





# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Sincap Kafesli Asenkron Motorların Rotor Çubuk Kırıklarının Akustik Ölçümlerle Tespiti

 Osman Zeki ERBAHAN<sup>a,\*</sup>,  İbrahim ALIŞKAN<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Elektrik Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, TÜRKİYE*

\* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: osmanerbahan@gmail.com*

DOI : 10.29130/dubited.449604

### ÖZET

Üretim hatlarında çok kullanılan asenkron motorların arızaları, üretim hedeflerine ulaşılmasını önlemektedir. Bu şirketin hem karlılığını hem de sanayideki güvenilirliğini negatif etkilemektedir. Arızaların planlanması bakım çalışmalarının proaktif olması zorunludur. Proaktif bakım çalışmasında elektrik ekipman arızalarının oluşmasına meydan vermeden, tespitini, planlı bakım ve değişimini gerekli kılar. Alternatif Akım (AA) motor arızalarının titreşim, elektriksel değerler veya ses ölçümü ile tespiti çalışmaları yapılmakta ve birçok uygulamaları sanayide kullanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron motor rotor arızasının akustik ölçümlerle tespit edilebilirliği incelenmiştir. Akustik ölçümler ile sağlam ve arıza oluşturulan motorun ses dosyaları elde edilmiştir. Bu ölçümler için hazırlanan test devresinde AA sürücü, motor frenleme devresi ve kondenser mikrofon kullanılmıştır. Ses dosyalarının MATLAB yazılımı ile zaman domenindeki değişimi, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yapılarak frekans domenindeki değişimleri elde edilmiştir. Sağlam ve rotor çubuğu kırık olan motora ait farklı hız ve tork değerlerinde çalışması sırasında ölçülen ses dosyalarındaki FFT farkları tespit edilmiş, en yakın komşu algoritması (KNN) kullanılarak yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** *Sincap Kafesli Asenkron Motor, Rotor çubuk kırıkları, Akustik Sinyal, FFT, Matlab, KNN*

## Diagnostics of a Broken Rotor Bar Faults of Three-phase Squirrel Cage Induction Motor Using Acoustic Signals

### ABSTRACT

Failures of asynchronous motors used in production lines prevent the production targets. This has a negative impact on both the profitability of the company and its reliability in the industry. Planning of faults requires maintenance work to be proactive. Proactive maintenance ensures failure detection, planing and excanhange without failure. The determination of ac motor malfunctions by vibration, electrical values or sound measurement is carried out and many applications are used in the industry. In this study, acouistic measurement of asynchronous motor failures were investigated. Robust and malfunctioning motor sound files were obtained by acoustic measurements. The changes in the time domain of the sound files and the changes in the frequency domain were obtained by Fast Fourier Transform (FFT) with the Matlab software. FFT differences in sound files measured during operation of different speed and torque values of the robust motor and motor with broken rotor bar were determined and interpreted by K-Nearest Neighbor (KNN).

**Keywords:** *Squirrel cage induction motor, Broken rotor bar, Acoustic Signal, FFT, Matlab, KNN*

## I. Giriş

Asenkron motorlar sanayide en çok kullanılan ve en fazla elektrik tüketimine neden olan elektrik ekipmanlarıdır. Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) 2013 yılında yayınladığı Türkiye genel elektrik tüketim raporunda Türkiye’de elektrik enerjisinin %47,1’i sanayide, sanayide tüketilen elektrik enerjisinin %67’si motorlarda, motorlarda tüketilen elektrik enerjisinin %91’i 0,75-1000 kW güç aralığındaki motorlarda tüketilmekte ve bu motorların %87’sinin asenkron motorlar olduğunu yazmıştır. Bu değerler sanayide kullanılan asenkron motorların toplam enerji tüketiminin yaklaşık %25’ini kapsadığını göstermektedir [1]. Bu denli geniş kapsamlı kullanılan motorların arıza yapması üretim kayıplarına neden olmaktadır. Üretim kaybını önlemek için arızanın önceden tespitine yönelik proaktif bakım yapılması gereklidir. Bu çalışmada konu ile ilgili önemli birçok yöntem incelenerek, sincap kafesli asenkron motorların arızalarının teşhisine ilişkin bir çalışma aktarılacaktır. Yapılan literatür incelemesinde; sincap kafesli asenkron motoru oluşturan ekipmanlarının arıza oranları; rulman hataları %40, stator hataları %36 olarak belirlenmiştir [2]. Rulman hataları ve stator hataları ile ilgili olarak çok sayıda çalışma yapılarak muhtelif çözüm yöntemleri önerilerek uygulama alanı bulmuşlardır [3] [4]. Asenkron motorlardaki arızaların %5 - %10 yük kısmının rotor çubuklarının kırılması şeklinde meydana geldiği tespiti yapılmıştır [5]. Ancak rotor arızalarının teşhisinde kolay ve güvenilir çözüm yöntem ve ölçme aparatları günümüzde henüz kullanılabilir aşamaya ulaşmamıştır. Bu nedenle bu konuda çalışma yapılması kararı alınmıştır. Akustik ölçme yöntemi kullanılarak tek fazlı asenkron motorda arıza tespiti incelenmiş [6], benzer ölçme ile senkron motorlarda arıza tespitinde çalışma yapılmış [7] [8], akustik ölçüm kullanılarak motorlardaki arızaların tespitinde birçok çalışma yapılmış, farklı algoritmalar arıza tespitinde başarı ile uygulanmıştır [9] [10]. Sürücülü sistemlerde uygulanacak rotor kırığı arıza tespit yöntemi, hem açık hem de kapalı çevrim sürücülerdeki endüksiyon motorları için bozuk rotor çubuğu hatasını tespit edebilir [11]. Rotor kırığı tespitinde önerilen diğer bir yöntem, faz akımının Hilbert dönüşümünü ve bu dönüşüm modülünün FFT ile spektral analizini içerir [12]. Stator ve rotor arızalarının incelendiği ayrı bir çalışmada kırık rotor çubuğu ile ilgili özelliklerin çıkarımı için Fourier dönüşümüne dayalı motor akım imza analizi kullanılmıştır. Stator arızaları için ise park vektör dönüşümü ve temel bileşen analizi tabanlı bir özellik çıkarım işlemi yapılmıştır. Modeli gerçekleştirmek için ileri beslemeli bir yapay sinir ağı kullanılmıştır [13]. Zarf analizi yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar istatistiksel analiz yöntemlerinin sincap-kafesli asenkron motorlarda rotor arızalarının incelenmesinde ve tespit edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir [14]. Enerji yoğunluğu değişimini inceleyen çalışmada geliştirilen kırık rotor çubuğu arızası tespit yöntemi motorun çektiği üç fazlı ani güçteki 90-110 Hz frekans aralığındaki bileşenlerin enerji yoğunluğu değişimi temeline dayandırılmıştır [15]. Diğer çalışmada iki ve üç boyutlu modelleme ile stator akım ve akı sinyalleri ile rotor arıza tespiti yapılmış, sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik akı çizgileri incelenmiştir [16]. Çalışma [17]’de asenkron motorlarda sıkça karşılaşılan rotor hatalarını deneysel olarak inceleyebilmek için bir deney seti geliştirilmiştir. Ayrıca motorun rulman ve rotor eksen bozukluğu tespiti için, elektrik motorlarından akım işaretlerini kullanarak dalgacık ve spektral analiz yöntemlerinin birleşiminin kullanılabileceği de gösterilmiştir [18].

