

MARŞ MOTORU AKIM SİNYALLERİ WAVELET ANALİZ SONUÇLARININ BULANIK MANTIK İLE SINIFLANDIRILARAK ARIZA TESPİTİ

Raif BAYIR ve Ömer Faruk BAY *

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, 78050, Balıklarkayası Kampüsü, Karabük,

* Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü 06500, Teknikokullar, Ankara,

rbayir@karaelmas.edu.tr, omerbay@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 28.02.2006; Kabul/Accepted: 02.04.2007)

ÖZET

Marş motorları ağır yük altında çalışan seri sargılı doğru akım motorlarıdır. Marş motorları içten yanmalı motorların (İYM) başlatılmalarını sağladıklarından marş motorunun arızalanması durumunda içten yanmalı motorlar çalıştırılmazlar. Marş motorunun çektiği akım ve uçlarında düşen gerilimin değeri zamana bağlı olarak değişmektedir. Zamana bağlı olarak değişen (durağan olmayan) sinyallerin incelenmesinde Wavelet Analizi (WA), Hızlı Fourier Dönüşümüne göre daha iyi sonuç vermektedir. Bu çalışmada, arızalı marş motorunun, akım ve gerilim sinyalleri, bir ölçüm düzeneği kullanılarak ölçülmüş ve arızalı marş motoruna ait akım sinyalleri wavelet analizi ile bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Bu ayrıştırmadan elde edilen katsayılar kullanılarak marş motorlarında ve marş sisteminde gözlenen arızalar Bulanık Mantık (BM) ile sınıflandırılmıştır. Hata teşhisi için MATLAB' ta grafik ara yüzü bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu hata teşhis sistemi ile marş motorlarında en sık gözlenen altı çeşit arıza başarıyla teşhis edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Marş motoru, wavelet analizi, bulanık mantık, hata teşhisi.

FAULT DIAGNOSIS IN STARTER MOTORS BY CLASSIFICATION OF WAVELET ANALYSIS RESULTS OF FAULTY STARTER MOTOR's CURRENT SIGNALS USING FUZZY LOGIC

ABSTRACT

Starter motors are serial wound dc motors work under heavy duty. Starter motors are used to run the internal combustion engine (ICE). Internal combustion engines can not be run when starter motor is defective. The values of current drawn by starter motor and the voltage across the starter motor vary depending on time. In the analysis of time dependent signals (unstable signals), Wavelet Analysis (WA) is used. In this study, the current and the voltage signals of starter motors are measured by using a measurement rig and current signals of a starter motor is decomposed to its components with the help of Wavelet Analysis. With the use of coefficients derived from the decomposition, defects observed in starter motors and starter system is classified using fuzzy logic. A graphical user interface (GUI) software has been developed by using MATLAB for fault diagnosis. By using this developed fault diagnosis system, six defects seen in starter motors frequently have been diagnosed successfully.

Keywords: Starter motor, wavelet analysis, fuzzy logic, fault diagnosis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik motorları, iyi montaj edilmiş ve sağlam olmalarına rağmen çalışmaları esnasında arızalar meydana gelmektedir. Elektrik motorlarında elektriksel, mekanik veya bu ikisinin bileşimi şeklinde arızalar oluşabilir. Bu yüzden elektrik motorlarının uygulamalarında, emniyet, güvenilirlik, verim, performans, en çok ilgilenilen ve olması istenilen özelliklerdir [1-2].

Elektrik makine üreticileri ve kullanıcıları motor arızalarını önlemek için tedbirler almaktadır. Ancak motorların içerisinde oluşan arızaların tespiti bazen uzun zaman alabilmektedir. Elektrik motorlarının yaptığı işler giderek karmaşık hale gelmekte ve bu motorlar insanlar için hayati önem arz eden yerlerde kullanılmaktadırlar. Bu motorların zamansız bozulması, hem büyük maddi kayıplara, hem de hata teşhis edilip gerekli tedbir alınmadığında, makinenin zamanından önce yenilenmesine neden olmaktadır [3-5].

Düşük güçlü doğru akım motorlarının geniş kullanım alanları vardır (küçük ev aletlerinde, otomobillerde, uçaklarda, vb.). Günümüzde, bu motorlardaki hataların tespiti, uzmanlar tarafından geleneksel teknikler kullanılarak yapılmaktadır. Bu geleneksel teknikler, bütün istekleri yeterince gerçekleştirilememektedir.

Doğru akım motorlarında, hata teşhisi ve hatanın tespit edilmesi konusunda, birçok metot kullanılmaktadır [6]. Bu metotlara; sinyal analiz temelli metot, motorun dinamik modeli temel alınarak yapılan hata teşhis metodu ve bilgi tabanı temel alınarak yapılan hata teşhis sistemleri örnek olarak verilebilir. Ancak her bir metodun üstünlüklerinin yanında sakıncaları da bulunmaktadır. Doğru akım motorlarında, hata teşhisi ve hatanın tespit edilmesi konusunda bir çok çalışma yapılmıştır [6-10].

Marş motorları otomobil ve diğer motorlu araçların çalışmasını sağlayan ve ağır yük altında çalışan bir doğru akım motordur. Ancak geleneksel doğru akım motorlarından farklı elektriksel ve mekanik kısımları vardır. İYM'nin volanı ile kavramasını sağlayan pinyon dişlisi, selonoid şalter, vb. sistemleri barındırmaktadır. Bu da onları daha karmaşık hale getirmektedir. Marş motorlarının arızalanması durumunda araç çalıştırılmaz. Bu yüzden taşıtlar için hayati önemi vardır. Özellikle acil durumlarda kullanılan ve her an kullanıma hazır olması istenilen araçlarda (askeri araçlar, ambulans, itfaiye, vb) marş motoru arızasının meydana gelmesi durumunda, aracın çalışmaması, hem maddi, hem de hayati kayıplara neden olmaktadır [11-13].

Wavelet analizi, zamana bağlı değişen, sinyallerin incelenmesinde ve analizinde sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle sinyalleri bileşenlerine ayırtmada, görüntü işleme ve sıkıştırma, vb, birçok alanda son

15 yılda binlerce çalışma yapılmıştır [14]. Wavelet analizi motor hatalarının teşhis edilmesinde de kullanılmaktadır [15-21]. Ayrıca WA sonuçları kullanılarak, sınıflandırma çalışmaları da yapılmaktadır [16, 22-23].

Bulanık mantık, motorlarda hataların bulunması ve teşhis edilmesinde başarıyla kullanılmaktadır [24-32]. Gazdik (1985) çalışmasında hata teşhisinde bulanık mantık kullanmanın üstünlüklerini belirtmiştir [24]. Dilsel ifadeler kullanılarak sistem modelinin sözlü formülasyonunu geliştirmek mümkündür. Bu formülasyonun doğruluğu sistemin testi sırasında veya gerçek çalışma esnasında gözlemlenerek tespit edilebilir. Değişkenlerin durumlarındaki farklılıktan yararlanılarak hatalar oluşmadan önenebilir.

Geleneksel teşhis sistemleri ile motorların içerisinde oluşan arızaların tespiti hem zor hem de uzun zaman almaktadır [4]. Ayrıca hatanın teşhis edilmesinde, hatanın tipinin bilinmesi kadar, hatanın büyüklüğü, meydana geldiği yer ve ne zaman tespit edildiği de önemlidir [25]. Bulanık mantık kullanılarak yapılacak teşhislerde kullanılacak değişkenlerin seçimi, bulanıklaştırma işleminin nasıl yapılacağı, çıkarım ve durulaştırma aşamalarında dikkat edilmesi gereken hususlar iyi bilinmelidir [26].

