştir [14]. Pantograf sisteminin görüntüsünü yapısal geometrik modeller kullanarak tespit etmektedir. Ayrıca pantograf görüntüsüne, filtre uyguladıktan sonra Canny kenar çıkarım algoritmasıyla birlikte pantograftaki nesnelere tespit etmek için ön çalışma yapmıştır. Li ve diğ., pantograf üst kısmı üzerinde aşınmayı algılamak için görüntü işleme algoritması sunmaktadır [15]. Görüntüde kenar tespiti için Dalgacık dönüşümü, pantograf alt ve üst bölgelerinin tespiti için Hough dönüşümü kullanmıştır [15].

Bu çalışmada, pantograf katener sistemlerde oluşan ark arızalarının tespiti için görüntü işleme tabanlı yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde, iki farklı algoritmayı kullanarak özellik çıkarımı yapılmaktadır. İlk olarak ark tespiti için bölütleme tabanlı bir yöntem olan Otsu eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak, görüntü için en iyi üç tane eşik değeri belirlenir. Belirlenen eşik değerlerine göre görüntü dört farklı renk gurubuna göre oluşturulur. Bu işlemin ardından ark tespiti yapılmaktadır. Daha sonra görüntü üzerinde kenar çıkarım yöntemi kullanılarak görüntünün kenar bilgisi elde edilmektedir. Kenar bilgisinin ardından pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Elde edilen pantograf üst bölgesine ait düşey konum ile ark bölgesine ait düşey konum ilişkilendirilerek temas bölgesinde oluşan arklar başarıyla tespit edilmektedir. Önerilen yöntem hem MATLAB ortamında hem de FPGA geliştirme kiti üzerinde gerçekleştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

2 Önerilen Yöntem

Bu çalışmada önerilen yöntemde Otsu algoritması ve Sobel kenar çıkarım algoritması olmak üzere iki farklı algoritma kullanılmıştır. Otsu algoritması kullanılarak görüntüde bölütleme yapılmaktadır. Bu bölütleme sonucunda görüntüde bulunan ışık bölgeleri tespit edilmektedir. Ayrıca kullanılan Sobel kenar çıkarım algoritması ile görüntüde kenar çıkarımı yapılmaktadır. Kenar çıkarımının ardından elde edilen

doğrular kullanılarak görüntü üzerinde pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Pantograf katener sistemin görüntüsü alınırken, görüntü içerisinde bulunan farklı ışık kaynaklarının ark olarak tespit edilmemesi için pantograf üst bölgesi de tespit edilmektedir. Kullanılan iki algoritmanın sonucunda da elde edilen özellikler birleştirilerek temas bölgesinde oluşan arklar tespit edilmektedir. Temas bölgesinde tespit edilen ışık kaynakları ark olarak adlandırılırken temas bölgesi dışında tespit edilen ışık kaynakları ise dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Her bir aşama şu şekildedir;

Adım 1. Başlangıç Aşaması: Bu bölümde kameradan alınan bir frame gerekli hafıza kaynaklarına kaydedilerek gri renk formatına dönüştürülmektedir.

Adım 2. Özellik Çıkarım Aşaması: Bu aşama iki bölümden oluşmaktadır.

Adım 2.1. Işık Kaynaklarının Tespiti: Gri görüntü kullanılarak Otsu yöntemi ile ışık kaynakları tespit edilir.

Adım 2.2. Temas Bölgesinin Tespiti: Gri görüntü kullanılarak Sobel kenar çıkarım yöntemi ile pantograf üst bölgesi tespit edilir.

Adım 3. Ark Tespiti: Bir önceki aşamada kullanılan yöntemlerden elde edilen özellikler birleştirilerek ark tespiti yapılır.

Adım 4. Sonuç Aşaması: Bu aşamada elde edilen sonuçlar görüntülenerek işlem bitmemiş ise kameradan bir sonraki frame almak için gerekli işlemler yapılır.

Dört ana bölümden oluşan önerilen yöntemin genel akış şeması Şekil 1’de verilmektedir.

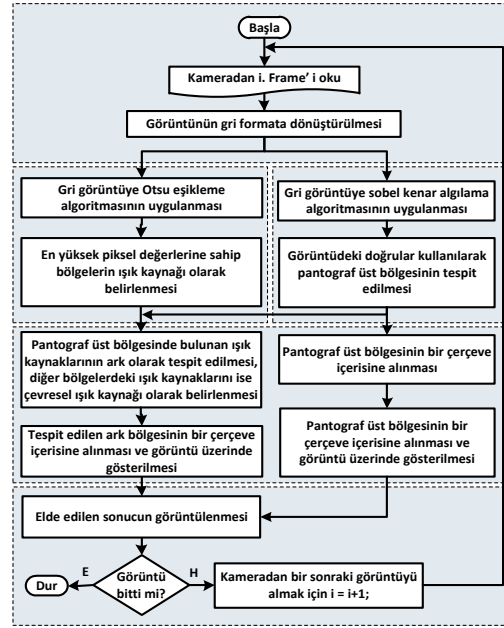
2.1 Otsu Yöntemi

Görüntü bölütleme veya eşikleme işlemi olarak adlandırılan yöntemler görüntüdeki özelliklerin elde edilmesi için kullanılan temel görüntü işleme tekniklerinden biridir [16]. Görüntüdeki piksel değerlerini kontrol ederek ikili renk tabanlı bir görüntü elde etmek için denklem (1) kullanılmaktadır.

