



ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZALARININ ANALİZİ

*Abdurrahman ÜNSAL¹, Oktay KARAKAYA²

¹Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Kütahya, unsal@dpu.edu.tr

²Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksek Okulu, elektrik ve Enerji Bölümü, Bigadiç/Balıkesir, karakaya@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi: 13.10.2014

Kabul Tarihi: 02.01.2015

ÖZET

Asenkron motorların rotor çubuklarında meydana gelen arızaların bir son yıllarda popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Rotor arızaları, motorun şebekeden çektiği akım, moment, akı dağılımı, akı yoğunluğu, gibi parametreler izlenerek tespit edilmeye çalışılır. Bu çalışmada, üç fazlı, dört kutuplu, sincap kafesli bir asenkron motorun rotor çubuklarında meydana gelen arızalar (kırık rotor çubukları) Ansoft/Maxwell yazılımı ile modellenmiştir. Modelleme iki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu modellemede, stator akımı, elektromanyetik moment ve stator sargı akısı sinyalleri hem zaman alanında hem de frekans alanında incelenmiştir. İki boyutlu modellemede sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri de incelenmiştir. Üç boyutlu modellemede ise sağlam ve arızalı (rotorlu) motor sonlu elemanlar yöntemi modellenerek manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Ansoft/Maxwell yazılımının asenkron motorların arızalarının modellenmesinde eğitim amaçlı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : *Asenkron motor, rotor çubuğu arızası, kırık rotor çubukları, sonlu elemanlar yöntemi.*

ANALYSIS OF ROTOR FAULTS OF INDUCTIN MOTORS

ABSTRACT

The identification of rotor faults and their effects on induction motors have been a popular research area in recent years. The rotor faults are identified by observing the stator current, torque, flux, and flux density of the motor. In this study, the rotor faults (broken rotor bars) are modelled by using Ansoft/Maxwell simulation tool. The modelling was conducted in both two dimension (2D) and three dimension (3D). In 2D modelling, stator current, electromagnetic torque, and winding flux were observed both in time domain and frequency domain by using Finite Element Analysis. In addition, the flux distribution and flux density were also observed. In 3D modelling, a healthy motor is modelled along with a motor with rotor faults to observe magnetic flux density. The results of modelling and simulation show that Ansoft/Maxwell simulation tool can be successfully used for detection of the rotor faults of induction motors for educational purposes.

Keywords: *Induction motor, rotor bar fault, broken rotor bars, Finite Element Method.*

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar, diğer elektrik makinaları ile karşılaştırıldığında, basit olmaları, ucuz, dayanıklı ve bakıma az ihtiyaç duymalarından dolayı sanayide en yaygın olarak kullanılan elektrik makinalarıdır. Asenkron motorlar sargılı rotorlu (veya bilezikli asenkron motor) ve sincap kafesli (veya kısa devre çubuklu) motor olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yaygın olarak kullanılan asenkron motorlar sincap kafesli asenkron motorlardır. Diğer elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında az arıza yapmalarına rağmen, sincap kafesli asenkron motorlarda yaygın olarak karşılaşılan arıza çeşitleri (yapılan iki ayrı araştırmanın sonuçlarına göre) aşağıda **Çizelge 1**'de verilmektedir [1].

Çizelge 1 Asenkron motor arızalarının dağılımı.

	IEEE-IAS (%)	EPRI (%)	IEEE-IAS (%)	IEEE-IAS (%)	EPRI (%)
Rulman Arızaları	44	41	Rotor Arızaları	8	9
Sargı Arızaları	26	36	Diğer Arızalar	22	14

Her iki çalışmanın sonuçlarına göre asenkron motor arızalarının büyük kısmını rulman ve sargı arızaları oluşturmaktadır (Çizelge 1). Asenkron makinalarda meydana gelen yaygın arıza tipleri mekanik arızalar, stator arızaları ve rotor arızaları olarak sınıflandırılabilir. Mekanik arızalar genelde rulmanlarda meydana gelen arıza tipleridir. Bu arızalar sürtünme, uygun olmayan yağlama, motor-yük dengesizlikleri, balanslı rotor kullanımı gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Yapılan araştırmalara göre bu arızalar asenkron motorlarda meydana gelen toplam arızalar için %41-44 civarındadır. Bu arızalar sonucu motorda aşırı ısınma ve/veya titreşimler meydana gelebilir ve motorun verimi düşer, enerji tüketimi artar.

Asenkron motorların stator arızaları genelde stator sargılarında meydana gelir ve toplam arızalar içindeki oranı yaklaşık olarak %26-36 civarındadır. Statorda meydana gelen arızalar sargı yalıtımlarının bozulması, sargılarda kirlilik (genelde sargı yalıtımlarının azalmasına neden olur), sargı kopukluğu, kısa devre (sarımlar arası ve/veya bobinler arası), sargı-gövde arası kısa devre, üç faz sargılar arası empedans dengesizliklerinden oluşmaktadır.