Nejjari ve Benbouzid (1999) çalışmalarında asenkron motorların stator ve faz akımlarının durumunu tespit etmek için bulanık mantığı başarıyla kullanmışlardır [27]. Bu çalışmada sundukları sistem; bulanıklaştırma arabirimi, çıkarım ünitesi, kural tabanı ve durulaştırma kısımlarından oluşmaktadır. Bulanık kurallar ve üyelik fonksiyonlarının ayarlanmasında gözlemler sonucunda elde edilen bilgiler kullanılmıştır. Stator akımının genliğindeki karakteristik değişimler temel alınarak hata teşhisi yapılmıştır.

Zeng ve Wang (1991) döner makinelerin hatalarının sınıflandırılmasında bulanık mantığı kullanmışlardır. Uzman sistem ve bulanık mantık kullanarak elektrik makinelerinde döner elemanların arızalarını tespit etmişlerdir [28]. Çalışmalarında bulanık mantığın, rulman arızalarının teşhisinde, diğer metotlara göre % 100 doğrulukla doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bulanık mantık kullanılarak, titreşim tabanlı hata teşhis çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalarda titreşim sinyali analiz edilerek rulman hataları teşhis edilmiştir [29].

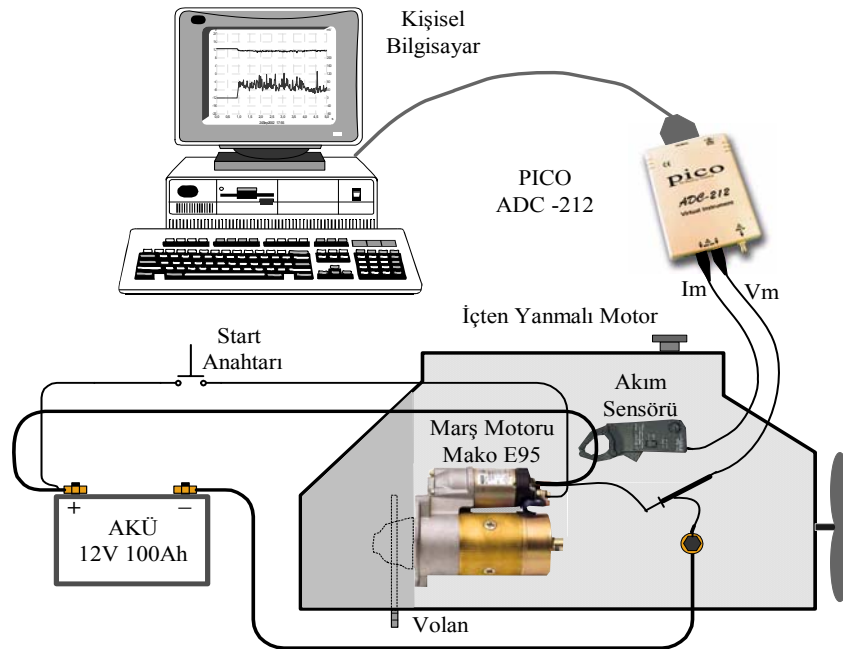
Bu çalışmada arızalı marş motoru akım sinyallerinin wavelet analiz sonuçlarını, bulanık mantık ile sınıflandırmak için Matlab'ta kullanıcı ara yüzü yazılım geliştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, arızalı marş motoru sinyalleri ve sinyallerin nasıl ölçüldüğü açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde wavelet analizi ve coiflets waveleti kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmektedir. Dördüncü bölümde Matlab ortamında FIS (Fuzzy Inference System) editör ile

bulanık mantık sınıflandırıcının nasıl gerçekleştirildiği açıklanmaktadır. Geliştirilen kullanıcı ara yüzü yazılım kısaca tanıtılmaktadır. Sonuç bölümünde elde edilen wavelet analiz sonuçlarının bulanık mantık ile yapılan sınıflandırması verilmektedir. Ayrıca gelecekte bu konuda yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

2. MARŞ MOTORU AKIM SİNYALLERİNİN ÖLÇÜLMESİ (MEASUREMENT OF CURRENT AND VOLTAGE SIGNALS OF STARTER MOTORS)

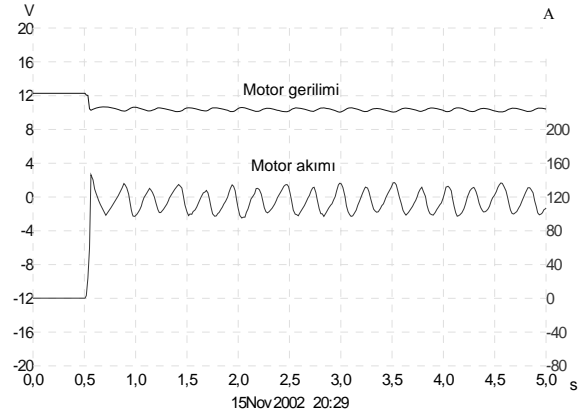
Marş motorları, aküden aldıkları elektrik enerjisini mekanik dönme enerjisine çevirmektedirler. Marş motoru ağır yük altında çalışan, bir elektrik motorudur. Kısa sürede, küçük hacimde büyük güç üretmektedir. Marş motoru elde ettiği dönme enerjisini bir dişli yardımıyla (pinyon dişlisi) İYM'ye aktarmaktadır. Bu bağlantı, bir elektromıknatis (solenoid) yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Marş motorlarının, İYM'yi ilk harekete geçirebilmeleri için, döndürme momentlerinin büyük olması istenmektedir. İlk harekette kalkınma momenti seri sargılı motorlarda yüksektir. Bu özelliğinden dolayı marş motoru olarak, seri sargılı doğru akım motorları ve bunların değişik bağlantı tipleri tercih edilirler [33, 34].

Arızalı marş motoru sinyallerinin ölçümü için, Şekil 1'deki ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Marş motorunun çektiği akım ve uçlarında düşen gerilim ölçülmüştür. Ölçümler, Pico firmasının ürettiği otomobil hata teşhis setindeki, Pico ADC-212 veri toplama cihazı ile yapılmıştır. Pico ADC-212'nin her iki kanalı, 12 bit yüksek çözünürlüğe sahiptir. ADC-212'nin doğruluğu $\pm 1\%$ ve örnekleme hızı 3MS/s'dir [35].



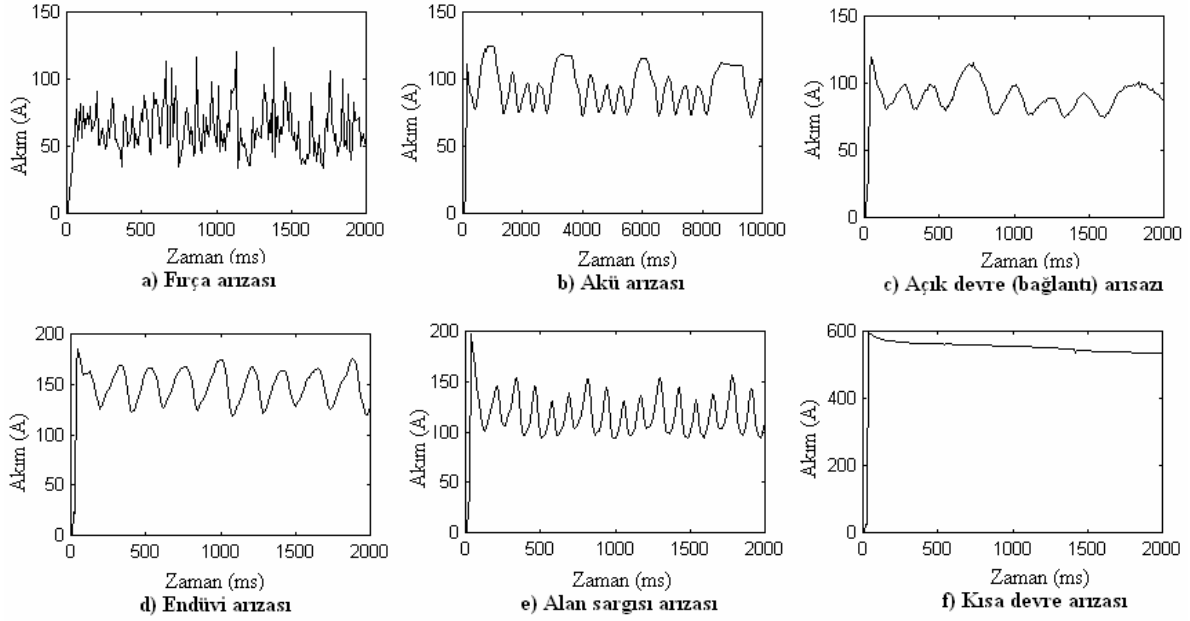
Şekil 1. Marş motoru akım ve gerilim sinyallerinin ölçmek için ölçüm düzeneği (Measurement rig for measurement of current and voltage signals of the starter motor)