İndüksiyon motorlarında ses ve titreşim sinyalleri yoluyla hata tespit metodolojisi konulu makalede günümüzde, elektrik motorunun zamanında bakımı, endüstriyel üretimdeki karmaşık işlemleri takip etmek için hayati önem taşımaktadır denilerek arıza teşhisi için çeşitli metodolojiler mevcut olduğu, genellikle teşhiste, kararlı durumda çalışan motor akım sinyallerinin analizinin tercih edildiği aktarılmıştır. Genel olarak mevcut sinyallere ait zaman-frekans ayrışması ile ilgili hataları tanımlayan motor akım analizi tercih edilir [19].

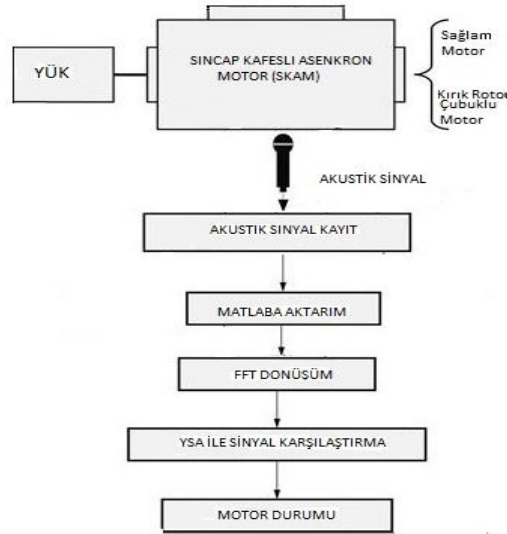
Diğer bir makalede, üç fazlı bir sincap kafes indüksiyon motorunun rotor kafes kırığı arıza teşhis tekniği sunulmaktadır. Yöntem rotor bar direnci değişiminden etkilenen basitleştirilmiş bir model kullanarak geliştirilmiştir. Üç fazlı zaman etki alanı modeli temel alınarak, her durumdaki tork hız karakteristiğini araştırmak için rotor çubuk kırıkları gibi istenmeyen koşullar simüle edilmiştir [20].

Yukarıda sunulan araştırma sonuçları ışığında sağlam motorda çeşitli hız ve yüklerde akustik ölçümler yapılarak bunların Matlab aracılığı ile FFT'si alınmıştır. İkinci motorun rotorunda çubuk hatası oluşturularak benzer ölçümler bu motorda da yapılarak FFT değerleri tespit edilmiştir. KNN ile de arızalı motor tespiti yapılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında, test devresi açıklanmış, rotor çubuk arızasının oluşturulması aktarılmıştır. Ardından, test ölçümleri ve veri tabloları verilmiştir. Son olarak sonuç kısmında test ölçümlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi yapılmıştır.

## II. TEST DEVRESİ

Bu bölümde ilk olarak üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun rotor çubuklarındaki kırıkların tespiti için test devresinin tespiti işlemi tamamlanmış, devrede kullanılacak olan 2 adet GAMAK motor temin edilmiştir. Hız ayarı yapılabilmesi için ABB marka AA sürücü temin edilmiştir. Akustik ölçüm için bir adet kondenser mikrofon temin edilmiştir. Şekil 1 de teste ait blok diyagramı verilmiştir.

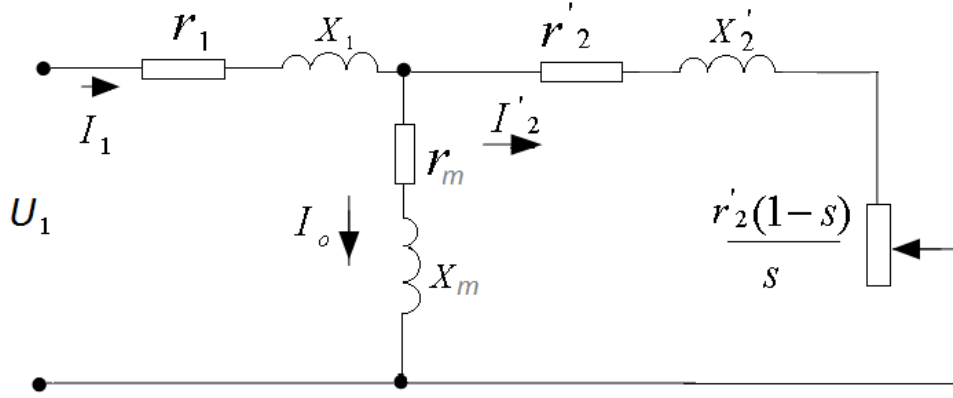


Şekil 1. Teze ait Test Devresinin Blok Diyagramı

Test düzeneğinde görülen her bir elemana ilişkin detaylı bilgilendirmeler aşağıda yapılmıştır.

### A. ASENKRON MOTORLAR

Asenkron motorlarda sargı direncinin bulunması deneysel olarak, boşa çalışma deneyi ve kısa devre deneyinin sonucunda elde edilebilir. Buna göre Şekil 2'de verilen T şekilli eşdeğer devre elde edilir. Eşdeğer devrenin sağ tarafı rotoru sol tarafı ise statoru gösterir. Eşdeğer devrede görülen ayarlı direnç rotor eşdeğer devresindeki kaymayla değişen omik direnci yani yükü temsil eder [21] [22] [23].



Şekil 2. Asenkron motorun bir fazına ait T- eşdeğer şeması

Motorun rotorunun dönme hızı ( $n_2$ ), statorun oluşturduğu manyetik alanın dönme hızından ( $n_1$ ) küçüktür. Bu farka  $s$  kayma adı verilir.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ ,  $p$  motorun çift kutup sayısıdır,  $n_2$  motorun dönme hızıdır,  $f_1$  stator besleme frekans değeridir.

