

NEGATİF SEÇİM TABANLI BULANIK ARIZA TEŞHİS MODELİ

İlhan AYDIN, Mehmet KARAKÖSE ve Erhan AKIN
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ
iaydin@firat.edu.tr, mkarakose@firat.edu.tr, eakin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23.01.2009 ; Kabul/Accepted: 05.10.2009)

ÖZET

Arıza teşhisinin sistemlerde sürekliliği sağlamak açısından önemli olduğu, bu alandaki çalışmaların gün geçtikçe artmasından da görülmektedir. Akıllı hesaplama teknikleriyle arıza teşhis yöntemlerinin etkinliği artırılmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmada bulanık mantık ve negatif seçim tabanlı bir arıza teşhis yöntemi önerilmiştir. Önerilen algoritmada yapay bağışıklık sisteminin bir bileşeni olan negatif seçim algoritması kullanılarak kırık rotor ile ilgili özellik çıkarılmaktadır. Ayrıca motor akım imza analizi kullanılarak elde edilen spektrum değişim yönü, bulanık mantık sistemine verilerek arıza teşhisi yapılmaktadır. Negatif seçim algoritması için yeni bir ağırlıklandırılmış afinite ölçümü kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile asenkron motorlarda oluşan stator arızası, mil yatağı sürtünme arızası ve kırık rotor arızaları teşhis edilebilmektedir. Yöntemin çıkışı arıza türü ile birlikte çoklu arızaları belirlemek için arızanın şiddetini de vermektedir. Önerilen yöntemin doğruluğu ve performansı simülasyon ve deneysel veriler kullanılarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay bağışık sistemler, negatif seçim algoritması, bulanık mantık, asenkron motor, arıza teşhisi.

NEGATIVE SELECTION BASED FUZZY FAULT DIAGNOSIS MODEL

ABSTRACT

Fault diagnosis is important to ensure the continuity in the systems that the studies in this area have increased. The effectiveness of fault diagnosis methods has been enhanced by using intelligent computing techniques. In this study, a fault diagnosis method based on fuzzy logic and negative selection is proposed. In the proposed algorithm, the broken rotor bar related features are extracted using negative selection algorithm that is a component of the artificial immune system. In addition, the direction of spectrum changing obtained using the motor current signature analysis is given to fuzzy logic system and the faults are diagnosed. A new weighted affinity measurement is presented for negative selection. The broken rotor bar faults, stator and bearing friction faults occurred in induction motors can be diagnosed by using proposed method. The output of the method gives both the fault type and the severity of fault to determine the multiple faults. The performance of proposed method is verified using healthy and faulty motor data that are obtained as simulation and experimentally.

Keywords: Artificial immune systems, negative selection algorithm, fuzzy logic, induction motor, fault diagnosis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride kullanılan motorların %80'nini asenkron motorlar oluşturmaktadır [1]. Bu motorlar birçok endüstriyel fabrikanın üretim zincirinin devamlılığının sağlanmasında anahtar elemanlardır. Asenkron motorların sağlam, basit ve güvenilir yapıda olmaları, bu motorların endüstride geniş yer bulmalarını sağlamıştır [2].

Bu motorlar genelde sağlam yapıda olmalarına rağmen aşındırıcı ve nemli ortamlara maruz kalmaktadırlar [3]. Motorların bu ortamlarda sürekli çalışması performanslarının düşmesine sebep olmaktadır. Bu performans düşüklükleri erken bir aşamada teşhis edilmezse motorun tamamen bozularak ve sistemin durmasına neden olurlar. Arıza teşhisinin amacı sistem tamamen durmadan veya motor tamamen arızalanmadan önce oluşan bu performans düşüş-

lerinin sebeplerini bulmak ve uygun bakımın yapılmasını sağlamaktır. Asenkron motorların performanslarının izlenmesi ve arıza teşhisinin yapılması için farklı duyarğalar kullanılmaktadır. Bu duyarğalar ile bir motorun stator akımı ve gerilimi, rotor hızı, titreşim, rotor pozisyonu, sıcaklık, çıkış momenti ve manyetik akı yoğunluğu gibi bilgiler ölçülebilir [4]. Akım ve gerilim duyarğaları maliyetlerinin ucuz olması ve birçok arızanın teşhisi için kullanılabilmelerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir.

Asenkron motorlarda oluşan arızalar temel olarak mil yatağı, rotor ve stator gibi motor bileşenleriyle ilgilidir. Son yıllarda elektriksel ve manyetik devre arızalarına göre mekaniksel arızalarda önemli bir artış olmuştur. Aşağıda asenkron motorlarda oluşan arıza yüzdeleri verilmiştir [5].

- Mil yatağı arızaları: ~40%
- Stator arızaları: ~36%
- Rotor arızaları: ~10%
- Diğer arızalar: ~14%

Motor arıza tespiti ve teşhisi için birçok geleneksel yöntemden faydalanılmıştır. Geleneksel yöntemlerden parametre tahmini, arıza teşhisi için motorun matematiksel modeline ihtiyaç duyar. Ancak motor zamanla eskidiğinden, matematiksel model motorun durumunu tam olarak ifade edemeyebilir. Bir diğer geleneksel yöntem ise bu iş için bir mühendisin eğitilmesidir. Bu yöntem motorun matematiksel modeline ihtiyaç duymamasına rağmen, arıza teşhisi için mühendisin eğitilmesi oldukça pahalı olup uzun zaman alır.