Marş sisteminde meydana gelen arızalar, sadece marş motorundan kaynaklanmayabilmektedir. Bu sistemde kullanılan diğer eleman ve malzemeler de arızalara neden olmaktadır. Örneğin akünün zayıflaması, kutup başlarındaki gevşeklik, bağlantı kablolarındaki kopukluk, vb. normal bir marş motorunun çektiği akım ve gerilimde (4 silindri içten yanmalı motorda) her pistonun hareketi için bir tepelik gözlenir (Şekil 2). Şekil 2'de normal bir marş motorunun çektiği akım ve uçlarındaki gerilimin dalga şekli görülmektedir. Bu çalışmada veriler alınırken İYM'nin çalışmasına izin verilmemektedir.



Şekil 2. Normal marş motoru akım ve gerilim sinyalleri (Current and voltage signals of the healthy starter motor)

Fırça arızası olması durumunda ise, marş motorunun komütatörüyle, fırçalar arasında arklar meydana gelmektedir. Bu durumlarda pistonların hareketleri, sinyallerden gözlenememektedir. Hatta fırça temas etmediği anlarda marş motoru durmaktadır (Şekil 3a). Akünün arızalı olması durumunda, akü marş



Şekil 3. Arızalı marş motoru akımları **a)** Fırça arızası, **b)** Akü arızası **c)** Açık devre arızası **d)** Endüvi arızası **e)** Alan sargısı arızası **f)** Kısa devre arızası (Current signals of the faulty starter motor **a)** Brush fault **b)** Battery fault **c)** Open circuit fault **d)** Armature fault **e)** Field winding fault **f)** Short circuit fault)

motorunun krankı döndürmesi için gerekli olan akımı sağlayamaz. Bu yüzden, iki tepecik arasındaki mesafe oldukça uzun olur (Şekil 3b).

Açık devre (bağlantı) arızası; bağlantı kablosunun kesitinin azalması, kablo boyunun uzun olması, kablo veya kutup başı bağlantılarının gevşek olması durumlarında oluşmaktadır (Şekil 3c). Endüvi sargılarının kısa devre olması, endüvi yatağının bozuk olması ve endüvi sargılarında açık devrenin olması durumu endüvi arızası olarak sınıflandırılmıştır. Endüvide kısa devre olması durumunda, çekilen akım artmaktadır (Şekil 3d). Alan sargısı arızası olarak, şaseye kısa devre olması ve alan sargısının kendi sargıları arası kısa devre olması durumu incelenmiştir (Şekil 3e). Şekil 3f’ de kısa devre arızası olarak alan sargısının şaseye kısa devre olması durumu verilmiştir. Bu durumda gerekli manyetik alan oluşmadığı için marş motoru dönmez.

3. Arızalı Marş Motoru Akım Sinyallerinin Wavelet Analizi İle İncelenmesi (Investigation of the Current Signals of Faulty Starter Motors by Wavelet Analysis)

3.1. Wavelet Analizi (Wavelet Analysis)

Wavelet analizi, durağan olmayan sinyallerin analizinde kullanılmaktadır. Bu özelliğinden dolayı, çok geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır [36-41]. Örneğin; resim işleme, resim sıkıştırma, sinyalleri bileşenlerine ayırma, vb. ayrıca wavelet dönüşümü, diğer dönüşümler ile kıyaslandığında birçok üstünlüğe sahiptir. Kararlı olmayan sinyallerin analizinde kullanılabilirliği, filtre katsayılarının kısa sürede sıfıra düşmesi, frekans spektrumunda sabit bant genişliğine

sahip olması ve çok ölçekli sinyal ayrıştırma özelliğine sahip olması, bunlardan birkaçıdır [42].

Wavelet analizinde zaman tabanlı bölgede verilen sinyal, wavelet fonksiyonu denilen, özel bir fonksiyonla çarpılır. Sinyalin, her bir bölümü için dönüşüm hesaplanır. Wavelet dönüşümlerinde ana hedef bir sinyalin ölçek parametreleri etiketlenmiş temel fonksiyon kümelerine ayrıştırılabilmektir. Bu büyük boyutlu sinyallerin, daha küçük yerel bölgelerde analizi olarak tanınır. Temel fonksiyonlar ana wavelet adı verilen fonksiyonun genişmesi, büzülmesi ve kaydırılması ile elde edilirler [42]. Başka bir deyişle; wavelet dönüşümü ana wavelet sinyalinin kaydırılmış ve ölçeklendirilmiş bölümlere ayrıştırılmasıdır. Wavelet sinyalinin genişletildiği, yani uzun olduğu bölgelerde sinyalin yavaş değişimleri ve/veya düşük frekansları, büzüldüğü yani kısa olduğu bölgelerde ise, ani değişimleri ve yüksek frekans bileşenlerini daha iyi tanımlamak mümkün olmaktadır.

Zamanla değişen bir sinyalin $x(t)$ wavelet dönüşümü için, a ve b gibi iki katsayının zamana bağlı bir fonksiyonla (wavelet fonksiyonu) çarpımının integrasyonu ile elde edilir.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

Eşitlik (1)’de; $\psi(t)$ wavelet prototipidir. a yayılma parametresidir. Bu parametreye bağlı olarak wavelet fonksiyonu zaman düzleminde genişler ya da büzülür. Aynı zamanda frekans düzleminde de genişleme ya da büzülmeye yol açar. b ise öteleme parametresidir. Sinyalin eksen üzerinde kaymasını sağlar. Sürekli

Wavelet Dönüşümü (SWD) (Continuous Wavelet Transform, CWT) Eşitlik (2) ile elde edilir.

$$CWT\{x(t); a, b\} = \int x(t)\psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2)$$

Burada * karmaşık eşleniği ifade etmektedir, t zamanı, a yayılma parametresi, b öteleme parametresidir. x(t) ise durağan olmayan zamana bağlı değişen bir sinyali ifade eder.

$$DTWT\{x_n; a, m\} = \sum_n x_n \psi_{a,m}^*(n) \quad (3)$$

Ayrık Zaman Wavelet Dönüşümü (AZWD) (Discrete-Time Wavelet Transform, DTWT) sürekli wavelet analizinin $x_n = x(nT)$ ile örneklenmesidir (Eşitlik 3). Örnekleme periyodu T, analizde zamanın integrasyon için kaydırılmasını sağlar.

Bu çalışmada analiz için Coiflets waveleti tercih edilmiştir. Marş motoru sinyalleri zamana bağlı değişen bir fonksiyon x(t) olarak kabul edilerek farklı öteleme ve yayılma parametreleri ile Coiflets wavelet katsayıları elde edilmiştir. Eşitlik (2)'deki $\psi_{a,b}(t)$ wavelet prototipi olarak coiflets waveleti kullanılmaktadır.