Devreye ait akım ve gerilim denklemleri;

$$I_1 = I'_2 + I_0 \quad (2)$$

$$U_1 = I_1(r_1 + jx_1) + I'_2((r'_2 + r'_2(1-s)/s) + jx'_2) \quad (3)$$

Burada,  $r_1$  stator sargı direncini,  $x_1$  stator kaçak akı reaktansını,  $I_1$  stator akımını,  $U_1$  şebeke gerilimini,  $I'_2$  statora indirgenmiş rotor akımını,  $I_0$  boşa çalışma akımını,  $r'_2$  statora indirgenmiş rotor direncini,  $s$  kaymayı,  $x'_2$  ise statora indirgenmiş rotor kaçak akı reaktansını göstermektedir. Makinanın mil gücü denkliği üzerinden rotor kırığının  $r'_2$  değerine ve dolayısıyla da momente etki edeceği görülür.

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2}{s \cdot w_1 \left[ \left( r_1 + \frac{c_1 r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]} \quad [N.m] \quad (4)$$

Eşitlikte  $m_1$  stator sargıları faz sayısı,  $w_1$  manyetik alanın açısal dönme hızıdır.  $w_1 = (2\pi n_1/60)$  [rad/s] olarak formüle edilir. Burada  $c_1$  değeri yaklaşık olarak  $1 + (x_1/x_m)$  olarak alınmalıdır. Gücü 1 kW değerinin üstünde olan motorlarda  $c_1$  değeri 1,04 ile 1,08 civarında olabilir [24].

Bu çalışmadaki asenkron motorlar GAMAK marka AGM71 4a model 3 faz 0.25kW 1390 devir/dakika, 380V AA, 0.8A özelliklere sahip iki adet sincap kafesli asenkron motordur. Şekil 3'de kullanılan motorlara ait resim verilmiştir.



*Şekil 3. Deneylerde kullanılan GAMAK AGM71 4a motor*

### *B. AA SÜRÜCÜ*

Test devresinde farklı çeşitli hızlarda akustik ölçü yapılabilmesi için devrede ABB marka ACS150 model 0.37kW gücünde bir sürücü kullanılmıştır. Üç fazlı asenkron motorların birim zamandaki devir sayıları besleme frekansı  $f_1$  ile doğru orantılı, kutup sayısı  $p$  ile ters orantılıdır. Bir asenkron motorun devir sayısını değiştirmek için ya motora uygulanan gerilimin frekansı ya da stator sargılarının kutup sayısının değiştirilmesi gerekir. Mevcut bir motor için sargılardaki kutup sayısını değiştirmek mümkün olmadığından bir asenkron motorun devir ayarı besleme geriliminin frekansı üzerinden gerçekleştirilebilir. Bu amaca uygun olarak gerçekleştirilen U/f denetleyicileri literatürde görmek mümkündür [25]. Bu amaçla frekans konvertörleri motor devir ayarlamasında kullanılır. Şekil 4’de kullanılan U/f hız kontrolörü sunulmuştur.

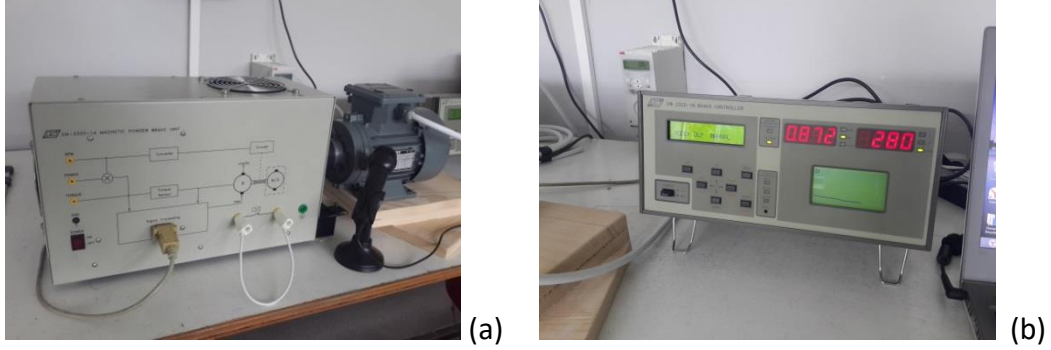


*Şekil 4. Kullanılan ABB ac sürücü 0.37 kW*

### *C. FRENLEME ÜNİTESİ*

Farklı yüklerde akustik ölçüm yapılabilmesi için Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi/ Elektrik Makine Laboratuvarında bulunan frenleme test ünitesi kullanılmıştır. Frenleme ünitesi Şekil 5a’ da ve frenleme ünitesinin kontrol modülü Şekil 5b’ de gösterilmiştir. Frenleme Ünitesi K&H marka EM3320-1A model Manyetik Toz Fren Ünitesidir. Elektromanyetik tozlu fren sistemi gerilim kontrolü ile değişken torqu kademesiz sağlayan fren ve kavramalardır. Sürtünmesiz çalıştığı için aşınma diğer sistemlere göre daha azdır, uzun ömürlüdür. Antimanyetik veya plastik bölüm içine manyetik toz doldurulur bu muhafazanın karşısına yerleştirilmiş bobine gerilim uygulanınca elektromıknatısın sonu bobin karşıdaki

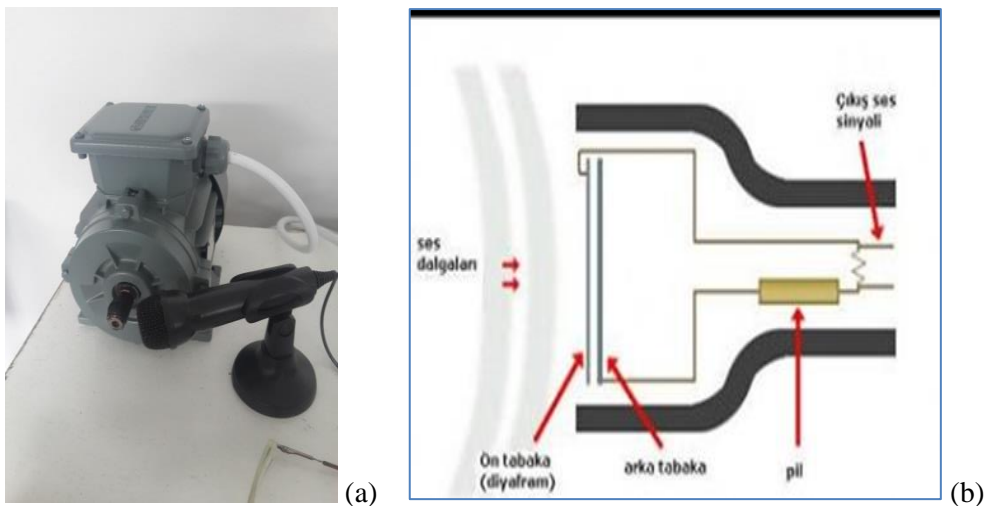
muhafazayı çeker. Tozlu kısım hareketli kısma yerleştirilir. Bobine uygulanan gerilim kaldırıldığında frenleme yapmaya başlar. Uygulanan gerilim kademesine göre fren şiddeti değişir. Fren Kontrol Modülü EM3320-1N model olup ayarlanan tork değerine göre manyetik toz fren ünitesine gerilim uygulayan bir yapıya sahiptir.



