

ASENKRON MOTOR EKSENEL KAÇIKLIK ARIZALARININ SHANNON ENTROPİSİ İLE ANALİZİ

Abdurrahman ÜNSAL *^{ID}
Selahattin GÜÇLÜ **^{ID}

Alınma: 23.01.2019 ; düzeltme: 30.07.2019 ; kabul: 04.10.2019

Öz: Sanayide ve işletmelerde yoğun bir şekilde kullanılan asenkron motorların yaygın arızalarından bir tanesi de motorlarda meydana gelen ekselel kaçıklık arızalarıdır. Bu çalışmada üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motorun ekselel kaçıklık arızaları Shannon entropisi ile incelendi. Ekselel kaçıklık arızaları asenkron motorun her iki kapağının iç kısmındaki rulman yatakları genişletilerek oluşturuldu. Genişletilen rulman yataklarına üç boyutlu yazıcıdan elde edilen bir burç yerleştirilerek rotorun ekseninden 0,20 mm kaçık olarak çalışması sağlandı. Asenkron motor hem sağlam olarak hem de ekselel kaçıklık arızalı olarak %25, %50, %75 ve %100 yük altında çalıştırıldı. Her test durumu için stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedildi. Stator akımı ve titreşim sinyallerinin doğruluğu Fourier analizi ile kontrol edildi. Ekselel kaçıklık arızasının etkisi, motorun stator akımı ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplanarak incelendi. Sağlam ve ekselel kaçıklık arızalı motorun akım ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri karşılaştırıldı. Elde edilen sonuçlar; ekselel kaçıklık arızalarının titreşim sinyali entropi değerinde ciddi bir artışa sebep olduğu ancak stator akımı entropi değerinde anlamlı bir değişim göstermediğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan titreşim sinyalleri entropi analizinin ekselel kaçıklık arızalarının tespitinde kullanılabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Ekselel Kaçıklık Arızaları, Entropi Analizi, Shannon Entropisi

Analysis of Eccentric Faults of Induction Motor by Using Shannon Entropy

Abstract: One of the common faults of induction motors which are extensively used in industry and commercial applications is the axial misalignment faults in the motor. In this study, axial misalignment faults of a three-phase squirrel-cage induction motor was analyzed by Shannon entropy. The axial misalignment fault was created by the enlarging of the bearing shell inside the two end-bells of the induction motor. A special designed material manufactured by a 3D printer was placed inside the enlarged bearing shell. In this way, a 0.20 mm offset was created. Induction motor was tested both healthy and with axial misalignment fault under 25%, 50%, 75% and 100% loading conditions. The stator current and vibration signals were recorded for each test case. The validity of the stator current and vibration signals was checked by Fourier analysis. The axial offset effect was evaluated by calculating the entropy values of the stator current and vibration signals of the motor. Then entropy values were calculated for both the healthy and faulty motor. The results show that the axial misalignment faults cause an increase in the entropy value of the vibration signal significantly. The change in the entropy value of the stator current due to axial misalignment faults is not significant. Therefore it is shown that the entropy analysis of vibration signals can be used in the analysis eccentric fault of induction motors.

Keywords: Induction Motor, Axial Misalignment Faults, Entropy Analysis, Shannon Entropy

* Abdurrahman ÜNSAL, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43100, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

** Selahattin GÜÇLÜ, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, 43100, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı

İletişim Yazarı: Abdurrahman ÜNSAL (unsal@dpu.edu.tr)

1. GİRİŞ

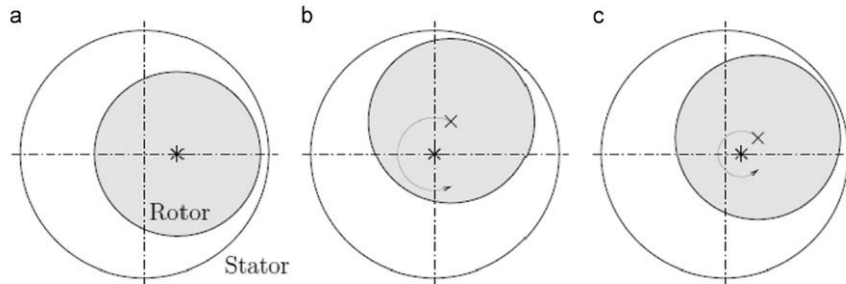
Asenkron motorlar düşük fiyat, küçük boyut, sağlam yapı, esneklik ve kolay devreye alınabildiğinden dolayı endüstride en yaygın olarak kullanılan elektrik motorlardır. Geniş kullanım alanları küçük tezgâhlardan petrol rafinesi, çelik fabrikası, maden ocağı ve kompresörler gibi yüksek güçlü proseslere kadar değişmektedir (Glowacz ve diğ., 2018). Zorlu koşullar altında çalışan asenkron motorlar elektrik, manyetik, mekanik, termal ve çevresel birçok strese maruz kalmaktadır. Bu stres sonucu asenkron motorlarda elektriksel ve mekanik arızalar meydana gelmektedir. Arızalar erken tespit veya teşhis edilmez ve gerekli tedbirler alınmazsa proseslerin durmasına üretim hatlarının verimlerinin azalmasına ve çevre ekipmanların ve/veya yakındaki kişilerin zarar görmesine neden olabilir (Ojaghi ve Mohammadi, 2018). Bundan dolayı asenkron motor arızalarının tespit edilmesi önemli bir çalışma konusudur. Uygulamalarda rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki çeşit asenkron motor kullanılmaktadır. Sincap kafesli asenkron motorlar rotoru sargılı asenkron motorlara göre daha yaygın olarak kullanıldığından dolayı bu çalışmada sincap kafesli asenkron motor çalışılmıştır. Asenkron motorlarda meydana gelen arızaların yüzdeleri Tablo 1’de verilmektedir (Kompella ve diğ., 2016).

