



# HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)  
URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

---

## Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasının Vibrasyon Sinyali ile Tespiti

*Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection by Vibration Signal*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Mehmet KUŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ORCID ID: 0000-0003-2215-9250

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Kuş,M,“ Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasının Vibrasyon Sinyali ile Tespiti”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(2): 36-43, (2019).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>



## Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasının Vibrasyon Sinyali ile Tespiti

Mehmet KUŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Şanlıurfa Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorda karakteristik arıza harmoniklerini içeren vibrasyon sinyalleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilmeye çalışılmıştır. Bilindiği gibi kırık rotor çubuk arızası asenkron motorlarda momentte ve hızda salınımlara sebep olmakta ve dolayısıyla motorun dinamik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Moment ve hızdaki bu salınımlar motorda mekanik titreşimlere de sebep olmaktadır. Bu çalışmada; arızalı ve sağlıklı asenkron motorlardan vibrasyon sensörü ile alınan titreşim sinyalleri belirli bir örnekleme frekansında örneklenerek frekans spektrumları elde edilmiş ve bu spektrumlardaki karakteristik arıza sinyalleri belirlenmiştir. Belirlenen bu arıza sinyalleri motor farklı yüklenme koşullarında iken test edilmiş ve böylece bu sinyallerin arıza tespitinde etkin olduğu ispatlanmıştır.

### Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection by Vibration Signal

### Abstract

In this study, it has been tried to detect broken rotor bar failure by using vibration signals containing characteristic fault harmonics in a three-phase induction motor. As it is well known, broken rotor bar failure causes torque and speed oscillations in induction motor, and thus leads to affect the dynamic performance of the motor negatively. These oscillations in torque and speed cause mechanical vibrations in the motor. In this work; the vibration signals taken from the faulty and healthy induction motors by the vibration sensor are sampled at a certain sampling frequency to obtain the frequency spectra and the characteristic fault signals in these spectra are determined. These fault signals have been tested when the motor is under different load conditions, and it has been proven that they are effective for broken rotor bar fault detection.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 08/05/2019

Düzeltilme: 19/06/2019

Kabul: 04/07/2019

### Anahtar Kelimeler

Kırık rotor çubuk arızası

Asenkron motor

Vibrasyon analizi

### Keywords

Broken rotor bar fault

induction motor

vibration analysis.

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar düşük maliyeti, sağlamlığı ve hızlı kurulumu gibi birçok nedenlerden dolayı sanayide oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorlarda durum izleme ve hata tespiti son yüzyılda oldukça popüler bir konu haline gelmiştir. Özellikle sanayide birçok alanda aktif olarak kullanılan asenkron motorlarda arızanın erken bir şekilde tespiti üretim verimi dolayısıyla mali kazanç açısından oldukça önemlidir. Bu tip motorlarda meydana gelebilecek herhangi bir arıza durumunda mevcut sistemin durması; üretim veriminin düşmesine, ağır finansal kayıplara ve iş-zaman kaybına yol açacaktır. Bu yüzden asenkron motorlarda arızayı erken bir şekilde tespit edebilecek durum izleme ve arıza tespit sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Asenkron motorlarda meydana gelen arızaları mekaniksel ve elektriksel olarak iki farklı grupta sınıflandırabiliriz. Mekaniksel arızalar motorun mekanik kısmından kaynaklanan bilye arızaları, eksantriklik, eksen kaçıklığı gibi arızalarken elektriksel arızalar ise kırık rotor çubuğu, stator kısa devre arızası gibi arızalardır.

Kırık rotor çubuk arızası motor performansını oldukça etkileyen ve önlem alınmazsa diğer mekaniksel ve elektriksel arızalara sebep olabilecek yaygın bir arıza türüdür. Kırık rotor çubuk arızası rotor çubuklarındaki aşırı akımdan dolayı meydana gelebilecek ısınmadan, rotor şaftındaki mekaniksel

zorlanmalardan, sık sık motorun durma-kalkmasından vb. durumlardan dolayı meydana gelebilir. Kırık rotor çubuk arızası arıza şiddetine bağlı olarak motor dinamik performansını düşürmekte ve moment ve hızda salınımlara sebep olabilmektedir.