Rotor arızaları ise toplam asenkron motor arızalarının %8-9 kadarını teşkil etmektedir. Rotorda meydana gelen arızalar rotor çubuklarının çatlaması veya kırılması ve rotor kısa devre halkasının çatlaması veya kırılması olarak sıralanabilir. Rotorda meydana gelen arızalar motorun stator akımında, besleme frekansının sağında ve solunda olmak üzere yan bant frekans bileşenleri olarak gözlemlenir. Rotor arızaları sonucu meydana gelen yan bant frekansları eşitlik (1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$f_c = (1 \pm 2ks)f \quad (1)$$

s kaymayı, f kaynak frekansını, k=1,2,3,4... şeklinde sabiti ifade etmektedir.

Sincap kafesli asenkron motorlar en yaygın olarak kullanılan motor çeşidi olmalarından ve uzun süre durmadan çalıştırdıklarından dolayı, rotorda meydana gelen arızalar motorların sürdüğü/çalıştırdığı proseslerde önemli miktarda mali, zaman ve iş kayıplarına sebep olabilmektedir. Bundan dolayı motorların sağlıklarının takip edilmesi ve olası rotor arızalarının önceden tespit edilmesi oldukça önemlidir.

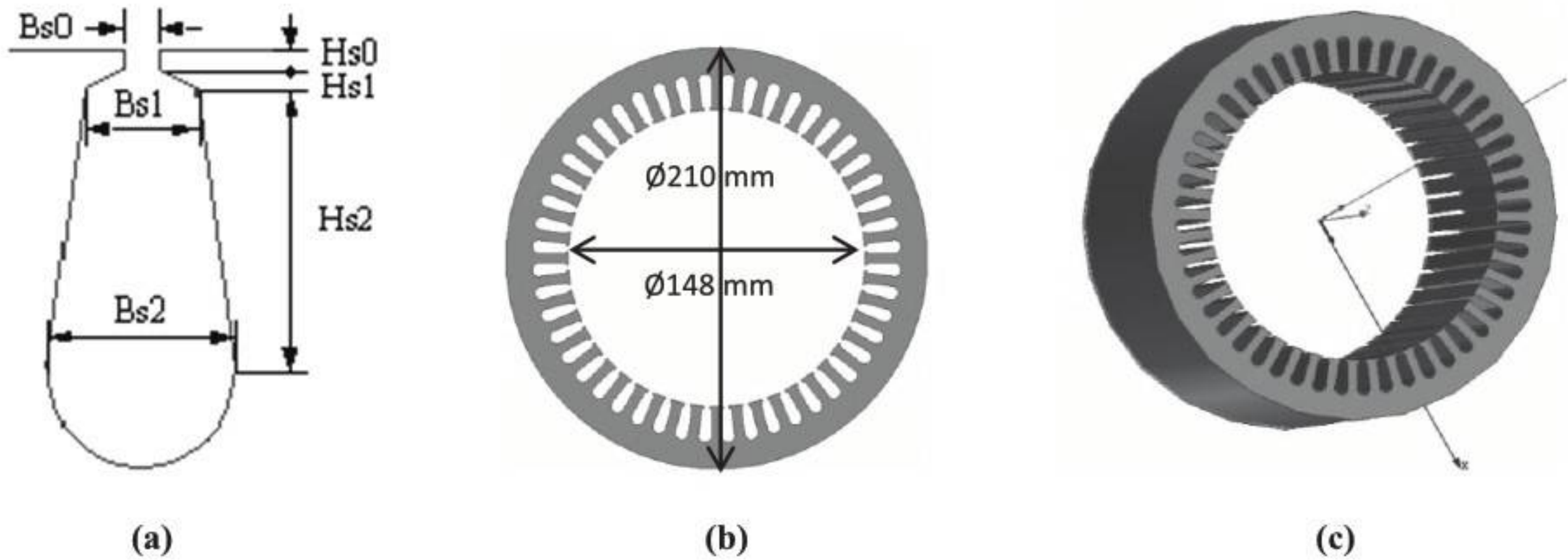
Rotor arızalarını tespit edilmesi için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Son yıllarda rotor arızalarını tespit edilmesi için akademik düzeyde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bir asenkron motorun sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve geçici durum analizi [2]'de yapılmıştır. Yapılan çalışmada, bir asenkron motor, sağlam bir rotor ve kırık çubuklu bir rotor ile ayrı ayrı çalıştırılarak yol alma momenti, sürekli durum momenti, ve yol alma akımı yüksüz ve tam yük incelenmiştir. Rotor çubuklarındaki kırıklar motorun yol alma akım sinyali ve elektromanyetik moment sinyallerinden tespit edilmeye çalışılmıştır. Sürücü ile beslenen ve kararlı durumda çalışan bir asenkron motorun rotor arızaları, stator akımı güç yoğunluk spektrumu (PSD) yöntemi ile analiz edilerek belirlenmeye çalışılmıştır [3]. Motor yüksüz ve tam yük altında çalıştırılarak rotor arızaları tespit edilmeye çalışılmıştır. Kırık rotor çubuğu arızalarının sınıflandırılması Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile [4]'te yapılmıştır. Dalgacık metodu kullanılarak bir asenkron motorun kırık rotor çubuğu arızasının tespit edilmesi ise [5]'te gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, stator akımlarının geçici durum analizi sonucu elde edilen dalga şekilleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda dalgacık analiz yönteminin küçük güçlü motorların kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisinde etkili olacağını belirtmiştir. Motor akım imza analizi (MCSA) rotor arızalarının izlenmesi ve teşhis edilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Referans [6]'da yapılan çalışmada rotor çubuğu kırıklarının motorun şebekeden çektiği akımın frekansının sağında ve solunda yan bant olarak yansıdığı görülmektedir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda, üç fazlı sincap kafesli asenkron motorların izlenmesi ve arızaların belirlenmesinde motor akım işaretlerinin kullanıldığı ve yazılım paketleri yardımı ile çeşitli analiz yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [7-24].

