

# Asenkron Motor Rotor Arızalarının İstatiksel Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Abdurrahman ÜNSAL<sup>1\*</sup>, Ahmet KABUL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya

(Geliş/Received : 31.05.2016 ; Kabul/Accepted : 05.10.2016)

## ÖZ

Bu makalede sincap kafesli asenkron motorlarda yaygın olarak meydana gelen rotor arızalarının istatistiksel olarak analizi ve değerlendirilmesi yapılacaktır. Rotor arızaları genel olarak rotor çubuklarının kırılması ve kısa-devre halkasının çatlama sonucu meydana gelir. Rotor arızaları stator akımına harmonik olarak yansımaktadırlar. Bu harmoniklerin tespiti için çeşitli sinyal işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu harmonikler ve diğer özellik çıkarım yöntemleri asenkron motor arızalarını tespit edilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada stator akımı önce zarf analizi ile incelenmiştir. Zarf analizi sonucu elde edilen veriler istatistiksel olarak incelenmiştir. İstatistiksel analizde ortalama, medyan, standart sapma, varyans, basıklık, çarpıklık, olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar istatistiksel analiz yöntemlerinin sincap-kafesli asenkron motorlarda rotor arızalarının incelenmesinde ve tespit edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Asenkron Motor, İstatistiksel Analiz, Rotor Arızaları.

## Evaluation of Rotor Faults of Induction Motors by Statistical Analysis Method

### ABSTRACT

In this article, commonly occurring rotor faults of squirrel-cage induction motors will be statistically analyzed and evaluated. Rotor faults generally occur due to broken rotor bars and cracking of end-rings. Rotor faults are reflected into the stator current as harmonics. Various signal processing methods are used to detect these harmonics. These harmonics and other feature extraction methods are used to detect the faults of induction motor. In this work, the stator current is firstly studied by using envelope analysis. The data gained as result of Envelope analysis are studied statistically. In the statistical analysis mean, median, standard deviation, variance, kurtosis, skewness, probability density function and cumulative density function were calculated. The gained results indicate that the statistical analysis methods can be used for the detection of rotor faults of squirrel-cage induction motors.

**Keywords:** Induction Motor, Statistical Analysis, Rotor Faults.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar yapılarının basit, az arıza yapmaları, bakımlarının kolay, fiyatlarının düşük olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan elektrik makineleridir. Asenkron motorlar diğer elektrik motorlarıyla karşılaştırıldığında az arıza yapmalarına karşın çok yaygın olarak kullanıldıklarından dolayı meydana gelebilecek herhangi bir arıza hem işletmeler için hem de motorun sürdüğü proses için önemi miktarda mali kayıplara sebep olabilir. Bundan dolayı asenkron motorların durumlarının izlenmesi ve meydana gelebilecek arızaların erken tespit edilerek meydana gelebilecek kayıpların azaltılması açısından oldukça önemlidir. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar içerisinde kırık rotor çubuğu arızaları önemli bir yer tutmaktadır [1-4]. Kırık rotor arızaları stator akımına harmonik olarak yansır. Kırık rotor çubuğu arızaları alanında yapılan çalışmalar genellikle motor stator akım verisinin imza analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu analiz yönteminde en basit yöntem stator akım

sinyallerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak yapılan analiz yöntemidir. FFT yönteminde stator akımı yan-band frekans bileşenlerinin taşıyıcı frekans (motorun besleyen şebeke frekansı) bileşenine göre bant genişliği ve genlik yüzdesi baz alınmaktadır. Özellikle motorun düşük yükte yüklenmesi durumunda ve/veya rotor çubuklarındaki kırık sayısının az olduğu durumlarda bu yöntem çok sağlıklı sonuç üretmemektedir [1]. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için akım sinyalinin adaptif bir filtreden geçirilerek işe yaramayan sinyal bileşenlerini elimine edilmesi ve arıza sinyalini daha kolay tespit edilmesi yoluna gidilmiştir [5]. Bu çözüm yöntemi yan-band frekanslarının netliğini arttırmakla birlikte yan-band harmoniklerinin genliklerinde herhangi bir düzelme ortaya koymadığından dolayı özellikle düşük yüklü motorların kırık rotor arızalarının tespit edilmesinde etkin bir çözüm getirmemiştir [6].