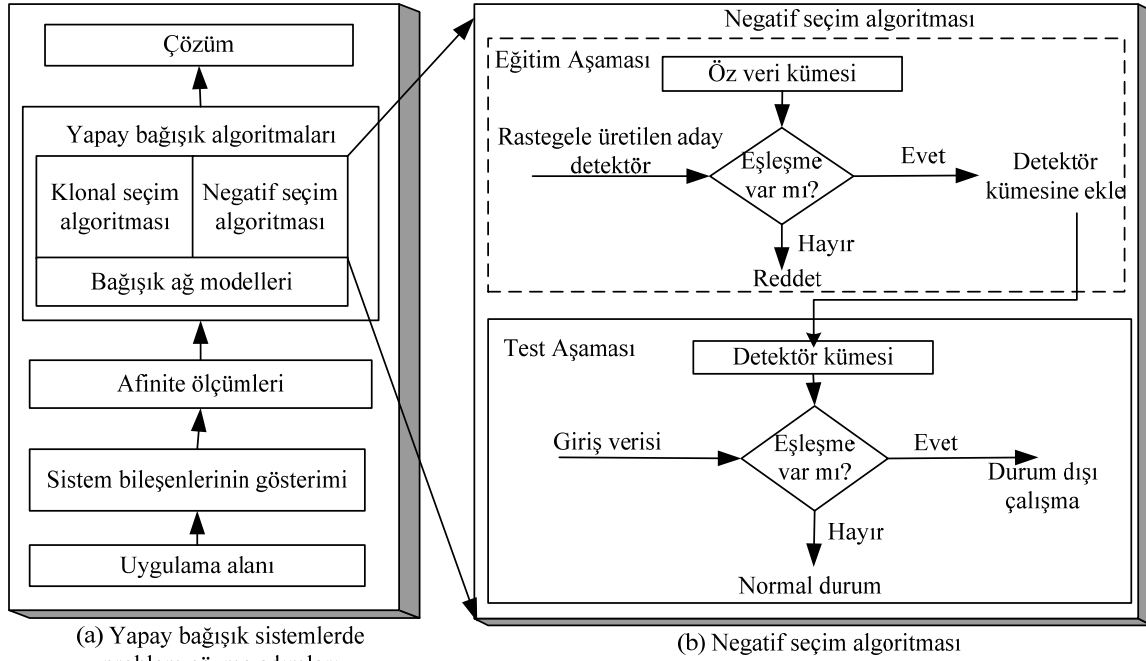
Son yıllarda geleneksel arıza teşhis yöntemleri yerine akıllı hesaplama teknikleri kullanılmaya başlanmıştır [6]. Bu yöntemler motor modeli ve uzman bilgisine daha az ihtiyaç duyarlar. Chow [3] tek fazlı bir asenkron motorda oluşan sarım ve sürtünme arızalarını teşhis etmek amacıyla yapay sinir ağı ve bulanık mantık kullanmıştır. Bir diğer çalışmada motorun faz akımları bulanık mantık ile incelenerek stator arızaları teşhis edilmiştir [7]. Önerilen çalışmada açık faz ve gerilim dengesizliği arızaları teşhis edilmiştir. Branco ve diğ. [8] kırık rotor arızalarının tespiti için yapay bağışık tabanlı arıza tespit yöntemini önermişlerdir. Çalışmalarında sağlam motor verilerini arızalıdan ayırmak için T modülünden, arıza tipini ayırmak için ise B modülünden faydalanmışlardır. Aydın ve diğ. [9] sarım, sürtünme ve mil yatağı arızalarını belirlemek için bağışık sistemleri ve bulanık mantığı önermiştir. Gao ve diğ. [10] mil yatağı arızalarının tespitinde negatif seçim algoritması ile yapay sinir ağlarını birleştirmiştir. Çalışmalarında ileri beslemeli yapay sinir ağı detektör üretmek için kullanılmıştır. Kırık rotor çubuğu arızalarının farklı çalışma durumları altında tespiti için zaman serisi veri madenciliği ve destek vektör makinaları kullanan bir yöntem sunulmuştur [11]. Önerilen yöntemde her bir arıza durumu ve sağlam durumun faz uzayı zaman

serisi veri madenciliği ile oluşturularak destek vektör makinaları ile faz uzaylarının dolayısıyla arızaların sınıflandırılması sağlanmıştır. Martins ve diğ. [12] stator arızalarını belirlemek amacıyla yapay sinir ağları tabanlı bir yöntem sunmuşlardır. Önerdikleri yöntemde park vektör dönüşümü ve temel bileşen analizi birlikte kullanılmaktadır. Park vektör bileşenlerinin her iki boyutta ölçeklendirilmesi için yapay sinir ağı ile temel bileşen analizinin öz vektörleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada asenkron motorlarda oluşan kırık rotor çubuğu, stator sarım arızaları ve mil yatağı sürtünme arızalarının teşhisi için negatif seçim tabanlı bulanık bir arıza teşhis modeli önerilmiştir. Motordan elde edilen akım sinyalleri motor akım imza analizi ile spektrum alanına dönüştürülmüştür. Spektrumda kırık rotor ile ilgili yan bantlar bağışık sisteme giriş olarak verilmiştir. Diğer giriş ise sağlam bir motora göre spektrumun negatif veya pozitif yönde değişimini göstermektedir. Bulanık mantığın çıkışlardan biri daha önceki adımda bir arıza olup olmadığını belirlemek için geri besleme olarak girişe verilmiştir. Bu giriş, motordaki performans değişikliğinin geçici bir durum mu yoksa bir arıza mı olduğunu belirlemek için kullanılmıştır.

2. YAPAY BAĞIŞIK SİSTEMLER (ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS)

Doğal bağışık sistemi insan vücudunu yabancı hücreler olarak bilinen antijen ve patojenlerden koruyan etkili bir mekanizmadır [13]. Virüs, bakteri, mantar ve parazit gibi mikroorganizmalar patojen olarak adlandırılır ve bunlar vücuda girdikten sonra hastalığa sebep olurlar. Bağışık sistemlerindeki temel problem bu patojenlerin tanınması ile ilgilidir. Patojenler bağışık sistem bileşenleri tarafından direkt olarak tanınmazlar. Bağışıklık sistemi, vücuda patojen olarak adlandırılan kanser ve virüs gibi öz olmayan hücrelerden korumak için birlikte çalışan hücre, molekül ve organlardan oluşur. Patojenlerin antijen gibi bazı küçük molekülleri, bağışık sistem tarafından tanınabilir. Hastalığa sebep olan bir antijen belirlendikten veya tanındıktan sonra bağışık sistemi onu yok etmekten sorumludur. Doğal bağışıklık sisteminde vücuda giren bu patojen veya antijenleri tanıyan sistem negatif seçim olarak adlandırılır [13]. İnsan bağışıklık sisteminin çalışması model alınarak yapay bağışık sistemler geliştirilmiştir. Doğal bağışıklık üzerine yapılan çalışmalar bağışıklık sisteminin daha iyi anlaşılmasını amaçlarken, yapay bağışıklık alanındaki çalışmalar hesaplama ve mühendislik problemlerine yeni çözümler geliştirilmesine dayanır [14]. Bu tür problemlerin yapay bağışık sistemlerle çözümlenmesi için Şekil 1 (a)'da gösterildiği gibi belirli adımların uygulanması gerekir. Yapay bağışık sistem bileşeni olan negatif seçim algoritmasının genel gösterimi Şekil 1 (b)'de verilmiştir. Yapay bağışık algoritmaları ile problem çözümlenirken ilk olarak problemin uygun bir gösterimi yapılmalıdır. Daha sonra