Bu çalışmada Ansoft Maxwell yazılımı ile sincap kafesli bir asenkron motor 2D ve 3D modellenerek rotor çubuk veya çubuklarında kırıklar oluşturulmuş ve analizi yapılmıştır. Farklı veriler ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılmasıyla rotor çubuğu kırık arızasının tespiti için 2D ve 3D modellerin eğitim amaçlı olarak kullanılabilirliği gösterilmektedir.

2. ASENKRON MOTORUN MODELLENMESİ

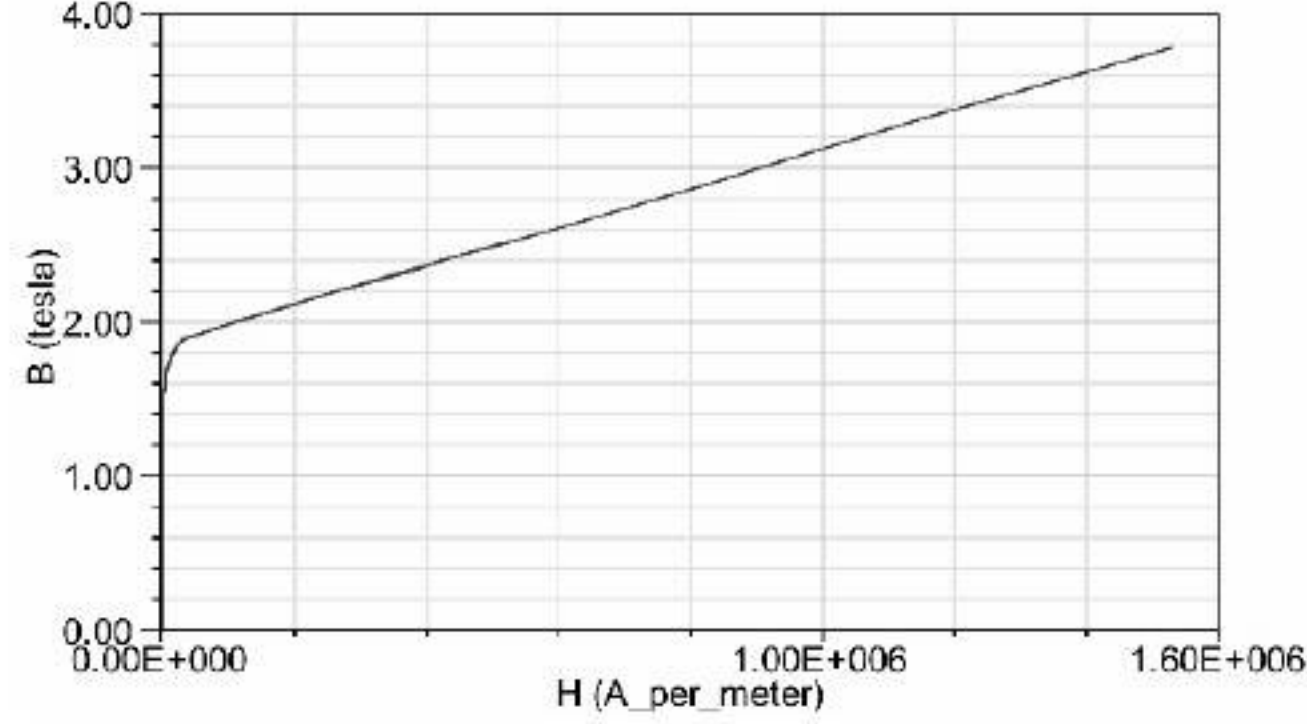
Bu çalışmada, 3-fazlı, 4-kutuplu 7,5 kW, 380V, 50 Hz, Yıldız bağlı ve çalışma sıcaklığı 75 °C olan sincap kafesli bir asenkron motor Ansoft/Maxwell yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun statoru ve rotoru ayrı ayrı olarak modellendi. Statorun ve rotorun modellenmesi sırasıyla aşağıda verilmektedir. Asenkron motorun statoru stator nüvesi ve stator sargılarından oluşmaktadır. Stator nüvesine ait parametreler Çizelge 2'te verilmektedir. Stator oyukları ve nüvesi ise Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1 (a) Stator oyuk şekli, (b) 2D stator nüvesi (c) 3D stator nüvesi.

Stator nüvesinde ferromanyetik malzeme olarak M19_24G malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemenin B-H karakteristik eğrisi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2 Stator nüve malzemesi B-H karakteristiği.

Stator sargılarının modellenmesinde tam kalıp sarım kullanılmıştır. Tam kalıp sargı, sarım bobin sayısının oyuk sayısına eşit olduğu sargı tipidir.