Şekil 5. (a) Frenleme Ünitesi (b) Frenleme ünitesi kontrol modülü.

#### D. MİKROFON

Akustik ölçümler için TRUST marka kondenser tip mikrofon kullanılmıştır. Mikrofonun hassasiyet aralığı 100Hz ile 10kHz arasındadır. Şekil 6a' da kullanılan mikrofon resmi verilmiştir. Kondenser mikrofon, genelde stüdyo çekimlerinde kullanılan, hassas, üst frekanslarda yani tiz seslerde ve harmonik cevaplarda oldukça verimli bir mikrofon çeşididir. Şekil 6b de görüleceği üzere, kondenser mikrofonlarda genelde elektrik yüklenmiş iki levha bulunur. Bu iki levhadan biri hareket edebilen bir yapıdadır ve diyafram olarak çalışır. Diğer ikinci levha ise sabittir. Bu iki levhadan biri + yüklü iken diğeri - yüklüdür. Levhalar arasındaki hava boşluğu ise kapasitör yani bir başka ifadeyle kondansatör etkisi yaratmaktadır. Sesin diyaframa baskı uygulaması sonrasında sabit duran ikinci plaka ve aradaki boşluk hacimsel olarak büyüyüp küçülmeye başlar. Aradaki boşluğun hareket halinde olması, voltaj potansiyelini değiştirir.



Şekil 6. (a)TRUST Marka mikrofon (b) Kondenser Mikrofonun yapısı

Kondenser mikrofonlar, diğer mikrofonlara göre oldukça pahalıdır. Aynı zamanda kondenser mikrofonlar, fiziksel olarak diğer mikrofonlardan daha ağırdır. Öte yandan kondenser mikrofonları çalıştırmak için genellikle dışardan bir elektriğe ihtiyaç duyulmaktadır.

Bunlara ek olarak akustik ölçümleri kaydetmek ve MATLAB dönüşümleri yapabilmek amacı ile LENOVA marka bir Laptop kullanılmıştır (Lenova Ideapad Z500 Core i7 Model 20202).

## II. ROTOR HATASININ OLUŞTURULMASI

Sincap kafesli motorların tork eğrilerinin rotor direncine göre değişimi incelendiğinde, rotor direnci arttığında tork eğrilerinin sola doğru kayarak başlangıç tork değerlerinin arttığı gözlemlenir. Rotor çubuk kırıkları rotor direncini artırır. Böylece motorun tork eğrisinde maksimum tork noktasının sola doğru kaymasına sebep olur, kısaca kaymayı artırır. Rotor direncindeki bu değişiklik torktaki değişim ile yakalanabilir. Bu değişim değerine göre kırık rotor çubuk sayısı belirlenebilir.

Motorun rotor çubuklarının kırılması halinde, motorun devreye girişinde kalkışı uzar ve güçleşir, motor gürültüsü değişir. Sürekli işletmeye geçince stator akımını gösteren ampermetre ibresi rotor frekansında salınım yapar. Bir kafes arızası zamanında fark edilmezse kafesin, hatta rotor saç paketinin komple değişmesi gerekebilir [26].

Çalışmamızda rotor motordan çıkarıldıktan sonra rotorun alüminyum kısa devre çubuklarının bulunduğu noktadan 2mm çaplı delik açılarak kırık çubuk arızası oluşturulmuş, boşluk silikon ile kapatılarak farklı ses oluşturmasının önüne geçilmiştir. Şekil 7’de rotora açılan delik gösterilmiştir.



*Şekil 7. Tek rotor çubuk hasarı (Delik çapı 2mm)*

## III. TEST ÖLÇÜMLERİ

Üç fazlı 380V gerilim ile beslenen motor için kullanılan AA sürücü şebekeye bağlanmıştır. Motor, frenleme ünitesine uygun kaplin ile bağlanarak titreşim oluşturmayacak şekilde akuple edilmiştir. Mikrofon motorun miline yakın kısma yerleştirilmiştir. Mikrofon bilgisayara bağlanarak laptop ile wma formatındaki ses dosyaları Tablo 1 ve 2 de belirtilen yük ve hız değerlerine göre kaydedilmiştir.

### *A. ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI*

Motor hızını sürücü ile kontrol ederken, yükün değişimi Frenleme kontrol cihazı üzerinden Nm olarak

yapılmıştır. Motor nominal tork değerine göre %0(yüksüz), %25, %50, %75, %100 ve %125 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bunlar sağlam ve çubuk arızası oluşturulan motorlarda uygulanmıştır. Bu durumlara ait ses dosyaları kaydedilmiştir. Şekil 8’de test devresine ait resim verilmiştir.



*Şekil 8. Çalışmada kullanılan test düzeneği*

## B. VERİ TABLOLARI

Yapılan çalışmada sağlam ve rotor çubuk arızası oluşturulan motorlara ait wma uzantılı ses dosyaları Tablo1 ve 2 de verilen hız ve tork değerlerinde 9 sn boyunca kayıt altına alınmıştır.