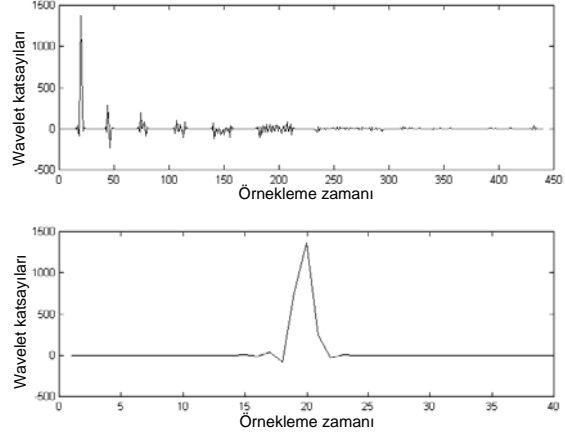
Matlab'ta coif1, coif2 ... coif5 adlarında 5 tane coiflets prototipi mevcuttur. Coiflets waveleti, birinci Daubechies waveletinden türetilmiştir [14]. Bu prototiplerin tipi, öteleme ve yayılma parametreleri Matlab'ın kullanıcı ara yüzü penceresinden kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

3.2. Coiflets Waveleti ile Arızalı Marş Motoru Akım Sinyallerinin Sınıflandırılması (Classification of Current Signals of a Faulty Starter Motor with Coiflets Wavelet)

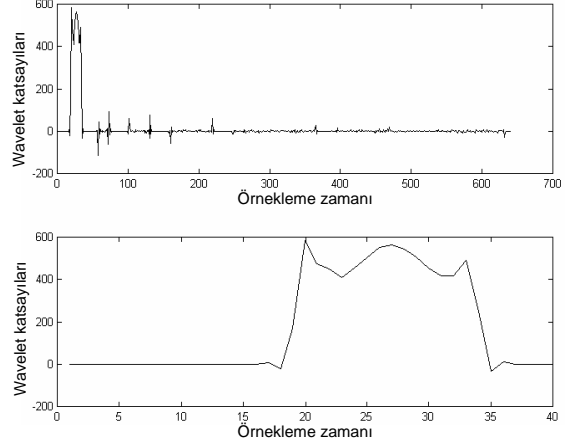
Marş motorunun arızalı akım sinyalleri, Matlab çalışma ortamına aktarılmıştır. Burada wavemenu penceresi kullanılarak sinyal coiflets waveleti ile bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Ayrıştırma işleminden elde edilen katsayılar çizilmiştir (Şekil 4 - Şekil 10). Sinyallerin Coiflets wavelet katsayılarının tamamı ve sınıflandırma için yeterli olduğundan ilk 40 terimi çizilmiştir. Bu değerler her bir arıza durumunda farklı sonuçlar vermektedir. WA ile elde edilen katsayıların ilk 40 terimi kullanılarak yapılan çizimlerden akü arızası, selenoid arızası, fırça arızası, bağlantı kablosu kesitinin normal kablo kesitinin beşte biri olduğu ve kablo boyunun iki kata artırıldığı durumlardaki sonuçlar çok ayırt edicidir.

Normal marş motorunda, WA ile elde edilen katsayılar bir yamuğa benzemektedir (Şekil 4). Alan sargısının şaseye kısa devre olduğu durumdaki WA sonuçları şekilsel olarak normal olan sinyale benzemesine rağmen genlikleri daha büyüktür. Endüvide açık devre olması durumunda sinyalin şekli, normal olan sinyalin şekline benzer olmasına karşın genliği çok düşüktür. Genlikteki bu farklılıklar

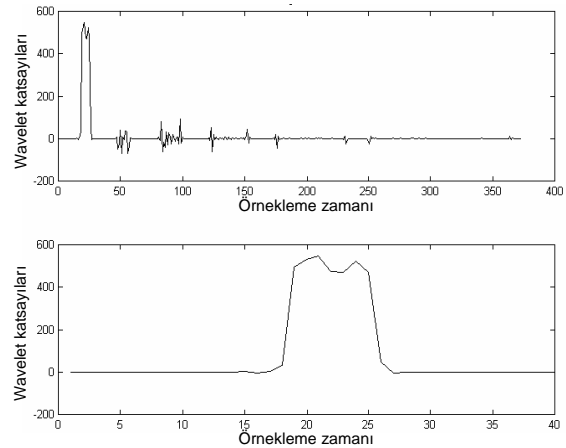
kullanılarak bu arızalar teşhis edilebilir. Bağlantı arızalarından gevşek bağlı kablo ve gevşek kutup başı bağlantı arızalarından elde edilen sonuçlar, normal olan sonuçların yaklaşık aynıdır. Gevşek bağlantı arızalarında motor düzgün çalışmakta fakat biraz fazla akım çekmektedir.



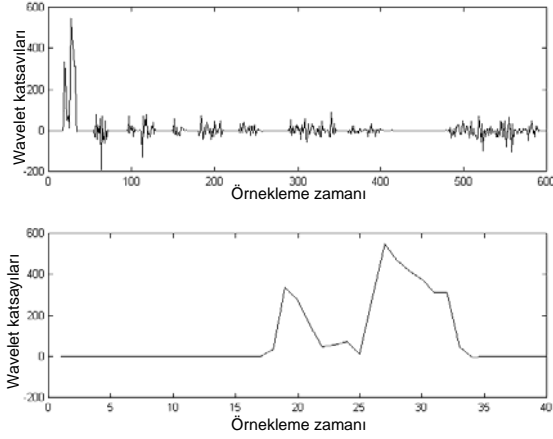
Şekil 4. Normal bir marş motorunda coiflets wavelet katsayıları (Coiflets wavelet coefficients in healthy starter motor)



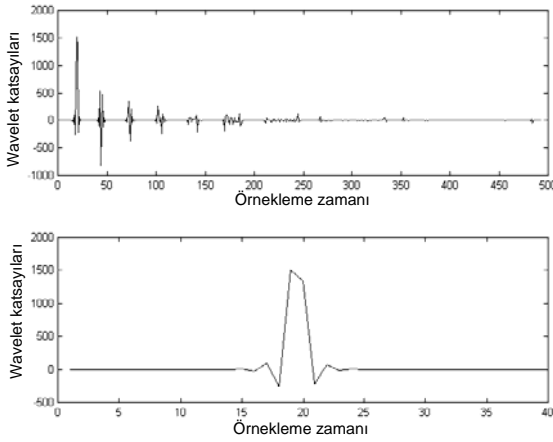
Şekil 5. Akü arızası için coiflets wavelet katsayıları (Coiflets wavelet coefficients for battery fault)



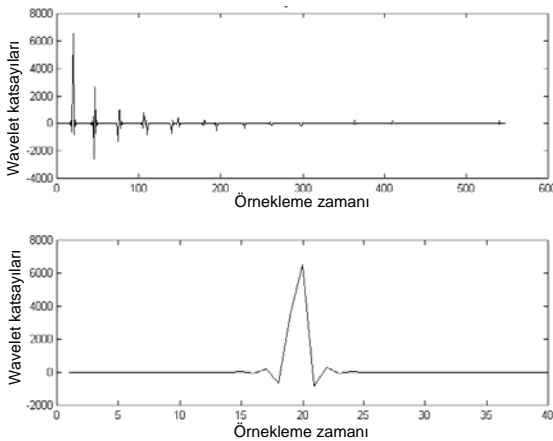
Şekil 6. Bağlantı arızasının coiflets waveleti katsayıları (Coiflets wavelet coefficients for connection (open circuit) fault)



