

ZAMAN SERİSİ VERİ MADENCİLİĞİ KULLANAN DESTEK VEKTÖR MAKİNALAR TABANLI ARIZA SINIFLANDIRMA ALGORİTMASI

Suna YILDIRIM¹

Erhan AKIN²

İlhan AYDIN³

Mehmet KARAKÖSE⁴

^{1, 2, 3, 4}Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ

^{1, 2, 3, 4}e-posta: {syildirim,eakin,iaydin,mkarakose}@firat.edu.tr

Anahtar sözcükler: Destek vektör makinalar, arıza sınıflandırma, zaman serisi veri madenciliği, asenkron motor

ABSTRACT

Induction motors are used as the workhorses in many industrial plants. Though these motors are reliably, they are susceptible to many types of faults. These faults can be detected in an initial stage in order to prevent completely motor faults. In this study, broken rotor bars have been detected via time series data mining and support vector machines. One and two broken rotor bars faults can be classified by developed algorithm. Three phase motor currents are acquired from experimental setup. Park's vector approach has been used in order to acquire the new time series. Time series data mining have been used as feature extraction and preprocessing step and support vector machines are used to classification process.

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan motorların %80 gibi büyük bir kısmını asenkron motorlar oluşturmaktadır [1]. Asenkron motorlar birçok uygulamada kullanılır. Bu motorların büyük bir kısmından petrokimyasal, madencilik ve ev aletleri ile ilgili endüstrilerde faydalanılmaktadır. Ayrıca güvenliğin üst düzeyde olduğu askeri ve uzay ile ilgili uygulamalarda tercih edilirler. Bu yaygın kullanımların en büyük sebepleri basit yapıları, güvenilirlikleri ve çok az periyodik bakıma ihtiyaç duymalarından gelir [2].

Asenkron motorların çalışma ortamları genellikle aşındırıcı ve nemlidir. Bu ortamlarda sürekli çalışan motorların belirli kısımlarında zamanla arızalar oluşur. Arızaların %10'a yakın bir kısmı motorun rotor bileşeni ile ilgilidir [3]. Bu motorların statoru için ani açılma ve kapanma problemlerine ek koruma cihazları geliştirilmesine karşın rotor ile ilgili herhangi bir koruma yapılmamıştır [1]. Arıza teşhisinin amacı motor tamamen bozulmadan önce motordaki performans düşüklüklerinin izlenmesi ile arızaları belirlemektir. Motorların izlenmesi için farklı duyarğalar kullanılmaktadır. Arıza teşhisinde titreşim, hız, akı gibi pahallı motor parametreleri yerine maliyet açısından daha ucuz olan akım duyarğaları tercih edilir. Asenkron motorlarda arıza teşhisi için model tabanlı teknikler ve uzman bilgisi gibi pahallı ve hassas ölçümler gerektiren geleneksel arıza teşhis yöntemleri kullanılmıştır. Son yıllarda geleneksel

arıza teşhis yöntemlerinin yerini yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik algoritmalar, yapay bağışık sistemler ve veri madenciliği gibi akıllı arıza teşhis teknikleri almıştır [4]. Akıllı arıza teşhis yöntemleri motordan duyarğalar ile alınan sinyaller üzerinde işaret işleme teknikleri ile arızaları belirler.