Şekil 1. Bağışık sistemlerde problem çözme adımları ve negatif seçim algoritması (Problem solution steps in immune systems and negative selection algorithm)

ortam ile bireylerin etkileşimini değerlendirecek bir mekanizma (afinite ölçümleri) gerekir. Son adımda ise sisteme uygun bir yapay bağışık algoritması kullanılmalıdır. Bağışık sistem algoritmalarından negatif seçim öz/öz olmayan ayrımını yapacak uygun bağışık hücre ve moleküller kümesinin oluşturulmasını sağlar [15]. Klonal seçim yabancı hücre ve patojenlerin nasıl tanındığını göstermede kullanılır. Klonal seçim algoritması daha çok optimizasyon problemlerine uygulanmaktadır. Afinitesi iyi olan bireylerin çoğalması, afinite tabanlı seçim ve mutasyon bileşenlerine sahiptir [16]. Bağışık ağ modeli antijenlerin tanınabilmesi için B hücrelerinin birbirine bağlanması ile oluşturulan bir ağa dayalıdır. Bu hücreler arasındaki bağlantıların sağlamlığı direkt olarak afinite ile orantılıdır. Negatif seçim algoritmasında ilk aşama öz hücrelerin tanınmasıdır. Öz hücreler belirlendikten sonra, rastgele bir şekilde aday detektörler üretilir ve bu detektörlerden öz hücreler ile eşleşenler çıkarılır. Öz hücreler ile eşleşmeyenler detektör kümesine aktarılır [13]. Bir aday detektör ile öz hücre arasındaki benzerliği ölçerek eşleşmenin hesaplanması için Öklid, Hamilton ve Manhattan mesafe ölçümleri kullanılır. Örneğin bir antikör kümesi $A_k = [ak_1, ak_2, \dots, ak_l]$ ve bir antijen kümesi ise $A_n = [an_1, an_2, \dots, an_l]$ ile ifade edilir. Burada l antikör ve antijen kümesinin boyutudur. Bu iki küme arasındaki öklid afinite ölçümü denklem (1)'de, Hamilton afinite ölçümü denklem (2)'de ve Manhattan benzerlik ölçümü ise denklem (3)'te verilmiştir.

$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^L (Ak_i - An_i)^2} \quad (1)$$

$$B = \sum_{i=1}^L |Ak_i - An_i| \quad (2)$$

$$B = \sum_{i=1}^L \delta_i \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & Ak_i \neq An_i \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (3)$$

Burada elde edilen benzerlik ölçümlerinin değeri B , ε gibi bir eşik değeri ile denklem (4)'teki gibi karşılaştırılır.

$$E = B - \varepsilon \quad (4)$$

Eğer $E > 0$ ise $A_n = [an_1, an_2, \dots, an_l]$ antijen kümesi öz örnekler ile eşleşmez ve eğer $A_n = [an_1, an_2, \dots, an_l]$ bütün öz örnekler ile eşleşmez ise detektör kümesine eklenir. Belirli sayıda detektör üretildikten sonra, test aşamasında bu detektörler kullanılarak gelen örneklerden öz kümelerin dışındakiler belirlenir. Dolayısı ile $Y = [y_1, y_2, \dots, y_l]$ gibi bir yeni örnek küme geldiğinde üretilen detektör kümesinden en az bir detektör ile eşleşiyorsa bir durum dışı çalışma tespit edilir.

3. ÖNERİLEN BAĞIŞIK SİSTEM TABANLI BULANIK ARIZA TEŞHİS ALGORİTMASI (PROPOSED IMMUNE SYSTEM BASED FUZZY FAULT DIAGNOSIS ALGORITHM)

Bulanık mantığın çalışma prensibi, insanın düşünme tarzı temel alınarak tasarlanmaktadır. Bulanık mantık genellikle matematiksel modeli bilinmeyen veya doğrusal matematiksel modeli kurulamayan sistemlerde oldukça etkilidir [17]. Bulanık mantıkta problem

çözümü üç aşamada yapılır: Bulanıklaştırma, çıkarım mekanizması ve durulandırma. Öncelikle denetlenecek sistemin parametreleri ölçülür. Daha sonra girişler bulanıklaştırmaya tabii tutulur. Bulanık kuralları sağlayan bilgi tabanı, denetlenen sistemin ayarlanması için gerekli bulanık değerleri çıkarır. Son adımda bu bulanık çıkış değerleri durulandırma yöntemlerinden biri ile kesinleştirilir ve sistemin ayarlanması yapılır.

Arıza teşhis algoritmasının ilk adımında stator akımı motor akım imza analizi yöntemi ile spektrum alanına dönüştürülür. Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) en çok kullanılan parametrik olmayan spektrum analiz yöntemidir. HFD minimum bir hesaplama zamanı ile ayırık bir zaman serisinin Fourier dönüşümünün hesaplanması için kullanılır. Denklem (5)'te ayırık zamanlı bir işaretin HFD 'sinin genel biçimi verilmiştir.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\omega n} \quad (5)$$

Burada $x[n]$ ayırık zaman serisini, $X(e^{j\omega})$ bu serinin ayırık Fourier dönüşümünü gösterir. Ayrıca ω değeri $0 \leq \omega \leq 2\pi$ arasındadır ve $\omega_k = 2\pi k / N$ ile ifade edilir ve k değeri $0 \leq k \leq N-1$ aralığında değer alır. Fourier dönüşümü uygulandıktan sonra güç spektrum yoğunluğu hesaplanır ve akım spektrumu oluşturulur. Bu spektrumda kırık rotor ile ilgili yan bantlar denklem (6)'ya göre hesaplanır.