Kutupta faz başına düşen oyuk sayısı

$$C = \frac{S}{2P+m} \quad (2)$$

S stator oyuk sayısını, 2P tek kutup sayısını ve m faz sayısını ifade etmektedir. Kutup başına 4 oyuk düşmektedir.

Bobin adımı eşitlik (3)’teki gibi hesaplanabilir;

$$Y_x = \frac{S}{2P} - q \quad (3)$$

q tam kalıp sarımın kısa adımlı olması için gerekli olan katsayıdır. Bu tasarımda q=5 olarak alınmıştır. Buna göre $Y_x = 7$ (1-8) olarak bulunur. Bobin adımının 7 olması A fazına ait bobinin giriş ucunun 1. oyukta, çıkış ucu ise 8. oyukta olması anlamına gelir. Elektrik açısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\alpha = \frac{360 \cdot P}{X} \quad (4)$$

p çift kutup sayısıdır. Buna göre elektriksel açı 15° olarak bulunur. Stator bobinlerinin giriş kenarı ile çıkış kenarı arasında 180° elektriksel açı vardır. Toplam 48 adet bobin kullanılmıştır. Her faza ait bobin sayısı 16’dır. Bobinler birbiriyle paralel bağlanarak bir faz sargısı elde edilmiştir. Paralel kol sayısı 2 olarak, İletken kesiti ise $0,679 \text{ mm}^2$ olarak alınmıştır. Stator sargılarının dağılımı Şekil 3’te görülmektedir.

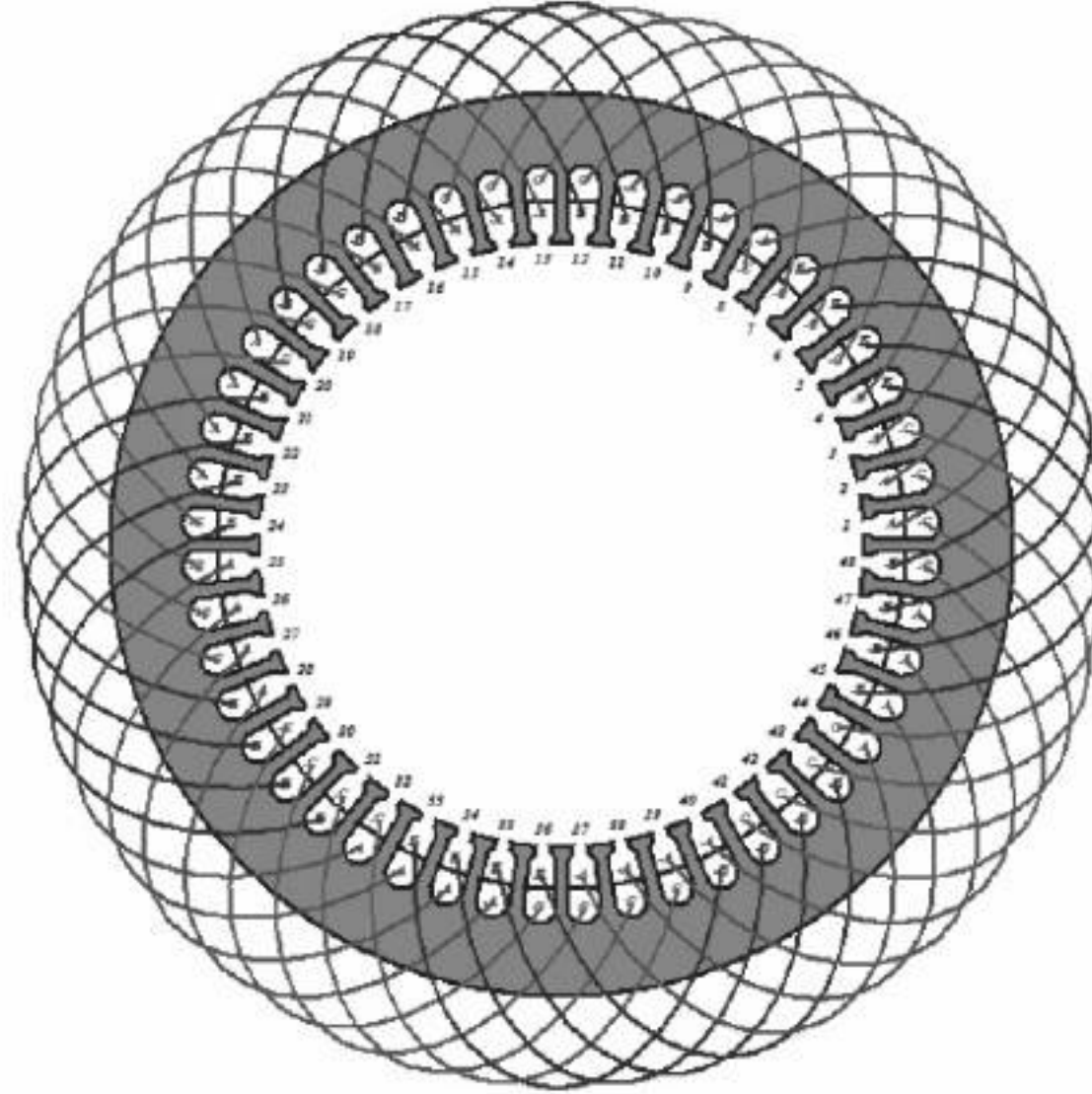
Rotor nüvesine ait parametreler Çizelge 3’te verilmektedir. Rotor nüve malzemesi stator nüve malzemesi ile aynıdır. Rotor çubuklarında ve kısa devre halkalarında, iletkenliği 23000000 siemens/m, bağıl geçirgenliği 1.000021 olan alüminyum kullanılmıştır. Rotor oyukları ile rotor nüvesinin iki boyutlu ve üç boyutlu olarak Şekil 4’te görülmektedir. Rotor çubukları ve kısa devre halkası ile motorun 2D ve 3D modelleri Şekil 5’te görülmektedir.