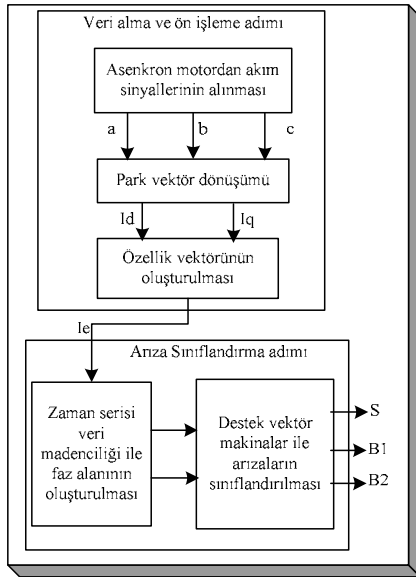
Ayhan ve diğ. [5] farklı yük durumları altında bir kırık rotor arızasını teşhis etmek için motor akım imza analizi kullanmıştır. Arıza teşhis algoritmasının girişlerini motor akımı ve rotor hızı sinyalleri oluşturmaktadır. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık ile tek fazlı bir asenkron motorun mil yatağı ve stator arızaları akım ve hız bilgileri kullanılarak teşhis edilmiştir [2]. Destek vektör makinalar kullanılarak kırık rotor, kırık sonlandırıcı, mil yatağı ve stator arızaları teşhis edilmiştir [6, 7]. Bu iki çalışmada titreşim analizi ve motor akım imza analizi gibi özellik çıkarımı yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kullanılması için en az üç ayrı duyarğadan bilginin alınması gerekir. Ayrıca motor akım imza analizi eğer motor bir şebekeden besleniyorsa iyi sonuçlar vermesine rağmen, PWM ile beslenen motorlar için uygun değildir. Çünkü bu tür motorlarda hız değişken olmaktadır [8]. Zaman serisi veri madenciliği ile kırık rotor, eksantriklik ve arızaları teşhis edilmiştir [9]. Arıza teşhisi için moment bilgisi üzerinden filtreleme işlemi yapılarak arızalar teşhis edilmiştir. Benbouza ve diğ. [10] kırık rotor arızalarını belirlemek için park vektör yaklaşımı kullanmıştır. Fakat bu çalışmada arızalar teşhis edilmeyip sadece arıza ile ilgili özellikler çıkarılmıştır. Ayrıca arıza belirlemede etkisi olmayan özellikler de arıza teşhis algoritmasında kullanılmıştır. Aydın [11] iki farklı motordaki kırık rotor, eksantriklik, sarım ve mil yatağı arızalarını teşhis etmek için akıllı hesaplama teknikleri ve veri madenciliği kullanmıştır. Yapay bağışık sistemler ve motor akım imza analiz kullanılarak asenkron motor arızaları teşhis edilmiştir [12].

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorda oluşan kırık rotor çubuğu arızalarının belirlenmesi için zaman serisi veri madenciliği ve destek vektör makinalar kullanılmıştır. Arıza teşhisi için üç fazlı asenkron motorun faz akımları yeterlidir. Motorun faz akımları üzerinden park vektör dönüşümü ile elde edilen

vektörler geliştirilen algoritma ile birleştirilerek yeni bir zaman serisi elde edilmiş ve zaman serisi veri madenciliği yöntemi ile iki boyutlu faz alanına dönüştürülmüştür. Faz alanında destek vektör makinalar ile arızalar sınıflandırılmıştır. Önerilen yöntemin en önemli avantajı sadece akım verileri kullanması ve basit yapıda olmasıdır. Daha önce yapılan çalışmalar en az iki duyargadan alınan verileri kullanarak veya maliyetli ölçümler gerektiren duyargalara ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca park vektör yaklaşımını kullanan algoritmalar genelde daha kolay ayırt edilebilecek arızaları teşhis etmişlerdir. Bu çalışmada motor performansını daha az düşüğü ve sadece akımdan arızanın belirlenmesinin zor olduğu bir arıza tipi incelenmiştir.

2. ARIZA TEŞHİSİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM

Kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için önerilen yöntem motorun üç faz akımına ihtiyaç duyar. Alınan üç faz akımı üzerinde gerekli ön işleme adımları ile özellik vektörleri elde edildikten sonra zaman serisi veri madenciliği yöntemi ile zaman serisinin faz alanı oluşturulur. Sağlam ve arızalı motor verilerinin faz alanı dağılımları destek vektör makinalar ile sınıflandırılarak arızalar teşhis edilmektedir. Şekil 1’de önerilen arıza sınıflandırma yönteminin şeması verilmiştir.