Tablo 1. Asenkron motor arızalarının sınıflandırılması

Asenkron Motor Arızaları			
Rulman arızalar (%)	Stator arızaları (%)	Rotor arızaları (%)	Diğer arızalar (%)
41	37	10	12

Asenkron motorlarda meydana gelen eksenel kaçıklık arızaları stator ile rotor arasındaki hava boşluğu mesafesinin dengesizleşmesi sonucu meydana gelir. Eksenel kaçıklık arızaları genel olarak statik, dinamik ve hibrit olmak üzere üç ayrı grupta toplanabilir. Statik eksenel kaçıklık arızalarında radyal hava boşluğu mesafesi sabittir. Dinamik eksenel kaçıklık arızalarında rotorun merkezi dönme merkezinde değildir ve hava boşluğu mesafesi rotorun dönüşü ile değişir. Asenkron motorlarda meydana gelen mekanik arızaların büyük çoğunluğu, zamanında tedbir alınmazsa, eksenel kaçıklık arızalarına sebep olur.

Statik eksenel kaçıklık arızaları genelde rotorun oval olmasından veya motorun işletmeye alınması sırasında montajlama hatalarından kaynaklanır. Şekil 1’de eksenel kaçıklık arızaları grafiksel olarak görülmektedir (Faiz ve Moosavi, 2016), (Polat, 2015).



Şekil 1:

a. Statik eksenel kaçıklık **b.** Dinamik eksenel kaçıklık **c.** Hibrit eksenel kaçıklık

Dinamik eksenel kaçıklık arızaları motor milinin bükülmesi, rulmanların aşınması veya bozulması, ve/veya motorun belli kritik hızlarda mekanik olarak osilasyona girmesi sonucu meydana gelebilir. Statik eksenel kaçıklık arızalarında rotor ve stator merkezleri

hızalanmamıştır, ancak rotor kendi merkezi etrafında döner. Statik aksel kaçıklık arızaları hava boşluğu manyetik alan dağılımının bozulmasına sebebiyet vererek sonuçta motor milinin bükülmesine ve dinamik aksel kaçıklık arızalara dönüşebilir. Statik aksel kaçıklık arızaları devam ederse rotorun statora sürtünmesi sonucu stator gövdesinin ve/veya sargılarının zarar görmesine ve motorun tamamen devre dışı kalmasına sebep olabilir.

Bu çalışmanın amacı aksel kaçıklık arızalarının Shannon entropisi ile analiz etmektir. Sağlam bir asenkron motor ile aynı özelliklere sahip aksel kaçıklık arızalı bir asenkron motorun akım ve titreşim sinyalleri entropi değerlerinin karşılaştırılması ve entropi değerlerinde meydana gelen değişimlerin gözlenmesi hedeflenmektedir.

Çalışmada etiket değerleri Tablo 2’de verilen üç fazlı, 3 kW sincap kafesli bir asenkron motor kullanıldı. Aksel kaçıklık arızasını oluşturmak için motorun her iki kapağının iç tarafındaki rulman yataklarının iç genişletildi (Şekil 2). Genişletilen rulman yataklarına 3D yazıcı kullanılarak PLA (Polylactic Acid) filamentinden, eksenden kaçık olarak üretilen birer burç yerleştirildi. Böylece rotorun stator ekseninden 0,20 mm aksel kaçıklık ile çalışması sağlandı. Şekil 3’te motor kapağının iç tarafına yerleştirilen burcun boyutları gösterilmiştir. Burcun imalatında PLA esnek malzemesi kullanıldığından dolayı oluşturulan aksel kaçıklık arızası da hibrit aksel kaçıklık arızası olarak değerlendirilmektedir.

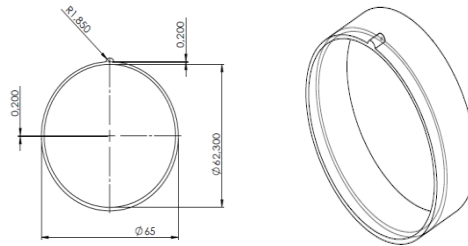
Tablo 2. Test motoru etiket değerleri

Marka	GAMAK
Model	AGM2E 100 L 2
Faz	3 fazlı
Güç	3 kW
Rotor Dönüş Hızı	2850 d/dk
Nominal Akım	5,6 A (Y bağlı)
Kutup sayısı	2
Güç Katsayısı	0,87
Verim	%84,6



Şekil 2:

Motor kapaklarındaki rulman yatağı



Şekil 3:

3B yazıcı ile elde edilen burç ebatları

Asenkron motorlarda eksenel kaçıklık arıza sonucu stator akımında meydana gelen yan-band frekansları eşitlik 1’de verilen formül ile bulunur (Faiz ve Moosavi, 2016), (Benbouzid, 2000).

$$f_{ecc} = f_s \pm k \frac{1-s}{p} f_s \quad (1)$$

burada f_s şebeke frekansını, k tam sayıyı, p kutup sayısını, s ise motorun kaymasını ifade etmektedir.