Çizelge 2. Stator nüvesi parametreleri.
parametreler.

<i>Stator Dış Çap</i>	<i>210 mm</i>	
<i>Stator İç Çap</i>	<i>148 mm</i>	
<i>Stator Nüve Uzunluğu</i>	<i>250 mm</i>	
<i>Paketleme Faktörü</i>	<i>0,92</i>	
<i>Stator Oyuk Sayısı</i>	<i>48</i>	
<i>Stator Nüve Malzemesi</i>	<i>M19_24G</i>	
<i>Stator Oyuk Boyutları</i>	<i>Hs0</i>	<i>0,8 mm</i>
	<i>Hs1</i>	<i>1,05 mm</i>
	<i>Hs2</i>	<i>12,9 mm</i>
	<i>Bs0</i>	<i>2,8 mm</i>
	<i>Bs1</i>	<i>4,9 mm</i>
	<i>Bs2</i>	<i>6,7 mm</i>

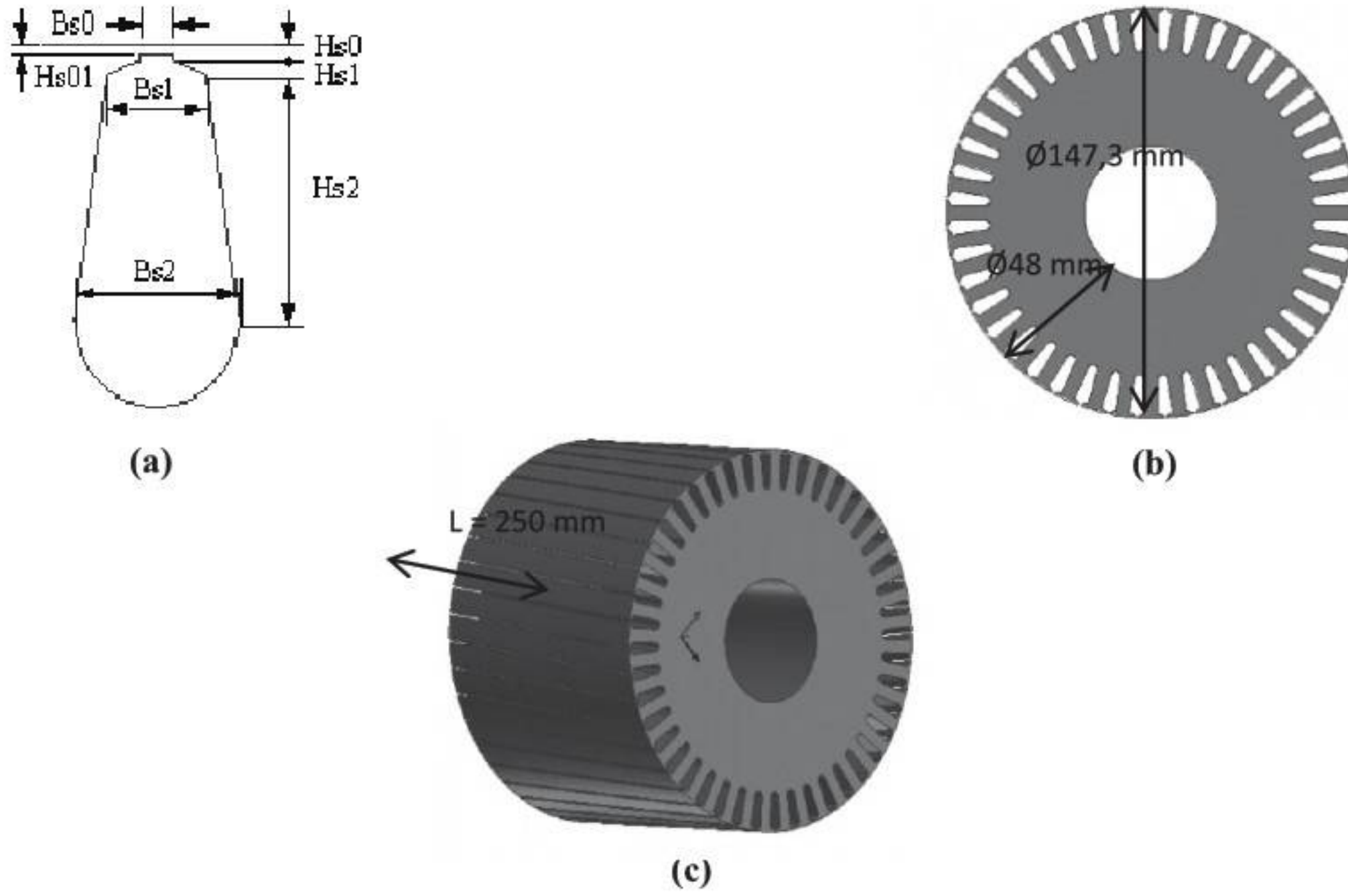
Çizelge 3 Rotor nüvesine ait

<i>Rotor Dış Çap</i>	<i>147,3 mm</i>	