*Tablo 1. Sağlam motora ait farklı hız ve yüklerde elde edilen ses dosyaları*

Hız	Tork	0% (0Nm)	25% (0,429Nm)	50% (0,858Nm)	75% (1,287Nm)	100% (1,717Nm)	125% (2,146Nm)
25% 347rpm		Ses1	Ses6	Ses11	Ses16	Ses21	Ses26
50% 696rpm		Ses2	Ses7	Ses12	Ses17	Ses22	Ses27
75% 1042rpm		Ses3	Ses8	Ses13	Ses18	Ses23	Ses28
90% 1251rpm		Ses4	Ses9	Ses14	Ses19	Ses24	Ses29
100% 1390rpm		Ses5	Ses10	Ses15	Ses17	Ses25	Ses30



**Tablo 2.** Rotor çubuğunda tek kırık bulunan motora ait farklı hız ve yüklerde elde edilen ses dosyaları

Hız	Tork	0% (0Nm)	25% (0,429Nm)	50% (0,858Nm)	75% (1,287Nm)	100% (1,717Nm)	125% (2,146Nm)
25% 347rpm		rses1	rses6	rses11	rses16	rses21	rses26
50% 696rpm		rses2	rses7	rses12	rses17	rses22	rses27
75% 1042rpm		rses3	rses8	rses13	rses18	rses23	rses28
90% 1251rpm		rses4	rses9	rses14	rses19	rses24	rses29
100% 1390rpm		rses5	rses10	rses15	rses20	rses25	rses30

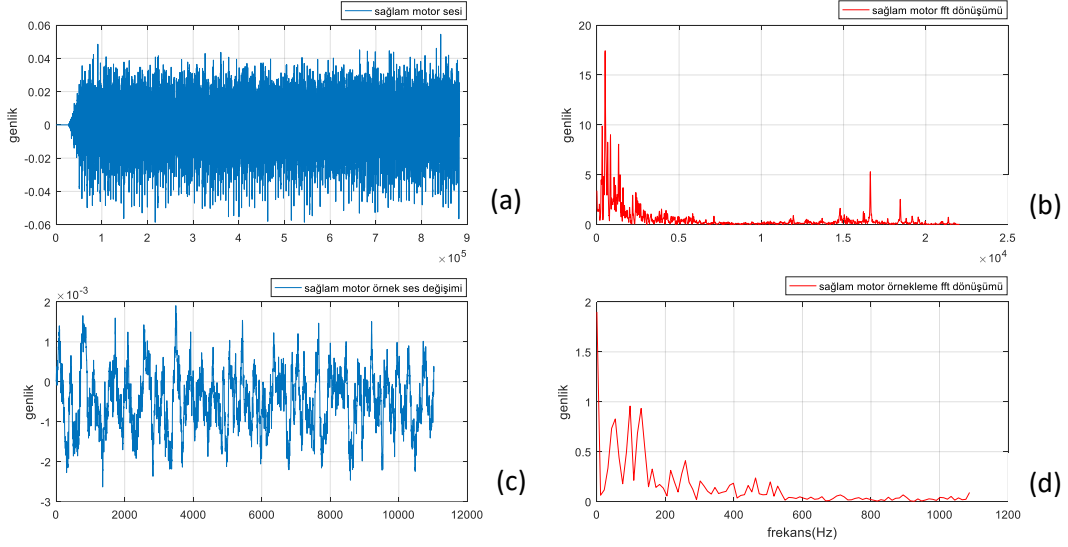
### C. ÖLÇÜM DEĞERLERİ

Kayıt altına alınan ses dosyalarının Matlab ile değerlendirilmesi ve FFT elde edilmesi aşağıdaki yazılım ile sağlanmıştır. Motorun kayıt edilen ses dalgası değerleri normalize edilmiştir. Daha sonra pencereleme metodu uygulanarak filtreleme yapılmıştır [6]. Elde edilen örnek ses dalgasının FFT sayesinde spektrumları kayıt altına alınmıştır. Veri tablosunda belirtilen **ses13.wma** ses dosyası sağlam yapıda motorun %50 tork ile (0,858Nm) ve %75 devrindeki (1042rpm) durumundaki halini göstermektedir. Sağlam motora ait Matlab yazılımı Şekil 9’da verilmiştir.

```
[y,fs] = audioread('ses13.wma');          %audiofile okuma
y = resample(y,100000,fs);
% pencereleme ve ortalama değerin oluşturulması
yy1=y(1:11025);yy2=y(11026:22050);yy3=y(22051:33075);...;yy80=( y(870776:881800));
yy=(yy1+yy2+yy3+yy4+yy5+yy6+yy7+yy8+...+yy80)/80;
sound(y,fs);
N = length(y);                          %y uzunluğu
t = (0:1/fs:(N-1)/fs);                  %time axis vector
figure;                                  %cizdirme
subplot(2,2,1);                          %ortak alanda y zaman cizdirme
plot(t,y);                                %zaman y grafiği gridli olarak
grid;                                     %time axis vector
legend('sağlam motor sesi');              %başlık yazdırma
xlabel('zaman(s)');                       % x eksen başlığı yazdırma
ylabel('genlik');                          %y eksen başlığı yazdırma
freq = linspace(0,fs,N);                  %frekans x eksenini tanımlama
F = fft(y,N);                             %Sinyalin fast fourier transformu
maxFreq = N/4;                            %Sinyalin max frekansı
.....
```

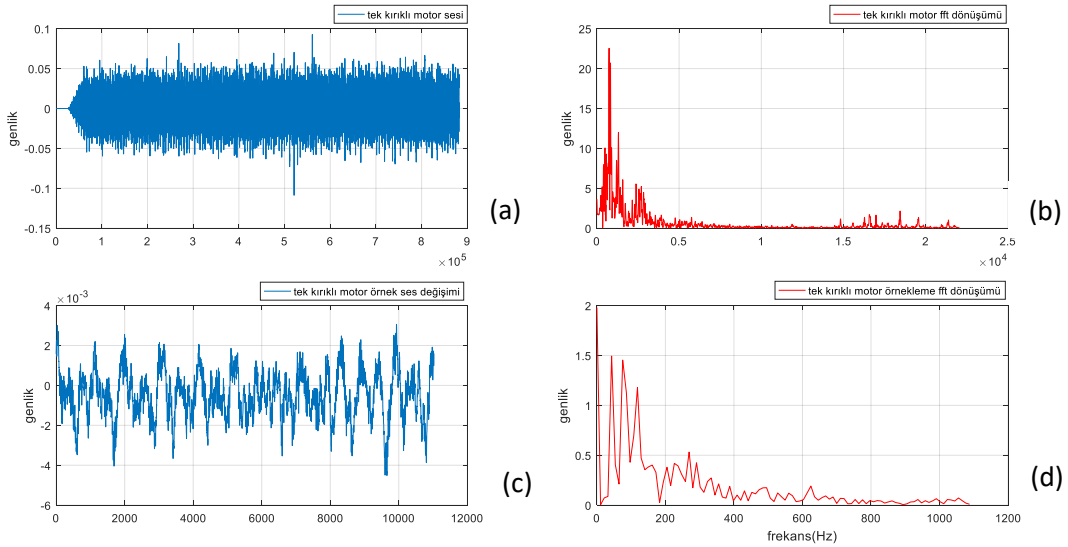
**Şekil 9.** Sağlam motora ait Matlab yazılımı

Örnek olarak belirtilen **ses13.wma** dosyasının Matlab ile değerlendirilmesi sonrasında elde edilen spektrumlar aşağıdaki Şekil 10’da verilmiştir.