2. ENTROPİ

Entropi kavramı bir sistemdeki belirsizlik miktarını belirlemek için kullanılan bir kavramdır. Entropi kavramı bilgi kuramında ilk kez 1948 yılında Claude Shannon tarafından kullanılmaya başlandı ve literatürde Shannon entropisi olarak yer aldı (Camarena-Martinez ve diğ., 2016). Shannon entropisi başlangıçta bilgi kaynağının belirsizliğini ifade etmek için kullanılmaya başlandı. Daha sonra bilgi kuramı dışında diğer alanlarda belirsizliğin veya düzensizliğin ölçüsü olarak kullanılmaya başlandı. Bundan dolayı bu çalışmada Shannon entropisi tercih edilmiştir. Bir sistemin düzensizliği sistem bileşenleri arasındaki enerji akışıyla ilgilidir. Bir sistemdeki belirsizlik veya düzensizlik miktarı arttıkça entropi değeri yükselir. Sistem düzensizliği arttıkça sistemi oluşturan bileşenler arasındaki enerji alış verişi azalır ve entropi değerinde artış meydana gelir. Buna göre en düzensiz bir sistem maksimum entropi değerine sahip bir sistemdir (Ojaghi ve Mohammadi, 2018), (Faiz ve Moosavi, 2016), (Benbouzidi, 2000), (Dinçer, 2005), Eduardo Cabal, 2011), (Cabal-Yepez, ve diğ. 2012), (Heidari ve Ohadi, 2014), Camarenave diğ., 2016), (Pan, ve diğ., 2016).

Bilimsel çalışmalarda farklı entropi metotları kullanılmakla birlikte Shannon entropisi pratik uygulamalarda kullanılan en yaygın entropi çeşididir (Dinçer, 2005). Rastgele $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ gibi n değerli bir x olayının Shannon entropi değeri aşağıdaki eşitlik 2 ile hesaplanır (Camarena ve diğ., 2016), (Ojaghi ve Mohammadi, 2018).

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2[p(x_i)] \quad (2)$$

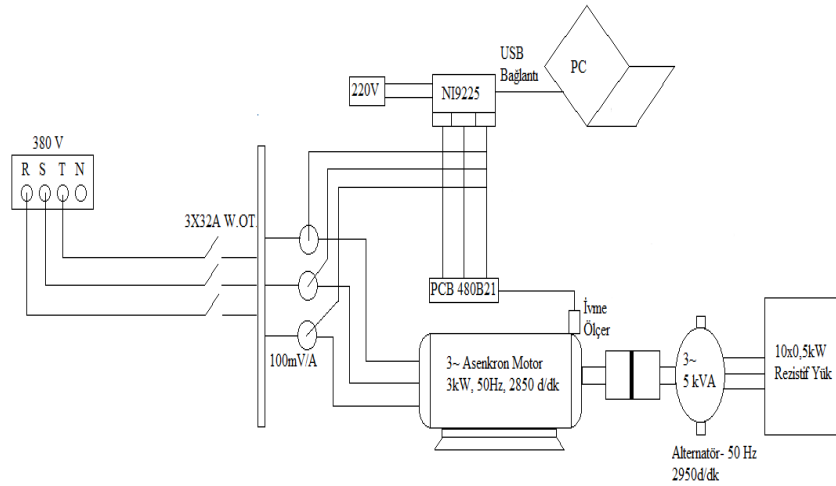
Burada $p(x_i)$ her bir x_i değerinin x olayı içindeki olasılığını vermektedir. Bu çalışmada da Shannon entropisi eksenel kaçıklık arızalarının analizinde kullanılacaktır. Eksenel kaçıklık arızaları asenkron motorun kararlı durumda çalışmasını olumsuz etkileyip motorun düzensiz olarak çalışmasına sebep olur. Bu düzensizlik durumu elektriksel olarak motorun stator akımına harmonik olarak yansımaktadır. Bu durum ayrıca asenkron motorun çalışmasını mekanik olarak etkileyip motor titreşiminde artış meydana getirmektedir. Dolayısıyla yapılan çalışmada hem stator akımı entropi değerleri hem de motorun 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri incelenmiştir.

Motorun yük tarafında meydana gelecek herhangi mekanik bir arıza da motorun titreşim sinyallerinde ve akım sinyallerinde değişimlere sebep olabilir. Motor boşta (yüksüz) çalıştırılırsa dahi motorun bağlı olduğu düzeneden kaynaklanabilecek mekanik titreşimler görülebilir. Bu çalışmadaki amaç asenkron motorda meydana gelen eksenel kaçıklık arızalarını etkilerinin gözlemlenmesidir. Bundan dolayı deney düzeneği, yük tarafında herhangi bir mekanik arıza olamayacak şekilde tasarlandı. Motor-yük bağlantısı da buna göre yapıldı. Yük tarafında meydana gelebilecek mekanik arızalar yükün fiziksel özelliklerine de bağlı olarak farklı karakteristik frekanslarda titreşimler gösterebilir. Motorun eksenel kaçıklık arızasına bağlı karakteristik titreşim frekansları bilindiğinden dolayı arızanın motordan mı yoksa yükten mi kaynaklandığını tespit etmek için sinyallerin frekans analizleri yapılması gerekir. Buna ilaveten yükten kaynaklanan dengesizlikler de motor miline farklı yönde kuvvetler uygulayarak dinamik veya hibrit eksenel kaçıklık arızalarına sebep olabilir.

