

## Kırık Rotor Çubuğu Arızası için Bulanık Otomata Yöntemi Kullanılarak Gerçek Zamanlı Arıza

Orhan Yaman<sup>1</sup>, Ebru Karaköse<sup>2</sup>, İlhan Aydın<sup>3</sup>, Mehmet Karaköse<sup>4</sup>, Erhan Akın<sup>5</sup>

<sup>1,3,4,5</sup>Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ 23119

<sup>2</sup>Sivil Havacılık Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ 23119

<sup>1</sup>orhanyaman@firat.edu.tr

(Geliş/Received:20.11.2017; Kabul/Accepted:10.07.2018)

### Özet

Modern endüstriyel sistemlerde üretimi sağlayan bileşenlerin durumunun izlenmesi ve erken arıza teşhisi önemli konulardan biridir. Bu sistemlerde iş gücünün büyük bir kısmını asenkron motorlar karşılamaktadır. Kırık rotor çubuğu arızaları asenkron motorlarda oluşan önemli arızalardan biridir. Bu arıza türü için gerçekleştirilen yöntemlerin çoğu çevrimdışı olarak uygulanmakta olup uzman bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için gerçek zamanlı bir bulanık otomata yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem arıza teşhisi için tek faz motor akımını kullanmaktadır. Elde edilen akım sinyalleri on periyotluk pencerelere bölünmekte ve bu pencerelerden Hilbert dönüşümü kullanılarak yeni özellik sinyali çıkarılmaktadır. Bu özellik sinyalinin sembol dizisi üretilip ardışık pencereler arasındaki entropi değeri entropi ağacı oluşturularak hesaplanmaktadır. Bu değer, sağlam ve arızalı motor durumlarını birbirinden ayırt etmek için kullanılmaktadır. Entropi değerinin izlenerek arızaların belirlenmesi için bulanık otomatadan faydalanılmaktadır. Bulanık otomata her bir sağlam ve arızalı durum için bir son duruma sahiptir. Bulanık otomata herhangi bir son duruma ulaşırsa motor durumu gösterilmektedir. Önerilen yöntem yüksüz durumda kırık rotor çubuğu arızalarını teşhis etmektedir. Yöntemin doğruluğu 0.37 kW'lık üç fazlı bir asenkron motordan deneysel olarak alınan veriler kullanılarak ispatlanmıştır

**Anahtar kelimeler:** Bulanık Otomata, Arıza Teşhisi, Hilbert Dönüşümü, Asenkron Motor.

## Real Time Fault Detection Using Fuzzy Automata Method for Broken Rotor Bar Faults

### Abstract

The monitoring of the components that insures the production in modern industrial systems and fault diagnosis are one of important issues. In these systems, induction motors perform a big part of the work power. Broken rotor bars are one of important faults occurred in induction motors. The most of methods that implemented for this fault type are applied offline and they need the expert information. In this study, a real time fuzzy automata based method is presented for diagnosis of broken rotor bars. The proposed method uses one phase current signal for fault diagnosis. The obtained current signals are divided to windows of ten periods and the new feature signal is extracted using Hilbert transform. The symbol series of this feature signal is generated and the information entropy between two consecutive windows is calculated by constructing entropy tree. This value is used to separate the conditions of healthy and faulty motors. Fuzzy automata are utilized to detect the faults by monitoring entropy value. Fuzzy automata have a final state for each motor condition. If fuzzy automata reach any final state, the state of motor is displayed. The proposed method diagnoses the broken rotor bar faults under no load condition. The accuracy of the method is proved by experimental data taken from a 0.37 kW induction motor.

**Keywords:** Fuzzy Automata, Fault Diagnosis, Hilbert Transform, Induction Motor

### 1. Giriş

Karmaşık sistemlerde arıza teşhisi ve tespiti hem endüstriyel hem de biyomedikal uygulamalar için önemli rol oynayan bir araştırma alanıdır. Asenkron motorlar elektrik enerjisinin mekanik

enerjiye dönüştürülmesi için endüstride en çok tercih edilen makinalardandır [1]. Bu motorların en önemli avantajları ucuz, sağlam ve güvenilir olup basit bir yapıya sahip olmalarıdır. Bu tür motorlar için gerçekleştirilen arıza teşhis yöntemleri diğer elektrik motorları için de

kullanılabilmektedir [2]. Asenkron motorların arıza teşhisi ve tahmini için durum izlemesi bu makinaların endüstriyel süreçlerin devamlılığını sağlamalarından dolayı önemlidir. Erken aşamada tespit edilen arızalar süreçlerin aksama süresini azaltır. İdeal bir arıza teşhis sistemi motordan gerekli minimum ölçümleri almalı ve en kısa sürede arıza türünü belirlemelidir. Asenkron motorlarda oluşan arızalar içerisinde kırık rotor çubuğu arızaları %10'luk bir orana sahiptir [3].