Düşük yüklü asenkron motorlarda kırık rotor arızası sonucu stator akımına yansıyan yan-band frekans bileşenlerinin genliğini net bir şekilde tespit edebilmek için stator akım sinyalleri adaptif bir filtreden geçirildikten sonra zarf analizine tabi tutulmaktadır. Daha sonra sinyalin frekans tanım bölgesindeki analizi

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: unsal@dpu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 283-289



**Çizelge 1.** Test motoru etiket değerleri (The nameplate of the test motor)

<b>Marka</b>	<b>GAMAK</b>
<b>Model</b>	AGM2E 132 S 2b
<b>Faz</b>	3 Fazlı
<b>Güç</b>	7.5 kW
<b>Kutup Sayısı</b>	2
<b>Rotor Dönüş Hızı</b>	2910 d/dk
<b>Nominal Akım</b>	13.6A
<b>Moment</b>	24.6 N
<b>Güç Katsayısı</b>	0.90
<b>Verim</b>	%88.5

Test edilen motora bir oto transformatörü ile yol verildi. Test motorunu farklı kademelerde yüklemek için bir adet üç fazlı, kendinden uyarımlı, sabit mıknatıslı senkron generatör kullanıldı. Senkron generatörün çıkışına da üç fazlı bir adet resistif yük bağlandı. Üç fazlı resistif yükün kapasitesi test motorunun tam yük ile yüklenmesi için yeterli olmadığından dolayı generatörün çıkışına iki adet asenkron motor da resistif yüke paralel bağlanarak testler gerçekleştirildi.

Test motorunun üç faz stator gerilimi ve akımını kaydetmek için National Instrument (NI cDAQ-9174 veri toplama kartı Labview yazılımı ile birlikte) veri toplama sistemi kullanıldı. Veri sisteminde akım ölçmek için NI 9227 modülü kullanıldı. Bu modülün giriş akımını 5 A (rms) ile sınırlı olduğu için NI 9227 modülü 30A/5A dönüştürme oranına sahip 3 adet akım transformatörü kullanıldı. Test motorunun stator gerilimini ölçmek için NI 9225 modülü kullanıldı. Modülün giriş gerilimi 300 V (rms) ile sınırlı olduğundan dolayı modül sistem üç fazlı 380/63 V bir transformatör üzerinden bağlandı. Veri ölçme sisteminin örnekleme frekansı 25 kHz olarak ayarlandı. Bu çalışmada ölçülen stator gerilimleri değerlendirmeye alınmamış, sadece stator akımları değerlendirmeye alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 3'te görülmektedir.

#### 4. DENEYSEL VERİLER (EXPERIMENTAL DATA)

Deneysel çalışmada özellikleri Çizelge 1'de verilen üç fazlı asenkron motor sağlam rotor, bir kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor ile birlikte %25, %50, %75, ve %100 yüklenerek çalıştırıldı. Her bir test verisi 32 sn süre ile 800.000 adet örnek olarak kaydedildi. Verilerin analizi MATLAB ortamında gerçekleştirildi. Veriler (akım sinyali) önce bir NLMS (Normalize Edilmiş En Küçük Farklar) filtreden geçirildi. Daha sonra filtrelenmiş olan sinyalin zarf analizi gerçekleştirildi (bu çalışmada sadece %100 yük altındaki akım verileri değerlendirmeye alınmıştır). Daha sonra stator akımının istatistiksel analizleri yapıldı.

Şekil 4, 5 ve 6'da test edilen motorun, sırasıyla, sağlam rotor, tek kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor ile birlikte %100 yük akımının zarf analizi ve Hilbert dönüşümü [14-15] sonuçları görülmektedir.

Zarf Analizi sonuçları incelendiğinde sağlam rotorlu motora göre kırık rotorlu motorun akımının kırık sayısı ile arttığı görülmektedir. Hilbert dönüşümü sonucu elde edilen sinyallerin frekans bileşenlerinin kırık sayısı artıkça birbirinden ayrıldığı ve daha belirginleştiği görülmektedir. İstatistiksel analiz sonraki bölümde verilmektedir.