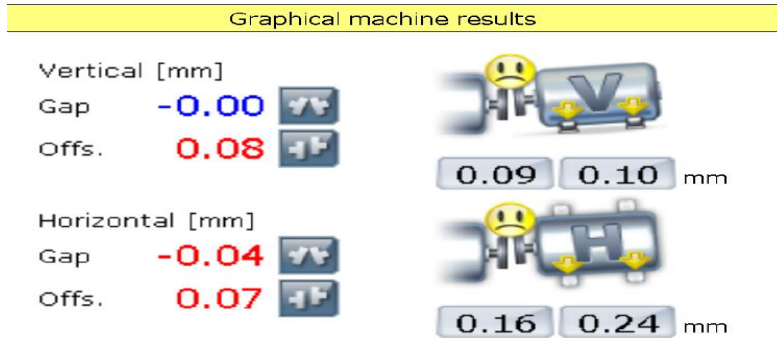
Pratik uygulamalarda, eksenel arızalarının tespiti için çalışan bir motorun yükten ayrılıp boşta test edilmesi emek, zaman kaybı ve maliyetlere sebep olduğundan dolayı tercih edilmez. Çalışan bir motorda titreşim ve akım sinyali almak daha pratik olduğundan dolayı tercih edilmektedir. Akademik çalışmalarda da bu yöntem kullanılmaktadır. Motor-yük arasında meydana gelebilecek herhangi bir dengesizlik de eksenel kaçıklık arızası gibi motorun çalışma düzenini bozabilir. Motor-yük dengesizliğinin etkisini minimum düzeye indirmek için motor-yük dengesi hassas bir lazer hizalama cihazı ile ayarlandı. Buna ilaveten yük tarafında meydana gelen arızaların genelde motorda moment salınımlarına sebep olduğu ve eksenel kaçıklık arızalarının da genelde motor içi arızalardan kaynaklandığı bilinmektedir (Faiz ve Moosavi, 2016).

3. DENEY DÜZENEGİ

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir. Deneyde etiket değerleri Tablo 2'de verilen iki kutuplu, üç fazlı, 3 kW bir asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motor 5 kVA anma gücüne sahip kendinden uyarımlı bir alternatör ile yüklendi. Alternatörün çıkışına da 5 kW anma gücüne sahip ayarlı bir rezistif yük bağlanarak yükleme gerçekleştirildi.



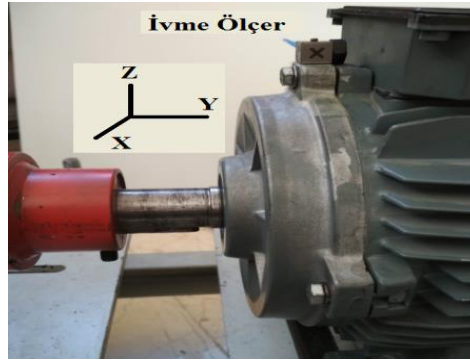
Şekil 4:
Deney düzeneği



Şekil 5:
Hizalama değerleri

Asenkron motor-yük arasındaki dengesiz probleminin eksenel kaçıklık arızasına olumsuz olarak etki etmemesi için motor-yük dengesi bir lazer hizalama cihazı ile ayarlandı. Ayarlama “**Prüftechnik Shaftalign**” marka bir lazer hizalama cihazı ile gerçekleştirildi. Hizalama değerleri dikey konumda 0,08 mm offset, yatay konumda ise 0,04 mm gap ve 0,04 mm offset değeri ile gerçekleştirilmiştir. Bu hizalama değerleri 3 kW’lık bir asenkron motorun hizalanması için normal olarak edilebilir değerlerdir. Şekil 5’te hizalama değerlerine ait bir cihaz ekran görüntüsü görülmektedir.

Asenkron motorun stator akımı ve titreşim sinyalleri National Instrument (NI cDAQ-9174) veri toplama sistemi kullanılarak kaydedildi. Titreşim sinyalleri bir adet üç-eksen ivmeölçer (PCB Piezotronics, 356A32) kullanılarak kaydedilmiştir. İvmeölçerin çıkışında bir adet sinyal şartlandırıcı/güçlendirici (PCB Piezotronics, 480B21) kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri NI 9225 modülü kullanılarak kaydedildi. Veriler 25 kHz örnekleme frekansı ile kaydedildi. Şekil 6’da ivmeölçerin ölçüm eksenleri görülmektedir.



Şekil 6:
Üç eksenli ivmeölçerin motor üzerindeki eksenleri

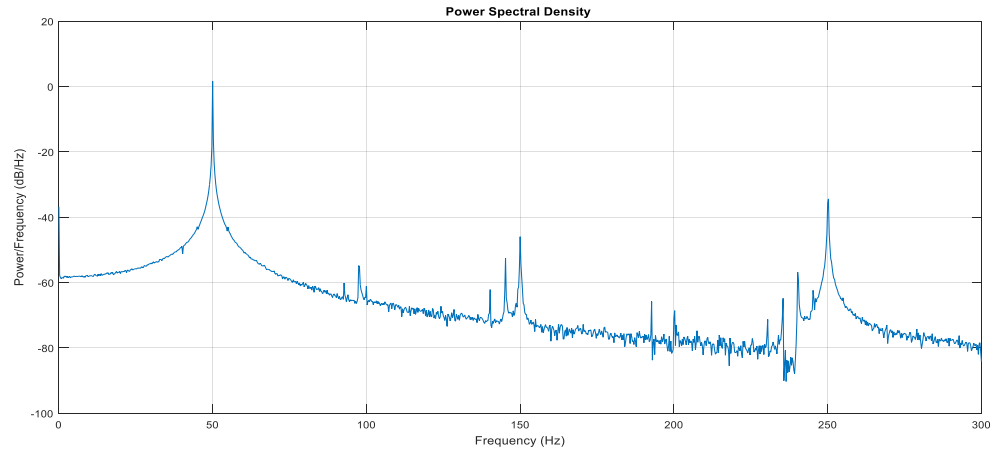
Testler, motor şebekeden (380 V, 50 Hz) beslenerek dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirildi. Testler önce sağlam motor ile gerçekleştirildi daha sonra da eksenel kaçıklık arızalı motor ile gerçekleştirildi. Stator akımı ve titreşim sinyalleri NI donanımı ve LabVIEW yazılımı ile kaydedilmiştir. Analizler için MATLAB paket programı kullanıldı.