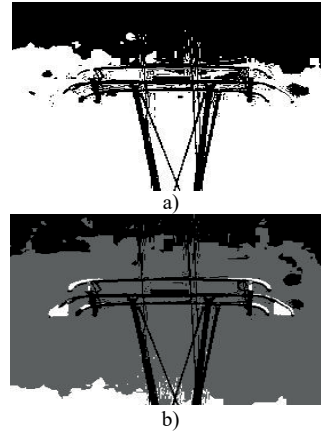
$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{eger } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (1)$$

Denklem (1)’de verilen $g(x, y)$ iki seviyeli bir imge olup, $f(x, y) \geq T$ ’ye karşılık gelen pikseller hedef piksellerini, diğerleri ise arka planı göstermektedir. Burada T eşik değeri olup, bu değerin belirlenmesi

oldukça önemli bir işlemdir. Çünkü belirlenen eşik değeri arka planın çıkarılması ve özelliklerin elde edilebilmesi gereklidir. Fakat bazı görüntü işleme uygulamalarında bu tür bir eşikleme denkleminin kullanılması özellik çıkarımı için yeterli olmayabilir. Şekil 2’de örnek bir pantograf sisteminin iki ve üç seviyeli görünümü verilmiştir.



Şekil-1: Önerilen yöntemin genel akış şeması



Şekil-2: Pantograf görüntüsünün iki seviyeli ve üç seviyeli görünümü

Şekil 2’de verilen örnek bir pantograf görüntüsünde iki ve üç seviyeli görüntü arasında birçok fark bulunmaktadır. Görüntü üzerinde belirlenen eşikleme

sayısı ve kullanılan eşik değerleri oldukça önemlidir. Bütün eşikleme teknikleri arasında otomatik eşikleme yöntemleri basit ve kısa zamanda uygulanabildikleri için birçok uygulamada kullanılmaktadır. Otomatik eşiklemedeki temel amaç arka plandan istenilen bölgeyi bölütleme için en uygun gri seviyeli eşik değerlerini seçmektir.

Otsu yöntemi, birçok görüntü işleme uygulamalarında kullanılan ve başarılı sonuçlar veren bir görüntü eşikleme yöntemidir. Bu eşikleme yönteminde en iyi eşik değerlerin belirlenmesi için piksellerin ağırlık değerleri dikkate alınmaktadır. Ayrıca daha iyi sonuçlar elde edilmesi için Çoklu Otsu yöntemi geliştirilmiştir [17].

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

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

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

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

Görüntüde her sınıfa karşılık gelen sıfıncı derece birikimli momentleri denklem (2)'deki gibi hesaplanmaktadır.

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

Görüntü üzerindeki piksellerin birinci derece birikimli momentleri denklem (3)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_k = \frac{1}{\omega_k} \sum_{i \in C_k} iP_i = \frac{1}{N\omega_k} \sum_{i \in C_k} if_i \quad \text{for } k=1,2,\dots,K \quad (3)$$

Bütün imgelerin yoğunluk ortalaması denklem (4)'teki gibi sıfıncı ve birinci derece birikimli momentleri ile elde edilmektedir.

$$\mu = \sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k \quad (4)$$

Son olarak, eşiklenmiş imgenin sınıflar arası değişimi denklem (5)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\sigma_B^2 = \sum_{k=1}^K \omega_k (\mu_k - \mu)^2 = \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right) - \mu^2 \quad (5)$$

En iyi eşik değerlerin belirlenmesi için denklem (6) kullanılarak σ_B^2 ifadesini en büyük yapan $(T_1, T_2, \dots, T_{K-1})$ değerleri hesaplanmaktadır.

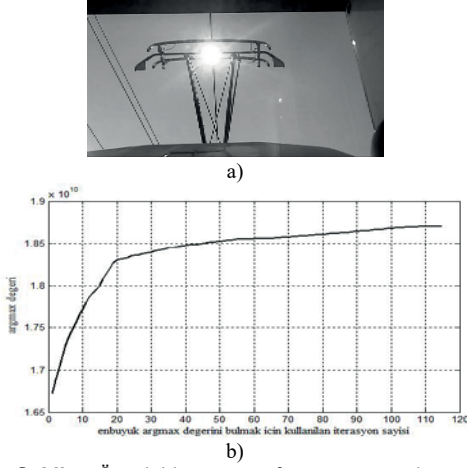
$$\begin{aligned} [\hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_{K-1}] &= \arg \max \{ \sigma_B^2 \} \\ &= \arg \max \left\{ \left(\sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right) - \mu^2 \right\} \\ &= \arg \max \left\{ \sum_{k=1}^K \omega_k \mu_k^2 \right\} \\ &= \arg \max \left\{ \sum_{k=1}^K \left[\frac{\left(\sum_{i \in C_k} if_i \right)^2}{\sum_{i \in C_k} f_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

Burada μ^2 ve N her imgede sabittir. Bu yüzden, bu sabitler en iyi eşik değerlerinin hesaplanmasında göz ardı edilebilir. Denklem (6)'da σ_B^2 ifadesini en büyük yapan $(T_1, T_2, \dots, T_{K-1})$ değerleri, en iyi eşik değerleri olarak elde edilmektedir. Önerilen yöntemde (T_1, T_2, T_3) olmak üzere üç tane eşik değeri bulunmaktadır. Bu eşik değerlerine göre en iyi σ_B^2 değerinin elde edilmesi için Şekil 3'te verilen kod parçacığı kullanılmıştır.