Genel arıza teşhis yöntemleri model tabanlı ve sinyal tabanlı olmak üzere iki şekilde düşünülebilir. Model tabanlı arıza teşhisi motorun matematiksel modeline dayalıdır. Sinyal tabanlı arıza teşhisi ise motordan akım, gerilim, titreşim ve hız gibi sinyallerin ölçülmesi ve bu sinyallerden elde edilen özelliklerin motor durumunun belirlenmesinde kullanımını gerektirir. Elde edilen özellikler yapay sinir ağları, yapay bağışık sistemler, sinirsel bulanık sistemler gibi akıllı hesaplama teknikleri ile eğitilerek arızalar belirlenir. Kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için motor akım imza analizi birçok çalışmada kullanılmıştır [1,4,5]. Motor akım imza analizi yöntemi motor akımının frekans spektrumunu fourier dönüşümü ile elde edilerek yan bant bileşenlerinin incelenmesine dayalıdır. Fakat motor düşük yükte çalışırken yan bant frekansları hat frekansına çok yakın olduğundan bu durumlarda yöntem kötü sonuçlar verir. Düşük yüklerde kırık rotor çubuğu arızalarını teşhis etmek için başlama akımına ayrık dalgacık dönüşümü uygulanmıştır [6-8]. Ayrık dalgacık dönüşümü yöntemi iyi sonuçlar vermesine rağmen arıza teşhisi için her defasında motorun yeniden başlatılmasına ihtiyaç duyar. Ayrıca evirici ile beslenen motorlarda bu yöntem iyi sonuçlar vermez. Kırık rotor çubuğu arızasını faz uzayında tespit etmek için akıllı hesaplama tabanlı teşhis yöntemleri sunulmuştur [9-11]. Bütün bu arıza teşhis yöntemleri sinyallerin motordan alınması ve bilgisayar ortamında teşhisin yapılmasına dayalıdır. Bu şekilde çalışan yöntemler gerçek zamanlı arıza teşhisi için uygun değildir. Dalgacık ve Fourier dönüşümü gibi yöntemlerin iyi sonuç verebilmesi için verilerin yüksek çözünürlükte alınması gereklidir. Arıza

teşhisi ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen halen şu eksiklikler bulunmaktadır [12]:

- Çalışma ve yük durumlarına bağımlı olma,
- Zamanla değişen şartlarda güvenilir arıza teşhisinin yapılamaması,
- Bütün arıza türleri için tek bir teşhis yönteminin geliştirilememesi.

Ayrık olay sistemleri belirsizliğin olduğu problemlerin çözümünde oldukça kullanışlıdır. Ayrık olay sistemleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmasına rağmen, arıza teşhis problemleri için uygun değildir. Çünkü arıza teşhisinde sistemin durumu ile ilgili keskin çıkarımlar yapılamaz. Oluşan arızaların belirli seviyeleri olabilir. Örneğin asenkron motorda mil yatağının tamamen bozulması daha önceden oluşan sürtünme arızalarına bağlı olabilir. Dolayısıyla motor direkt olarak sağlam durumdan mil yatağı arızasına geçmez. Bu problemlerin çözümü için bulanık geçiş ve durumlar kullanılabilir. Bulanık geçiş ve durumların göz önüne alındığı otomata bulanık otomata olarak isimlendirilir [13]. Bulanık otomatada girişler  $[0,1]$  aralığında üyelik dereceleri ile bulanıklaştırılır.

Bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarının gerçek zamanlı teşhisi için bulanık otomata tabanlı yeni bir yöntem sunulmaktadır. Yüksüz durumda çalışan bir motor düzenli bir şekilde akım çektiği için kırık rotor çubuğu arızasının tespiti oldukça zordur. Bu çalışmada, yüksüz durumdaki motorun kırık rotor çubuğu arızası tespit edilebildiği için önerilen yöntem özgündür. Yöntem bu amaçla tek faz motor akımını on periyotluk kısa pencerelelere bölerek Hilbert dönüşümü uygulamakta ve elde edilen sinyali sembol serisine dönüştürerek ayırklaştırmaktadır. Elde edilen serinin sembol ağacı oluşturulup entropi hesabı yapılmakta ve bu değer bulanık otomata ile değerlendirilerek arızalar teşhis edilmektedir.

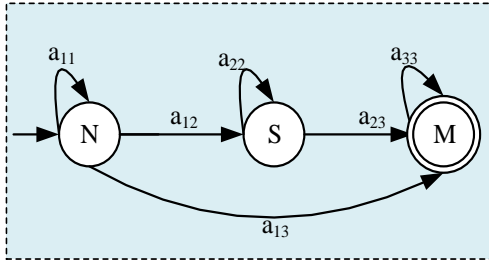
## 2. Sonlu Durum Otomatalar ve Ayrık Olay Sistemleri

Otomata ayrık olay sistemlerin dinamiklerini modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Dinamik sistemler genel olarak fark veya

diferansiyel denklemler ile tam olarak gösterilemeyen ve eş zamanlı olarak gerçekleşmeyen olayların oluşması ile durumu değişen sistemlerdir [13]. Genelde bir ayrık olay sistemi sonlu otomata ile ifade edilir. Sonlu bir otomata ise beş parametreye sahiptir [14]. Bu parametreler denklem (1)'de verilmiştir

$$M = \{\Phi, B, \delta, S, F\} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde  $\Phi$  ayrık durumların kümesini ve B değişkeni durumlar arasındaki geçişlerin kümesini gösterir. Denklemdeki  $\delta$  değeri geçiş haritalanmasını, S başlangıç durumunu ve F ise son durumu gösterir. Bu modelde her bir durum bir olayın oluşmasını gösterir. Şekil 1'de otomata ile ilgili bir örnek verilmiştir.