4. SONUÇLAR

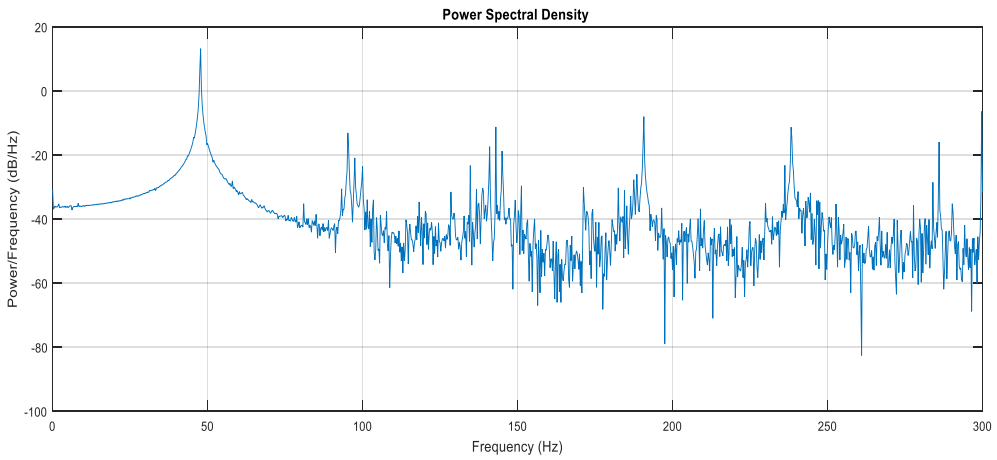
Eşdeğer özelliklere sahip biri sağlam diğeri eksenel kaçıklık arızalı olmak üzere iki adet asenkron motor dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75 ve %100 yük) test edildi. Motor yüklendikçe motor akımında artış meydana gelir. Motorun kayması artar ve hızı düşer. Hava aralığındaki dengesiz manyetik akı yoğunluğu dağılımı sonucu motorun stator akımı karakteristik frekans bileşenlerinin genliğinde artış meydana gelir (Ojaghi ve Mohammadi, 2018). Motorun yükü artıkça titreşim sinyalleri karakteristik frekans genliklerinde azalma meydana gelir (Habetler, 2003). Sağlam ve eksenel kaçıklık arızalı motorların %100 yük altında şebekeden çektiği akımların güç spektral yoğunlukları Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmektedir. Eksenel kaçıklık arızasına ait karakteristik frekanslar rahatlıkla görülmektedir. Sağlam motorun ve eksenel kaçıklık arızalı motorun üç-eksen (x-y-z) titreşim sinyallerinin güç spektral yoğunlukları da Şekil 9 - Şekil 12 de verilmektedir. Titreşim sinyalleri karakteristik frekanslar rahatlıkla görülmektedir.



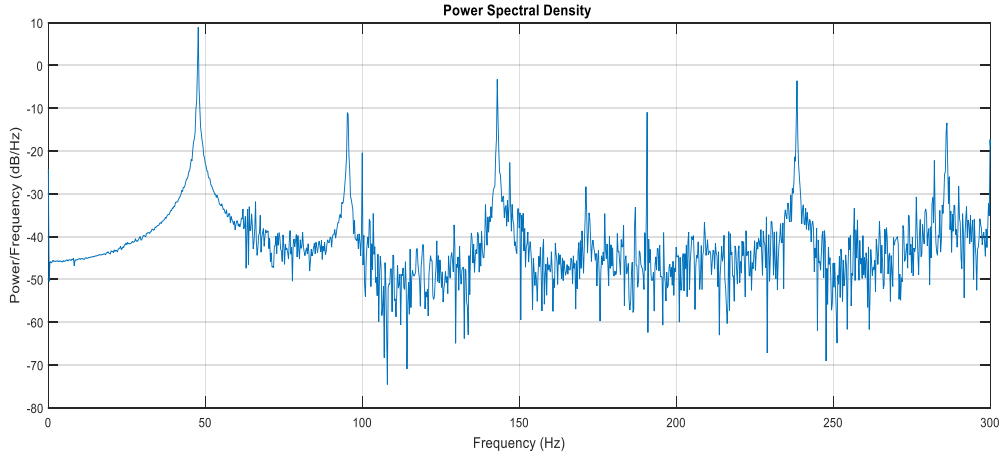
Şekil 7:
Sağlam motorun %100 yük altında stator akımı güç spektral yoğunluğu