Kullanılan kod parçacığı, Şekil 4.a'da verilen örnek bir pantograf görüntüsü için kullanılarak Şekil 4.b'de verilen grafik elde edilmektedir.

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

Şekil-3: En iyi eşik değerlerin elde edilmesi için kullanılan kod parçacığı



Şekil-4: Örnek bir pantograf görüntüsü ve bu görüntüden en iyi σ_B^2 değerinin elde edilmesi

Şekil 3'te verilen kod parçacığı Şekil 4.a'daki görüntü için uygulanmış ve σ_B^2 değerini gösteren grafik Şekil 4.b'de verilmiştir. Şekil 4.b'de yaklaşık 100 iterasyondan sonra σ_B^2 ifadesi en büyük değere ulaşmıştır. σ_B^2 ifadesini en iyi yapan (T_1, T_2, T_3) değerleri Şekil 4.a'daki görüntü için en iyi eşik değerleri olarak elde edilmektedir. Bir görüntü için en iyi eşik değerlerin elde edilmesinde Otsu eşikleme yöntemi oldukça önemlidir. [18-19]

2.2 Sobel Kenar Çıkarım Algoritması

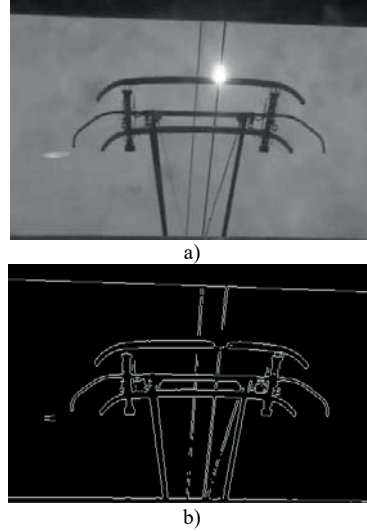
Kenar çıkarım yöntemleri görüntü işlemede özellik çıkarımı için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir [20]. Görüntü işlemede, piksellerin değerlerinin ani değişmesi görüntüde kenar bilgisi olarak algılanmaktadır. Bu çalışmada, özellik çıkarımı adımında, kenar çıkarım yöntemi olarak Sobel algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma diğer kenar çıkarım algoritmalarına göre daha basit ve FPGA ortamında kullanılmaya uygun bir algoritmadır [21,22]. Sobel kenar çıkarım algoritması görüntü matrisi üzerinde 3×3 boyutundaki S_x ve S_y matrisleri ile tarama işlemidir. S_x ve S_y matrisleri denklem (7)'de verilmektedir.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

S_x ve S_y matrisleri, $n \times m$ boyutundaki görüntünün tüm pikselleri ile konvolüsyon işlemine girerek x ve y eksenindeki değerlerin belirlenmesini sağlamaktadır. Konvolüsyon işlemi sonucunda $n \times m$ boyutunda G_x ve G_y matrisleri elde edilmektedir. Daha sonra denklem (8) kullanılarak G matrisi hesaplanmıştır. G matrisi kenar çıkarım görüntüsünü temsil etmektedir.

$$G = \sqrt{(G_x)^2 + (G_y)^2} \quad (8)$$

Şekil 5'te örnek bir pantograf görüntü kullanılarak elde edilen Sobel kenar çıkarım sonucu verilmektedir.



Şekil-5: Sobel kenar çıkarım algoritması a) Normal görüntü b) Kenar çıkarımı elde edilmiş görüntü

Pantograf katener sistemi görüntüsünün kenar çıkarımı sonucunda pantografa ait kenar çizgileri ortaya çıkmaktadır. Önerilen yöntemde hızlı bir şekilde sonucun elde edilmesi için görüntüde bulunan yatay çizgiler tespit edilerek pantograf üst çizgisi bulunmaktadır. Tespit edilen pantograf üst çizgisinin etrafında temas bölgesi tanımlanır. Temas bölgesi pantografin yüksekliğine göre sürekli değişmektedir. Ark tespitinde, temas bölgesi dikkate alındığından adaptif bir yapı oluşmaktadır. Eğer bir ışık kaynağı temas bölgesinde oluşmuş ise ark olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle temas bölgesinin pantograf üst çizgisine bağlı olarak değişmesi oldukça önemlidir. Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi sırasında ark oluşan bölgenin tespit edilebilmesi için temas bölgesinde olması gerekmektedir. Bir

görüntüde oluşan arkın tespit edilmesi için kullanılan kod parçacığı Şekil 6'da verilmiştir.

```

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

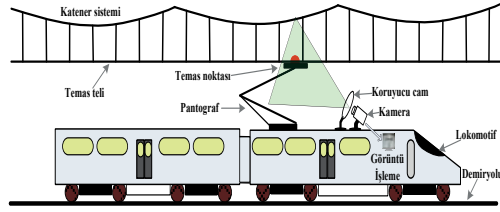
```

Şekil-6: 'Result' sinyalinin elde edilmesi için kullanılan Verilog kod parçası

Şekil 6'daki kod parçasında da verildiği gibi, eğer pantograf üst bölgesinin merkezinin düşey eksenindeki konumu, ışıklı bölgenin düşey sınırları içerisinde ise ark olarak tanımlanmaktadır. Diğer durumlarda ise oluşan ışıklı bölge, çevresel ışık kaynağı olarak tanımlanarak dikkate alınmamaktadır.