Şekil 1. Otomata ile ayrık bir olay sisteminin modellenmesi

Şekil 1 bir asenkron motorun durumunu ifade etmek için kullanılabilir. Burada N normal çalışan motoru, S mil yatağı sürtünme arızasını ve M ise mil yatağının tamamen bozulması durumunu göstermek için kullanılabilir. Bu otomata sisteminde başlangıç durumunun N olduğunu kabul edersek diğer parametreler denklem (2)'de ki şekilde ifade edilebilir.

$$\Phi = \{N, S, M\} \quad (2)$$

$$B = \{a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}, a_{33}\}$$

Bu otomata için başlangıç durumu  $N=[1 \ 0 \ 0]$  ile gösterilebilir. Herhangi bir zamanda sistem üç durumdan birinde olabilir. Otomatanın farklı durumları arasındaki geçişler herhangi bir olayın gerçekleşmesine bağlıdır [13]. Bir olay genel

olarak geçiş matrisi ile ifade edilir. Denklem (3)'te  $a_{11}$  ve  $a_{12}$  geçişleri için matrisler verilmiştir.

$$a_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, a_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

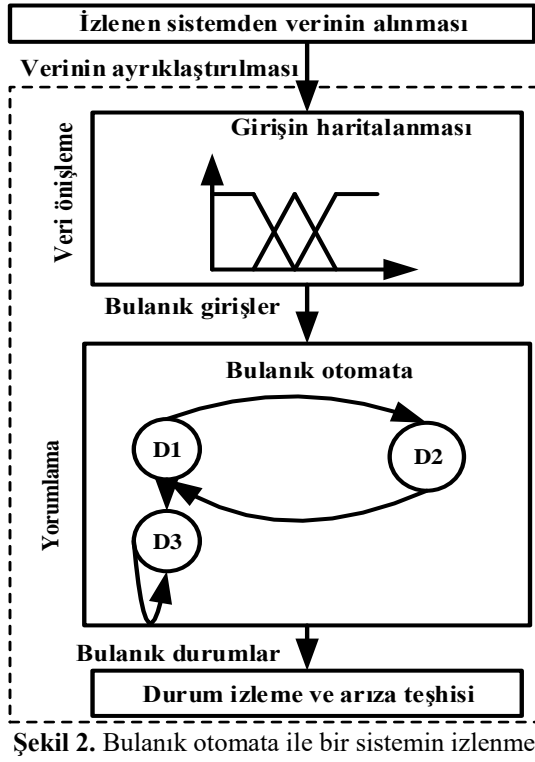
Eğer sistem başlangıçta  $S=[0 \ 1 \ 0]$  durumunda ise ve  $a_{23}$  geçişi olursa bir sonraki durumu denklem (4)'te ki gibi hesaplanır.

$$[0 \ 1 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ 1] \quad (4)$$

Ayrık olay sistemleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmasına rağmen bazı problemlerde keskin geçişler mümkün olmamaktadır [15]. Şekil 1'de bir mil yatağı tamamen arızalanmadan önce bu bileşende oluşan sürtünmeler mil yatağının arızalanmasını hızlandırır. Dolayısıyla  $a_{13}$  geçişi aslında tespit edilemeyen bir olay olarak ifade edilir. Ayrıca arıza teşhis probleminde çoğu zaman bir bileşen ile ilgili arızanın şiddeti de bilinmek istenir. Ayrık zamanlı sistemlerde bir sistemin durumu hakkında belirsizliğin ölçümü ve oluşan herhangi bir arızanın teşhis edilebilirliği iki önemli parametredir.

### 3. Bulanık Otomata

Her bir durumu ve durumlar arası geçişi 0 veya 1 ile ifade edilen sonlu otomata bazı mühendislik problemleri için uygun değildir. Özellikle durumlar arasında belirsizliğin olduğu sistemlerde sonlu otomata doğru sonuç vermeyebilirler. Bu tür problemler için bulanık durumlar ve geçişler tanımlanmıştır. Keskin geçişler yerine kullanılan ve  $[0, 1]$  aralığında değer alan bu durum ve geçişler bulanık otomata olarak isimlendirilir [16]. Bulanık otomatada sistem farklı üyelik dereceleri ile aynı anda birkaç durumda olabilir. Şekil 2'de bulanık otomata ile problem çözüm adımları verilmiştir.



Şekil 2. Bulanık otomata ile bir sistemin izlenmesi

Şekil 2’de görüldüğü gibi ilk olarak sistemden alınan verilerin ayrıklaştırılması gerekmektedir. Daha sonra bulanık üyelik fonksiyonları ile girişler bulanıklaştırılır. Bu aşama veri ön işleme olarak da isimlendirilir. Sonraki aşamada bulanık giriş otomataya verilir ve sistemin durumu izlenerek arıza teşhisi yapılır. Şekil 1’deki örnek göz önüne alındığında bir motorun durumu herhangi bir t anında 0.7 üyelik derecesi ile “Normal”, 0.2 üyelik derecesi ile “Sürtünme” durumu ve 0.1 üyelik derecesi ile “Mil yatağı” arızası durumunda olabilir. Bu durum denklem (5)’te ki gibi gösterilebilir.

$$S = [0.7 \quad 0.2 \quad 0.1] \quad (5)$$

Durumlar arası geçiş matrisi de sıfır ile bir arasında değer alan elemanlardan oluşur. Herhangi bir anda  $a_{12}$  geçiş matrisi denklem (6)’daki gibi gösterilebilir.

$$a_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Denklem (6)’daki geçiş matrisine göre N durumundan S durumuna geçiş denklem (7)’deki gibi hesaplanabilir.

$$[0.7 \quad 0.2 \quad 0.1] \times \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0 \quad 0.49 \quad 0] \quad (7)$$

Bulanık otomatanın genel tanımlanması aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Bulanık durumlar  $\bar{\Phi}_f$  ile ifade edilir. Her bir durumun üyelik derecesi  $\mu(\bar{\Phi}_f)$   $[0, 1]$  aralığında bir değerdir.