Şekil 1 Arıza sınıflandırma şeması

Şekil 1’e göre a, b ve c asenkron motorun üç fazını göstermektedir. Bu üç faz akımı üzerinden park vektör dönüşümü ile I_d ve I_q park vektör bileşenleri elde edilmektedir. Bu iki bileşen ile özellik vektörü I_e elde edildikten sonra bu vektör faz alanına dönüştürülür ve destek vektör makinalar ile arızalar sınıflandırılır. Sistemin çıkışlarından S sağlam motor durumunu, B₁ bir ve B₂ iki kırık rotor çubuğu arızalarını göstermektedir. Kullanılan yöntem aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

2.1. Veri Ön İşleme Modülü

Üç fazlı bir asenkron motorda stator akımlarının toplamı sıfırdır [10]. Park vektör yaklaşımı üç fazlı asenkron motorun hat akımlarının iki boyutlu gösterimini elde etmek için kullanılır. Park vektörünün genel biçimi denklem (1)’de verilmiştir.

$$I_d = \sqrt{\frac{2}{3}}a - \frac{1}{\sqrt{6}}b - \frac{1}{\sqrt{6}}c \quad (1)$$

$$I_q = \frac{1}{\sqrt{2}}b - \frac{1}{\sqrt{2}}c$$

İdeal şartlar altında dengeli üç faz akımının park vektör dönüşümü denklem (2)’deki gibidir.

$$I_d = \frac{\sqrt{6}}{2} I_{\max} \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}}{2} I_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Burada I_{\max} besleme akımının maksimum değerini ve ω ise besleme frekansını gösterir. Park vektörü önemli performans düşüklüklerinin olduğu açık faz, gerilim dengesizliği gibi arızaları direkt olarak belirlemek için tek başına yeterlidir. Fakat kırık rotor arızalarını belirlemek için yeterli değildir. Bu amaçla şekil 2’de yeni bir özellik vektörü olan I_e ’yi elde etmek için algoritmanın bir bölümü verilmiştir.

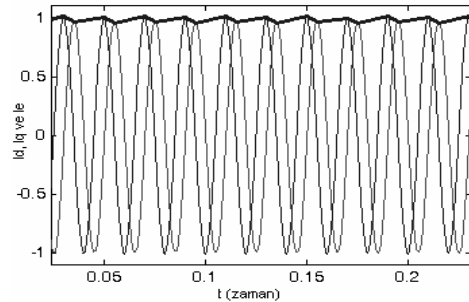
```

s=0;
While(i<boyut(Id))
  if (Id(i)>Id(i-1))&(Id(i)>0)&(Id(i)<Id(i+1))
    continue;
  if(Id(i)>0)&(Id(i)>Id(i-1))&(Id(i)>Id(i+1))
    Ie(s)=x(i);
    s=s+1;
end

```

Şekil 2 Özellik vektörünün elde edilmesi

Yukarıdaki algoritma ile sadece I_d park vektör bileşeninin tepe noktasına yakın bölgelerdeki değişimlerden oluşan I_{e1} vektörü elde edilmiştir. Bu işlem I_q vektörü için de tekrarlanarak I_{e2} elde edilir ve iki vektör birleştirilerek I_e vektörü elde edilir. Şekil 3’te yöntemin uygulandığı bir örnek verilmiştir.



Şekil 3 Elde edilen özellik vektörü

Elde edilen özellik vektörü zaman serisi veri madenciliği yöntemine giriş olarak verilmeden önce [0,1] aralığında normalleştirilmiştir.

2.2. Zaman serisi Veri Madenciliği Modülü

Bir zaman serisi belirli zaman aralıklarında bir sistemden alınan verilerdir. Denklem (3)'te bir zaman serisi örneği verilmiştir. Burada t zamanı ve N örnek sayısını gösterir. Zaman serisi veri madenciliği yöntemi bir zaman serisinden ilginç örüntülerin çıkarılması amacıyla serinin bir faz alanında incelenmesidir. Zaman serisinden çıkarılması gereken ilginç örüntüler olay olarak ifade edilir [13]. Farklı amaçlar için kullanılan zaman serisinin olayları farklı anlamlar ifade eder. Örneğin sismik bir zaman serisinde depremler önemli olaylar olarak alınırken, günlük stok fiyatlarını tutan bir zaman serisinde ani fiyat düşüşü veya yükselişi bir olaydır. Aynı zamanda bir asenkron motorda oluşan arızalar zaman serisi veri madenciliği için bir olaydır [9].