Bir rotor çubuğu kırıldığında, o çubuktan akamayan akım yan çubuklardan akacaktır. Bu yüzden motorda elektriksel, manyetiksel ve mekaniksel düzensizlikler oluşacaktır. Bu düzensizliklerden dolayı karakteristik arıza sinyalleri motorun stator akımında denklem (1)'deki gibi görülebilmektedir:

$$f_b = (1 \pm 2ks) f_s \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

burada  $k$  harmonik indeksi,  $s$  motor kayması,  $n_s$  senkron hızı ve  $n_m$  rotor hızıdır. Bu yan band harmoniklerinin genliği arızanın şiddetine, rotorun atalet momentine ve yüke bağlıdır. Bazen bu yan band harmonikleri üretim aşamasındaki aksaklıklardan dolayı sağlıklı bir motorda da görülebilir ancak bunların genliği arızalı duruma göre oldukça düşük olmaktadır. Motordan elde edilen elektriksel ve mekaniksel büyüklükleri zaman ekseninde incelemek oldukça zordur. Bu yüzden elde edilen mekaniksel ve elektriksel büyüklükler frekans-genlik eksenine (Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile) dönüştürülerek karakteristik arıza sinyalleri incelenmektedir.

Asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını tespit etmek için akım, akı, moment, hız ve vibrasyon analizleri tabanlı birçok çalışma bulunmaktadır [1-11]. Bu çalışmalardan bilinen en eski ve yaygın yöntemlerden biri motorun vibrasyon (titreşim) analizidir. Vibrasyon analizi temel olarak; motordaki mekanik titreşimleri bir vibrasyon sensörü kullanılarak ölçmek ve bu titreşim büyüklüğünü frekans-genlik ekseninde ifade etmektir. Burada dikkat edilecek en önemli hususlardan biri ölçüm yapılacak ortamda diğer çevresel yanıtıcı sinyallerin olmaması veya bu yanıtıcı sinyallerin en düşük seviyeye indirgenmesidir.

Vibrasyon analizi ile asenkron motorlarda arıza tespiti üzerine literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [3-11]. Ref. [3]'te kırık rotor çubuk arızası durumunda vibrasyon sinyali spektrumu incelenmiş ve rotor dönme frekansının ( $f_r$ ) yan bandlarında bulunan  $f_r \pm 2sf_s$  ( $s$  kayma,  $f_s$  ise besleme frekansı) sinyalleri gözlemlenmiştir. Bu arıza sinyallerinin genlikleri farklı motor yüklenme koşullarında karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada hız sensörünün Hilbert transformu alınarak  $2sf_s$  sinyali incelenmiştir. Ref. [4]'te DSP tabanlı bir vibrasyon analiz sistemi geliştirilerek yüksek doğrulukta arıza tespiti sağlanmıştır. Ref. [5]'de statik ve dinamik eksantriklik arızası durumunda vibrasyon spektrumunda  $2f_s \pm f_r$  sinyali arıza sinyali olarak tanımlanmıştır. Asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası var iken akım ve vibrasyon sinyalleri incelenmiştir [6]. Deneysel olarak yapılan testlerde  $f_r \pm 2sf_s$  sinyalleri incelenmiştir. Akım ve vibrasyon sinyalleri birlikte incelenerek daha etkin bir arıza tespiti sağlanabildiği görülmüştür [6]. Ref. [7]'de kırık rotor çubuk arızasını tespit etmek için vibrasyon sinyalinin (-x, -y ve -z yönündeki titreşimler) FFT spektrumundan elde edilen frekans spektrumunun seyrek gösterimi (0-500 Hz arası) metodu kullanılmıştır. OMP (*orthogonal matching pursuit*) ve K-SVD (*K-Singular Value Decomposition Algorithm*) ile çok düşük arıza şiddetinde bile arıza tespiti sağlanabildiği görülmüştür. Ref. [8]'de radyal ve eksenel vibrasyonlar kırık rotor çubuk arızası durumunda bir fabrika ortamında çalışan asenkron motorda ölçülmüş ve  $f_r \pm 2sf_s$  sinyalleri gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra bu çalışmada rotor bar geçiş frekansındaki (rotor bar pass frequency (RBPF)) sinyallerin yan bantlarında  $f_{brk} = N_r f_r \pm 2f_s$  sinyallerinin de kırık rotor çubuk arızası durumunda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Motor kalkış anında (startup transient) geçici durum davranışından yararlanılarak da vibrasyon analizi ile kırık rotor çubuk arızası tespit edilebilmektedir. Ref. [9]'da motor kalkış anında iken elde edilen vibrasyon bilgilerinin waveleti alınarak kırık rotor çubuk arızası henüz başlangıç seviyesinde iken tespit edilebilmiştir. Motor çok düşük yüklerde yüklendiğinde kayma değerine bağlı olarak bazen kırık rotor çubuk sinyalleri etkin bir şekilde gözlenememektedir. Ref. [10]'da çok düşük yük koşullarında çalıştırılan bir asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası analitik vibrasyon sinyalinin modülü alınarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmada bir asenkron motorda vibrasyon sensöründen (akselerometre) alınan titreşim bilgileri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilmeye çalışılmış ve vibrasyon spektrumunda karakteristik arıza sinyalleri tespit edilerek bu sinyallerin farklı yük koşulları altında etkinliği incelenmiştir.