**Şekil 10.** Ses13.wma ses dosyası sağlam yapıda motorun %50 tork ile (0,858Nm) ve %75 devrindeki (1042rpm) spektrumları; (a) 9 sn süreli kaydedilen ses dalgası, (b) 9 snlik ses dalgasının fft dönüşümü, (c) Örnek alınan ses dalgası, (d) Örnek ses dalgasının fft dönüşümü

Kırık rotorlu motora ait %50 tork (0,858Nm) ve hız %75 (1042rpm) değerlerindeki rses13.wma ses dosyası yukarıdaki kodla işlenmiş ve Şekil 11’de görülen spektrumlar elde edilmiştir.



**Şekil 11.** Kırık rotorlu motora ait %50 tork (0,858Nm) ve hız %75(1042rpm) değerlerindeki rses13.wma ses dosyasının spektrumları; (a) 9 sn süreli ses dalgası, (b) 9 snlik ses dalgasının fft dönüşümü, (c) Örnek alınan ses dalgası, (d) Örnek ses dalgasının fft dönüşümü

### C. ÖLÇÜM DEĞERLER ANALİZ VE İSTATİSTİKLERİ

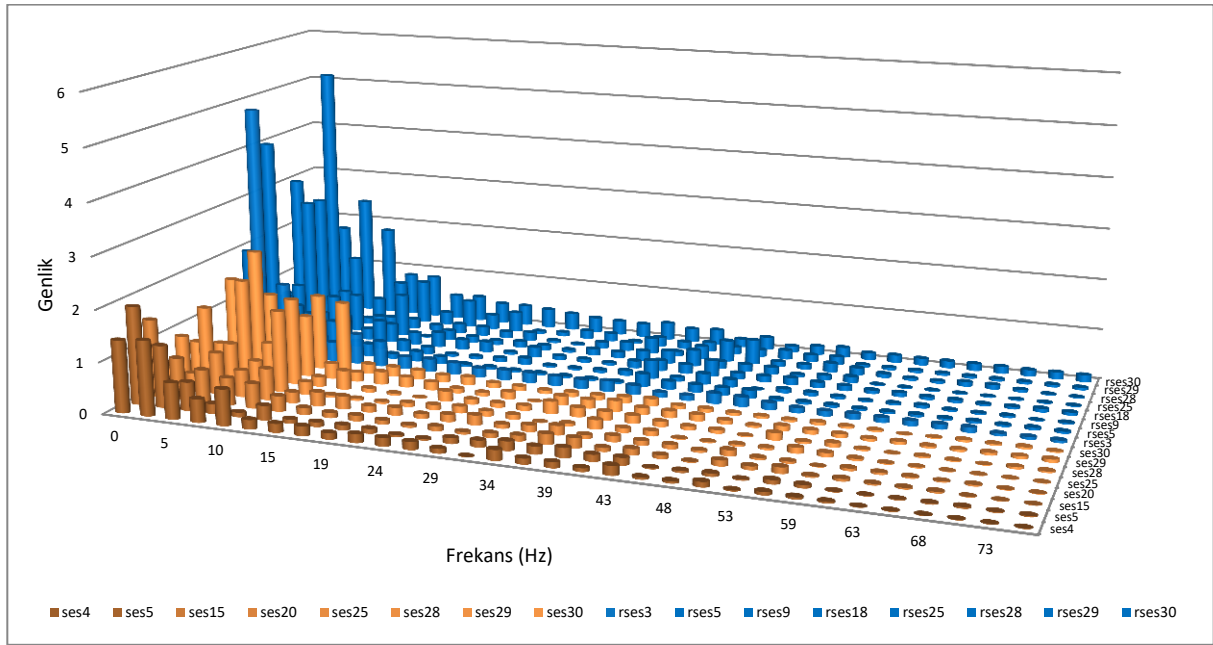
Bu çalışmada, sağlam ve rotorundaki çubuklarında hasar oluşturulan motorlarda akustik ölçümler yapılarak farklı hız ve yüklerde bu kayıt işlemleri tamamlanmıştır. Ses dosyalarının pencereleme

çalışmaları sonrasında elde edilen FFT sonuçlarından örnek alınan değerler Tablo 3’de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde hasarlı motorun düşük hızlardaki genliklerinde fark olduğu gözlenmiştir.

**Tablo 3.** Sağlam ve Rotor çubuğunda tek kırık bulunan motora ait 50% tork (0,858Nm) ve 75% (1042rpm) hızında çalışırken alınan ses dosyalarının örnekleme FFT karşılaştırılması.

Frekans (Hz)	0	43	75	86	107	118	161
Genlik (Sağlam Motor)	1,9	0,73	0,17	0,49	0,21	0,68	0,32
Genlik (Hasarlı Motor)	1,9	1,49	1,45	1,12	0,69	1,17	0,40

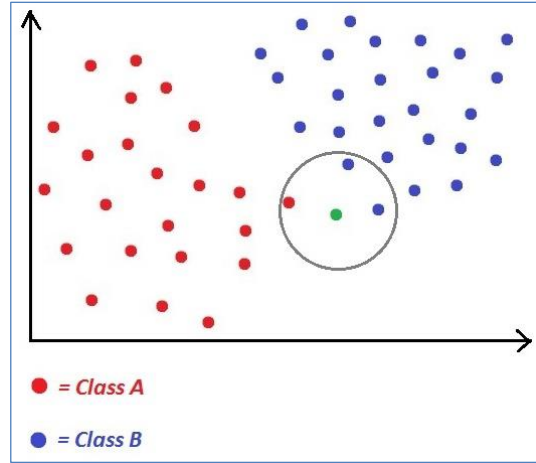
Ayrıca sağlam ve hasarlı motor ses fft verileri Şekil 12’de çubuk grafik olarak verilmiştir. Grafikte kahverengi ile gösterilen veriler sağlam motor verileri olup, hasarlı motor verileri mavi renkle işaretlenmiştir. Grafikten görüleceği üzere hasarlı motor verilerinin sağlam motor değerlerine göre önemli farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıkların algoritmalar vasıtasıyla incelenerek sonuçlar elde edilmesine çalışılmıştır. Bu amaçla sağlam ve hasarlı veri tablosu hazırlanarak normalize edilmiş KNN algoritması kullanılarak inceleme yapılmıştır.