$$X = \{x_t, t = 1 \dots N\} \quad (3)$$

Zaman serisi veri madenciliği yöntemi, veri madenciliği ve lineer olmayan zaman serisi analizinin birleşiminden oluşmaktadır. Zaman serisinin amacına göre herhangi bir optimizasyon algoritması veya sınıflandırma algoritması veri madenciliği kısmı için kullanılır. Bu çalışmadaki amaç farklı çalışma durumlarını ayırt etmek olduğundan bir sınıflandırma işlemi yapılacaktır. Zaman serisi veri madenciliği yönteminde bir zaman serisi faz alanında incelenir. Denklem (3)'teki zaman serisinin faz alanı denklem (4)'teki gibi oluşturulur.

$$F = \begin{bmatrix} x_{1+(b-1)\tau} & \dots & x_{1+\tau} & x_1 \\ x_{2+(b-1)\tau} & \dots & x_{2+\tau} & x_{1+\tau} \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & \cdot & \\ x_N & \dots & x_{N-(b-2)\tau} & x_{N-(b-1)\tau} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde b gömülme boyutunu ve τ ise zaman gecikmesini gösterir. Faz alanı matrisinde dikkat edilmesi gereken nokta matrisin her satırının faz alanında bir noktaya karşılık gelmesidir. Örneğin gömülme boyutu $b=3$ ve zaman gecikmesi $\tau=2$ olarak seçildiğinde faz alanında bir nokta $F_t = (x_{t-4}, x_{t-2}, x_t)$ ile ifade edilir. Dolayısıyla üç boyutlu bir faz alanı oluşturulur. Zaman gecikmesi ve gömülme boyutu rasgele seçilmesi algoritmanın performansını kötü yönde etkileyebilir. Zaman gecikmesi küçük olduğunda faz alanındaki noktalar birbirine çok yakın olduklarından zaman serilerinin ayırt edilmesi zorlaşır. Aynı zamanda zaman gecikmesi çok büyük olduğunda bütün noktalar faz

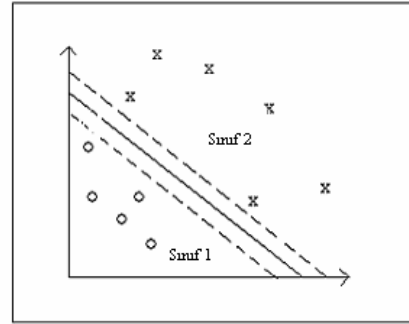
alanı boyunca dağıldığından farklı zaman serileri birbirine benzer ve seriler ayırt edilemez. Zaman gecikmesinin belirlenmesi için karşılıklı bilgi yöntemi ve gömülme boyutunun belirlenmesi için yanlış en yakın komşu algoritması kullanılır [13]. Böylece optimum bir faz alanı oluşturulur.

Bu çalışmada şekil 3'te elde edilen özellik vektörünün faz alanı oluşturulmuştur. Bir sonraki adımda faz alanlarına göre arızaların sınıflandırılması yapılmıştır.

2.3. Destek Vektör Makinalar Modülü

Destek vektör makinaları 1960'ların sonunda V. Vapnik tarafından geliştirilen bir istatistiksel öğrenme metodu olup iki sınıflı bir sınıflandırma yöntemidir. Bu yöntem el yazısı tanıma, ses tanıma, meme kanseri tahmini, biyoinformatik ve uzaysal veri analizi gibi birçok alanda sıkça kullanılmaktadır. Destek vektör makinalarının en basit modeli lineer olarak ayrılabilen girişler için uygulanan modeldir. Bu durumda, iki sınıflı birbirinden ayıran hiperdüzlem denklem (5)'teki gibi verilebilir. Burada w ağırlığı, x girişleri ve b ise eğim terimi olarak ifade edilir. Etiket değeri +1 sınıfına ait olan veriler için $f(x)=+1$ ve etiketi -1 sınıfına ait olan veriler içinse $f(x)=-1$ 'dir. Şekil 4'te destek vektörleri ve hiperdüzlem ile ayrılmış giriş örnekleri verilmiştir.