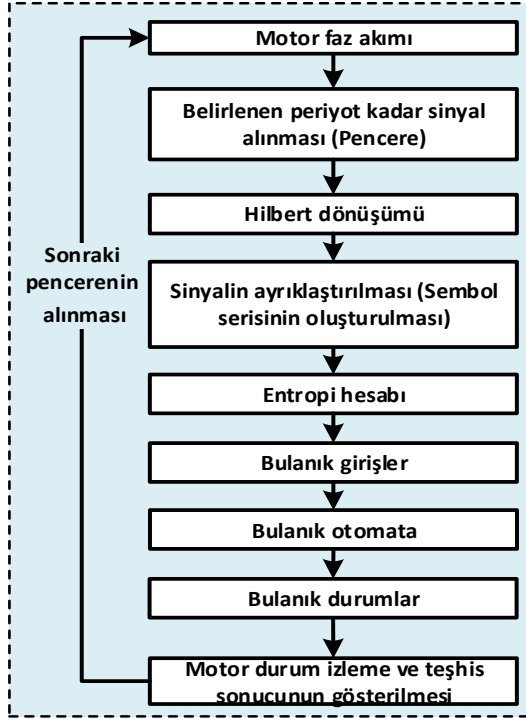
- Giriş kümesinin her bir elemanı da  $[0, 1]$  aralığında bir üyelik derecesine sahip olup  $\mu(a_{ij})$  ile gösterilir.
- Durumlar arası geçişler  $\mu(\bar{\delta}_f)$  ile ifade edilir. Geçiş üyelik derecesi iki durum arasında gerçekleşen bir olay ile ifade edilir.
- Başlangıç ve son durum sonlu durum otomataya benzer biçimde ifade edilir.

Bulanık otomata dinamik bir sistemdeki çıkış ile referans bir sinyalin benzerliğini ölçmek için kullanılabilir [17-20]. Bu özellik sayesinde sistemden ölçülen ayrık sinyallerin bir referans sinyale göre değişimi arıza tespiti için uygundur. Bulanık otomatada ölçüm hatası ile ilgili eşik değer, her bir durum ve geçiş üyelik fonksiyonu bir uzman tarafından belirlenir.

#### 4. Bulanık Otomata Tabanlı Arıza Teşhisi

Bu çalışmada asenkron motorlarda arıza teşhisi için bulanık otomata tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Yöntem asenkron motorlarda oluşan kırık rotor çubuğu arızalarını belirlemek için stator akımına ihtiyaç duymaktadır. Stator akımından Hilbert dönüşümü aracılığıyla yeni özellik sinyali çıkarılmaktadır. Daha sonra bu

sinyalin sembol serisi oluşturularak ayrıklaştırma işlemi yapılmaktadır. Serinin entropi ağacı oluşturulmakta ve ardışık pencereler arası hesaplanan entropi değeri bulanık otomatanın girişine verilerek arıza teşhisi yapılmaktadır. Önerilen arıza teşhis yönteminin blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen yöntemin blok diyagramı

Şekil 3'teki blok diyagramına göre motor akımının her defasında belli sayıda periyodu sisteme giriş olarak verilmektedir. Bu durum algoritmada pencere olarak ifade edilmiştir. Her bir pencerenin boyutu denklem (8)'e göre hesaplanmaktadır.

$$w = f_s \frac{1}{f_h} n \quad (8)$$

Bu denklemde  $f_s$  örnekleme oranını,  $f_h$  hat frekansını ve  $n$  ise periyot sayısını gösterir. Hilbert dönüşümü herhangi bir sinyal ile o sinyalin 90 derece kaydırılması ile elde edilir. Üretilen sinyal genelde karmaşık iki bileşenden

oluşur. Birinci bileşen orijinal sinyali ikinci bileşen ise Hilbert dönüşümünü ifade eder. Bir sinyalin Hilbert dönüşümü denklem (9)'a göre hesaplanır.

$$H(I(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

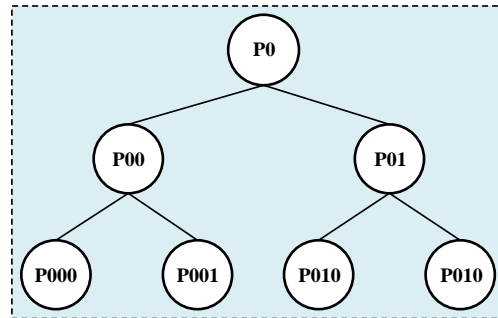
Ayrık zamanlı sinyaller için denklem (9) aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$H(I(t)) = \frac{1}{\pi} * I(t) \quad (10)$$

Hilbert dönüşümü bir sinyalin anlık büyüklüğünü hesaplamak için oldukça kullanışlıdır. Bu çalışmada denklem (10)'daki Hilbert dönüşümünün mutlak değeri özellik sinyali olarak kullanılmıştır. Yöntemin sonraki aşaması elde edilen özellik sinyalinin sıfır ve birlerden oluşan sembol serisine dönüştürülmesidir. Bu işlem denklem (11)'de gösterilmiştir.

$$S(t) = \begin{cases} 1, & H(t) \geq \text{medyan}(H(t)) \\ 0, & H(t) < \text{medyan}(H(t)) \end{cases}, t = 1, \dots, n \quad (11)$$

Denklem (11)'de sinyalin medyana göre değişimi sembol serisi olarak ifade edilmiştir. Bu sembol serisi oluşturulduktan sonra entropi hesabı için sembol ağacının oluşturulması gerekir. Üç seviyeli sembol ağacı Şekil 4'te verilmiştir.