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_h \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Burada f_b kırık rotor ile ilgili yan bantların frekansını, f_h hat frekansını ve s ise motor kaymasını gösterir. Bu çalışmada $k=1$ ve $k=2$ için elde edilen yan bantlar incelenmiştir. Yüksek yan bantlar $f_{b1} = (1+2s)f_h$ ve $f_{b2} = (1+4s)f_h$, düşük yan bantlar ise $f_{b3} = (1-2s)f_h$ ve $f_{b4} = (1-4s)f_h$ olarak hesaplanır. Kayma değerinin hesaplanması için denklem (7)'deki formül kullanılmıştır.

$$s = 1 - \frac{1}{N} \left[p \left(1 + \frac{f'}{f_h} \right) \right] \quad (7)$$

Burada N rotor sayısını, p motorun çift kutup sayısını ve f' ise ilk slot harmoniğinin frekansını gösterir. Motor akım imza analizi ile akım spektrumu oluşturulduktan ve kırık rotor ile ilgili yan bantlar hesaplandıktan sonra negatif seçim algoritması için gerekli girişler oluşturulmalıdır. Kırık rotor arızalarında f_{b1} ve f_{b3} daha etkilidir. Diğer iki yan bantın genliği kırık rotor arızaları oluştuğunda daha az değişmektedirler. Bu yüzden problemin kodlanmasında bu iki yan bantın genliği diğerlerine göre daha etkili olmalıdır. Çalışmada veriler $[0,1]$ aralı-

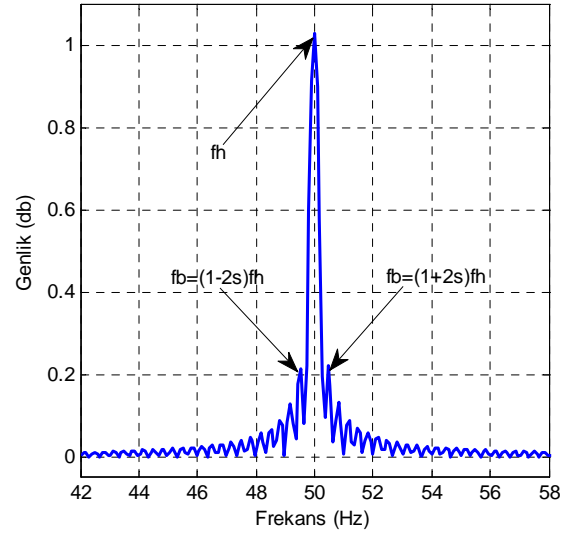
ğında normalleştirilmiştir ve reel kodlama kullanılmıştır. Şekil 2'de bu kodlama verilmiştir.

Akım spektrumu ile ilgili bir örnek Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada f_h 50 Hz olup hat frekansını, f_h 'in sağında olan yan bantlar yüksek ve solunda olan yan bantlar ise düşük yan bantlardır. Burada bir düşük (f_{b3}) ve bir yüksek (f_{b1}) yan bant gösterilmiştir.

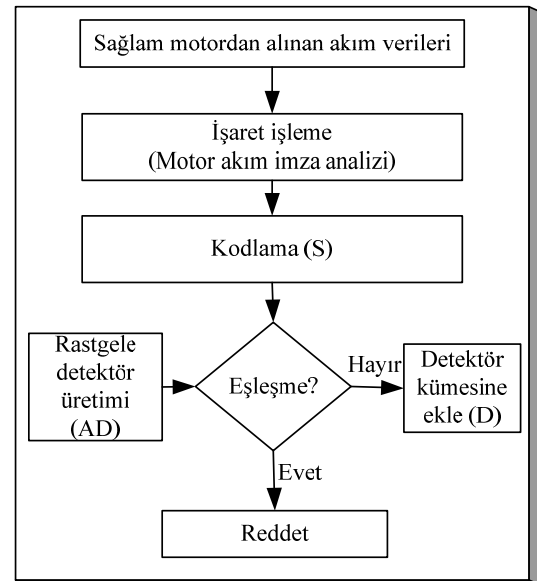
Yapay bağışık modülün eğitim aşamasında sağlam motor verileri alınarak Şekil 4'teki gibi bir detektör

$$\begin{matrix} f_{b3} & f_{b1} & f_{b4} & f_{b2} \end{matrix}$$

Şekil 2. Negatif seçim için kodlama (Coding for negative selection)



Şekil 3. Sağlam motorun akım spektrumu (Healthy motor current spectrum)



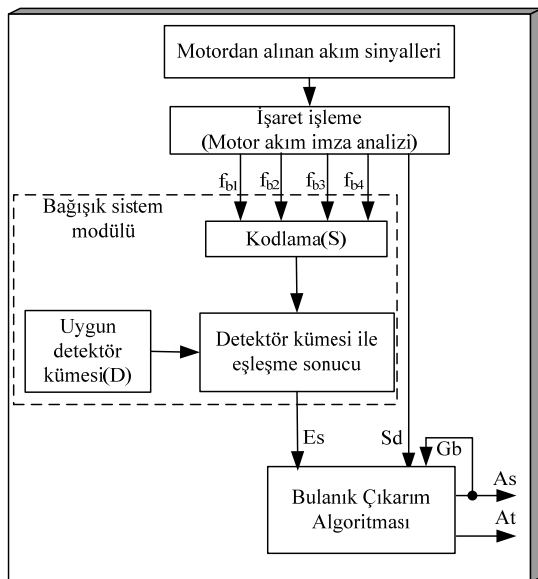
Şekil 4. Yapay bağışık modülünün eğitim aşaması (Training stage of artificial immune module)

kümesi oluşturulur. Bu aşama çevrimdışı olarak yapılr ve sadece sağlam motor verileri kullanılarak detektörler üretilir.