$$f(x) = w \cdot x + b \quad (5)$$



Şekil 4 Hiperdüzlemle ayrılmış giriş örnekleri

Çoğu gerçek dünya uygulamaları lineer olarak ayrılabilen duruma uygun değildir. Bu durumda giriş verileri klasik yöntemle çözülmeyebilir. Böyle problemlerde ise lineer olmayan sınıflandırma uygulanmaktadır. Lineer olmayan sınıflandırmada, giriş verileri Kernel fonksiyonları adı verilen fonksiyonlardan geçirilip özellik uzayına düşürülürler ve burada sınıflandırma yapılır. En çok kullanılan kernel fonksiyonları denklem (6), (7) ve (8)'de verilmiştir.

$$K(x, y) = (x \cdot y)^d \quad (6)$$

$$K(x, y) = \exp(-\|x - y\|^2 / (2\sigma^2)) \quad (7)$$

$$K(x, y) = \tanh(\kappa(x \cdot y) + \phi) \quad (8)$$

Denklem (6)'daki d değeri polinomun derecesini, denklem (7)'deki σ değeri radyal tabanlı fonksiyon parametresi ve denklem (8)'deki ϕ değeri sigmoid kernel parametresidir.

Faz alanı oluşturulduktan sonra destek vektör makinaları kullanılarak faz alanındaki dağılıma göre arızalar sınıflandırılır. Buradaki sınıflandırma lineer olmayan bir sınıflandırma yöntemi olup çok sınıflı sınıflandırma işlemi yapılmıştır.

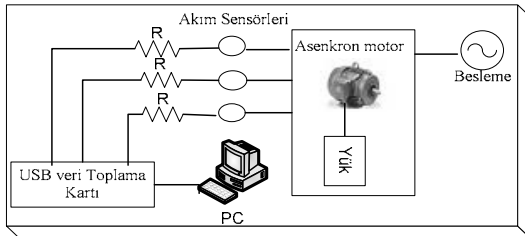
3. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen arıza sınıflandırma algoritmasını uygulamak için MATLAB programı kullanılmıştır. Arıza sınıflandırma için üç fazlı gerçek bir asenkron motordan akım sinyalleri alınmıştır. Kullanılan motor ile ilgili parametreler tablo 1'de gösterilmiştir. Kırık rotor arızalarını oluşturmak amacıyla iki adet rotor çubuğu delinmiştir. İlk önce bir kırık rotor arızası oluşturulmuş, sonra bu rotorun yanındaki rotor çubuğu delinmiştir. Asenkron motordan verileri elde etmek amacıyla Advantech'in 16 bitlik bir veri toplama kartı kullanılmıştır. Akım verileri 3000 örnek/saniye ile 3 saniye boyunca alınıp kaydedilmiştir.

Tablo 1 Deneyde kullanılan asenkron motorun özellikleri

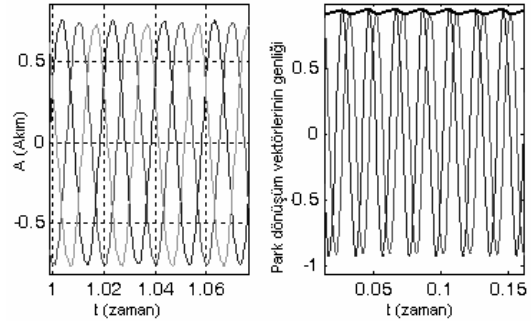
Özellik	Değer
Güç	0.37 Kw
Giriş gerilimi	380 V
Tam yük akımı	1.2 A
Frekans	50 Hz
Kutup sayısı	4
Rotor slot sayısı	22
Tam yükte çalışma hızı	1390 Rpm

Asenkron motordan veriler 2 farklı hızda alınmıştır. Motora verilen besleme gerilimleri 340 ve 380 V olarak seçilmiştir. Üç faz akımından elde edilen akım verileri arıza sınıflandırma için kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneğinin şeması şekil 5'te görülmektedir.