3 DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi için lokomotif üzerine bir kamera yerleştirilerek pantograf katener sisteminden görüntüler alınmıştır. Bu çalışmada görüntülerin alınması için kurulan deneysel düzenek Şekil 7'de verilmiştir.

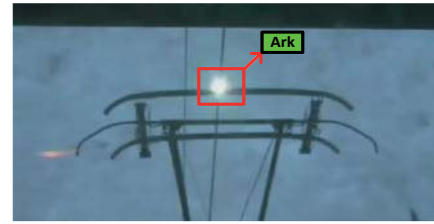


Şekil-7: Önerilen yöntemde görüntülerin alınması için kurulan deneysel düzenek

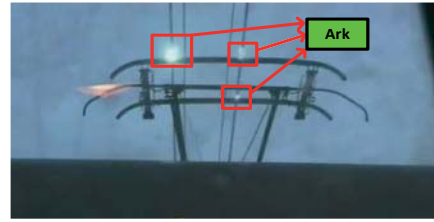
Bu çalışmada önerilen yöntemin gerçekleştirilmesi için farklı türden pantograf görüntüleri kullanılmıştır. Her bir pantograf türüne ait 20 fps hız ile toplamda 5000 frame görüntü alınmıştır. Alınan görüntülere ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Alınan görüntüler MATAB ve FPGA ortamında uygulanarak başarı oranları ve çalışma süreleri hesaplanmıştır. Ayrıca bir ve birden fazla ark oluşumu olan pantograf görüntüleri kullanılarak ark tespiti yapılmıştır. Önerilen yöntemin doğru bir şekilde çalışarak ark tespiti yapabilmesi için Şekil 8'de verilen dört farklı durumda bulunan pantograf görüntüleri kullanılmıştır.

Tablo-1: Kullanılan pantograf görüntülerinin özellikleri

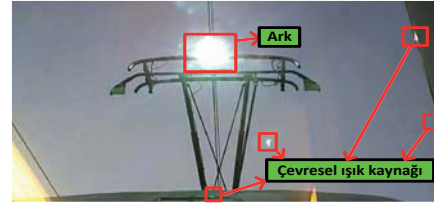
	Tür 1 (frame)	Tür 2 (frame)	Toplam (frame)
Ark içermeyen görüntü	1403	3315	4718
Bir yerde oluşan ark görüntüsü	51	135	186
Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü	6	90	96
Toplam görüntü sayısı	1460	3540	5000



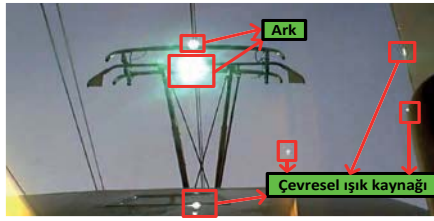
a)



b)



c)



d)

Şekil-8: Önerilen yöntemde kullanılan örnek görüntüler a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü c) Bir yerde oluşan ark görüntüsü ve farklı bölgelerde oluşan çevresel ışıklar d) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü ve farklı bölgelerde oluşan çevresel ışıklar

Şekil 8’de verilen farklı türde pantograf görüntüleri kullanılarak önerilen yöntemde kullanılacak eşik değerler belirlenmektedir. Otsu yönteminde kullanılan bu eşik değerlerin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle ne iyi eşik değerinin kullanılması daha iyi sonuç almamızı sağlamaktadır. En iyi eşik değerinin bulunması için kullanılan kod parçacığı Şekil 3’te verilmiştir. Önerilen yöntemde kullanılan eşik değerlerinin belirlenmesi için kullanılan bu kod parçacığının zaman karmaşıklığı kullanılan eşik sayısı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle kullanılan algoritmada eşik sayısı arttıkça yapılan işlemin süresi artmaktadır. Bir görüntü farklı çözünürlükte kullanılarak en iyi eşik değerinin elde edilmesi için geçen zaman Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo-2: Farklı boyutlardaki görüntülerden en iyi eşik değerlerinin hesaplanması için geçen zaman