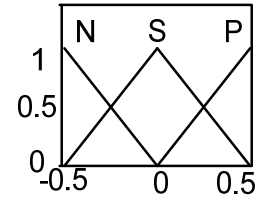
Eğitim aşamasında üretilen detektör kümesi ile çevrimiçi olarak alınan veriler arasındaki eşleşme sonuçları bulanık mantık modülünün birinci girişini oluşturur. İkinci giriş akım spektrumunda 0–200 Hz arasındaki frekansların genliklerindeki değişim miktarının toplamıdır. Bu değişimin sağlam motora göre pozitif veya negatif yönde olması arıza durumu etkileyecektir. Son giriş ise bir önceki adımdaki arıza şiddetidir. Bu giriş motorda performans düşüklüğünün gerçek bir arızadan mı kaynaklandığını yoksa geçici bir durum mu olduğunu belirlemek için alınmıştır. Şekil 5'te önerilen bağışık sistem tabanlı bulanık arıza teşhis şeması verilmiştir.

Bağışık sistem tabanlı algoritma Şekil 5'te de görüldüğü gibi gerçek zamanda arıza teşhisi yapmaktadır. Burada Es eşleştirme sonucunu, Sd spektrum değişim yönünü, Gb geri beslemeyi, As arıza şiddetini ve At arıza türünü gösterir. Bulanık modelin her bir girişi için üç üyelik fonksiyonu kullanmak arıza teşhis modelinin gerçekleştirimi için yeterlidir. Bulanık modülün giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları gerçekleştirimlerinin kolay olmasından dolayı üçgen olarak seçilmiştir. Üç giriş, iki çıkışa sahip bulanık modülün üyelik fonksiyonları Şekil 6'da verilmiştir.

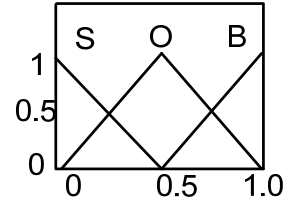
Şekil 6'da spektrum değişim yönü (S_d) girişi için N negatif, S sıfır ve P pozitif üyelik fonksiyonlarını temsil etmektedir. Eşleşme sonucu (E_s) ve geri besleme (G_b) girişlerindeki S etiketi sıfır, O orta ve B büyük üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Bulanık modülün çıkışı olan arıza türü (A_t)'deki S sağlam durumu ifade etmektedir. Sarım arızaları için S_u ve kırık rotor çubuğu arızaları için K_r üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Arıza şiddeti



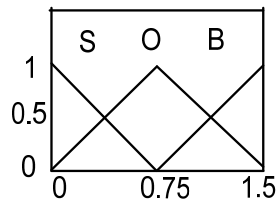
Şekil 5. Bağışık sistem tabanlı bulanık arıza teşhis şeması (Immune system based fuzzy fault diagnosis scheme)



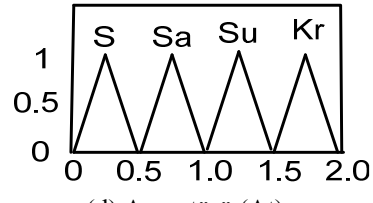
(a) Spektrum değişim yönü (S_d)



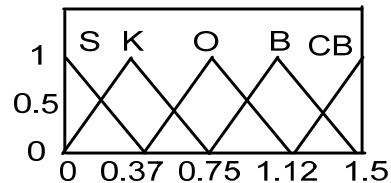
(b) Eşleşme sonucu (E_s)



(c) Geri besleme (G_b)



(d) Arıza türü (A_t)



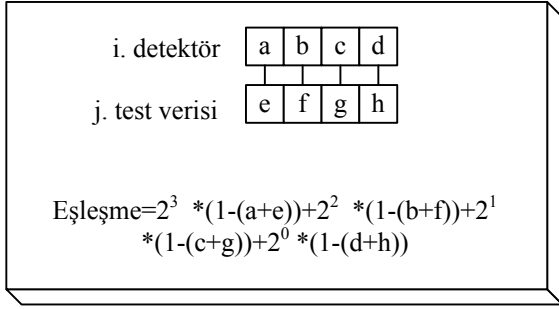
(e) Arıza şiddeti (A_s)

Şekil 6. Bulanık modül üyelik fonksiyonları (Membership functions of fuzzy module)

(A_s) çıkışında S etiketi sıfır, K küçük, O orta, B büyük ve CB çok büyük üyelik fonksiyonları olarak alınmıştır. Bazı kural örnekleri Tablo 1'de verilmiştir. Bir veri ile detektör arasındaki eşleştirmenin genel formülü Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 1. Bulanık modül kural örnekleri (Rule examples of fuzzy module)

Kural Örnekleri	
1.	If (E_s is S) and (S_d is N) and (G_b is S) then (A_t is S) and (A_s is S)
2.	If (E_s is O) and (S_d is P) and (G_b is S) then (A_t is Kr) and (A_s is O)
3.	If (E_s is B) and (S_d is S) and (G_b is S) then (A_t is Kr) and (A_s is O)
4.	If (E_s is S) and (S_d is S) and (G_b is B) then (A_t is S) and (A_s is S)
5.	If (E_s is S) and (S_d is P) and (G_b is B) then (A_t is Su) and (A_s is B)



Şekil 7. Test ve detektör arasındaki eşleşme denklemi (Matching equation between test and detector)

Tablo 1’de Sa sarım arızasını, Su sürtünme ve Kr kırık rotor arızası durumunu gösterir. Şekil 7’den de görüldüğü gibi eşleşme denkleminde hat frekansına yakın yan bantların genlikleri daha büyük katsayılarla çarpıldığından daha etkili olmaktadır.