#### 5. İSTATİKSEL ANALİZ (STATISTICAL ANALYSIS)

Test edilen motorun stator akımının (sağlam rotor, bir kırıklı rotor ve üç kırıklı rotor için) öncelikle olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonları hesaplandı. Arızanın artışına bağlı olarak yoğunluk ve dağılım fonksiyonlarında (sağlam rotorlu motor verileri ile karşılaştırıldığında) değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(x)$  Eşitlik 1'de belirtildiği şekilde hesaplanır [16].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

$\sigma$  sinyalin standart sapması,  $\mu$  sinyalin ortalama değeridir.

Akım sinyalinin kümülatif dağılım fonksiyonu ise eşitlik 2'de verilmektedir [17].

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (2)$$

Şekil 7 test edilen motorun stator akımına ait olasılık yoğunluk fonksiyonunu (sağlam rotor, bir kırıklı rotor, ve üç kırıklı rotor ve %100 yük altında) göstermektedir. Şekil 8 ise aynı stator akımına ait kümülatif dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Rotordaki kırık sayısı artıkça olasılık yoğunluk fonksiyonunda meydana gelen değişimin (sağlam rotorlu motora göre) daha belirgin hale geldiği görülmektedir. (Şekil 7). Rotor kırıkları sonucu kümülatif dağılım fonksiyonunda meydana gelen değişimler olasılık yoğunluk fonksiyonu ile karşılaştırıldığında sınırlı kalmaktadır (Şekil 8).

Test motorunun kırık rotor çubuğu arızalarının tespiti edilmesi amacıyla stator akımı istatistiksel analiz parametreleri olarak standart sapma, varyans ( $\sigma^2$ ), ortalama ( $\mu$ ), medyan ( $\tilde{\mu}$ ), çarpıklık ve basıklık hesaplamaları da yapıldı. Stator akım sinyalinin çarpıklığı ve basıklığı sırasıyla eşitlik (3) ve eşitlik (4)'teki gibi hesaplanır.

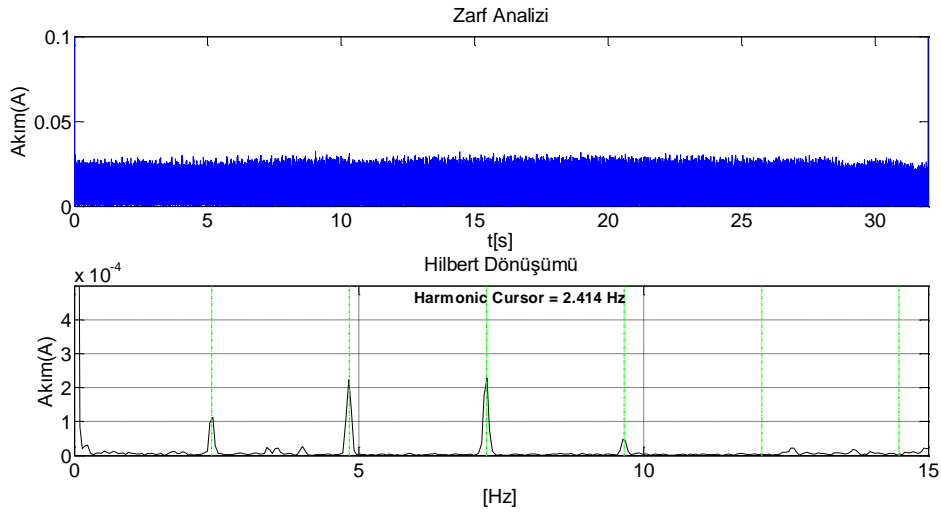
$$\text{Çarpıklık} = \frac{3(\mu - \tilde{\mu})}{\sigma} \quad (3)$$