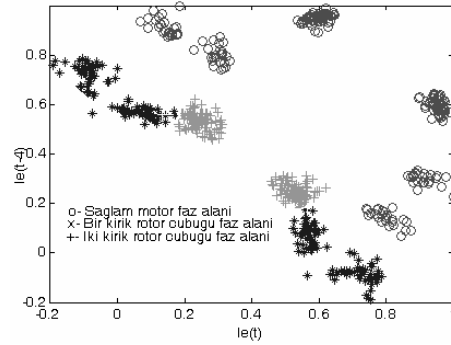
Şekil 5 Deney düzeneği şeması

Üç faz akımı denklem (1)'de verilen dönüşüm kullanılarak park vektörüne dönüştürülmüştür. Her bir sağlam ve arızalı motor için elde edilen park vektör bileşenlerinden yeni özellik vektörü şekil 2'deki algoritma kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 6'da kullanılan motorun faz akımları, elde edilen park vektörü ve özellik vektörü görülmektedir.



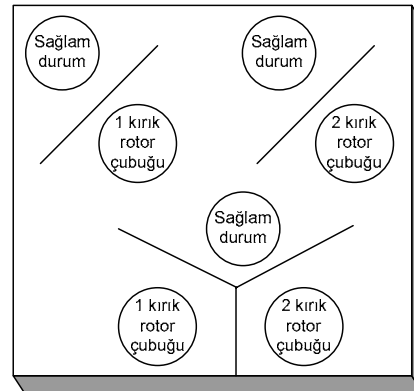
(a) Faz akımları (b) Park ve özellik vektörleri
Şekil 6 Bir kırık rotor çubuğuna sahip motorun faz akımları ve özellik vektörleri

Özellik vektörü elde edildikten sonra her bir durum için ayrı ayrı faz alanları oluşturulmuştur. Faz alanı için gömülme boyutu iki ve zaman gecikmesi dört olarak seçilmiştir. Şekil 7'te ayrı ayrı oluşturulan faz alanlarının birleştirilmiş hali görülmektedir.



Şekil 7 Farklı durumların birleştirilmiş faz alanı

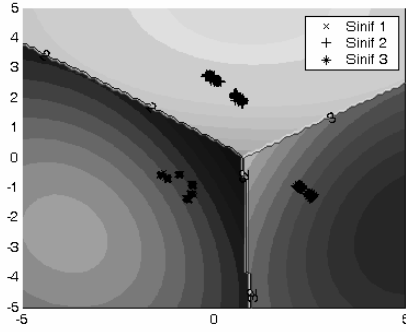
Destek vektör makinaları iki sınıflı bir sınıflandırma yöntemi olmasına rağmen bazı yöntemler kullanılarak çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde kullanılabilir. Kullanılan yöntemlere birine karşı bir, birine karşı diğerleri ve yönlendirilmiş çevrimsiz çizge örnekleri verilebilir. Birine karşı biri yönteminde ikili sınıflar alınır ve birbirinden ayrılır ve $(K*(K-1))/2$ tane sınıflandırıcı yapılandırılır. Bu yöntemin çalışma prensibi şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8 Birine-karşı-biri metodu

Yapılan bu çalışmada üç sınıflı bir sınıflandırma yapılmıştır. Sağlam duruma ek olarak, bir kırık rotor

çubuğu ve iki kırık rotor çubuğu arızaları teşhis edilmiştir. Radyal tabanlı kernel fonksiyonu seçilmiştir. Bu fonksiyonun σ parametresi 5 olarak ve C yaptırım parametresi ise 10000 olarak alınmıştır. Her bir sınıftan 200 veri yani toplam 600 veri kullanılmıştır. Destek vektör makinalar tabanlı arıza sınıflandırma algoritmasının sonuçları şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9 Arıza sınıflandırma algoritması sonuçları

Şekil 9'dan da görüldüğü gibi arızalar başarılı bir şekilde sınıflandırılmaktadır. Kullanılan yöntem sadece faz akımlarını kullanmaktadır. Ayrıca zaman serisinden elde edilen özellik vektörü ile oluşturulan faz alanı destek vektör makinalar ile sınıflandırmak için uygundur.