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

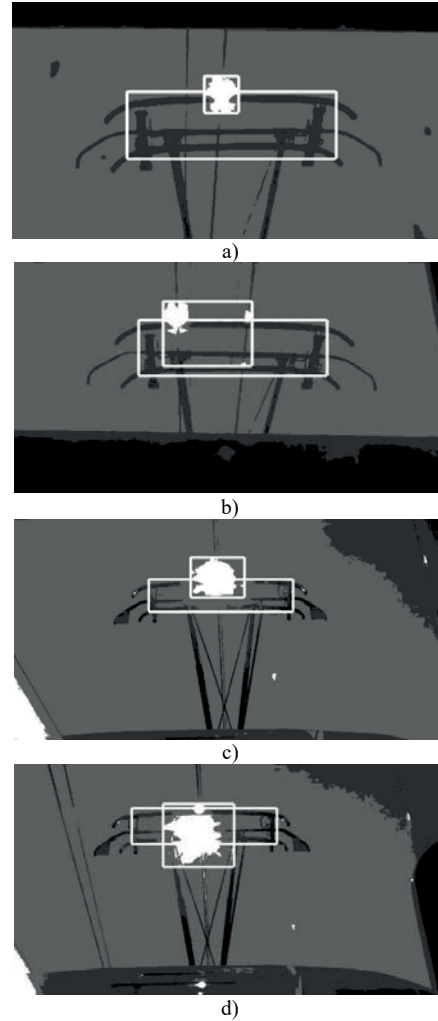
Tablo 2’de verilen sonuçlar Intel Core 2 Duo T6600 2.2GHz ve 4 GB RAM özeliğine sahip bir bilgisayar kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi bir görüntüde en iyi eşik değerlerinin elde edilmesi için geçen zaman oldukça fazladır. Önerilen yöntemin gerçek zamanlı çalışabilmesi için eşik değerlerinin önceden elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan görüntülerin eşik değerlerinin belirlenmesi için sistemin çalışması sırasında elde edilen bir videodan 100 frame kullanılarak her bir frame için en iyi eşik değerleri hesaplanmıştır. Videodan alınan 100 frameden elde edilen eşik değerleri Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo-3: Videodan alınan 100 frameden elde edilen eşik değerleri

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

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

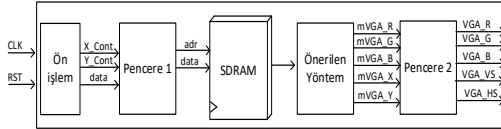
gerçekleştirilmesi için iki farklı pantograf türüne ait örnek görüntüler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 8’de verilen pantograf temas bölgesinde bir ve birden fazla yerde ark oluşmuş görüntüler kullanılmıştır. Kullanılan görüntülerde Otsu yöntemi ile ışık oluşan bölgeler elde edilirken, Sobel kenar çıkarımı ile pantograf temas bölgesi tespit edilmiştir. Bu iki yöntem sonucunda elde edilen özellikler birleştirilerek temas bölgesinde oluşan ark oluşumları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Otsu yöntemi sonucunda elde edilen görüntü ile birleştirilerek Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil-9: Örnek bir pantograf katener görüntüsünde MATLAB ile elde edilen sonuçlar a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü c) Farklı bir görüntüde bir yerde oluşan ark görüntüsü d) Farklı bir görüntüde birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü

görüntüsü, d) Farklı bir görüntüde birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü

Bu çalışmanın FPGA geliştirme kartı üzerinde uygulanması için FPGA tabanlı bir mimari oluşturulmuştur. Bu çalışmada geliştirilen FPGA mimarisi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil-10: Bu çalışmada geliştirilen FPGA mimarisi

Şekil 10'da verilen FPGA mimarisinde bulunan blokların tümü birbiriyle ilişkili olarak çalışmaktadır. Ön İşlem bloğu, kameradan gelen görüntü verilerinin bir görüntü matrisi şeklinde dönüştürülmesini sağlamaktadır. Pencere 1 bloğuna gelen görüntünün matris değerleri SDRAM hafıza bloğuna kaydedilecek formata dönüştürülmektedir. SDRAM bloğundan Önerilen yöntem bloğuna gelen veriler üzerinde önerilen yöntemin bir özellik çıkarımı adımı gerçekleştirilerek pantograf üst çubuğu tespiti yapılmaktadır. Ayrıca pantograf temas noktasında oluşan arklar tespit edilmektedir. Daha sonra Önerilen Yöntem bloğunda elde edilen sonuçlar Pencere 2 bloğunda birleştirilerek FPGA kartının VGA çıkışından monitöre aktarılmaktadır.

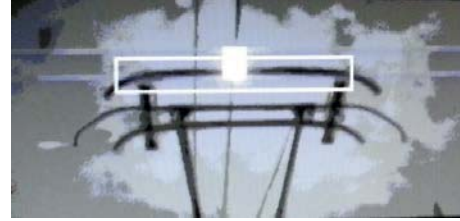
Önerilen yöntemin üzerinde çalıştırıldığı FPGA geliştirme kartının genel özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo-4: Önerilen yöntemde kullanılan FPGA geliştirme kitinin genel özellikleri

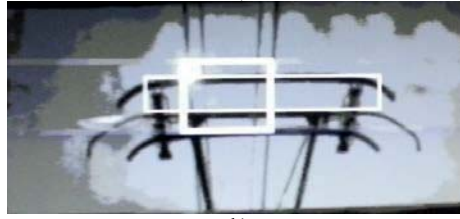
FPGA Development Kit	Elements
Cyclone III 3C16 FPGA	15,408 LEs
	56 M9K Embedded Memory Blocks
	504K total RAM bits
SDRAM	8-Mbyte Synchronous Dynamic RAM memory chip
Flash memory	4-Mbyte NOR Flash memory
SD card socket	Provides both SPI and SD 1-bit mode SD Card access
Serial Configuration device	Altera EPCS4 serial EEPROM chip
Clock inputs	50-MHz oscillator