$$\text{Basıklık} = \frac{(\sigma - \mu)^4}{n * (\sigma)^4} \quad (4)$$

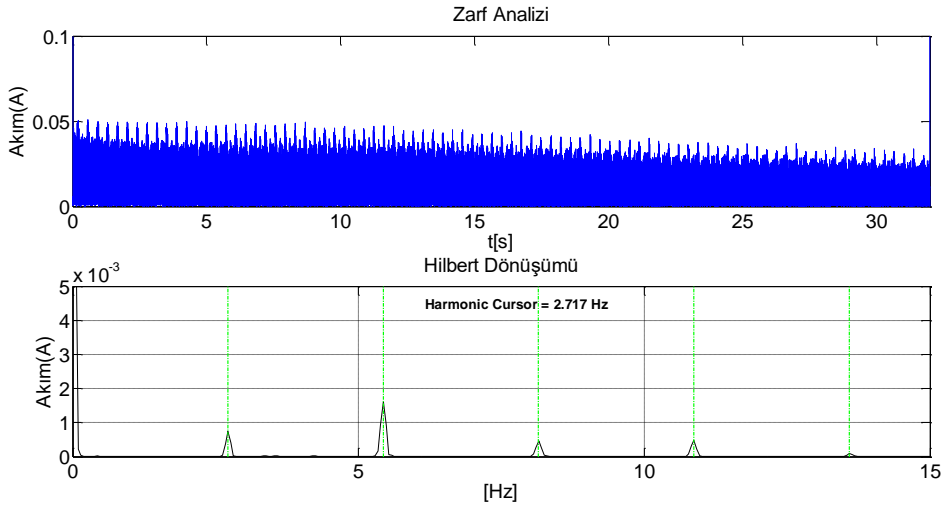
Stator akımı periyodik ve sinüzoidal bir yapıya sahip olduğu için sinyalin ortalama ve medyan değerlerinin sıfıra oldukça yakın çıkması beklenmelidir. Bundan dolayı ortalama ve medyan verisinin kullanıldığı Pearson Çarpıklık değeri de sıfır olarak hesaplanmaktadır. Basıklık hesaplamasında kullanılan  $n$  toplam veri sayısını göstermekte olup 800,000(32s \* 25,000Hz)

adet veriyi temsil etmektedir. Bu nedenle Çizelge 2'de stator akımının sadece standart sapma ve varyans değ-

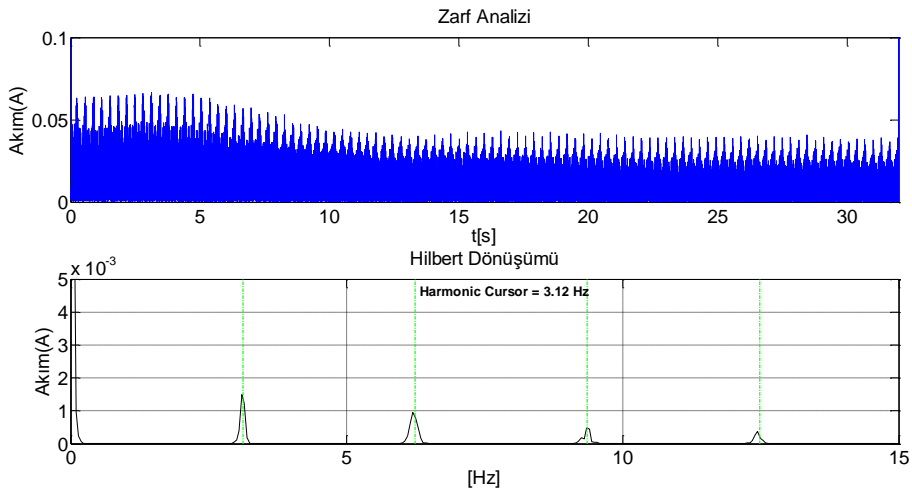
leri verilmektedir. Ortalama ve medyan hesaplamaları zarf analizi sonucu elde edilen akım sinyali için yapıldı.