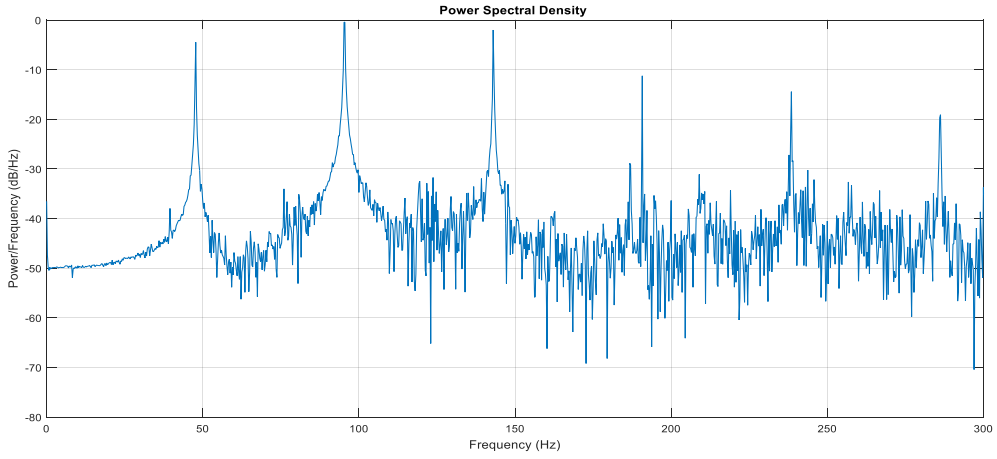
Şekil 8:
Eksenel kaçıklık arızalı motorun %100 yük altında stator akımı güç spektral yoğunluğu



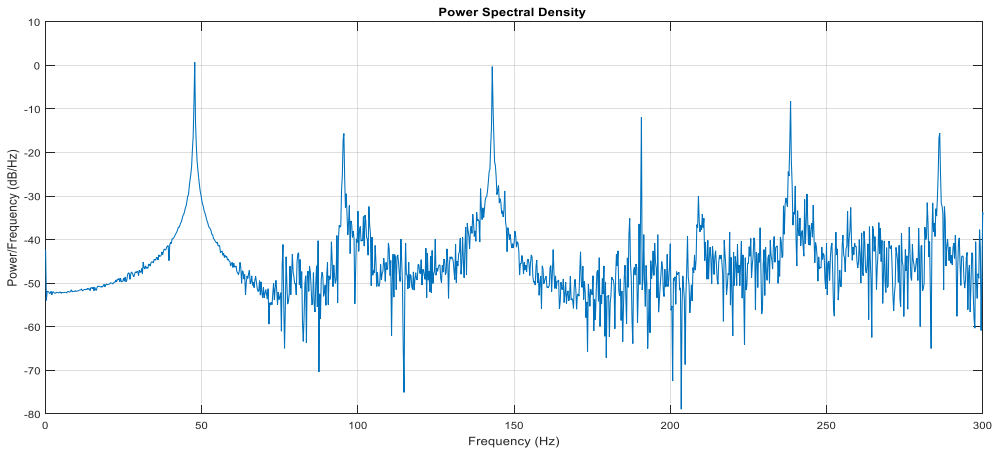
Şekil 9:
Sağlam motor %100 yük altında x-ekseni titreşim güç spektral yoğunluğu



Şekil 10:
Eksenel kaçıklık arızalı motor %100 yük altında x-ekseni titreşim güç spektral yoğunluğu



Şekil 11:
Eksenel kaçıklık arızalı motor %100 yük altında y-ekseni titreşim güç spektral yoğunluğu

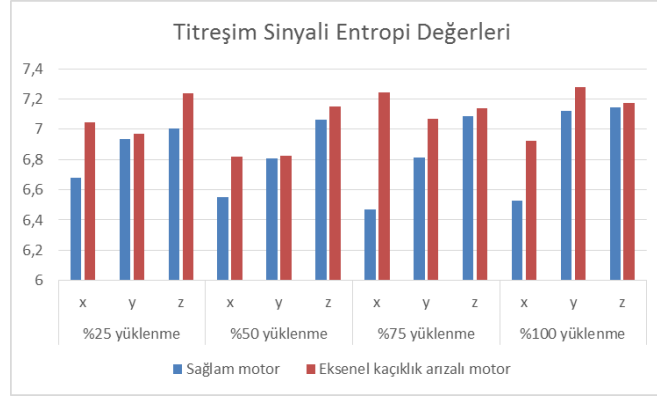


Şekil 12:
Eksenel kaçıklık arızalı motor %100 yük altında z-ekseni titreşim güç spektral yoğunluğu