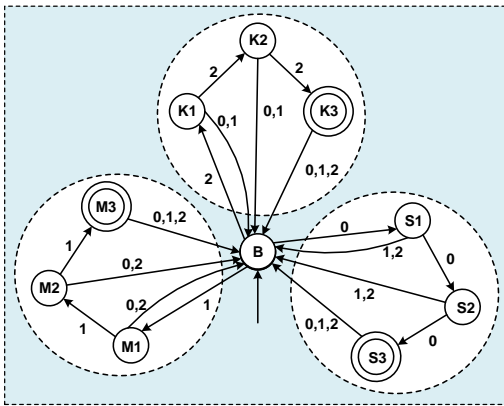
Şekil 4. Üç seviyeli sembol ağacı

Şekil 4’teki sembol ağacı her bir düğümde o seriye ait entropi oranını vermektedir. Sembol ağacında örneğin P00 düğümü elde edilen sembol serisindeki “00”ların sayısının toplam dizi uzunluğuna oranıdır. Ağaçtaki seviye arttıkça algoritmanın karmaşıklığı artar. Buna karşın farklı durumları birbirinden ayırt etmek daha kolay olur. Ağaçtaki bilgi entropisi denklem (12)’ye göre hesaplanmaktadır.

$$H_s = -\frac{1}{\log n} \sum_m P_m \log P_m \quad (12)$$

$$H = -\frac{1}{\log n} \left( \sum_{i=1}^L \left( \sum_{monceki} \frac{P_{monceki-1}}{w} \log \frac{P_{monceki+1}}{w} + \sum_{myeni} \frac{P_{myeni+1}}{w} \log \frac{P_{myeni+1}}{w} \right) + \sum_{mara} P_{mara} \log P_{mara} \right) \quad (13)$$

Denklem (13)’te monceki, mara ve myeni sırasıyla önceki pencere, ara pencere ve yeni pencereyi ifade eder. Bu denklemde L entropi ağacının seviyesini gösterir. Kayan pencereler arasındaki entropi hesabı bulanıklaştırma işlemine tabi tutularak bulanık otomatanın durumları arasında geçiş sağlanacaktır. Kayan ardışık pencereler arasındaki bilgi entropisi her adımda hesaplanarak otomatanın girişine verilmektedir. Otomata gelen girişlere göre durumunu sürekli günceller. Bu çalışmada önerilen bulanık otomata yapısı Şekil 5’te gösterilmiştir.



Denklem (12)’de sembol serisinin uzunluğu n ile gösterilmiştir. Denklemdeki m indisi sembol serisinde olasılığı (Pm) sıfırdan farklı olanların indisini gösterir. Gerçek zamanlı izleme için her defasında bir pencerecik akım sinyali alınmakta ve sonraki aşamada bir adım kaydırma işlemi yapılarak sonraki pencere elde edilmektedir. Bir önceki pencere ile sonraki pencere arasındaki entropi hesabı arıza indeksi olarak kullanılacaktır. Bu hesaplama denklem (13)’e göre yapılmaktadır.

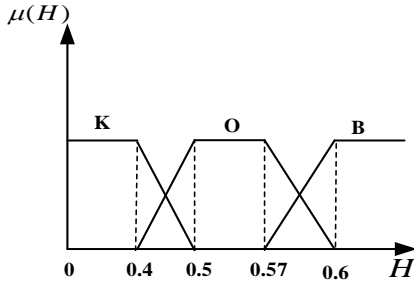
Şekil 5. Önerilen bulanık otomata

Şekil 5’teki bulanık otomatada B başlangıç durumunu göstermektedir. Bu durumdan diğer durumlara geçiş için entropi değerinin üyelik derecesi kullanılmaktadır. Bu geçişler ve temsil ettikleri durumlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen yöntemin çalışma performansı

Geçiş	Durum
0	Sağlam durum
1	Bir kırık rotor çubuğu arızası
2	Birden fazla kırık rotor çubuğu arızası

Otomatada S1, S2, S3 durumlarına gelen verinin bir eşik değerinin altında olması durumunda geçilmektedir. Aynı şekilde K ile ifade edilen durumlara bir kırık rotor çubuğu arızasında, M ile ilgili durumlara ise birden çok kırık rotor çubuğu arızasında geçilmektedir. Otomata her bir sağlam ve arızalı durum için son duruma sahiptir. Gelen girişleri modellemek için Şekil 6’daki gibi üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.