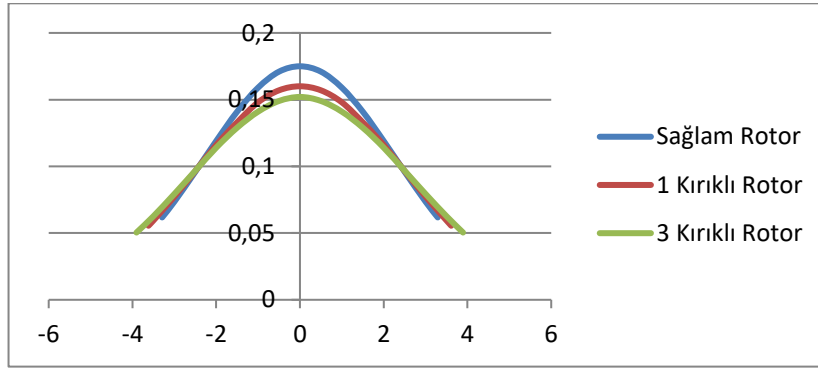
Şekil 4. Sağlam rotor %100 yükleme (Healthy rotor, %100 loading)



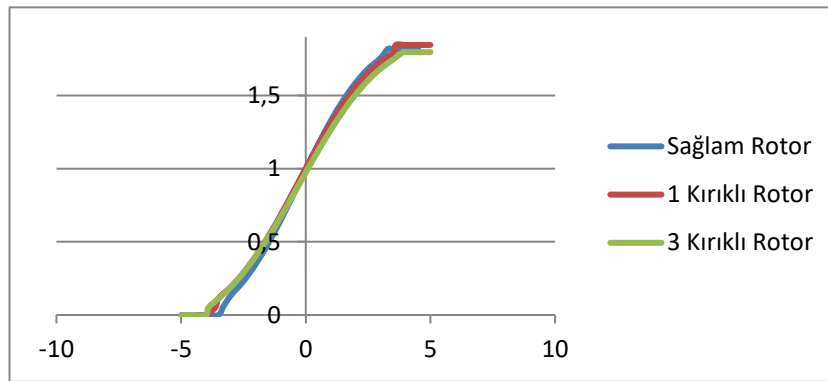
Şekil 5. Bir kırıklı rotor %100 yükleme (Rotor with one broken bar, %100 loading)



Şekil 6. Üç kırıklı rotor %100 yükleme (Rotor with three broken bars, %100 loading)



Şekil 7. Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability density function)



Şekil 8. Kümülatif dağılım fonksiyonu (Cumulative distribution function)

Çizelge 2. Stator akımı istatistiksel analiz sonuçları (Results of statistical analysis of stator current)

Rotor	Motor Yüğü	Standart Sapma	Varyans
Sağlam Rotor	%25	1.1644	1.356
Sağlam Rotor	%50	1.3019	1.695
Sağlam Rotor	%75	1.9287	3.720
Sağlam Rotor	%100	2.2782	5.19
Bir Kırıklı Rotor	%25	0.9047	0.819
Bir Kırıklı Rotor	%50	1.2865	1.655
Bir Kırıklı Rotor	%75	1.9178	3.678
Bir Kırıklı Rotor	%100	2.4866	6.183
Üç Kırıklı Rotor	%25	0.9316	0.868
Üç Kırıklı Rotor	%50	1.3515	1.827
Üç Kırıklı Rotor	%75	2.0139	4.056
Üç Kırıklı Rotor	%100	2.62863	6.91

Çizelge 2'deki sonuçlar incelendiğinde motorun aynı yük kademesi altında rotorundaki kırık çubuk sayısı arttıkça elde edilen sinyalin standart sapma ve varyans değerleri de artmaktadır. Aynı rotor arızası için motorun yükü arttığında standart sapma ve varyans değerlerinin de arttığı gözlemlenmektedir.

Zarf analizi sonucu elde edilen akım sinyalinin ortalama, medyan, standart sapma ve çarpıklık ve basıklık değerleri Çizelge 3'te verilmektedir.

Aynı yük değeri altında motorun rotorunda meydana gelen arızanın etkisini incelemek için motorun stator

akımı farklı rotor arızaları için istatistiksel olarak analiz edildi. Sonuçlar (varyans, çarpıklık, ve basıklık değerleri) Çizelge 4'te verilmektedir.