Tablo 3. Titreşim sinyalleri karakteristik harmonik frekansları ve genlikleri

$f_{ecc}=(f_s \pm k.f_r)Hz$		f_s+f_r		f_s+2f_r		f_s+3f_r	
Beklenen değerler		97,5		145		192,5	
Ölçülen değerler		f_{ecc} (Hz)	Normalleştirilmiş genlik değeri	f_{ecc} (Hz)	Normalleştirilmiş genlik değeri	f_{ecc} (Hz)	Normalleştirilmiş genlik değeri
Sağlam motor (%25 yüklenme)	x-ekseni	97,85	0,01399	146,9	0,02929	194,4	0,004497
	y-ekseni	97,85	0,01599	146,9	0,01197	194,4	0,005125
	z-ekseni	98,04	0,01495	146,9	0,01413	194,4	0,00416
Eksenel kaçıklık arızalı (%25 yüklenme)	x-ekseni	97,66	0,01442	144,8	0,02199	193,8	0,006379
	y-ekseni	96,89	0,02363	144,8	0,01293	192,5	0,009433
	z-ekseni	96,89	0,01664	144,8	0,01659	193,2	0,008762
Sağlam motor (%50 yüklenme)	x-ekseni	98,99	0,01429	145	0,0218	192,8	0,009335
	y-ekseni	98,42	0,03694	145,7	0,01951	191,7	0,005108
	z-ekseni	98,61	0,01543	147,1	0,0221	192,8	0,009973
Eksenel kaçıklık arızalı (%50 yüklenme)	x-ekseni	98,99	0,01485	144,6	0,02962	194	0,008083
	y-ekseni	99,18	0,03796	145,3	0,02701	193,8	0,008126
	z-ekseni	98,99	0,02233	145,3	0,04554	193,8	0,006108
Sağlam motor (%75 yüklenme)	x-ekseni	95,75	0,01552	146,1	0,02531	194,4	0,01652
	y-ekseni	95,75	0,03849	146,7	0,0132	194,9	0,009619
	z-ekseni	95,75	0,01617	146,7	0,03143	194,9	0,007127
Eksenel kaçıklık arızalı (%75 yüklenme)	x-ekseni	95,94	0,013	146,5	0,03329	192,3	0,0146
	y-ekseni	97,47	0,04116	146,5	0,03237	194,5	0,01704
	z-ekseni	96,51	0,2689	146,5	0,0471	193,8	0,008666
Sağlam motor (%100 yüklenme)	x-ekseni	94,22	0,01477	143,4	0,03845	192,1	0,01976
	y-ekseni	97,47	0,0531	143,4	0,02631	192,8	0,01729
	z-ekseni	94,22	0,02417	143,4	0,02924	192,6	0,01214
Eksenel kaçıklık arızalı (%100 yüklenme)	x-ekseni	99,95	0,06211	144,2	0,03761	189,6	0,01409
	y-ekseni	96,51	0,07395	144,2	0,04159	190,4	0,0401
	z-ekseni	94,99	0,03591	144,2	0,05291	191,9	0,01241

Eksenel kaçıklık arızası karakteristik titreşim sinyalleri kx_f frekanslarında görülür (Hegde ve Maruthi, 2012), (Polat, 2015), (Li ve diğ. 2015), (Faiz ve Moosavi, 2016), (Bessous, 2017). Bu çalışmada motorun tam yük çalışma hızı $f_r = 47,5$ olarak ölçülmüştür. Asenkron motorlarda meydana gelen eksenel kaçıklık arızaları titreşim sinyallerinin $1xf_r$, $2xf_r$, $3xf_r$ karakteristik harmonik bileşenlerinin genlik değerlerinden tespit edilebilir. $2xf_r$ ya da $3xf_r$ harmonik bileşenlerinin genlik değerleri $1xf_r$ harmonik bileşeninin genlik değerinden %50 oranında daha yüksek olması motorda eksenel kaçıklık arızasının olduğunu gösterir (Köse, 2004). Elde edilen deneysel sonuçlarda da eksenel kaçıklık arızalı motorun farklı yüklenme durumlarında $2xf_r$ ya da $3xf_r$ harmonik bileşen genliklerinin, $1xf_r$ harmonik bileşeni genliğinin %50'sinden daha yüksek olduğu ve motorun eksenel kaçıklık arızalı olarak çalıştığı görülmektedir.



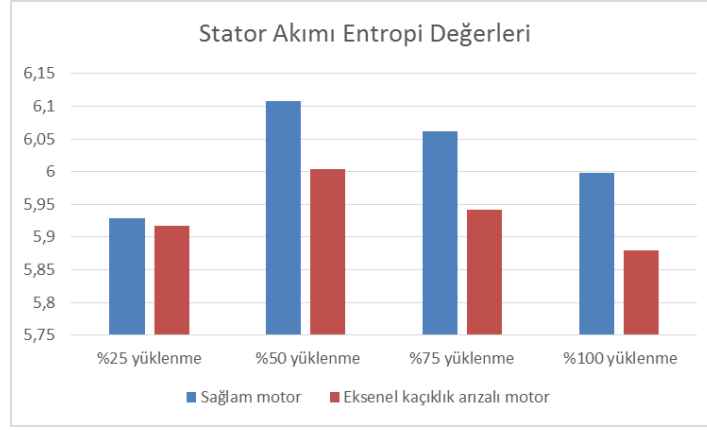
Şekil 13:
Titreşim sinyalleri entropi değerleri

Sağlam motor ve eksenel kaçıklık arızalı motora ait üç-eksen titreşim sinyallerinin harmonik frekansları ve genlikleri toplu olarak Tablo 3'te verilmektedir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde eksenel kaçıklık arızalı motorun karakteristik harmonik bileşen genliklerinin sağlam motorun karakteristik harmonik bileşen genliklerine göre (aynı yüklenme durumunda) her üç eksen de arttığı görülmektedir.

Titreşim sinyallerine ilave olarak sağlam motor ve eksenel kaçıklık arızalı motorun stator akımı karakteristik harmoniklerinin frekansları da incelendi. Yapılan incelemede eksenel kaçıklık arızası sonucu meydana gelen yan-band karakteristik harmonik genliklerinden anlamlı bir sonuç bulunamamıştır.

Sağlam motor ve eksenel kaçıklık arızalı motorun titreşim sinyallerinin entropi değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir. Şekil 13'te görüldüğü gibi eksenel kaçıklık arızalı motorun titreşim sinyallerinin entropi değerleri, sağlam motor titreşim sinyallerinin entropi değerleri ile kıyaslandığında entropi değerlerinde anlamlı bir artış olduğu tespit edilmiştir. Motorda eksenel kaçıklık arızası meydana geldiği zaman motorun çalışma düzeni bozularak titreşiminde bir artış meydana gelir. Bunun sonucunda da entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Entropi değerlerindeki bu artış eksenel kaçıklık arızası sonucu meydana gelen düzensizliği/belirsizliği göstermektedir.