Şekil 7. Fırça arızasının coiflets waveleti katsayıları (Coiflets wavelet coefficients for brush fault)



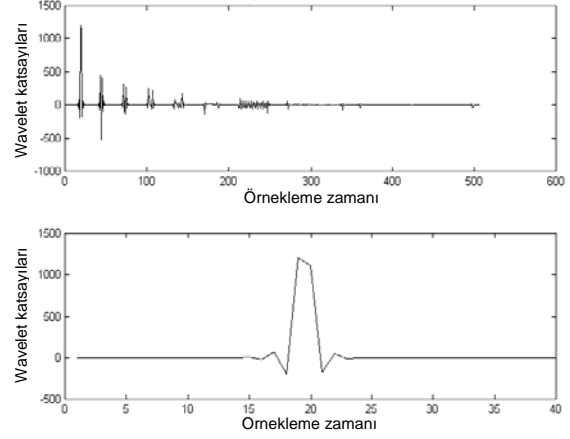
Şekil 8. Endüvi arızasının coiflets waveleti katsayıları (Coiflets wavelet coefficient for armature fault)



Şekil 9. Alan sargısı arızasının coiflets waveleti katsayıları (Coiflets wavelet coefficient for field winding fault)

Arızalı marş motoru akım sinyallerinden endüvi sargılarında kısa devre olması endüvinin açık devre olması ve alan sargısının sargılarının kısa devre olması durumları normal marş motoru WA sonucuna çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sinyallerin

genliğinde bir miktar farklılık ve 20. terimin olduğu bölgenin genişliğindeki farklılıklar hataların ayrıştırması için kullanılabilir [43]. Şekillerdeki farklar bu çalışmada bulanık mantık sınıflandırıcısının kural tabanı oluşturulmasında kullanılmaktadır.



Şekil 10. Kısa devre arızasının coiflets waveleti katsayıları (Coiflets wavelet coefficient for short circuit fault)

Wavelet analizinden elde edilen sonuçlar (Tablo 1'deki gibi) incelenerek giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları sınır değerleri seçilmiştir. Tablo 1'de marş motoru arızalarının wavelet analiz sonucunda ilk 40 terim ile elde edilen sinyalin, 20. terimin aldığı değer ve oluşan darbenin genişliği verilmiştir. Tablo 1'deki değerler Şekil 4 - Şekil 10 daki wavelet analiz sonuçlarından yararlanılarak çıkartılmıştır.

4. WAVELET ANALİZ SONUÇLARINI BULANIK MANTIK İLE SINIFLANDIRILMAK İÇİN MATLAB'TA GUI TASARIMI (DESIGN OF A GUI IN MATLAB FOR CLASSIFICATION OF WAVELET ANALYSIS RESULTS USING FUZZY LOGIC)

Bulanık mantık, elektrikli ev aletlerinden oto elektriğine, gündelik kullandığımız iş makinelerinden, üretim mühendisliğine, endüstriyel teknolojilerden, otomasyona kadar aklımıza gelebilecek her yerde kendisine uygulama alanı bulmuştur [44]. Bulanık mantık, motorlar konusunda uzman kişinin bilgisinin, dilsel ifadeler haline getirilerek kullanılmasını sağlar. Bu özellik bulanık mantığa büyük bir esneklik getirmektedir. Bu sayede motor hata teşhis ve analiz çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. [30]. Kesin olmayan bilgileri kullanabilmesi, sürecin matematiksel bir modeline gereksinim duyulmaması ve uygulamaya çabucak geçilebilmesi, bütün bunlardan sonra da yüksek derecede verim alınabilmesi bulanık mantığın önemini açıkça ortaya koymaktadır [44].

WA Sonuçlarının bulanık mantık ile sınıflandırılması için MATLAB'ta hazırlanmış GUI yazılımının ana penceresi Şekil 11'de verilmiştir. Bu ara yüz ile daha

Tablo 1. Arızalı marş motoru akım sinyallerinin 20. terime ve darbenin genişliğine göre sınıflandırılması (Classification of current signals of faulty starter motor according to 20. term and its pulse width)

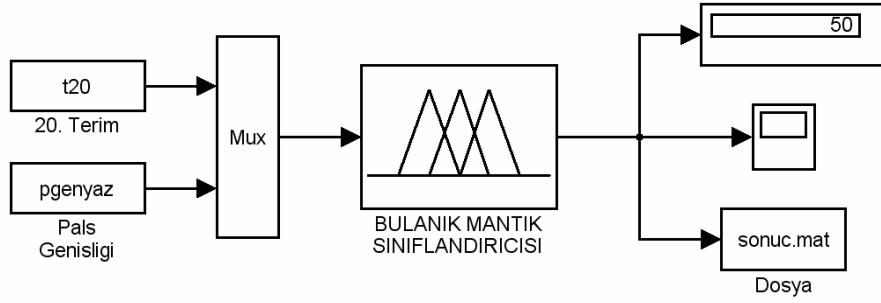
Sıra No	Marş Motorunun Arızası	Özellik	20. Terimin Değeri	Darbenin Başlangıç Terimi	Darbenin Bitiş Terimi	Darbenin Genişliği
1	Marş Motoru Normal	Marş motoru sağlam, İYM' un bir pistonunda sıkıştırmasında problem var	1371,3	18	22	4
		Marş motoru ve İYM normal	1149,3	18	21	3
2	Akü Arızası	Akünün durumu çok kötü	583,22	18	35	17
		Akünün durumu kötü	529,59	18	34	16
3	Bağlantı Arızası	Bağlantı kablosunun 1/5 kesitinde bir kablo kullanıldığında	529,42	16	27	11
		Bağlantı kablosunun boyu 2 kat artırıldığında	568,75	17	29	12
		Gevşek kutup başı bağlantısı	940,6	18	21	3
		Gevşek kablo bağlantısı	1187,1	18	21	3
5	Fırça Arızası	Düzgün olmayan fırça baskısı	368,06	18	28	10
		Fırçaların kirli olması durumunda	275,8	17	34	17
6	Endüvi Arızası	Endüvide kısa devre olması durumunda	1342	18	21	3
		Endüvideki kısa devre büyük olması durumu	979,9	18	21	3
		Endüvi açık devre	949,5	18	21	3
		Endüvideki açık devrenin büyük olması durumunda	141,69	18	21	3
7	Alan Sargısı Arızası	Alan sargısının şaseye olan kısa devrenin büyük olması durumunda	6544	18	21	3
8	Kısa Devre Arızası	Alan sargısının, sargıları arası kısa devrenin büyük olması durumunda	1113,3	18	21	3

**Şekil 11.** Wavelet analiz sonuçlarını sınıflandırmak için hazırlanmış kullanıcı ara yüzü (GUI form for classification of wavelet analysis result)