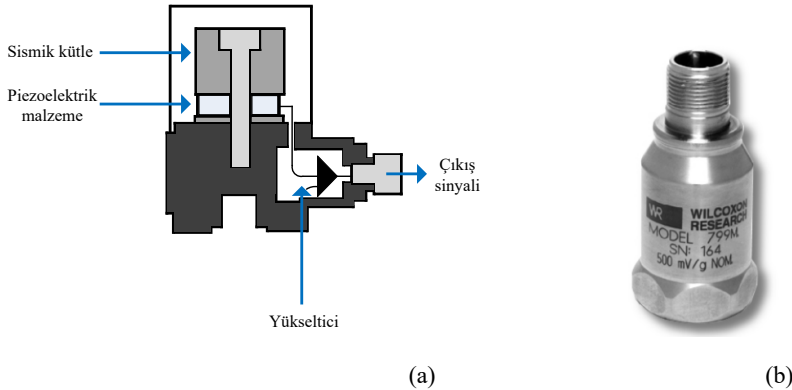
## 2. VİBRASYON SENSÖRLERİ VE VİBRASYON ANALİZİ

### 2.1 Vibrasyon Sensörleri

Vibrasyon (titreşim); bir makinedeki veya malzemedeki denge noktası etrafındaki hareketler veya mekaniksel salınımlardır. Bu mekaniksel salınımlar bir sarkaç hareketi gibi periyodik veya düzensiz olabilir. Titreşim hareketi metrik birimler ( $m/s^2$ ) veya yerçekimi sabiti ( $g=9.81 m/s^2$ ) ile ifade edilebilmektedir.

Vibrasyon sinyalleri, bir motorun veya cihazın dinamik ivmesini voltaj veya akım olarak gösteren ivmeölçerler (akselerometre) kullanılarak ölçülebilmektedir. Bu çok yönlü sensörler ayrıca şok ölçümlerinde (patlama ve arıza testleri) ve daha yavaş, düşük frekanslı titreşim ölçümlerinde de kullanılabilir. Bu tip sensörler geniş bir titreşim frekansı bandı aralığında yüksek doğrulukta ölçümler yapabilmektedir. Çoğu ivmeölçerler baskı altındaki kristallerin gerilim üretmesi ile ortaya çıkan piezoelektrik etki ile çalışmaktadır. Bu ivme, piezoelektrik kristal üzerinde orantılı bir kuvvet üreten ivmeölçer içindeki sismik bir kütleye iletilir. Kristal üzerindeki bu harici stres (baskı) uygulanan kuvvete orantılı olarak yüksek empedanslı, elektriksel bir yük oluşturur (Şekil 1.). Bu elektriksel yük kullanılarak ivmeölçerlerin bulunduğu ortamdaki titreşimler ölçülebilir.