<i>Rotor İç Çap</i>	<i>48 mm</i>	
<i>Rotor Nüve Uzunluğu</i>	<i>250 mm</i>	
<i>Paketleme Faktörü</i>	<i>0,92</i>	
<i>Rotor Oyuk Sayısı</i>	<i>44</i>	
<i>Rotor Nüve Malzemesi</i>	<i>M19_24G</i>	
<i>Rotor Oyuk Boyutları</i>	<i>Hs0</i>	<i>0,5 mm</i>
	<i>Hs01</i>	<i>0 mm</i>
	<i>Hs1</i>	<i>1,2 mm</i>
	<i>Hs2</i>	<i>12 mm</i>
	<i>Bs0</i>	<i>1 mm</i>
	<i>Bs1</i>	<i>5,2 mm</i>
	<i>Bs2</i>	<i>3,5 mm</i>
<i>Çubuk ve Halka Malzemesi</i>	<i>Cast_aliminum_75C</i>	
<i>Halka Genişliği</i>	<i>20 mm</i>	
<i>Halka Yüksekliği</i>	<i>10 mm</i>	

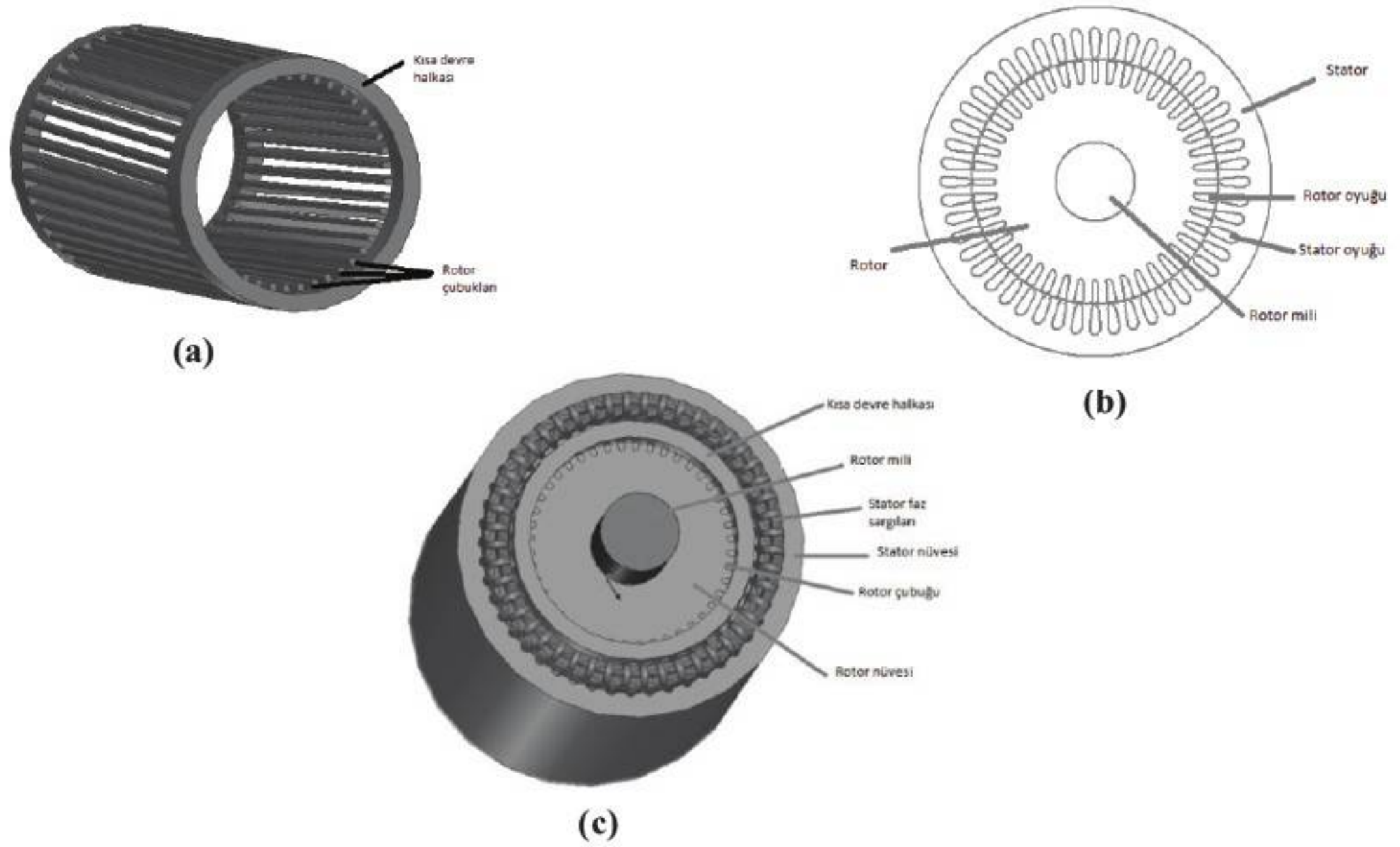


Şekil 3. Stator sargısı dağılımı.