Çizelge 3 ve 4'te verilen sonuçlar incelendiğinde sinyalin ortalama, medyan ve standart sapma değerlerinin aynı rotor arızası için motor yükünün arttığı zaman arttığı görülmektedir. Benzer şekilde, aynı yük kademesinde rotor arızası (kırık çubuk sayısının) arttığında ortalama, medyan ve standart sapma değerlerinin de arttığı gözlemlenmektedir. Aynı yük kademesinde rotor kırık sayısı arttığı zaman çarpıklık ve basıklık değerleri sıfıra

oldukça yakın çıktığı için arıza durumu için bu analizlerin sağlıklı sonuç vermeyeceği gözlemlenmektedir. Zarf analizi sonucunda elde edilen akım sinyalinin standart sapma ve varyans değerlerinin arızayla ilişkilendirilmesinin daha mantıklı sonuçlar verebileceği gözlemlenmektedir.

edilmesinde ve durumlarının gözlemlenmesinde kullanılabilmesi görülmektedir. Stator akımının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonu %100 yük altında ve farklı rotor arızaları için ayrı karşılaştırmalı olarak hesaplandı. Elde edilen sonuçlara göre motordaki rotor arızaları olasılık yoğunluk

**Çizelge 3.** Zarf analizi sonucu elde edilen sinyalin istatistiksel analizi (Statistical analysis of the resulting signal of envelope analysis)

Rotor	Yüklenme	Ortalama	Medyan	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık
Sağlam Rotor	%25	0.0064	0.0057	0.0047	0.447	6.69e-10
Sağlam Rotor	%50	0.0067	0.0062	0.0054	0.278	4.2e-9
Sağlam Rotor	%75	0.0085	0.0077	0.0061	0.393	2.996e-8
Sağlam Rotor	%100	0.0103	0.0094	0.0092	0.293	6.39e-6
Bir Kırıklı Rotor	%25	0.0070	0.0063	0.0054	0.389	0.000241
Bir Kırıklı Rotor	%50	0.0079	0.0071	0.0067	0.358	3.22e-5
Bir Kırıklı Rotor	%75	0.0103	0.0092	0.0070	0.471	0.00154
Bir Kırıklı Rotor	%100	0.0131	0.0116	0.0106	0.425	9.67e-05
Üç Kırıklı Rotor	%25	0.0079	0.0071	0.0056	0.429	0.000889
Üç Kırıklı Rotor	%50	0.0089	0.0080	0.0080	0.338	5.01e-06
Üç Kırıklı Rotor	%75	0.0108	0.0095	0.0109	0.358	2.21e-10
Üç Kırıklı Rotor	%100	0.0135	0.0118	0.0121	0.422	5.60e-06

**Çizelge 4.** Çarpıklık ve basıklık analizleri (Skewness and kurtosis analysis)

Rotor	Yüklenme	Varyans	Çarpıklık	Basıklık
Sağlam Rotor	%25	2.209e-5	0.447	0.000535
Bir Kırıklı Rotor	%25	2.916e-5	0.389	0.000105
Üç Kırıklı Rotor	%25	3.136e-5	0.429	0.000749
Sağlam Rotor	%50	2.916e-5	0.278	6.39e-6
Bir Kırıklı Rotor	%50	4.489e-5	0.358	0.000241
Üç Kırıklı Rotor	%50	6.4e-5	0.338	3.22e-5
Sağlam Rotor	%75	3.721e-5	0.393	0.00154
Bir Kırıklı Rotor	%75	4.9e-5	0.471	9.67e-05
Üç Kırıklı Rotor	%75	1.1881e-4	0.358	0.000889
Sağlam Rotor	%100	8.464e-5	0.293	5.01e-06
Bir Kırıklı Rotor	%100	1.1236e-4	0.425	2.21e-10
Üç Kırıklı Rotor	%100	1.4641e-4	0.422	5.60e-06

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorun sağlam rotor, bir kırıklı ve üç kırıklı rotor ile farklı yük kademelerinde test edilerek stator akımında meydana gelen değişiklikler zarf analizi yöntemi ile ve istatistiksel olarak incelenmiştir. İstatistiksel analiz ortalama, medyan, standart sapma, varyans, basıklık ve çarpıklık değerlerinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Zarf analizi sonucunda elde edilen harmonik frekansları asenkron motorların rotor arızalarının tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da bu durum deneysel olarak gösterildi. Elde edilen sonuçlara göre standart sapma ve varyans değerlerindeki (rotor arızalarına bağlı olarak meydana gelen) değişimlerin asenkron motorların rotor çubuğu arızalarının tespit

fonksiyonu ve kümülatif dağılım fonksiyonunda değişimlere sebep olmaktadır. Bu değişimler de rotor arızalarının tespitinde kriter olarak değerlendirilebilir.