İvmeölçerler otomotiv, inşaat, uçak sanayi vb. gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda bu tip sensörler sanayide durum izleme ve arıza tespiti sistemlerinde de tercih edilmektedir. Makinanın dış gövdesine sabitlenmiş yüksek duyarlıklı, düşük gürültülü bu sensörler ile bir elektrik makinasındaki titreşimleri ölçerek makinanın durum tespiti sağlanabilmekte ve böylece üretim aşamasında ki aksaklıkların önüne geçile bilinmektedir.



Şekil. 1. a) Bir vibrasyon sensörünün (akselerometrenin veya ivmeölçerin) yapısı b) Wilcoxon 799M sensörü

### 2.2 Vibrasyon Analizi ile Kırık Rotor Çubuk Arızasının Tespiti

Kırık rotor çubuk arızası olan bir asenkron motorda, kırık rotor çubuğundaki akım diğer yan rotor çubuk akımlarından daha düşük olacaktır ve bu nedenle arızalı rotor çubuğu ilgili stator sargısı kutuplarını geçtiğinde daha az moment sağlayacaktır. Momentteki bu değişim belirli frekanslarda titreşimlere sebep olacaktır [11]. Kırık rotor çubuk arızasına sahip bir asenkron motorda besleme frekansına, dönme hızına ve motor yük durumuna bağlı olarak karakteristik arıza sinyalleri vibrasyon spektrumunda görülebilmektedir. Bu titreşim sinyalleri temel olarak elektromanyetik kuvvetlerin düzensiz dağılımından dolayı oluşmaktadır. Çünkü kırık rotor çubuğu kayma frekansında rotora göre dönen bir manyetik

alan oluşturmakta ve bu alan stator manyetik alanı ile etkileşime girerek  $2sf_s$  frekansında momentte ve hızda titreşimlere sebep olmaktadır. Moment ve hızdaki bu salınım dönme frekansının yan bandları olan  $f_r \pm 2sf_s$  frekanslarında net bir şekilde görülebilmektedir [3], [6].

Deneyel olarak yapılan bu çalışmada kırık rotor çubuk arızası durumunda asenkron motorun vibrasyon sinyalinde rotor bar geçiş frekansı (rotor bar pass frequency (RBPF)) civarında denklem (3) ve (4)'te gösterilen karakteristik arıza sinyallerinin etkin bir şekilde kullanılabilceği gözlemlenmiştir.

$$f_{b,1} = N_r f_r - 2f_s \pm 2sf_s \quad (3)$$

$$f_{b,2} = N_r f_r + 4f_s + 2sf_s \quad (4)$$

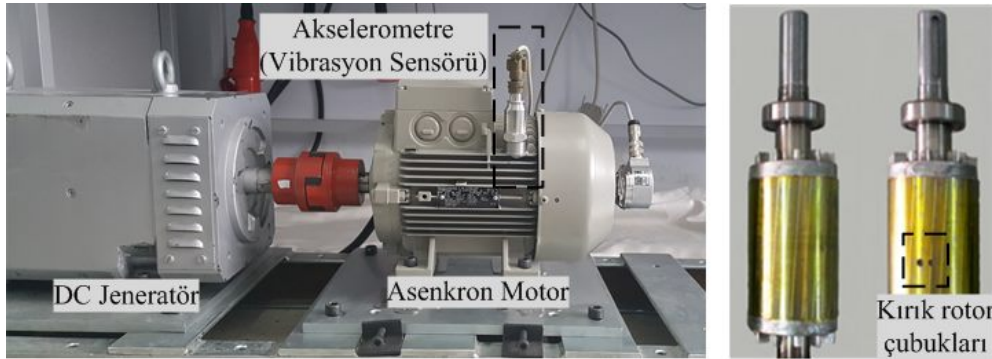
$$RBPF = N_r f_r$$

Burada  $N_r$  rotor çubuk sayısını,  $f_r$  rotor dönme frekansını,  $f_s$  besleme kaynağı frekansını ve  $s$  ise motor kayma değerini temsil etmektedir. Bu sinyallerin genliği motorun yüklenme koşullarına bağlıdır. Ayrıca kırık rotor çubuk sayısı arttıkça elektromanyetik dengesizlik artacağından bu sinyallerin genliği de artacaktır.