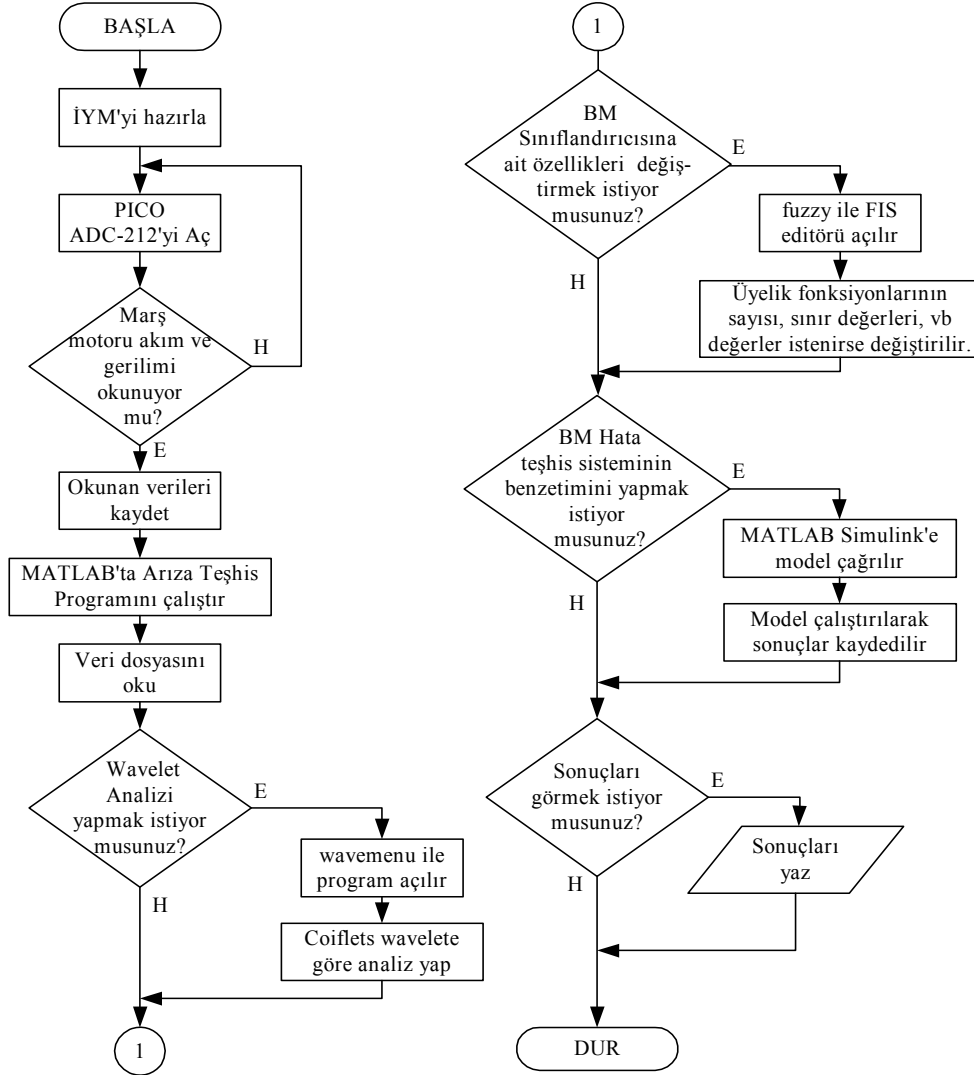
önce ölçülmüş marş motoru akım verileri Dosya Oku butonuna basılarak MATLAB'ın çalışma ortamına (workspace) aktarılmaktadır. Aktarılan bilgiler Wavelet analizi yapılmak için Wavelet Analiz'i butonuna basılarak MATLAB'ın wavelet için tasarlanan ara yüzü çağrılır. Buradan kullanıcı sinyalin wavelet analizini yapar ve elde edilen katsayıları Matlab ortamına kaydeder. Bu elde edilen katsayılardan bulanık mantık için kullanılan giriş

değişkenlerini elde etmek için Giriş Değişkenlerinin Değerini Hesapla düğmesine basılarak elde edilir. Giriş değişkenlerinin değerleri ile sınıflandırma yapmak için Matlab Simulink'te hazırlanan model BM Modeli butonuna basılarak çağrılır (Şekil 12). Marş motoru arızalarını sınıflandırmak için bulanık mantık model çalıştırılır. Bulanık mantık denetleyicisinin verdiği sonuç çalışma alanına gönderilir. Bu değer ile arızanın ne olduğu tespit edilir. Hazırlanan yazılımın aynı zamanda eğitimde de kullanılabilir olması için işlemler adım adım gerçekleştirilmektedir. Sadece teşhis amaçlı kullanmak için ara adımlara ait butonlar devreden çıkarılabilir.

Bu modelde giriş değişkenleri Matlab çalışma ortamından bulanık mantık sınıflandırıcısına aktarılmaktadır. Bulanık mantık sınıflandırıcısında seçilen üyelik fonksiyonun tipine ve üyelik sayısına bağlı olarak yapılan bulanıklaştırma gerçekleştirilmektedir. Fiziksel giriş bilgilerinin, dilsel niteleyicilerle ifade edebileceğimiz bulanık mantık bilgileri şekline çevirme işlemine bulanıklaştırma adı verilir. Ancak bu bilgilerin tamamının mutlaka kesin bilgiler olması söz konusu değildir. Bulanıklaştırma sonucu elde edilen değişkenlere dilsel değişkenler denir. Bulanıklaştırmadan sonra bulanık çıkarım yapılmaktadır. Elde edilen bulanık değerler uzman kişi tarafından tanımlanan kurallar doğrultusunda ve bulanık mantık çıkarım işlemleri kullanılarak, etkin



Şekil 12. Bulanık mantık hata teşhisi için Matlab simulinkte hazırlanmış model (Matlab Simulink model for fuzzy logic fault diagnosis)



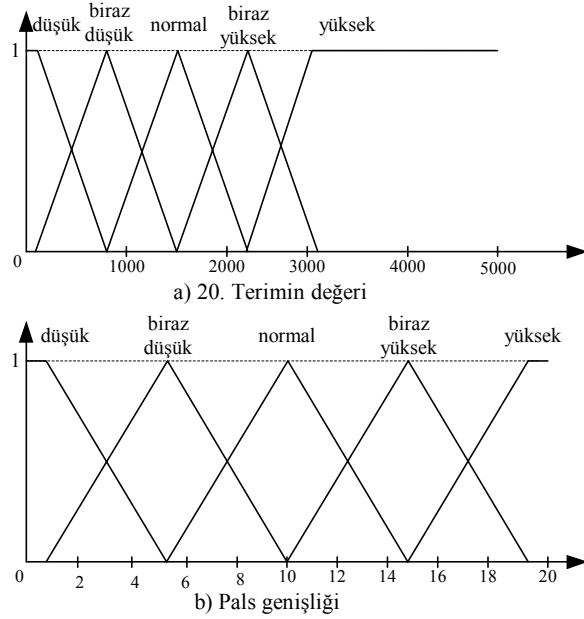
Şekil 13. Bulanık mantık hata teşhis sisteminin akış diyagramı (Flow chart of the fuzzy logic fault diagnosis system)

çıkış üyelik fonksiyonları ve üyelik fonksiyonlarının değerleri bulunur. Bulunan değerlerin, yeniden fiziksel ve kesin bilgilere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işleme durulaştırma adı verilir. Durulaştırma işlemi ile bulanık mantık teşhis sistemi bir sonuç üretir. Elde edilen sonuçlar dosyaya yazılmakta ve sayısal değer olarak da kullanıcı tarafından görüntülenebilmektedir.

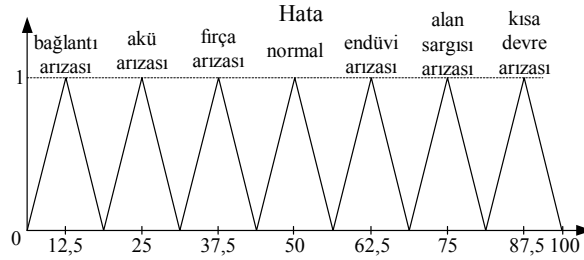
Bulanık mantık hata teşhis sistemin çalışmasını gösteren akış diyagramı Şekil 13'te verilmektedir.

Hata teşhisinde kullanılan giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları Şekil 14'de, çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları Şekil 15'te verilmektedir. Pals genişliği ve 20. terimin değeri giriş değişkeni olarak seçilmiştir. Pals genişliği ve hata değişkenlerinin

üyelik fonksiyonlarının eşit aralıklarla yerleştirilmesine karşılık 20. terime ait üyelik fonksiyonunun aralıkları farklı olarak seçilmiştir. Bu seçim en iyileme neticesinde oluşmuştur.