**Şekil 12.** Sağlam ve hasarlı motora ait ses fft verileri

KNN algoritması ilk olarak Cover and Hart tarafından ortaya atılmıştır. KNN algoritması günümüzde veri madenciliği, istatistiksel örüntü tanıma gibi birçok alanda kullanılan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Algoritmanın yaygın olarak birçok alanda kullanılmasının nedenleri arasında gürültülü verilerde iyi sonuç vermesi ve sınıflandırma modelinin hızlı oluşturulması söylenebilir [27].

Algoritma “En yakındaki komşuluğa göre sınıflandırma yap” prensibine göre çalışmaktadır. Algoritma sınıflandırma yaparken eğitim kümesinde ve test kümesinde var olan verileri öznitelik uzayına taşır. KNN sınıflandırma algoritması test kümesine ait bir örneği sınıflandırırken örneğe en yakın K tane komşuya bakıp Şekil 13’de görüldüğü gibi bir oylama yöntemiyle sınıf atamasını gerçekleştirir [28].



Şekil 13. KNN algoritma En Yakın komşu sınıfı (Class) tanımlama

Algoritmanın çalışma adımları aşağıdaki gibidir:

1) K komşuluk sayısı belirlenir;

KNN algoritmasında, komşu sayısı (K) parametresinin değerine dayalı olarak sınıflandırma yapılmaktadır. Sınıflandırma sürecinde, K=1 için, sadece en yakın komşunun bulunduğu sınıfa atanırken, K sayısı örnek sayısına (n) yaklaştıkça veri setinde yer alan tüm veriler dikkate alınmaktadır.

2) Sınıfı bilinmeyen obje ile eğitim kümesindeki bütün objeler arasındaki mesafe hesaplanır. Bu hesaplama iki vektör arasındaki uzaklığın hesaplanması şeklindedir. Genellikle bu hesaplamada Öklid (Euclidean) uzaklığı yöntemi kullanılır;

Öklid uzaklığı, sınıflandırma ve kümeleme algoritmalarında en sık kullanılan uzaklık ölçütüdür. Bu iki nokta arasındaki doğrusal uzaklık olup herhangi iki nokta, P ve Q arasındaki Öklid uzaklığı d;  $P=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ve  $Q=(y_1, y_2, \dots, y_n)$  olmak üzere, aşağıda verilen formüle göre hesaplanır [29].

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

3) Sınıfı bilinmeyen obje ile eğitim kümesinde bulunan her bir obje arasındaki mesafe en düşük olacak şekilde K tane eğitim kümesi objesi seçilir;

4) Bu K tane en yakın komşudan çoğunluk oylaması yöntemiyle yeni gelen objenin sınıfı belirlenir.

Sonuçlar KNN algoritması ile inceleneceğinden 54 adet ses dosyasının [54x103] boyutunda Data dosyası oluşturulmuştur. Bu dosyadaki 18 veri sağlam motora, 36 veri hasarlı motora aittir. Öncelikle bu matrisin doğru sonuca ulaşması için tüm değerleri normalize edilerek, 44 veri Training amaçlı, 10 veri Test amaçlı kullanılmıştır. Matlab için oluşturulan Kod Şekil 14'de verilmiştir.

```
%KNN En yakın Komşu algoritması
Data= xlsread('MotorverileriKNN4.xlsx');
DataTrain=Data(1:44,:);
DataTest=Data(45:54,:);
TrX=DataTrain(1:44,1:102);
TrY=DataTrain(:,103);
TsX=DataTest(:,1:102);
```

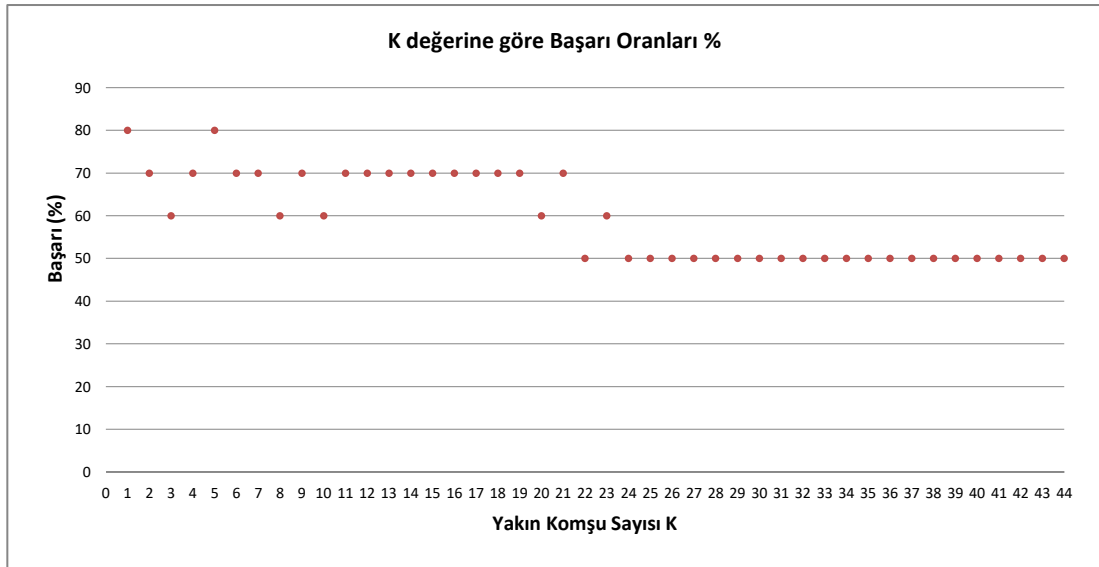
```

TsY=DataTest(:,103);
K=1;
Class=zeros(10,1);
for i=1:10;
Class(i)=KNN(TrX,TrY,TsX(i,:),K);
%En yakın Komşu Distanz hesabı fonksiyonu
function Class = KNN(TrX,TrY,testSampleX,K)
Class = 0;
[TrDNum FeatureNum]= size(TrX);
Dist=zeros(TrDNum,1);
for j=1:TrDNum
Dist(j)=norm(TrX(j,:)- testSampleX);
end
[SortedDist SortingIndices]=sort(Dist);
NearestIndices=SortingIndices(1:K);
NearestClasses=TrY(NearestIndices);
ClassOne=(NearestClasses==1);

```

**Şekil 14.** K-NN algoritması için ait Matlab yazılımı

Matlab uygulaması sonrasında mevcut motor durumu vektörünün Class ile tanımlanan KNN ile bulunan değer vektörü karşılaştırılmıştır. Şekil 15’de K değerine göre başarı değişimi görülür.