### 3. DENEYSEL DEVRE DÜZENEGİ VE SONUÇLAR

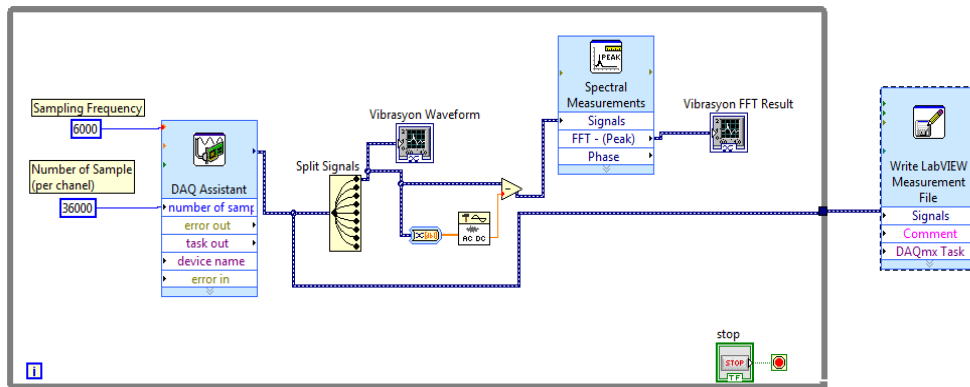
#### 3.1. Deneyel Devre Düzenegi

Vibrasyon seviyesini ölçmek için, 1000  $mV/g$  duyarlılığa sahip, hassas ve yüksek duyarlılık Wilcoxon firmasının 799M modeli bir vibrasyon sensörü (akselometre) kullanılarak bir ölçüm düzenegi geliştirilmiştir. Sensörün monte edildiği yüzey alanı düz ve pürüzsüz olup sensör ile uyumlu bir montaj plakası kullanılmıştır. Şekil 2a'da deneyel devre düzenegi görülmektedir.

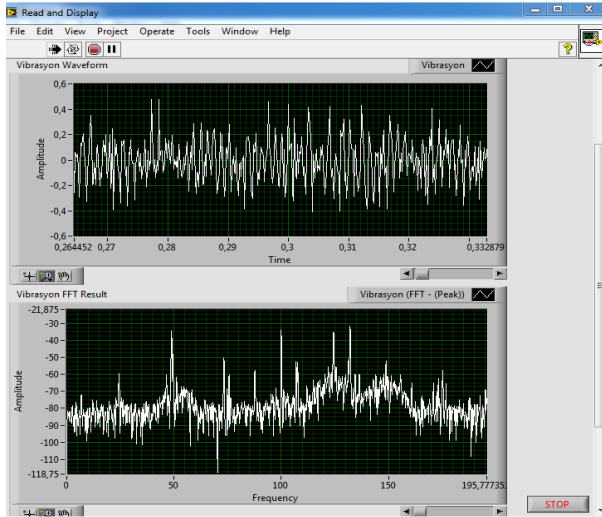


(a)

(b)



(c)



(d)