Şekil 14. Bulanık mantık sınıflandırıcısının giriş değişkenleri **a)** 20. Terimin değeri **b)** Pals genişliği (Input variables of fuzzy logic classifier, **a)** Value of 20. term, **b)** pulse width)



Şekil 15. Bulanık mantık sınıflandırıcısının çıkış değişkeni (Output variable of fuzzy logic classifier)

Hata değişkeninde üçgen yada yamuk üyelik fonksiyonlarının kesişim bölgesine karşılık gelen bir çıkarım yaptığında birden fazla hatayı işaret edebilir. Eğer bu durum istenmiyorsa, üyelik fonksiyonlarının

değerleri birbiriyle kesilmeyecek şekilde FIS penceresinden ayarlanabilir. Ancak marş motorlarının yaz ve kış aylarında ilk çalışma sırasında çektikleri akım değerleri değişmektedir. Çıkış üyelik fonksiyonlarının kesişmesi, bu durumlar için uygun sonuçlar vermektedir. Kesişme durumunda, birden fazla hatayı sistem sonuç olarak gösterir.

Bulanık mantık sınıflandırıcısına ait kuralların listesi Tablo 2'de verilmektedir. Sistemdeki kural sayısı 16'dır. Bu kurallar Tablo 1'deki veriler ve uzman bilgisi ile elde edilmiştir. Kuralların doğruluğu

benzetim çalışmalarında test edilmiştir. Bulanık mantık sınıflandırıcısına daha fazla kural yazılabilir. Ancak bu durumda sistem hatalı teşhis sonuçları vermektedir.

MATLAB FIS editörden aynı zamanda değişkenlerin değerleri ile çıkış değişkeninin aldığı değerleri görmek mümkündür. Kullanıcı hangi kuralın ateşlendiğini buradan takip edebilir. Kullanıcı bulanık mantık sınıflandırıcısının giriş ve çıkış değişkenlerinin sayısını, üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerini, üyelik fonksiyonlarının tiplerini ve sayılarını, kural tabanının kural sayısını ve kurallarını değiştirebilir. Yeni kural ekleyebilir ve mevcut kuralları değiştirebilir. Bunları gerçekleştirmek için ana pencereden BM ayarları butonuna basılır. Bu özellikler bulanık mantık hata teşhisine esneklik kazandırmakta ve daha net sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Wavelet analiz sonuçlarından ilk 40 terim ile elde edilen sinyalin 20. teriminin aldığı değer ve oluşan darbenin genişliği bulanık mantık için giriş değişkeni seçilerek marş motoru arızaları sınıflandırılmaktadır.

Wavelet analizinde, sinyalin formunda bozulma meydana geliyorsa, sonuçlar çok belirgin olmaktadır. Sinyalin periyodundaki değişimler analiz edilebilmektedir. Sinyalin formu aynı ancak, genliği arttığında (akımın biraz yüksek olması durumu) net sonuçlar vermemektedir. Coiflets wavelet katsayılarının 20. terim değerini ve sinyalin genişliğini bularak, bu değerler hangi hata aralığına giriyorsa kolayca sınıflandırılabilir.

Bulanık mantık kullanılarak, marş motorlarında meydana gelen; fırça arızası, akü arızası, kısa devre arızası, açık devre (bağlantı) arızası, endüvi arızası ve alan sargısı arızası olmak üzere altı çeşit arıza başarıyla

tespit edilmiştir. Bulanık mantık hata teşhis sisteminin testinde, toplam 50 adet (farklı arızalara ait) veri kullanılarak sistem test edilmiştir (Tablo 3). Bulanık mantık sınıflandırıcısı bu verileri %88 oranında doğru sınıflandırmaktadır. Gelecekte bu konuda yapılacak çalışmalarda wavelet analizinden elde edilen katsayılar kullanılarak yapay sinir ağları ile sınıflandırma yapılabilir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- $\psi(t)$: Wavelet prototipi
- a : Yayılma parametresi
- b : Öteleme parametresi
- t : Zaman
- $x(t)$: Durağan olmayan zamana bağlı değişen sinyal
- T : Örnekleme periyodu
- n : Örnekleme sayısı

Tablo 2. Bulanık mantık sınıflandırıcısının kural listesi (Rule table of the fuzzy logic classifier)

Kural No	Kurallar
1	Eğer 20. terimin değeri normal ve pals genişliği normal ise motor normal
2	Eğer 20. terimin değeri biraz yüksek ve pals genişliği normal ise motor normal
3	Eğer 20. terimin değeri biraz düşük ve pals genişliği normal ise motor normal
4	Eğer 20. terimin değeri biraz düşük ve pals genişliği yüksek ise akü arızası var
5	Eğer 20. terimin değeri düşük ve pals genişliği biraz yüksek akü arızası var
6	Eğer 20. terimin değeri biraz düşük ve pals genişliği düşük ise bağlantı arızası var
7	Eğer 20. terimin değeri normal ve pals genişliği biraz düşük ise bağlantı arızası var
8	Eğer 20. terimin değeri biraz düşük ve pals genişliği biraz yüksek ise bağlantı arızası var
9	Eğer 20. terimin değeri düşük ve pals genişliği yüksek ise fırça arızası var
10	Eğer 20. terimin değeri düşük ve pals genişliği normal ise fırça arızası var
11	Eğer 20. terimin değeri biraz yüksek ve pals genişliği biraz yüksek ise endüvi arızası var
12	Eğer 20. terimin değeri düşük ve pals genişliği düşük ise endüvi arızası var
13	Eğer 20. terimin değeri biraz yüksek ve pals genişliği düşük ise alan sargısı arızası var
14	Eğer 20. terimin değeri yüksek ve pals genişliği düşük ise alan sargısı arızası var
15	Eğer 20. terimin değeri biraz yüksek ve pals genişliği biraz düşük ise kısa devre arızası var
16	Eğer 20. terimin değeri yüksek ve pals genişliği biraz düşük ise kısa devre arızası var

Tablo 3. Hata teşhis sonuçları (Fault diagnosis results)

Sıra No	Marş Motorunun Durumu	Örnek Sayısı	Doğru Sınıflandırma Sayısı	Yanlış Sınıflandırma Sayısı	Yanlış Sınıflandırma Sonucu
1	Normal	5	4	1	Endüvi arızası
2	Fırça Arızası	7	6	1	Bağlantı arızası
3	Bağlantı Arızası	8	6	2	Normal
4	Akü Arızası	7	7	-	-
5	Endüvi Arızası	8	7	1	Normal
6	Alan Sargısı Arızası	9	8	1	Kısa Devre Arızası
7	Kısa Devre Arızası	6	6	-	-
Toplam		50	44	6	
Yüzde (%)		100%	88%	12%	