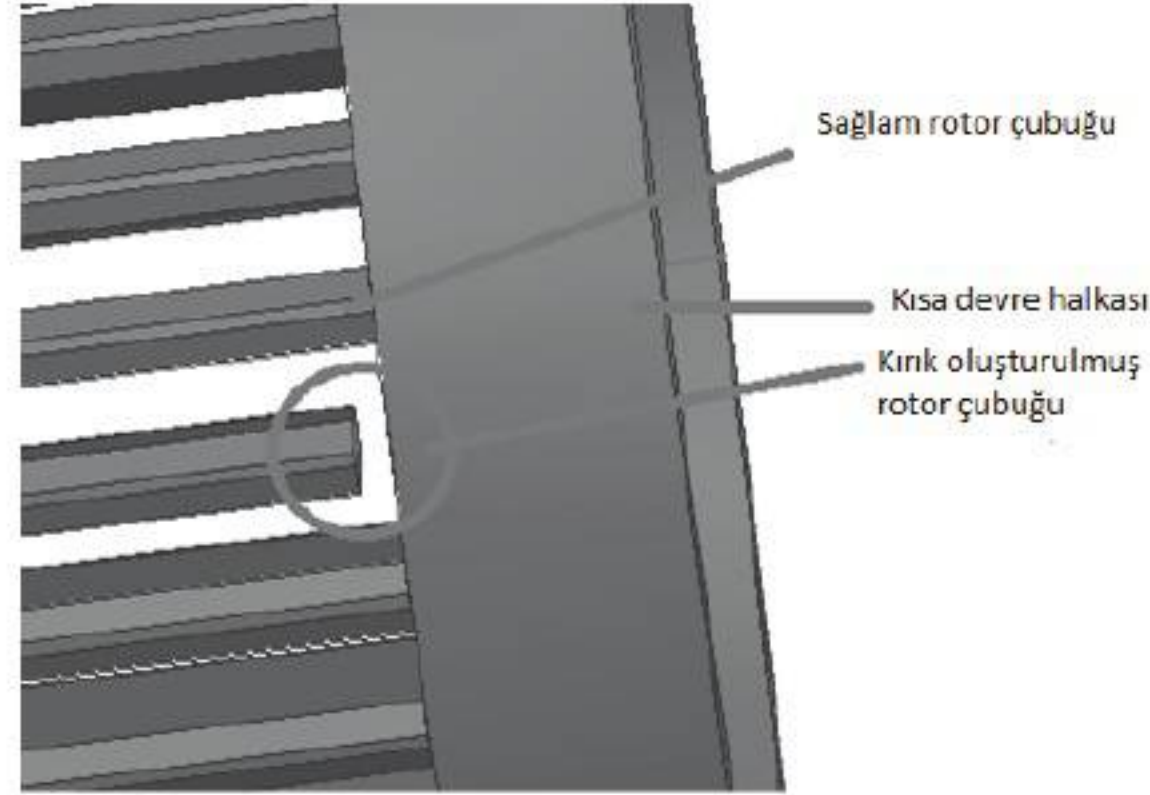
Modellenen asenkron motorda kırık rotor çubuk kırığı arızası (sadece bir rotor çubuğu kırık), Şekil 6'da görüldüğü gibi, kısa devre halkası ile rotor çubuğu arasında 2,5mm genişliğinde aralık bırakılarak oluşturulmuştur. Arıza modelleri ayrıca iki kırık çubuk, üç kırık çubuk için de ayrı ayrı tekrarlandı.



Şekil 4 (a) Rotor oyuk şekli, (b) 2D rotor nüvesi (c) 3D rotor nüvesi.



Şekil 5 (a) Rotor çubukları ve kısa devre halkası (b) 2D motor modeli (c) 3D motor modeli.



Şekil 6 Rotor çubuğunda oluşturulan kırık.

3. SİMÜLASYON

Modellenen asenkron motorun stator sargılarına üç fazlı, 50 Hz 380 V (rms) gerilimi uygulanarak simülasyon gerçekleştirildi. Stator sargılarına uygulanan üç fazlı gerilim eşitlik (5)-(7)'de verilmiştir.

$$v(t)_R = V_m \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$v(t)_S = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$v(t)_T = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7)$$

Ansoft/Maxwell-RMxprt paket programı ile modellenen motorun stator sargı direnci 0.669482Ω , endüktansı da 0.000229044 H olarak bulundu. Rotorun kısa devre halkası ve iki çubuk arası direnci $2.11561e-006 \Omega$, kısa devre halkası ve iki çubuk arası endüktans ise $1.39027e-009$ H olarak bulundu. Modellenen motorun, yüksüz, nominal yüklü ve kısa devre çalışması (sürekli durum) için parametreleri hesaplanmıştır. Yüksüz çalışma için elde edilen sonuçlar Çizelge 4'te verilmektedir.