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Önerilen negatif seçim tabanlı bulanık arıza teşhis algoritmasını gerçekleştirmek için MATLAB paket programı kullanılmıştır. Kırık rotor ile ilgili motor akım verileri üç fazlı 0.37 Kw’lık bir motordan deneysel olarak alınmıştır. Sarım ve sürtünme ile ilgili veriler ¼ hp gücündeki tek fazlı sincap kafes bir motordan simülasyon ile elde edilmiştir. Her iki motor tipi için de sağlam motor verileri referans olarak kullanılmıştır. Kırık rotor arızalarını oluşturmak amacıyla üç fazlı motorun rotor çubuklarından biri delinmiştir. Tek fazlı motorun stator sargısındaki yüz sarımdan on tanesinin kısa devre olduğu sarım arızası ve mil yatağında sürtünme arızaları oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan motorun özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deneyde kullanılan asenkron motorun özellikleri (Features of induction motor used in experiment)

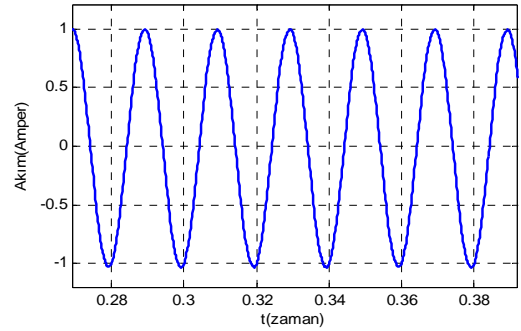
Özellik	Değer
Güç	0.37 kw
Besleme gerilimi	380 V
Tam yük akımı	1.2 A
Besleme frekansı	50 Hz
Kutup sayısı	4
Rotor çubuklarının sayısı	22
Tam yükte çalışma hızı	1390 rpm

Şekil 8 ‘de deney düzeneği görülmektedir. Şekil 9 ve 10’da 380 V ile beslenen sağlam ve bir kırık rotor arızasına sahip üç fazlı motorların akım ve spektrum grafikleri verilmiştir.

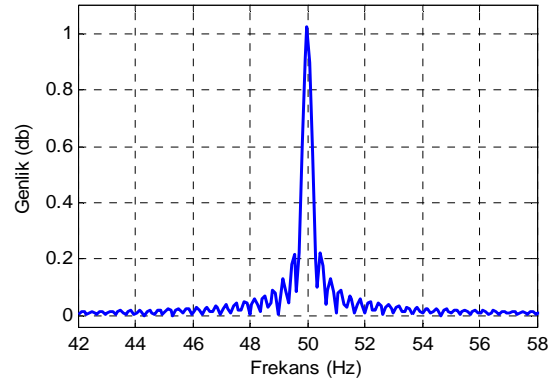
Sağlam bir üç fazlı motor 140, 180, 220, 260, 300, 340 ve 380 V besleme gerilimleri ile çalıştırılarak akım verileri alınmıştır. Daha sonra bu akım verileri Şekil 4’teki algoritma ile eğitilerek sağlam motor verilerini tanıyan detektörler üretilmiştir. Bulanık mantığın diğer girişi için ise spektrumun değişim yönü kullanılmıştır. Şekil 11’de sağlam ve sürtünme



Şekil 8. Motor sinyallerini elde etmek için kurulan deney düzeneği (Established experiment setup to obtain the motor signals)



(a) Akım (Current)

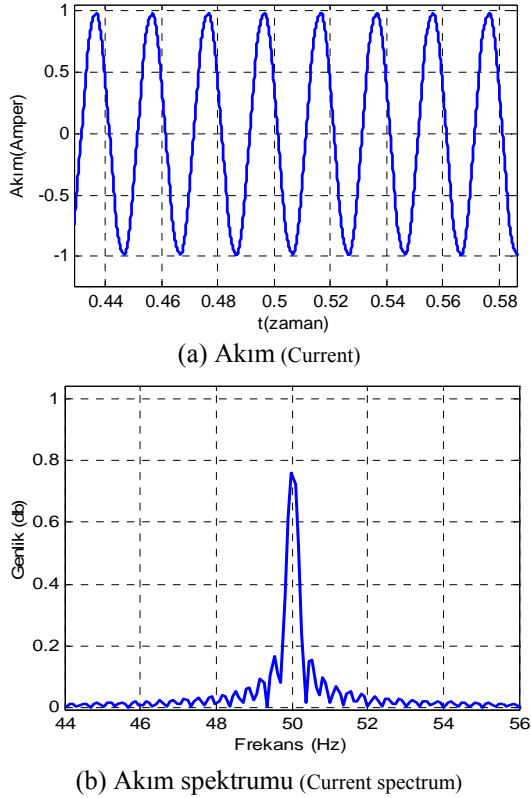


(b) Akım spektrumu (Current spectrum)

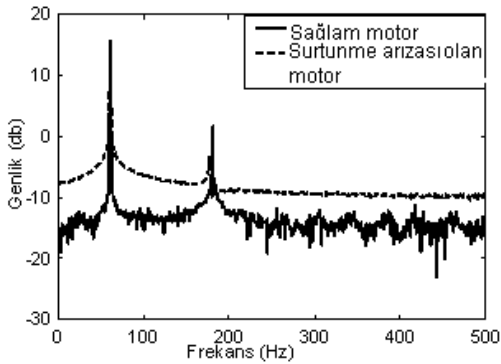
Şekil 9. Sağlam motorun akım ve spektrum grafikleri (Current and spectrum graphics of healthy motor)

arızalarının olduğu tek fazlı bir motora ait spektrumlar verilmiştir.