Şekil 8'de verilen pantograf temas bölgesinde bir ve birden fazla yerde ark oluşmuş görüntüler kullanılmıştır. Bu görüntüler FPGA geliştirme kitinde

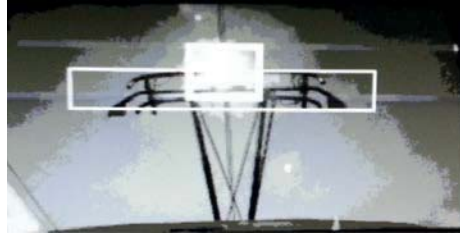
uygulanarak sonuçlar alınmıştır. Şekil 8'de verilen görüntüler kullanılarak Şekil 11'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



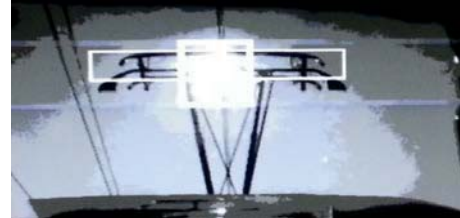
a)



b)



c)



d)

Şekil-11: Örnek bir pantograf katener görüntüsünde FPGA ile elde edilen sonuçlar a) Bir yerde oluşan ark görüntüsü b) Birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü c) Farklı bir görüntüde bir yerde oluşan ark görüntüsü, d) Farklı bir görüntüde birden fazla yerde oluşan ark görüntüsü

Şekil 11'de ortaya çıkan FPGA sonuçları ile Şekil 9'da verilen MATLAB sonuçlarında pantograf üst bölge tespiti ve ark tespiti yapılmıştır. Fakat FPGA ortamındaki sonuçlar MATLAB ortamındaki sonuçlardan farklıdır. Alınan pantograf görüntülerinin FPGA ortamına aktarılması için "Altera D5M" kamera kullanılmıştır. FPGA üzerindeki kameranın lens yapısından dolayı

görüntülerdeki ışıklardan oldukça etkilenmektedir. Böylece kullanılan görüntülerin piksel değerlerinde ışıktan kaynaklı değişimler oluşmaktadır. Bu nedenle pantograf üst bölgesi tespiti sırasında sınırlayıcı alanların boyutları ve arkın boyutu MATLAB sonuçları ile karşılaştırıldığında farklılık göstermektedir. Ayrıca sınırlayıcı alan tespitinde başarı oranının hesaplanması için “Intersection Over Union” yöntemi kullanılmıştır. MATLAB ve FPGA ortamında rastgele alınan 100 görüntü için “Intersection Over Union” değeri hesaplanmıştır. “Intersection Over Union” değeri yaklaşık olarak MATLAB için 0,68 ve FPGA için 0,52 olarak hesaplanmıştır. Bundan dolayı MATLAB ortamında önerilen yöntemin başarı oranı daha yüksektir. FPGA geliştirme kartında sonuçların incelenmesi için Şekil 12’de verilen “SignalTap II Logic Analyzer” aracı kullanılmıştır. Şekil 12.a’da verilen şartlar sağladığı için ‘Result’ değeri Lojik 1 olmuştur. Yani ark tespitinin yapıldığını göstermektedir. Şekil 12.b’de ise ark oluşmamış bir normal pantograf görüntüsünden alınan sinyaller verilmiştir. Burada ark oluşmadığı ve gerekli şartlar sağlanmadığından dolayı ‘Result’ değeri Lojik 0 olmuştur. Şekil 12’de görüldüğü gibi birçok sinyal incelenmiştir. ‘iCLK’ sinyali önerilen yöntemde kullanılan 50Mhz osilatörü, ‘Frame_Count’ sinyali kameradan alınan frame sayısını, ‘X_Count’ ve ‘Y_Count’ sinyalleri alınan pikselin konumunu, ‘line’ sinyali pantograf üst bölgesinin merkezinin düşey eksenindeki konumunu, ‘sxkucuk’, ‘sykucuk’, ‘sybyuk’ ve ‘sybyuk’ sinyalleri ark bölgesinin yatay ve düşey eksenindeki

minimum ve maksimum değerlerini, ‘Result’ sinyali ise pantograf bölgesinde oluşan arkların tespit edilmesini temsil etmektedir.

Bu çalışmada, önerilen yöntemin FPGA geliştirme kartında gerçekleştirilmesi sonucunda kullanılan kaynaklar Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo-5: Önerilen yöntemin tasarımı için gerekli kaynaklar

	Kullanım oranı
Mantık elemanları	5.537 / 15.408 (% 36)
Kombinasyonel fonksiyon	4.959 / 15.408 (% 32)
Adanmış mantık kayıtları	1.830 / 15.408 (% 12)
Toplam bellek biti	78.800 / 516.096 (% 18)
Etkin çarpanlar	0 / 112 (% 0)

Önerilen yöntem hem MATLAB hem de FPGA ortamında uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda doğruluk oranının hesaplanması için 5000 frame görüntü içerisinde rastgele 1000 frame görüntü seçilmiştir. Bu görüntülerden elde edilen sonuçlar incelenerek yöntemin doğruluk oranı Tablo 6’da ki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6’da görüldüğü üzere MATLAB ortamında önerilen yöntemin doğruluk oranı %92,6 iken FPGA ortamında dış etkenlerden daha fazla etkilendiği için doğruluk oranı %78,2’dir. Ayrıca FPGA geliştirme kartında kullanılan kameranın lens özelliklerinin iyi olmamasından dolayı doğruluk oranı MATAB ortamına göre düşüktür.