Şekil 6. Geçişler için kullanılan üyelik fonksiyonu

Şekil 6'da verilen üyelik fonksiyonu uzman bilgisine göre oluşturulmuştur. Şekil 6'da K küçük üyelik fonksiyonunu, O orta üyelik fonksiyonunu ve B ise büyük üyelik fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen entropi sonucunun her bir üyelik fonksiyonu için üyelik değeri hesaplanarak geçiş yapılacak durum hesaplanmalıdır. Bu amaçla denklem (14) kullanılmaktadır.

$$\mu_g = \max(\mu_H(K), \mu_H(O), \mu_H(B)) \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemde geçiş üyelik fonksiyonu maksimum üyeliğe göre hesaplandıktan sonra eğer bu değer K üyelik fonksiyonuna ait ise 0 geçişi, O üyelik fonksiyonuna ait ise 1 geçişi, aksi halde 2 geçişi olmaktadır.

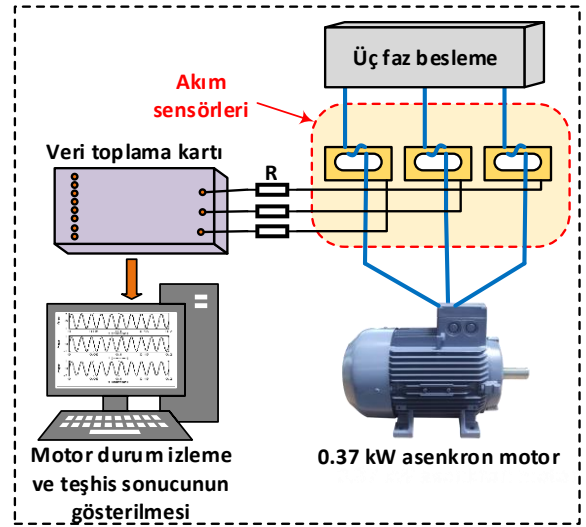
## 5. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada önerilen yöntemin uygulanması için gerçek bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde sağlam ve arızalı asenkron motorlar kullanılarak veriler alınmıştır. Bu çalışmada üç fazlı asenkron motorlar kullanılmıştır. Kullanılan asenkron motorların Gücü 0.37 kw, tam yük akımı 1.2 A, besleme frekansı 50 Hz, kutup sayısı 4, rotor çubuklarının sayısı 22 ve tam yükte çalışma hızı 1390 rpm'dir.

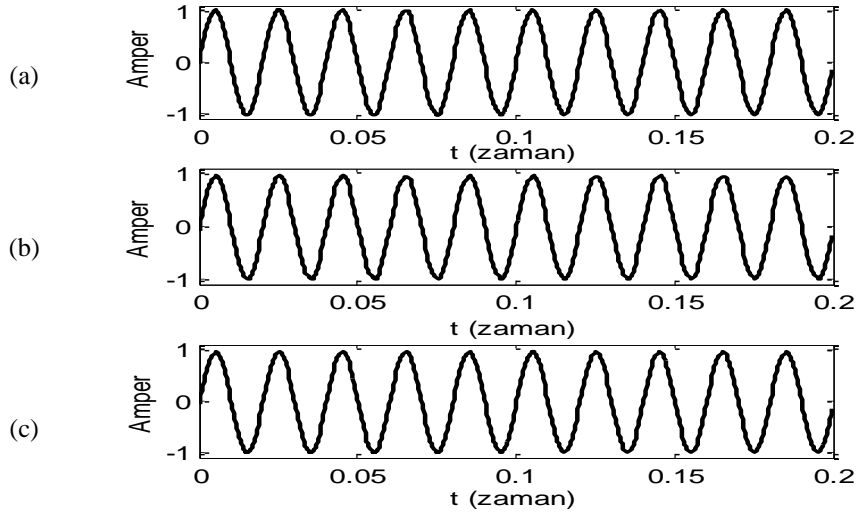
Kullanılan üç fazlı asenkron motorların faz akımlarını ölçmek için üç adet akım sensörü kullanılmıştır. Motordan ölçülen akım değerleri 16 bitlik Advantech PCL-816 model veri toplama kartı kullanılarak bilgisayara aktarılmaktadır.

Kurulan deney düzeneği Şekil 7'de verilmiştir. Her bir durum için örnekleme oranı 3.000 örnek/saniye ile faz akımları üç saniye boyunca okunarak bilgisayara kaydedilmiştir. Asenkron motordan veri aktarım hızı 3000 örnek/saniye olduğundan her periyottaki örnek sayısı denklem (8)'e göre 60 olarak bulunur. Her pencere toplam on periyottan oluştuğundan bir pencerenin boyutu 600 örnekten oluşur. Her bir on periyotluk sinyal arıza teşhisi için yeterli olmaktadır. Şekil 8'de sağlam ve bir kırık ve iki kırık rotor çubuğuna sahip motorun A fazından alınan akım sinyalleri görülmektedir.