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Vas, P., **Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines**, Clarendon Press, Oxford, A.B.D., 1993.
- Finley, W. R. and R. R. Burke, "Troubleshooting Motor Problems", **IEEE Transactions on Ind. Applications**, Cilt 30, No 5, 1383-1397, 1994.
- Subhasis, N. ve Toliyat, H. A., "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines- a Review", **IEEE Ind. App. Society**, Cilt 1, 197-204, 1999.
- Gao X. Z. and Ovazska S. J., "Soft Computing Methods in Motor Fault Diagnosis", **Applied Soft Computing**, Cilt 1, 73-81, 2001.
- Isemann, R., "Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods an Introduction", **Control Eng. Prac.**, Cilt 5, No 5, 639-652, 1997.
- Liu, X. Q., Zhang, H. Y., Jun, L. ve Yang, J., "Fault Detection and Diagnosis of Permanent-Magnet DC Motor Based on Parameter Estimation and Neural Network", **IEEE Tran. Ind. Electronics**, Cilt 47, No 5, 1021-1030, 2000.
- Füssel, D. ve Ballé, P, **Combining Neuro-Fuzzy and Machine Learning for Fault Diagnosis of a D.C. Motor**, Proc. American Control Conference, 37-41, 1997.
- Moseler, O. and Isermann, R., "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor", **IEEE Trans. Ind. Elect.**, Cilt 47, No 5, 1015-1020, 2000.
- Isermann, R. ve Moseler, O., "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor", **IEEE Tran. Ind. Elec.**, Cilt. 47, No. 5, 1015-1020, 2000.
- Awadallah, M. A. and Marcos, M. M., "Adaptive-Fuzzy-Based Stator Winding Fault Diagnosis of PM Brushless DC Motor Drive by Monitoring Supply Current", **IEEE Power Engineering Review**, Cilt 22, No 12, 46-49, 2002.
- Bayır, R. **Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Marş Motorlarında Hata Teşhisi**, Doktora Tezi, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- Bayır, R. and Bay, Ö. F., **Serial Wound Starter**

- Motor Faults Diagnosis Using Artificial Neural Network**, ICM' 04 Proceedings of the IEEE International Conference Mechatronics, Istanbul, Turkey, 194-199, 2004.
13. Bay, Ö.F. ve Bayır, R., "Kohonen Network Based Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Pre-Engaged Starter Motor", **Int. J. of Automotive Technology**, Cilt 6, No 4, 341-351, 2005.
 14. Misiti, M, Misiti, Y., Oppenheim, G., ve Poggi, J. M., **Wavelet Toolbox User's Guide**, The MathWorks Inc., USA, 2005.
 15. Wang, P., Propes, N., Khiripet, N., Li, Y. ve Vachtsevanos G., **An Integrated Approach to Machine Fault Diagnosis**, IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, 4-6, May, 1999.
 16. Boltezar, M., Simonovski, I. ve Furlan, M., "Fault Detection in DC Electro Motor Using Continuous Wavelet Transform", **Meccanica** , Cilt 38, No 2, 251-264, 2003.
 17. Lou, X., Loparo, K. A., Discenzo, F. M., Yoo, J. ve Twarowski, A., **A Wavelet - Based Technique for Bearing Diagnostics**, Int. Conference on Acoustics, Noise and Vibration, Montreal, Canada, 8-12, August 2000.
 18. Lee, D. ve Morrison, R., "Multiresolution Based Pattern Recognition Approach for Condition Monitoring of Switchgear", **Electrical & Computer Systems Engineering Dept.**, Monash University, Australia, 1999.
 19. Dalpiaz, G., Rivola A ve Rubini, R., "Gear Fault Monitoring: Comparison of Vibration Analysis Techniques", **Proc. 3rd Int. Conf. Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diag. Tech.**, Senlis, France, Cilt 2, 623-637, 1998.
 20. Bhunia, S. ve Roy, K., "Fault Detection and Diagnosis Using Wavelet Based Transient Current Analysis", **Design Auto. and Test in Europe**, March, 2002.
 21. Kim, K. ve Parlos, A. G., "Induction Motor Fault Diagnosis Based on Neuron Predictors and Wavelet Signal Processing", **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Cilt 7, No 2, 200-219, 2002.
 22. Magnago, F. H. ve Abur, A., "Fault Locations Using Wavelets", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Cilt 113, No 4, 1475-1480, 1998.
 23. Khurram, M. ve Kaushik, R., "Fault Detection and Locations Using IDD Waveform Analysis", **IEEE Design & Test Comp.**, 42-49, 2001.
 24. Gazdik, I., "Fault Diagnosis and Prevention by Fuzzy Sets", **IEEE Transaction on Reliability**, Cilt R-34, No 4, 382-388, 1985.
 25. Isermann, R., "On Fuzzy Logic Applications for Automatic Control, Supervision and Fault Diagnosis", **IEEE Trans. Sys., Man & Cyb.**, Cilt 28, o 2, 221-235, 1998.
 26. Frank, M. P. and Seliger, K. B., "Fuzzy Logic and Neural Network Applications to Fault Diagnosis", **Int. Journal of Approximate Reasoning**, Cilt 16, 67-88, 1997.
 27. Nejari, H. and Benbouzid, M. E. H., "Application of Fuzzy Logic to Induction Motors Condition Monitoring", **IEEE Power Eng. Rev**, Cilt 19, 52-54, 1999.
 28. Zeng, L. and Wang, H. P., "Machine-Fault Classification: a Fuzzy-Set Approach", **Int. Journal of Advanced Manufacturing Tech.**, Cilt 6, 83-94, 1991.
 29. Liu, T. I., Singonahalli, J. H. and Iyer, N. R., "Detection of Roller Bearing Defects Using Expert System and Fuzzy Logic", **Mech. Systems and Signal Processing**, Cilt 5, 595-614, 1996.
 30. Chow, M. Y., **Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection**, World Scientific Pub., Singapore, 1997.
 31. Mechefske, C. K., "Objective Machinery Fault Diagnosis Using Fuzzy Logic", **Mech. Systems and Signal Proc.**, Cilt 12, No 6, 855-862, 1998.
 32. Bay, O.F. ve Bayır, R., "Fault Diagnosis of Starter Motors Using Fuzzy Logic", **3rd International Advanced Technologies Symp.**, Ankara, Turkey, 520-534, 2003.
 33. Denton, T., **Automobile Electrical and Electronic Systems**, 2nd Edition, Arnold Publisher, London, 2000.
 34. Bolenz, K., **Automotive Electric/Electronic System**, Robert Bosch, Germany Stuttgart 1995.
 35. **Pico Technology Catalogue** (Automotive Diagnostic Kit), March-Sept., 1999.
 36. Mallat, S. G., "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representations", **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Cilt 11, No. 7, 674-693, 1989.
 37. Mallat, S. ve Hwang W. L., "Singularity Detection and Processing with Wavelets", **IEEE Transactions on Information Theory**, Cilt 38, No 2, 617-643, 1992.
 38. Hamid, E., Y., Yokoyama, N. ve Kawasaki, Z. I., "Rms and Power Measurements: A Wavelet Packet Transform Approach", **T.IEE Japan**, Cilt.122-B, No 5, 559-606, 2002.
 39. Tunganawanich, A., Kawasaki, Z. I., Matsuura, K. ve Kuno, H., "Ground Fault Discrimination based on Wavelet Transform using Artificial Neural Networks", **T. IEE Japan**, Cilt 120-B, No 10, 1263-1270, 2000.
 40. Jayasankar, V., Kumar, P. P. ve Babu, K. L., **Failure Recognition in Transformer Using Time- Frequency Analysis**, Int. Conference on Signal processing and Application Technology (ICSPAT 2000), Texas, October 2000.
 41. Wanlu, J., Shuqing, Z., ve Yiqun, W., **Applying Multi resolution Analysis for Processing of Hydraulic Pump Fault Signal**, Fifth Int. Conf. on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2001), Hangzhou, China, 3-5 April, 2001.
 42. Gültekin, S., **Wavelet Analizi**, YL Dönem Projesi, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enst., 2002.

43. Bayır, R. ve Bay, Ö. F., **Arızalı Marş Motoru Akım Sinyallerinin Wavelet Analizi İle Sınıflandırılması**, 4. Uluslararası İleri Tekn. Semp., Konya, Türkiye, Eylül 28–30 2005.
44. Mendel, J. T., “Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial”, **Proceeding of the IEEE**, Cilt 83, No 3, 345-377, 1995.