Burada hem kırık rotor ile ilgili yan bantlar hem de 0-200 Hz arasındaki frekansların genlik farklarının toplamı [0, 1] aralığında normalleştirilmiştir. Şekil 12’de yapay bağışık sistem için bir izleme esnasında oluşan eşleşme grafiği verilmiştir. Burada eşleşme değeri arttıkça arıza şiddeti de artmaktadır. Bulanık modülün arıza şiddeti (As)’nin girişlere göre değişim grafiği Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 10. Bir kırık rotor arızasına sahip motorun akım ve spektrum grafikleri (Current and spectrum graphics of motor having one broken bar fault)

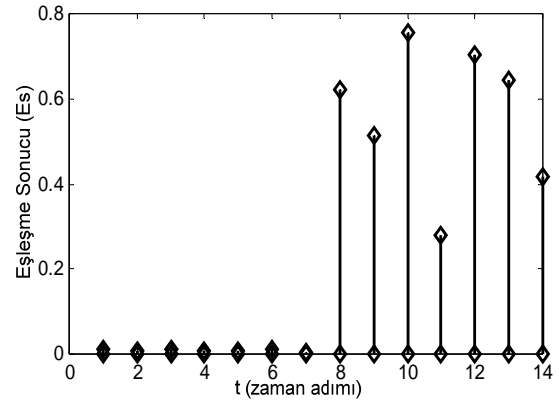


Şekil 11. Sağlam ve sürtünme arızası olan bir motora ait spektrum grafiği (Spectrum graphic of healthy and faulty motor having bearing friction fault)

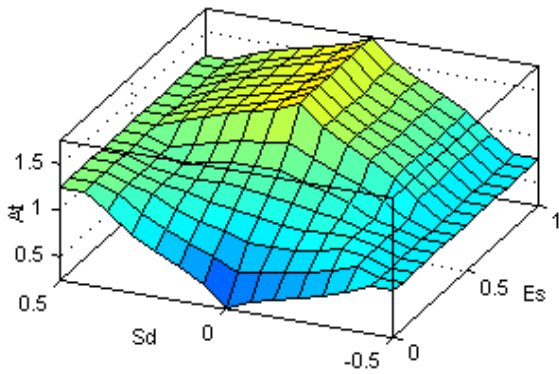
Şekil 13'ten de görüldüğü gibi arıza türünün 0.5 ile 1.0 arasında sarım arızaları, 1.0 ile 1.5 arasında sürtünme ve 1.5 ile 2.0 arasındaki çıkışlar kırık rotor arızalarını gösterir. Aşağıda Tablo 3'te girişlere göre bulanık modülün çıkışları verilmiştir. Tablo 4'te verilen girişlere göre algoritmanın çıkışı Şekil 14'te verilmiştir.

Tablo 3'ün birinci satırında Es değeri büyük, Sd negatif ve Gb büyük ise bir sarım arızası vardır. Ayrıca arıza şiddeti (As) büyük olduğundan aynı zamanda bir kırık rotor arızası da vardır.

Şekil 14'teki grafiğe göre ilk adımda herhangi bir hata olmadığı için arıza türü ve şiddeti düşmüştür. İkinci



Şekil 12. Yapay bağışık sistemde izleme esnasında eşleşme sonuçları (Matching results in artificial immune system during monitoring)



Şekil 13. İki girişe göre arıza türünün görünümü (View of fault type according to two inputs)

ve üçüncü adımlar arasında Sd'nin değeri pozitif yönde arttığından bir sarım arızası vardır. Dördüncü ve beşinci adımlarda ise hem arıza şiddeti hem de arıza türünde bir artış olduğundan kırık rotor ve sürtünme arızaları oluşmuştur. Önerilen model gerçek zamanda arıza teşhisi yapabilmektedir. Bulanık sistemde bir arızanın olup olmadığı bir önceki adımda arıza şiddeti kontrol edilerek yapılmaktadır. Çünkü gerçek zamanda çalıştırılan bir motorda bazı geçici durumlardan dolayı da motor performansı düşebilir. Fakat gerçek bir arıza durumunda motorun performansının bir önceki durumuna göre daha da kötüleşmesi veya bulunduğu performansta çalışması beklenir.

Tablo 3. Simülasyon sonuçları (Simulation results)

Es	Sd	Gb	At	As
0.818	-0.392	1.050	0.794	1.14
0.049	-0.483	0.073	0.491	0.482
0.032	0.016	0.918	0.421	0.295
0.967	0.033	0.467	1.690	0.941
0.082	-0.450	0.934	0.750	0.857

Bu çalışmada önerilen algoritmanın sonuçları kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için önerilen yapay bağışık sistem tabanlı bir algoritma ile karşılaştırılmıştır [18]. Bağışık sistem tabanlı algoritmanın test sonuçları Şekil 15'te verilmiştir.

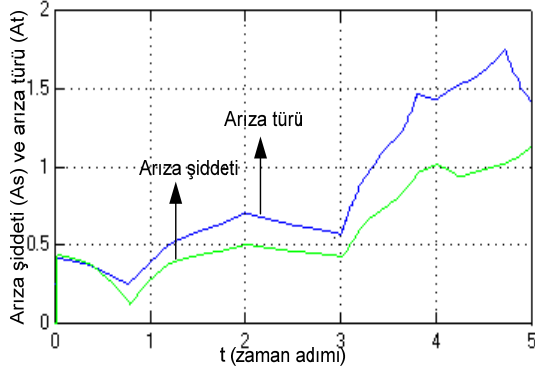
Tablo 4. Simülasyon girişleri (Simulation inputs)

Es	Sd
0.0066	0.0366
0.0102	0.1968
0.0035	0.2952
0.6230	-0.1128
0.9961	-0.4500

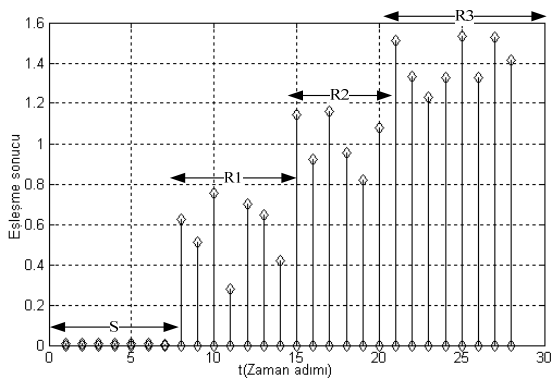
Şekil 15'te S ile gösterilen kısım sağlam durumu, R1, R2 ve R3 ise sırayla bir, iki ve üç kırık rotor çubuğu arızaları ile elde edilen sonuçları göstermektedir. Kırık rotor çubuklarının sayısı değiştikçe eşleşme sonucu artmaktadır. Fakat eşleşme sonucu keskin bir şekilde arızanın şiddeti hakkında bilgi vermemektedir. Ayrıca önerilen algoritma sadece kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisinde doğru sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada ise sadece kırık rotor çubuğu arızası belirlenmeyip, sarım, sürtünme ve aynı anda iki arızanın oluşması durumları da belirlenmektedir. Bu amaçla bulanık mantık'tan faydalanılmıştır. Bağışık sistem sadece rotor ilgili arızaların belirlenmesi için bir ön işleme adımı olarak alınmıştır. Önerilen algoritma ile sadece arızanın türü belirlenmeyip şiddeti hakkında da bilgi edinilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir sistemin normal davranışları ve karakteristikleri yapılan gözlemlerle ortaya konulabilir. Kural dışı