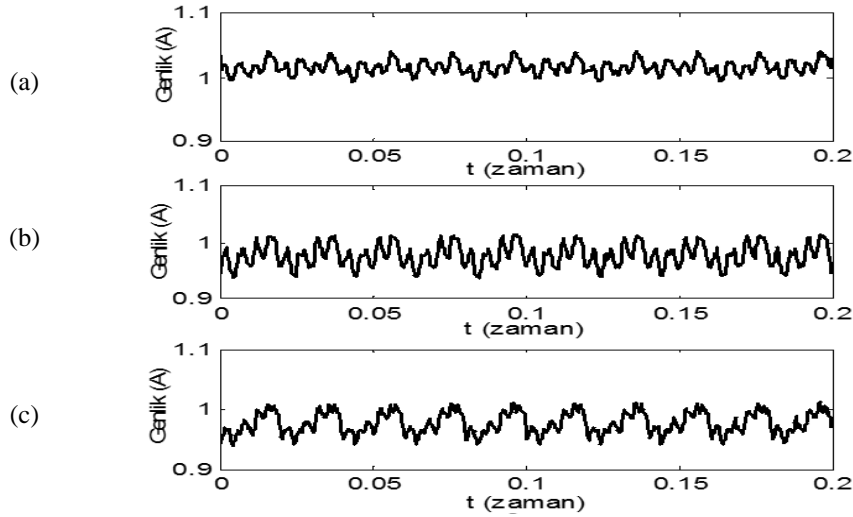
Şekil 8'deki akım sinyallerinden arızanın belirlenmesi oldukça zordur. Elde edilen her on periyotluk akım sinyallerine Hilbert dönüşümü uygulanmıştır. Sağlam ve arızalı motorlar için örnek bir dönüşüm Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 7. Bu çalışmada geliştirilen deney düzeneği

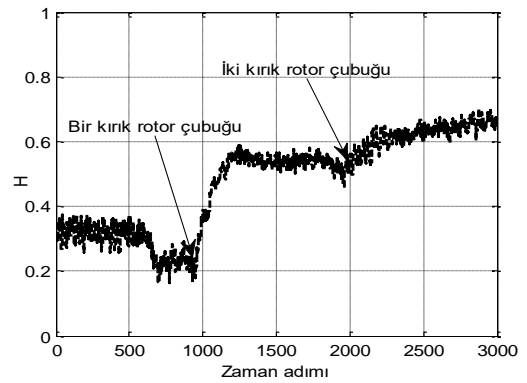


Şekil 8. Farklı durumlar için faz akımları (a) Sağlam (b) Bir kırık rotor çubuğu (c) İki kırık rotor çubuğu



Şekil 9. Özellik sinyali (a) Sağlam (b) Bir kırık rotor çubuğu (c) İki kırık rotor çubuğu

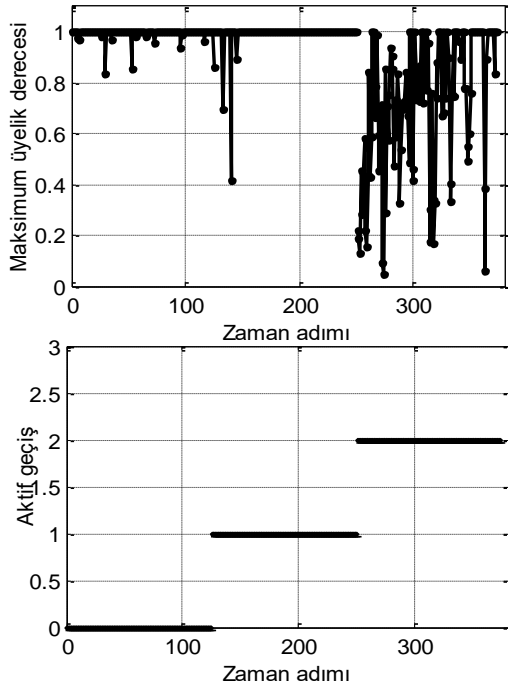
Şekil 9'da elde edilen her on periyotluk verinin sembol serisi oluşturulmakta ve daha sonra bu serinin entropi ağacı elde edilmektedir. Bu çalışmada entropi ağacının seviyesi üç olarak belirlenmiştir. Entropi ağacı elde edildikten sonra ardışık iki kayan pencere arasındaki entropi hesabı denklem (13)'e göre hesaplanır. Daha sonra bu entropi değeri bulanık otomata verilerek arıza teşhisi yapılmaktadır. Gerçek zamanlı test işlemi için her bir durumdan 1200 örnek alınmıştır. Bu veriler tek bir sinyal olarak birleştirilip sisteme verilmiştir. Şekil 10'da gerçek zamanlı izleme esnasında her bir durum için entropi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10. İzleme esnasında entropi değişimi



Şekil 10'da görülebileceği gibi sağlam ve arızalı durumlar arasındaki entropi değerleri oldukça farklıdır. Sağlam durumdan kırık rotor çubuğu arızasına geçerken küçük bir düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi aynı pencere içerisinde hem arızalı hem de sağlam verilerin olmasıdır. Her adımda hesaplanan entropi değeri bulanık otomataya verilir ve motorun durumu belirlenmektedir. Otomata üç adım boyunca aynı arıza türü ile ilgili veri alırsa o arıza ile ilgili son duruma ulaştığından motor durumu gösterilmektedir. Şekil 11 'de bulanık otomatanın izleme esnasında her bir durum için çıkışı gösterilmiştir.