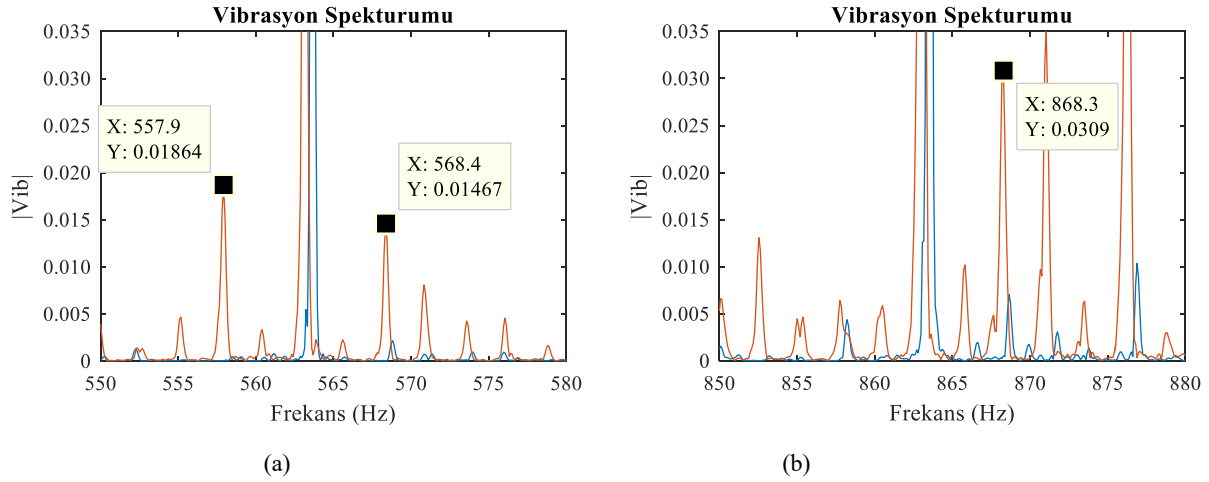
Şekil. 2. a) Deneysel test düzeneği b) kırık rotor çubukları c) Tasarlanan Labview programı

d) Labview kullanıcı arayüzü

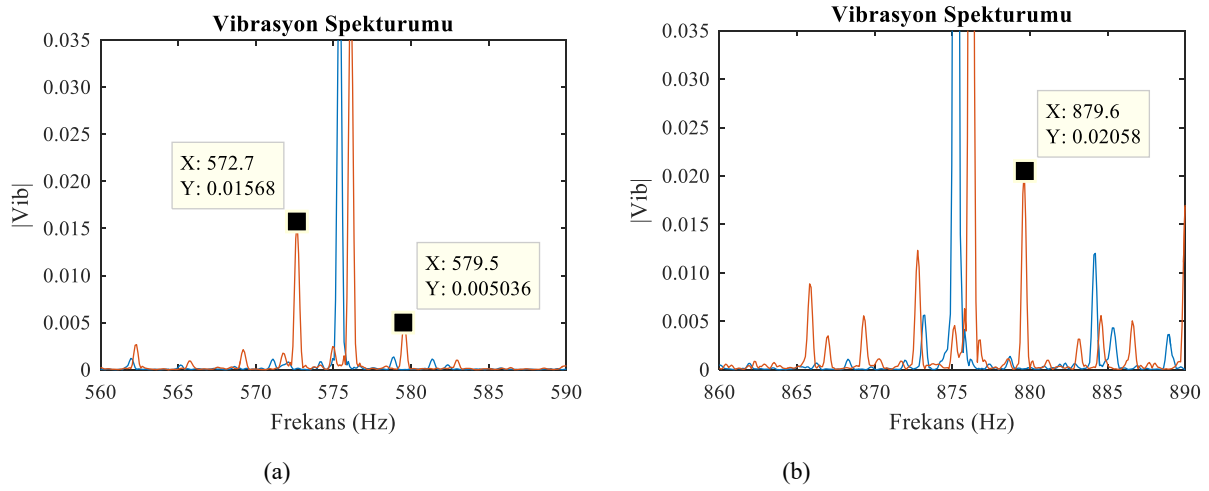
Yapılan testlerde asenkron motor bir DC jeneratör aracılığıyla uygun yüklenme koşullarında çalıştırılmıştır. Asenkron motor ve DC jeneratör birbirlerine esnek bir kaplin kullanılarak oluşabilecek titreşimler minimize edilerek bağlanmıştır. Ayrıca bu iki makine arasında düzgün bir bağlantı sağlamak ve böylece oluşabilecek ek gürültüleri minimize etmek için lazer ayarlama cihazı kullanılmıştır. Ölçülen vibrasyon sinyalleri gömülü bir ADC ve mikrokontrolör içeren veri toplama kartı (data acquisition card-DAQ) ile 6 kHz'lik örnekleme frekansında (36000 örnek) Labview sistem ara-yüzüne aktarılmıştır. Şekil 2c ve 2d.'de görüldüğü gibi Labview aracılığıyla oluşturulan yazılımda anlık olarak ölçülen titreşim sinyalleri hem zaman hem de frekans ekseninde gözlemlenebilmektedir. Kırık rotor çubuk arızası oluşturmak için rotor uygun bir şekilde stator merkezinden çıkartılmış ve rotor çubuklarından 2 (iki) tanesi bir matkap yardımıyla delinmiştir (Şekil 2b). Deneysel 2.2 kW'lık 4 kutuplu bir asenkron motor kullanılarak yapılmıştır. Bu motorun parametreleri Ek-Tablo 1.'de verilmiştir. Asenkron motor tam yükte ve %75 nominal yükte sağlıklı rotor ve iki kırık rotor çubuğu durumunda test edilmiştir.