4. SONUÇ

Bu çalışmada asenkron motorlarda oluşan kırık rotor arızalarının sınıflandırılması için zaman serisi veri madenciliği ve destek vektör makinalar kullanılmıştır. Arıza teşhisi için sadece faz akımları yeterlidir. Park vektör dönüşümü kullanan çalışmalar daha çok arızaların kolayca belirlenebileceği arıza türlerini ayırt etmiştir. Burada park vektöründen elde edilen yeni özellik vektörü sadece kırık rotor ile ilgili kısımlar elde edilmiştir. Daha önce zaman serisi veri madenciliği yöntemini kullanan arıza teşhis şemaları moment ve hız bilgisi gibi elde edilmesi zor ve pahalı olan duyarılardan gelen bilgileri kullanmıştır. Literatürde kırık rotor arızaları için en çok kullanılan yöntem olan motor akım imza analizi de hız bilgisi gerektirmektedir. Destek vektör makinaların lineer olmayan sınıflandırma özelliklerinden faydalanılarak faz alanında sınıflandırma işlemi yapılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Benbouzid M.E., Kliman G.B., What Stator Current Processing based technique to use for induction motors rotor faults?, IEEE TRANSACTION ON ENERGY CONVERSION, Vol 18, No 2, pp 238-244, 2003.

[2] Chow M. Y., Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection, WORLD SCIENTIFIC, 1997.

[3] Czeslaw, T. K., T. O. Kowalska, Neural Network Application for Induction Motor Fault Diagnosis,

MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SIMULATION, Vol. 63, pp 435-448, 2003.

- [4] Filipetti F., Franceschini G., Tassoni C., Vas P., Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques, IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol 47, No 5, pp 994-1004, 2000.
- [5] Ayhan B., Chow M.Y., Song M.H., Multiple Signature Processing-based Fault Detection Schemes for Broken Rotor Bar in Induction Motors, IEEE TRANSACTION ON ENERGY CONVERSION, Vol. 20, No. 2, pp 336-343, 2005.
- [6] Pöyhönen, S., Support Vector Machine Based Classification in Condition Monitoring of Induction Motors, Helsinki University of Technology Control Engineering Laboratory, 2004.
- [7] Shin H. J., Eom D. H., Kim S. S., On-Class Support Vector Machines-An Application in Motor Fault Detection and Classification, COMPUTER & INDUSTRIAL ENGINEERING, Vol 50, pp 396-408, 2005.
- [8] Ondel O.,Boutleux E., Clerc G., A Method to Detect Broken Bars in Induction Machine Using Pattern Recognition Techniques, IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol 42, No 4, pp 916-923, 2006.
- [9] Bangura J. F., Povinelli R. J., Demerdash, N.A.O., Brown R. H., Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data Mining and Time-Stepping Coupled FE-State Space Techniques, IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol 39, No 4, pp 1005-1013, 2003.
- [10] Benbouzza N., Benyettou A., Bendiabdellah A., An Advanced Park's Vectors Approach for Rotor Cage Diagnosis, IEEE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTROL, COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING, pp 461-464, 2004.
- [11] Aydın İ., Arıza Teşhisinde Veri Madenciliği ve Yumuşak Hesaplama Tekniklerinin Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, 2006.
- [12] Aydın İ., Karaköse M., Akın E., Yapay Bağışıklık Sistemi Tabanlı Arıza Teşhis Algoritması, IEEE 14. SİNYAL İŞLEME VE İLETİŞİM UYGULAMALARI KURULTAYI (SİU2006), pp 1-4, 2006.
- [13] Feng X., Huang H., A Fuzzy Set Based Reconstructed Phase Method for Identification of Temporal Patterns in Complex Time Series, IEEE TRANSACTION ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING, Vol 17, No 5, pp 601-613, 2005.