**Şekil 11.** İzleme esnasında bulanık otomata çıkışı

Şekil 11 'de izleme esnasında entropi çıkışının maksimum üyelik derecesi ilk olarak hesaplanmaktadır. Maksimum üyelik fonksiyonu denklem (14)'e göre hesaplanmaktadır. Her bir arızanın son durumuna ulaşıldığında ise o anki aktif geçiş gösterilmektedir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada asenkron motorlarda oluşan arızalardan kırık rotor çubuğu için bulanık otomata tabanlı bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem arıza teşhisi için sadece motor akımına ihtiyaç duymaktadır. Stator akımının her on periyotluk kısmı bir pencere olarak alınıp sembol serisi oluşturulmakta ve bu serinin entropi ağacı oluşturulmaktadır. Ardışık pencereler arasındaki entropi değeri bulanık otomataya verilerek motor durumunun gerçek zamanlı izlenmesi sağlanmaktadır. Bu çalışmanın avantajları şöyle sıralanabilir:

- Herhangi bir şekilde motor kaymasının hesaplanmasına ihtiyaç duymamak,
- Yüksüz durumda tespit edilmesi zor olan kırık rotor çubuğu arızaları için yeni bir yöntem olması,
- Sadece on periyotta veri alınmasının arıza teşhisi için yeterli olması, dolayısıyla çok fazla veri kaydına ihtiyaç duyulmaması,
- Gerçek zamanlı olarak arıza teşhisinin yapılabilmesi,

Önerilen yöntemin sunduğu bu avantajlar deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Yöntem farklı ön işleme teknikleri kullanılarak diğer arıza türlerinin tespiti için de kullanılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışma 0692.STZ.2014 Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Santez projesi ve TÜBİTAK 109E105 projesi kapsamında desteklenmiştir.

## 7. Kaynaklar

1. Aydın, I., Karaköse, M., and Akın, E. (2015). Combined intelligent methods based on wireless sensor networks for condition monitoring and fault diagnosis, *Journal of Intelligent Manufacturing* **26.4**:717-729. DOI: 10.1007/s10845-013-0829-8
2. Batista, F. B., Lamim Filho, P. C. M., Pederiva, R., and Silva, V. A. D. (2016). An empirical demodulation for electrical fault detection in induction motors, *IEEE Transactions on Inst. and Measurement*, **65(3)**: 559- 569.

3. Akin, E., Aydin, I. and Karakose, M. (2011). FPGA based intelligent condition monitoring of induction motors: Detection, diagnosis and prognosis, IEEE International Conference on Industrial Technology.
4. Burriel-Valencia, J., Puche-Panadero, R., Martinez-Roman, J., Sapena-Bano, A. and Pineda-Sanchez, M. (2017). Short-Frequency Fourier Transform for Fault Diagnosis of Induction Machines Working in Transient Regime, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. DOI: 10.1109/TIM.2016.2647458
5. Jung, J. H., Lee, J. J. and Kwon, B. H. (2006). Online diagnosis of induction motors using MCSA, IEEE Trans. Ind. Electron., **33**:1842-1852.
6. Briz, F., Degner, M. W., Garcia, P. and Bragado, D. (2008). Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients, IEEE Trans. Ind. App., **44** : 760-768.
7. Supangat, R., Ertugrul, N., Soong, W.L., Gray, D.A. Hansen, C. and Grieger, J. (2006). Detection of broken rotor bars in induction motor using starting-current analysis and effects of loading, IET Proc. Electr. Power Appl., **153**, pp. 848-855.
8. Gupta, D. and Choubey, S. (2015). Discrete wavelet transform for image processing. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, **4(3)**: pp. 598-602.
9. Bessam, B., Menacer, A., Boumehraz, M. and Cherif, H. (2016). Detection of broken rotor bar faults in induction motor at low load using neural network. ISA transactions, **64**: 241-246.
11. Aydin, I., Karakose, M., and Akin, E. (2015). Anomaly detection using a modified kernel-based tracking in the pantograph–catenary system. Expert Systems with Applications, **42(2)**:938-948.
12. Brockwell, P. J. and Davis, R. A. (2013). Time series: theory and methods. Springer Science & Business Media.
13. Panadero, R. P., Sanchez, M. P., Guasp, M. R., Folch, J. R., Perez, E. H. and Cruz, J. P. (2009). Improved resolution of the MCSA method via Hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip, IEEE Trans. Energy Conv., **24**:52-59.
14. Rigatos, G. G. (2009). Fault detection and isolation based on fuzzy automata, Information Sciences, **178**:1893-1902.
15. Cui, C., Dang, Z., Fischer, T. R. and Ibarra, O. H. (2016). Execution information rate for some classes of automata. Information and Computation, **246**: 20-29.
16. Salomaa, A. (2014). Theory of automata, Cilt. 100. Elsevier.
17. Yaman, O., Karakose, M., Aydin, I. and Akin, E. (2014). Detection of pantograph geometric model based on fuzzy logic and image processing. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 686-689.
18. Yaman, O., Karaköse, E., Aydın, İ., Karaköse, M., and Akin, E. (2017). Pantograf-katener sistemler için bulanık mantık tabanlı belirlenen pantograf modeli kullanılarak ark tespiti yaklaşımı. Sakarya University Journal of Science, **21(4)**:724-739.
19. Santur, Y., Karaköse, M. and Akin, E. (2016). Chouquet fuzzy integral based condition monitoring and analysis approach using simulation framework for rail faults. International Conference on In Industrial Informatics (INDIN), pp. 345-350.
20. Li, L. and Daowen Q. (2015). On the state minimization of fuzzy automata, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **23**: 434-443.
21. Karakose, M., Yaman, O., Aydin, I., and Karakose, E. (2016). Real-time condition monitoring approach of pantograph-catenary system using FPGA. IEEE 14th International Conference on In Industrial Informatics (INDIN), pp. 481-486.