**Şekil 15.** KNN incelemesinde K değerine göre başarı oranları

## IV. SONUÇ

Sonuç olarak, sağlam ve rotoru kırık motorun FFT değerlerindeki Tablo 3’de verilen değerler dikkate alınarak, motorun rotor çubuklarında oluşan kırıkların akustik ölçümler ile tespiti mümkün görülmüştür. Tablo 3 de sağlam motor verilerinin, arızalı motor değerlerine göre artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu farklılığın sebebi rotor direncinin değişmesi nedeniyle motor momentindeki değişimdir. Ayrıca KNN algoritması uygulandığında, bulunan değer vektörü karşılaştırıldığında Şekil 15de verilen ilişki ortaya

çıkılmaktadır. Buna göre En Yakın Komşu sayısı K değeri 1 ve 5 olduğunda en iyi değer olan %80 oranında başarıya ulaşılmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak oluşturulacak cihaz ile arıza bildirim ve ikazı oluşturulabilir.

## V. KAYNAKLAR

- [1] G.K. Esen, “Türkiye ve Dünyada Elektrik motorları Enerji Tüketimi ve İlgili Teknik Mevzuat”, *EMO 6. Enerji Verimliliği Sempozyumu*, Sakarya, Türkiye, 2015, ss. 1-6.
- [2] R. G. Smiley, “Using line current to diagnose faults in induction motors”, *Iron and Steel Engineer*, pp. 23-25, 1992
- [3] P.C.M. Lamim Filho, R. Pederiva ve J.N. Brto, “Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, no. 1-2, pp. 377-387, 2014
- [4] A. Bellini, F. Filipetti and C. Tassoni, “Advances in diagnostic techniques for induction machines”, *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 5, no. 12, pp. 4109-4126, 2008
- [5] S. Nandi, H. Tolyat and X. Li, ”Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors a review,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, 2005
- [6] A. Glowacz and Z. Glowacz, “Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signal,” *Applied Acoustic*, no. 17, pp. 20-27, 2017.
- [7] Glowacz A. Recognition of acoustic signals of synchronous motors with the use of MoFS and selected classifiers. *Measure Sci. Rev*, vol.15, no. 4, pp.167-175, 2015
- [8] Glowacz A. Fault diagnostics of acoustic signals of loaded synchronous motor using smofs-25-expanded and selected classifiers. *Tehnicki Vjesnik- Technical Gazette*, vol. 23, no. 5, pp. 1365–1372, 2016
- [9] E. Germen, M. Başaran ve M. Fidan, “Sound based induction motor fault diagnosis using Kohonen self-organizing map” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 46, no. 1, pp. 45-58, 2014
- [10] A. Alwodai, F. Gu and A. D. Ball, “A Comparison of Different Techniques for Induction Motor Rotor Fault Diagnosis” *J. Phys, Conf. Ser.*, 2012
- [11] D. Stankovic , Z. Zhang , I. Voloh and J. Vico , “Enhanced algorithm for motor rotor broken bar detection”, 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2010
- [12] V. Sarkimaki , P. Rodriguez, “ Detection of broken rotor rod malfunction in induction machine fed by frequency converter”, *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 7, 8, pp. 1214 – 1223, 2017.

- [13] İ. Aydın, M. Karaköse ve E. Akın, “Kırık rotor çubuğu ve stator arızalarının teşhisinde yapay sinir ağı yaklaşımı”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 25, s. 1-2, ss. 134 - 149, 2009
- [14] A. Ünsal ve A. Kabul, “Asenkron motor rotor arızalarının istatistiksel analiz yöntemi ile değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, c. 20, s. 2, ss. 283-289, 2017
- [15] M. Bayrak ve A. Küçükler, “Üç fazlı asenkron motorlardaki kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti için güç tabanlı bir algoritmanın geliştirilmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 31, s. 2, ss. 303-311, 2016
- [16] A. Unsal ve O. Karakaya, “Asenkron motor rotor arızalarının analizi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s. 34, Haziran 2015
- [17] M. M. Tezcan ve A. İ. Çanakoğlu, “Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızası analizi için bir deney seti geliştirilmesi”, Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- [18] E. Ayaz, S. Şeker, E. Türkcan ve B. Barutçu,. “ Elektrik motorlarında akım işaretlerini kullanarak dalgacık ve spektral analiz yöntemlerinin birleşimi ile arıza tanısı,” Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, İstanbul, Türkiye, 2003
- [19] P. A. Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R. A. Osornio-Rios and J. G. Avina-Cervantes, “ Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 83, pp. 568-589, 2017.
- [20] F. M. H. Khater, M.I.A. El-Sebah, M. Osama and K.H. Sakkaoury, “Proposed fault diagnostics of a broken rotor bar induction motor fed from PWM inverter” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, no. 3, pp. 387-397, 2016.
- [21] İ. Çolak, “Asenkron motorların modellenmesi,” Elektrik Makinaları 2 Asenkron Motorlar-Senkron Motorlar, İstanbul, Türkiye: Seçkin Yayınları, 4. Baskı, 2017, ss.41.
- [22] A.İ., Çanakoğlu, A.G., Yetkin, H. Temurtaş ve M. Turan, ‘Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods’, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, no. 22, pp.1077-1192, 2014.
- [23] D. Lindemeyer, H.W. Dommel, A. Moshref ve P. Kundur, “An Induction Motor Parameter Estimation Method,” *Electrical Power and Energy Systems*, no. 23, pp. 251-262, 2001.
- [24] A. N. Şerifoğlu, “Asenkron motorun elektromanyetik momenti ve çalışma karakteristikleri,” Elektrik Makinaları Cilt1, 1. Baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2007, bölüm 2, ss.118-124.
- [25] Z. B. Durunay ve H. Güldemir, “Bir Fazlı Asenkron Motor V/f Hız Kontrolü”, Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, vol. 29 no. 2, pp. 163-172, 2017

- [26] W. Schuiskey ve İ. Çetin, “Kafes sorunları,” Elektrik Motörleri 1. Kısım, İstanbul, Türkiye: Fatih Yayınevi, 1987, ss. 180-189.
- [27] N. Bhatia, “Survey of Nearest Neighbor Techniques”, *International Journal of Computer Science and Information Security*, vol. 8, no. 2, pp. 302-305, 2010
- [28] N. Suguna and K. Thanushkodi, “An Improved k-Nearest Neighbor Classification Using Genetic Algorithm”, *International Journal of Computer Science*, vol. 7, no. 2, pp.18-21, 2010.
- [29] W. Kresse and D. M. Danko, “Springer Handbook of Geographic Information”, Springer-Verlag, Berlin, 2012.