Sağlam motor ve eksenel kaçıklık arızalı motorun stator akımı sinyallerinin entropi değerleri Şekil 14'te gösterilmiştir. Eksenel kaçıklık arızalı motorun stator akımı entropi değerleri, sağlam motorun stator akımı entropi değerlerine göre azaldığı görülmektedir. Stator akımı sinyallerinin güç spektral yoğunluklarından da görüleceği gibi eksenel kaçıklık arızaların motorun stator akımında anlamlı karakteristik frekanslar oluşturmadığı görülmüştür. Bundan dolayı stator akımı entropi değerlerinde eksenel kaçıklık arızası ile orantılı ve anlamlı bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 14:
Stator akımı entropi değerleri

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada üç fazlı bir asenkron motorun eksenel kaçıklık arızaları Shannon entropi değerleri ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında bir adet sağlam ile bir adet eksenel kaçıklı ve aynı niteliklere sahip asenkron motor dört farklı yük altında test edildi. Motorların stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedilerek önce karakteristik frekansları incelendi. Elde edilen karakteristik frekansların literatürde sunulan değerlerle uyumlu olduğu görüldü. Titreşim sinyalleri ve stator akımı entropi değerleri hesaplandı. Eksenel kaçıklık arızalı motorun titreşim sinyalleri entropi değerlerinde sağlam motorun titreşim sinyali entropi değerlerine göre anlamlı artışlar meydana geldiği gözlemlendi. Sağlam ve eksenel kaçıklı arızalı motorun stator akımı entropi değerlerinde ise anlamlı bir değişim gözlemlenmedi. Elde edilen sonuçlar titreşim sinyalleri entropi değerlerinin eksenel kaçıklık arızalı motorların arıza teşhisinde kullanılabileceğini ancak stator akımı entropi değerlerinin eksenel kaçıklık arızalarını teşhis edilmesinde anlamlı sonuç vermeyeceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK-116E302 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK Başkanlığına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Bafroui, H. H., ve Ohadi, A. (2014) Application of wavelet energy and Shannon entropy for feature extraction in gearbox fault detection under varying speed conditions, *Neurocomputing*, 133, 437-445. doi:0.1016/j.neucom.2013.12.018
2. Benbouzid, M. E. H. (2000) A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), 984-993. doi:10.1109/41.873206
3. Bessous, N., Zouzou, S. E., Sbaa, S., ve Bentrah, W. (2017) A comparative study between the MCSA, DWT and the vibration analysis methods to diagnose the dynamic eccentricity fault in induction motors, *6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 414-421. doi:10.1109/ICoSC.2017.7958655
4. Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R. A., ve Alvarez-Salas, R. (2011). Multiple fault detection through information entropy analysis in

- ASD-fed induction motors, *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, 391-396. doi:10.1109/DEMPED.2011.6063653
5. Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., ve Osornio-Rios, R. A. (2012) Single-parameter fault identification through information entropy analysis at the startup-transient current in induction motors, *Electric Power Systems Research*, 89, 64-69. doi:10.1016/j.epsr.2012.02.016
 6. Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcua-Sanchez, J. P., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., ve Garcia-Perez, A. (2016) Shannon Entropy and Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals, *Shock and Vibration*. 2016, 1-10. doi:10.1155/2016/4860309
 7. Dinçer, G. (2005) *Entropi Kavramının İstatistiksel Bazı Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 8. Faiz, J., ve Moosavi, S. M. M. (2016) Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 169-179. doi:10.1016/j.rser.2015.10.113
 9. Glowacz, A., Glowacz, W., Glowacz, Z., ve Kozik, J. (2018) Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals, *Measurement*, 113, 1-9. doi:10.1016/j.measurement.2017.08.036
 10. Hegde, V., ve Maruthi, G. S. (2012) Experimental investigation on detection of air gap eccentricity in induction motors by current and vibration signature analysis using non-invasive sensors, *Energy Procedia*, 14, 1047-1052.
 11. Kompella, K. D., Mannam, V. G. R., ve Rayapudi, S. R. (2016) DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(3), 411-427. doi:10.1016/j.egypro.2011.12.1053
 12. Köse, R. K. (2004). Makine arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 45, 538.
 13. Li, S., Li, Y., ve Sarlioglu, B. (2016) Rotor unbalanced magnetic force in flux-switching permanent magnet machines due to static and dynamic eccentricity, *Electric Power Components and Systems*, 44(3), 336-342. doi:10.1080/15325008.2015.1111469
 14. Obaid, R. R., ve Habetler, T. G. (2003) Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions, *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2, 1347-1351. doi:10.1109/IAS.2003.1257726
 15. Ojaghi, M., & Mohammadi, M. (2017) Unified modeling technique for axially uniform and nonuniform eccentricity faults in three-phase squirrel cage induction motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5292-5301. doi:10.1109/TIE.2017.2760280
 16. Pan, S., Han, T., Tan, A. C., & Lin, T. R. (2016). Fault diagnosis system of induction motors based on multiscale entropy and support vector machine with mutual information algorithm, *Shock and Vibration*. doi:10.1155/2016/5836717
 17. Polat, A., Ertuğrul, Y. D., ve Ergene, L. T. (2015) Static, dynamic and mixed eccentricity of induction motor, *IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 284-288. doi:10.1109/DEMPED.2015.7303703