### 3.2. Deneysel Sonuçlar

Şekil 3'te asenkron motor tam yüklenme (%100) koşullarında iken sağlıklı ve arızalı durumda vibrasyon spektrumu görülmektedir. Şekil 3a'da kırık rotor çubuk arızası durumunda bu spektrumda rotor bar geçiş frekansı (RBPF) civarlarında denklem (3)'göre tanımlanmış olan  $N_f f_i - 2f_s \pm 2sf_s$  sinyalleri olan 557.9 Hz ve 568.4 Hz'de net bir şekilde görülmektedir. Burada  $f_i = 23.682 \text{ Hz}$ ,  $N_r = 28$ ,  $f_s = 50 \text{ Hz}$  ve kayma değeri  $s = 0.0572$ 'dir. Bu sinyallerden  $N_f f_i - 2f_s - 2sf_s$  sinyalinin (557.9 Hz) genliğinin,  $N_f f_i - 2f_s + 2sf_s$  (568.4 Hz) bulunan sinyalin genliğinden biraz daha büyük olduğu da net bir şekilde görülmektedir. Şekil 3b'de ise denklem (4)'e göre tanımlanmış olan  $N_f f_i + 4f_s + 2sf_s$  frekansında 868.3 Hz'de kırık rotor çubuk sinyali net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. Tam yükte titreşim spektrumu, kırık rotor çubuk sinyalleri a)  $N_{f_r}-2f_s\pm 2s f_s$  b)  $N_{f_r}+4f_s+2s f_s$



Şekil 4. %75 Nominal yükte titreşim spektrumu, kırık rotor çubuk sinyalleri a)  $N_{f_r}-2f_s\pm 2s f_s$  b)  $N_{f_r}+4f_s+2s f_s$

Sağlıklı durumda bazı kalıcı sinyaller görülse de bu sinyallerin genliğinin arızalı duruma göre çok düşük olduğu net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca bu kalıcı sinyaller arıza eşik koşulunu belirlemede kullanılabilir.

Şekil 4'te ise belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin etkinliğini göstermek için motor nominal yükün %75'indeki yüklenme koşulunda iken test edilmiştir. Şekil 4a'da arızalı durumda motor kayma değerine ve rotor dönme frekansına bağlı olarak 572.7 Hz ve 579.6 Hz'de denklem (3)'te tanımlanmış olan arıza sinyalleri görülmektedir. Burada  $f_r=24.146$  Hz,  $N_r=28$ ,  $f_s=50$  Hz ve  $s=0.0342$ 'dir. Bu sinyallerden  $N_{f_r}-2f_s-2s f_s$  sinyalinin genliğinin farklı yük koşulunda çok değişmediği ancak sağ yan bantta bulunan  $N_{f_r}-2f_s+2s f_s$  sinyalinin (579.6 Hz) genliğinin oldukça düştüğü görülmektedir. Şekil 4b'de ise  $N_{f_r}+4f_s+2s f_s$  sinyalinin 879.6 Hz'de kırık rotor çubuk arızası durumunda ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sinyalin genliğinin tam yük koşuluna göre biraz azaldığı ancak yine de arızalı durumda sağlıklı duruma göre oldukça baskın olduğu görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası vibrasyon spektrumu analizi ile tespit edilmiştir. Motor mekaniksel titreşimlerini ölçmek için yüksek duyarlılık, hassas ölçüm yapabilen bir akselerometre kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre  $N_{f_r}-2f_s$  sinyalinin sağ ve sol yan bandlarında ( $\pm 2s f_s$ ) ve  $N_{f_r}+4f_s+2s f_s$  frekansında kırık rotor çubuk arızası sinyalleri görülmüştür. Motor farklı