a)



b)

Şekil-12: Önerilen yöntemin FPGA’da gerçekleştirilmesi sırasında elde edilen sinyaller a) Ark oluşumun tespit edilmesinde alınan sinyal b) Ark oluşumunun olmadığı bir görüntü sırasında alınan sinyal

Tablo-6: Önerilen yöntemin doğruluk oranının hesaplanması

	TEST (frame)	MATLAB Doğru tespit sayısı (frame)	MATLAB Başarı oranı (%)	FPGA Doğru tespit sayısı (frame)	FPGA Başarı oranı (%)
Ark içermeyen görüntü	943	876	92,8	741	78,5
Bir yerde oluşan ark görüntüsü	37	34	91,8	28	75,6
Birden fazla yerde oluşan ark	20	16	80,0	13	65,0
Toplam görüntü sayısı	1000	926	92,6	782	78,2

Önerilen yöntemde kullanılan her bir görüntü üzerinde gerçekleştirilmesi için geçen zaman, hem MATLAB hem de FPGA ortamında ölçülerek Tablo 7’te verilmiştir.

Tablo-7: Önerilen yöntemin farklı boyutlardaki görüntüler için zaman analizi

Uygulama	Görüntü Boyutu (piksel)	Ortalama (ms)	Standart Sapma (ms)
MATLAB	1280x720	32,53	0,53
	640x480	12,40	0,12
	320x240	4,33	0,08
FPGA	1280x1024	18,43	0,46
	640x480	5,68	0,33
	320x240	2,53	0,12

Tablo 7’de MATLAB ve FPGA’ da her bir görüntü boyutu için uygulama 10 defa çalıştırılmıştır. Elde edilen bu zaman değerleri kullanılarak her görüntü boyutuna ait ortalama geçen süre ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. FPGA ortamında ise tek bir görüntü boyutu için sistem çalıştırılarak geçen süre hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin uygulaması “Intel Core 2 Duo T6600 ve 2.2GHz” özelliklerine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Tablo 7’te verilen önerilen yöntemin performans tablosundaki değerler, literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yapılan bir çalışmada, pantograf doğrularının tespiti için şekil tabanlı bir yöntem önerilmiştir [14]. Literatürdeki bu çalışmada “Intel Pentium 4 ve 2.4 MHz” özelliklerine sahip bir bilgisayarda, 640x480 boyutundaki görüntüler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki yöntemin zaman analizi Tablo 8’ de verilmiştir.

Tablo 8’ de literatürde yapılan çalışmanın birçok farklı durumlardaki zaman analizi verilmiştir. Literatürde yapılan çalışma ile önerilen yöntem karşılaştırıldığında, literatürde başarısız işleme sırasında geçen zaman önerilen yöntemin bütün durumlarından fazladır. Ayrıca önerilen yöntemde her bir görüntü boyutu için zaman analizi sonuçları verilmişken literatürde kullanılan görüntünün boyutları belirli değildir. Önerilen yöntemde küçük

boyutlarda görüntü kullanılması durumunda literatürde yapılan çalışmalardan daha hızlı bir sonuç vermektedir.

Tablo-8: Literatürde yapılan çalışmanın zaman analizi [14]

Uygulama	Ortalama (ms)	Standart Sapma (ms)
Bir alanın başarılı işlenmesi	13,9	5,17
Bir alanın başarısız işlenmesi	43,6	14,86
Pantograf üst çubuğu tespiti	1,9	1,80
Pantograf alt çubuk tespiti	1,7	0,26
Pantograf yan çubuk tespiti	0,9	0,25

4 Sonuçlar

Son yıllarda elektrikli trenlerin gelişmesiyle birlikte pantograf katener sistemler üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Pantograf katener sistemler elektrikli trenler için kritik bir bileşen olduğu için bu sistemlerde oluşan arızaların tespit edilmesi de oldukça önemlidir. Pantograf katener sistemlerde oluşan arızaların tespit edilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Genel olarak akım ve gerilim tabanlı ya da görüntü işleme tabanlı arıza tespit yöntemleri sunulmaktadır. Bu çalışmada, pantograf katener sistemlerde temas bölgesinde oluşan arızaların tespit edilmesi için adaptif bir yöntem sunulmuştur. Önerilen bu yöntemde farklı görüntüler kullanılarak MATLAB ve FPGA ortamında sonuçlar elde edilmiştir. Farklı tür pantograf görüntüleri kullanılarak bu görüntülerde Otsu ve Sobel algoritmaları uygulanmıştır. Kullanılan algoritmalar sonucunda elde edilen sonuçlar birleştirilerek temas bölgesinde oluşan ark arızaları tespit edilmiştir. Önerilen yöntemde bir veya birden fazla bölgede ark oluşan görüntüler kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ark oluşumu, pantograf üst bölgesi ile katener telinin teması sırasında oluşmaktadır. Ark tespiti işleminin doğruluğunu arttırmak için öncelikle pantograf üst bölgesi tespit edilmektedir. Pantograf üst

bölgesinde oluşan ışıklar ark olarak tanımlanmaktadır. Diğer bölgelerde oluşan ışıklar çevresel ışık kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Böylece görüntü işleme ile pantograf üst bölgesi tespit edilerek ark tespitinin yapılması sonuçlarının doğruluğunu arttırmaktadır. Ayrıca önerilen yöntem, hem MATLAB hem de FPGA ortamında gerçekleştirilmiş olması bu yöntemin gerçek zamanlı ve farklı sistemlerde kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından desteklenmiştir. Proje No: 112E067.