Şekil 14. Arıza şiddeti ve arıza türü grafiği (Graphics of fault type and fault severity)



Şekil 15. Yapay bağışık sistem tabanlı arıza teşhis modeli test sonuçları [18] (The test results of artificial immune system based fault diagnosis model [18])

çalışmanın tespit edilmesi problemi, sistemin karakteristik davranışlarındaki sapmanın ortaya çıkarılması ile mümkün olabilir. Negatif seçim tabanlı arıza teşhis yaklaşımı da, bağışıklık sisteminin herhangi bir yabancı hücreyi vücudun kendi hücresinden ayırt etme özelliğini kullanır. Böyle bir sistem arıza teşhisi için kullanıldığında arızanın tipi belirlenmeyip sadece kural dışı çalışmalar belirlenebilir. Fakat asenkron motorlarda farklı arıza türleri oluşmaktadır. Bu yüzden sistemin bu kural dışı çalışmasının sebebinin belirlenmesi de önemli bir problemdir. Bu problemi çözmek için bu çalışmada bulanık mantık kullanılmıştır. Yapılan çalışmada asenkron motorlarda en çok karşılaşılan rotor, mil yatağı ve stator arızalarının teşhisi için bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen algoritma aynı anda gelen iki arıza türünü teşhis edebildiği gibi arıza şiddeti çıkışı ile motorun durumu hakkında da bilgi vermektedir. Ayrıca bulanık sistemin bir önceki durumu kontrol edilerek geçici performans düşüklüklerinin teşhis algoritmasını yanlış yönde etkilemesi önlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Benbouzid, M. E. H., Kliman, G. B., "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?", **IEEE Trans. on Energy Conv.**, Cilt 18, No 2, 238-244, 2003.
2. Ayhan, B., Trussel, H. J. Chow M.Y., Song, M. H., "On the Use of a Lower Sampling Rate for Broken Rotor Bar Detection With DTFT and AR-Based Spectrum Methods", **IEEE Trans. on Industrial Elect.**, Cilt 55, No 3, 1421-1434, 2008.
3. Chow, M. Y., **Introduction to Motor Incipient Fault Detection Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection**, World Scientific, Singapore, 1997.
4. Benbouzid, M. E. H., "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection", **IEEE Trans. on Industrial Elect.**, Cilt 47, No 5, 984-993, 2000.
5. Czeslaw, T. K., Kowalska, T. O., "Neural Network Application for Induction Motor Fault Diagnosis", **Mathematics and Computers in Simulation**, Cilt 63, 435-448, 2003.
6. Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., Capolino, G.A., "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines", **IEEE Trans. On Industrial Elect.**, Cilt 15, No 2, 4109-4126, 2008.
7. Rodriguez, P. V. J., Antero, A., "Detection of Stator Winding Fault in Induction Motor Using Fuzzy Logic", **Applied Soft Computing**, Cilt 8, 1112-1120, 2008.
8. Branco, P.J. C., Dente, J. A., Mendes, R. V., "Using Immunology Principles for fault

- Detection”, **IEEE Trans. on Industrial Elect.**, Cilt 50, No 2, 362-373, 2003.
9. Aydın, İ., Karaköse, M., Akın, E. “Bağışık Sistem Tabanlı Bulanık Arıza Teşhis Şeması”, **Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu(ASYU 2006)**, YTÜ, İstanbul, 47-51, 31 Mayıs-2 Haziran 2006.
 10. Gao, X. Z., Ovaska, S. J., Wang, X., Chow, M.Y., “A Neural Networks-based Negative Selection Algorithm in Fault Diagnosis”, **Neural Computing & Applications**, Cilt 17, No 1, 91-98, 2008.
 11. Aydın, İ., Karaköse, M., Akın,E., “Zaman Serisi Veri Madenciliği ve Destek Vektör Makinalar Kullanan Yeni Bir Akıllı Arıza Sınıflandırma Yöntemi”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 23, No 2, 431-440, 2008.
 12. Martins, J. F., Pires, V. F., Pires, A. J., “Unsupervised Neural-Network-Based Algorithm for an On-Line Diagnosis of Three-Phase Induction Motor Stator Fault”, **IEEE Trans. On Industrial Elect.**, Cilt 54, No 1, 2007.
 13. Igava, K., Ohashi, H., “A Negative Selection Algorithm for Classification and Reduction of the Noise Effect”, **Applied Soft Computing**, Cilt 9, 431-438, 2009.
 14. Dasgupta, D., “Advances in Artificial Immune Systems”, **IEEE Computational Intelligence Magazine**, Cilt 1, No 4, 40-49, 2006.
 15. de Castro, L. N., Timmis, J. I., “Artificial Immune Systems as Novel Soft Computing Paradigm”, **Soft Computing Journal**, Cilt 7, No 7, 1-31, 2003.
 16. Leung, K., Cheong, F., Cheong, C., “Generating Compact Classifier Systems Using a Simple Artificial Immune System”, **IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics**, Cilt 37, No 4, 1344-1356, 2007.
 17. Kecman, V., **Learning and Soft Computing**, Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge, 2001.
 18. Aydın, İ., Karaköse, M., Akın, E., “Fault Diagnosis Algorithm Based On Artificial Immunity System”, **14th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference**, Antalya, 1-4, 17-19 April 2006.