yüklenme koşullarında çalıştırılarak bu sinyallerin arıza tespitinde etkin olduğu ispatlanmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, özellikle  $N_{r}f_{r}-2f_{s}-2sf_{s}$  ve  $N_{r}f_{r}+4f_{s}+2sf_{s}$  sinyallerinin değişik yüklerde bile değerlerinin çok az değiştiği ve bu sinyallerin kırık rotor çubuk arızası tespitinde yüke daha az bağımlı olduğu belirlenmiştir. Böylece vibrasyon sinyali kullanarak kırık rotor çubuk arızası tespitinde bu harmoniklerin daha efektif olduğu bu çalışmada görülmüştür. Bu teknik güvenli sonuçlar vermekte ve sadece titreşim bilgisi ile arıza tespit edebilmesi açısından uygulaması oldukça kolay olduğu görülmektedir.

## Ek

Test edilen asenkron motorun parametreleri Tablo 1.'deki gibidir.

Tablo 1. Test Edilen Motorun Parametreleri

Kutup sayısı	4
Rotor çubuk sayısı	28
Stator oluk sayısı	36
Nominal gerilim, $V$	380
Nominal hız, $d/d$	1420
Nominal güç, $kW$	2.2
Besleme frekansı, $Hz$	50

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bayrak, M., Küçükler, A., “Üç Fazlı Asenkron Motorlardaki Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Tespiti için Güç Tabanlı Bir Algoritmanın Geliştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31, 2016.
- [2] Ünsal, A., Kabul, A., “Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi”, Politeknik Dergisi 20, 283-289, 2017.
- [3] Alwodai, A., Gu, F., ve Ball, A. D., “A Comparison of Different Techniques for Induction Motor Rotor Fault Diagnosis”, J. Phys.: Conf. Ser. 364 012066, 2012.
- [4] Betta, G., Liguori, C., Paolillo, A. ve Pietrosanto, A., “A DSP-based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 6, pp. 1316-1322, Dec. 2002.
- [5] Dorrell, D. G., Thomson, W. T. ve Roach, S., “Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 1, pp. 24-34, Jan.-Feb. 1997.
- [6] da Gama, R. S., Silva, C. C. J., Nascimento, C. E. F., da Silva, A. M., da Costa, C., “Analysis of Combined Motor Current Signature and Vibration-Monitoring Techniques in the Study of Broken Bars in Three-Phase High-Performance Induction Motors”, J Electr Electron Syst 6: 235, 2017.
- [7] Morales-Perez, C., Rangel-Magdaleno, J., Peregrina-Barreto, H., Amezcua-Sanchez, J. P., ve Valtierra-Rodriguez, M., “Incipient Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Vibration Signals and the Orthogonal Matching Pursuit Algorithm”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 67, no. 9, pp. 2058-2068, Sept. 2018.
- [8] Kanović, Ž., Matić, D., Jeličić, Z., Rapaić, M., Jakovljević, B. ve Kapetina, M., “Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Using Vibration Analysis — A Case Study”, 2013 9th IEEE



International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Valencia, 2013, pp. 64-68.

- [9] Rangel-Magdaleno, J., Peregrina-Barreto, H., Ramirez-Cortes, J., Morales-Caporal, R., and Cruz-Vega, I., “Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT”, *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 3530464, 11 pages, 2016.
- [10] Matic, D., Kanovic, Z., “Vibration Based Broken Bar Detection in Induction Machine for Low Load Conditions”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol.17, no.1, pp.49-54, 2017.
- [11] Kim D. J., Kim H. J., Hong J. P., Park C. J., “Estimation of Acoustic Noise And Vibration in an Induction Machine Considering Rotor Eccentricity”, *IEEE Transactions on Magnetics* 50: 857-860, 2014.