Kaynaklar

- [1] Karakose, E., Gencoglu, M.T., Karakose, M., Yaman, O., Aydın, I., Akin, E., *A new arc detection method based on fuzzy logic using S-transform for pantograph-catenary systems*. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-18, 2015.
- [2] Karakose E., Gencoglu MT. *An investigation of pantograph parameter effects for pantograph-catenary systems*. Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) Proceedings, 2014 IEEE International Symposium on. IEEE, 2014.
- [3] Aydın I, Karakose M, Akin E. *Anomaly detection using a modified kernel-based tracking in the pantograph-catenary system*. Expert Systems with Applications 42.2, 938-948, 2015.
- [4] Liu Y, Chang GW, Huang HM. *Mayr's Equation-Based Model for Pantograph Arc of High-Speed Railway Traction System*, IEEE Transactions on Power Delivery, (25), 2025-2027, 2010.
- [5] Midya S, Bormann D, Schütte T, Thottappillil R. *DC Component From Pantograph Arcing in AC Traction System—Influencing Parameters, Impact, and Mitigation Techniques*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, (53), 18-27, 2011.
- [6] Barmada S, Raugi M, Tucci M, Romano F. *Arc detection in pantograph-catenary systems by the use of support vector machines-based classification*, IET Electrical Systems in Transportation Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [7] Ostlund S, Gustafsson A, Buhrkall L, Skoglund M. *Condition monitoring of pantograph contact strip*, International Conference on Railway Condition Monitoring, 1-6, 2008.
- [8] Hamey LGC, Watkins T, Yen SWT. *Pancam: In-Service Inspection of Locomotive Pantographs*, 9th Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society on Digital Image Computing Techniques and Applications, 439-499, 2007.
- [9] Sacchi M, Cagnoni S, Spagnoletti D, Ascari L, Zunino G, Piazzi A. *PAVISYS: A computer vision system for the inspection of locomotive pantographs*, Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control, 2011.
- [10] Ocoleanu CF, Popa I, Manolea G, Dolan AI, Vlase S. *Temperature Investigation in Contact Pantograph - AC Contact Line*, International Journal Of Circuits. Systems and Signal Processing, 154-163, 2009.
- [11] Facchinetti A, Bruni S. *Hardware-in-the-loop hybrid simulation of pantograph-catenary interaction*, Journal of Sound and Vibration, 2783-2797, 2012.
- [12] Midya S, Bormann D, Schütte T, Thottappillil R. *Pantograph Arcing in Electrified Railways—Mechanism and Influence of Various Parameters—Part I: With DC Traction Power Supply*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1931- 1939, 2009.
- [13] Yaman, O., Karaköse, E., Aydın, I., Karaköse, M., Akin, E., *Pantograf-Katener Sistemler için Bulanık Mantık Tabanlı Belirlenen Pantograf Modeli Kullanılarak Ark Tespiti Yaklaşımı*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(4), 724-739, 2017.
- [14] Boguslavskii AA, Sokolov SM. *Detecting Objects in Images in Real-Time Computer Vision Systems Using Structured Geometric Models*, Pleiades Publishing, 177-187, 2006.
- [15] Li M, Ze-yong W, Xiao-rong G, Li W, Kai Y. *Edge Detection on Pantograph Slide Image*, International Congress on Image and Signal Processing, 1 - 3, 2009.
- [16] Otsu, N. *A threshold selection method from gray-level histograms*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 9(1), 62-66, 1979.
- [17] Liao P. S., Chen T. S. and Chung P.C., *A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding*, Journal of Information Science and Eng. 17, pp. 713-727, 2001.
- [18] Aydın, İ., Karaköse, E., Karaköse, M., Gençoğlu, M. T. and Akin, E. *A new computer vision approach for active pantograph control*. IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 1-5, 2013.
- [19] Chen Q, Zhao L, Lu J, Kuang G, Wang N, Jiang Y. *Modified two-dimensional Otsu image segmentation algorithm and fast realisation*, IET Image Processing, (6)4, 426-433, 2012.
- [20] AlSaeed DH, Bouridane A, Elzaart A, Sammouda R. *Two modified Otsu image segmentation methods based on Lognormal and Gamma distribution models*, International Conference on Information Technology and e-Services, 1-5, 2012.
- [21] Karakose, M., Yaman, O., Aydın, I., Karakose, E. *Real-time condition monitoring approach of pantograph-catenary system using FPGA*. International Conference on In Industrial Informatics (INDIN), pp. 481-486, 2016.
- [22] Yaman, O., Karaköse, M., Akin, E., *Improved Rail Surface Detection and Condition Monitoring Approach with FPGA in Railways*, 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences, pp. 108-111, 2017.