Asenkron motorların rotor arızalarının gözlemlenmesinde ve tespit edilmesinde istatistiksel parametrelerin de kullanılabilmesi görülmektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar ileri düzey istatistiksel metotların asenkron motorların rotor arızalarının ve şiddetinin de tespit edilmesinde kullanılmasını kapsayacaktır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Dumlupınar Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (DPÜ-BAP 2012-29).

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Ünsal A., Kabul A., “Detection of the broken rotor bars of squirrel-cage induction motors based on normalized least mean square filter and Hilbert envelope analysis”, *Electrical Engineering*, 98: 245-256, (2016).
2. Ünsal A., Kara Ö., “Detection and Classification of the Broken Rotor Bars in Squirrel-Cage Induction Motors”, *International Journal of Engineering Research And Management*, 03: 59-64, (2016).
3. Ünsal A., Karakaya O., “Asenkron Motor Rotor Arızalarının Analizi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 34: 69-86, (2015).
4. Ünsal A., Güçlü S., “Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırıklarının Mann-Whitney U-Testi İle İncelenmesi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 35: 79-92, (2015).
5. Lamb M. J., “Monitoring the Structural Integrity of Packaging Materials Subjected to Sustained Random Loads”, *PhD Thesis*, Victoria University, School of Engineering and Science, (2011).
6. Günel S., Ece D. G., Gerek Ö. N., “Induction machine condition monitoring using notch-filtered motor current”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23: 2658-2670, (2009).
7. Thomson W.T., Gilmore R. J., “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, data interpretation, and industrial case histories”, *Proceedings of the 32<sup>nd</sup> Turbomachinery Symposium*, Texas, 145-156, (2003).
8. Kalaskar C.S. and Gond V. J., “Motor current signature analysis to detect the fault in induction motor”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4: 58-61, (2014).
9. Ayhan B., Chow M. Y., Trussell H. J., Song M. H., et. al., “Statistical analysis on a case study of load effect on PSD technique for induction motor broken rotor bar fault detection”, *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta, 119-123, (2003).
10. Ahamed S. K., Karmakar S., Mitra M., Sengupta S., “Diagnosis of induction motor faults due to broken rotor bar and rotor mass unbalance through discrete wavelet transform of starting current at no load”, *Journal of Electrical Systems*, 6(3): 442-456, (2010).
11. Vargas M. H., Yopez E. C., Perez A. G. and Troncoso R. J. R., “Novel methodology for broken-rotor-bar and bearing faults detection through SVD and information entropy”, *Journal of Scientific&Industrial Research*, 71: 589-593, (2012).
12. Khwaja H.A., Gupta S. P. and Kumar V., “A statistical approach for fault diagnosis in electrical machines”, *IETE Journal of Research*, 56 (3): 146-155, (2014).
13. Perez O.D., Escudero L. A. G., Sotelo d. M., Gardel P. E. and Alonso M. P., “Analysis of fault signatures for the diagnosis of induction motors fed by voltage source inverters using ANOVA and additive models”, *Electric Power System Research* 121: 1-13, (2015).
14. İnternet: Kschischang F. R., “The hilbert transform”, *Lecture Notes*, The Edward S. Rogers Sr. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, (2006).  
<http://www.comm.utoronto.ca/frank/papers/hilbert.pdf>
15. Poularikas A. D., “Hilbert Transform”, *Transforms and Applications Handbook*, CRC Press , New York (2010).
16. Aczel A. D., “The Bell-Shaped Curve”, *Statistics Concepts and Applications*, IRWIN, United States of America, (1995).
17. İnternet: Freiwald R., “The cumulative distribution function for a random variable X”, *Lecture Notes*, Washington University.  
<http://www.math.wustl.edu/~freiwald/Math132/cdf.pdf>