Çizelge 4 Boşta çalışma için motor parametreleri.

Stator direnci	0,669482 Ω	Demir nüve kayıpları	166,379 W
Stator kaçak reaktansı	0,61638 Ω	Giriş gücü	314,832 W
Rotor direnci	0,524174 Ω	Güç faktörü	0,0704197
Rotor kaçak reaktansı	0,828024 Ω	Kayma	0,000147859
Stator faz akımı	5,99437 A	Mil Hızı	1499,78 rpm

Tam yük altında çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmektedir. Kilitli rotor çalışma için elde edilen sonuçlar ise Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 5 Tam yükte çalışmada motor parametreleri.

<i>Stator direnci</i>	<i>0,669482 Ω</i>	<i>Stator faz akımı</i>	<i>14,2961 A</i>	<i>Toplam kayıp</i>	<i>888,598 W</i>
<i>Stator direnci (20°C)</i>	<i>0,550703 Ω</i>	<i>Demir nüve kayıpları (akım cinsinden)</i>	<i>0,247147 A</i>	<i>Giriş gücü</i>	<i>8,38829 kW</i>
<i>Stator kaçak reaktansı</i>	<i>0,615653 Ω</i>	<i>Manyetik akım</i>	<i>5,74737 A</i>	<i>Çıkış gücü</i>	<i>7,49969 kW</i>
<i>Rotor direnci</i>	<i>0,524191 Ω</i>	<i>Rotor faz akımı</i>	<i>12,5637</i>	<i>Mekanik mil torku</i>	<i>49,3165 N.m</i>
<i>Rotor direnci (20°C)</i>	<i>0,43119 Ω</i>	<i>Stator bakır kayıpları</i>	<i>410,481 W</i>	<i>Verim (%)</i>	<i>89,4067</i>
<i>Rotor kaçak reaktansı</i>	<i>0,824918 Ω</i>	<i>Rotor bakır kayıpları</i>	<i>248,226 W</i>	<i>Güç faktörü</i>	<i>0,88755</i>
<i>Demir nüve kayıpları (direnc cinsinden)</i>	<i>837,037 Ω</i>	<i>Sürtünme ve rüzgar kayıpları</i>	<i>39,508 W</i>	<i>Kayma</i>	<i>0,0318752</i>
<i>Manyetik reaktans</i>	<i>35,9941 Ω</i>	<i>Diğer kayıplar</i>	<i>37 W</i>	<i>Mil hızı</i>	<i>1452,19 rpm</i>

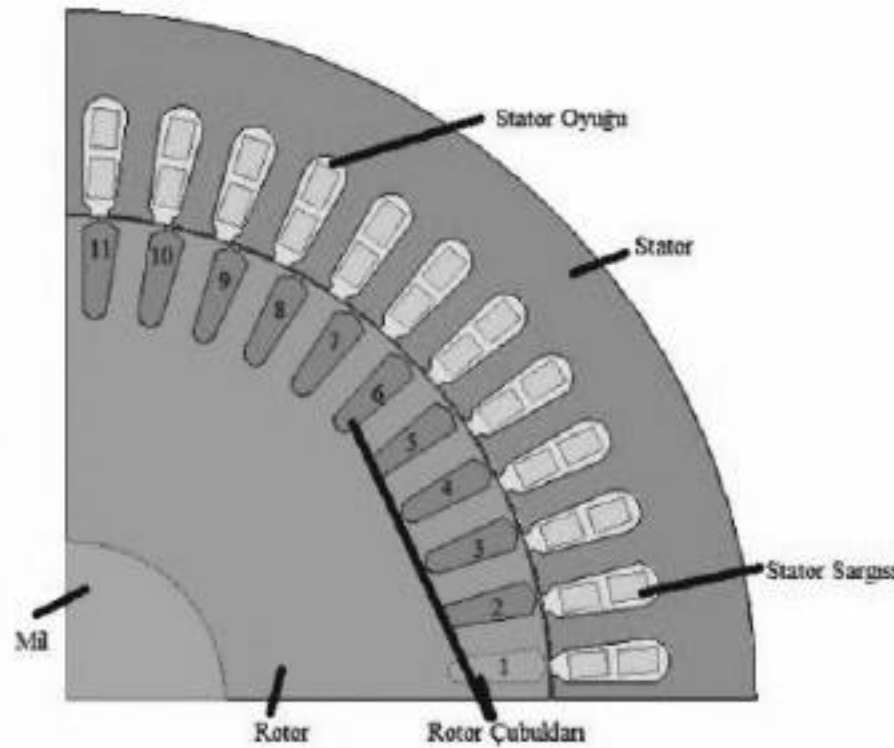
Çizelge 6 Kilitli-rotor çalışmada için motor parametreleri.

<i>Moment</i>	<i>188,688 N.m</i>	<i>Stator direnci</i>	<i>0,669482 Ω</i>
<i>Faz Akımı</i>	<i>137,412 A</i>	<i>Stator kaçak reaktansı</i>	<i>0,505577 Ω</i>
<i>Moment oranı Oranı</i>	<i>3,82606</i>	<i>Rotor direnci</i>	<i>0,54105 Ω</i>
<i>Akım Oranı</i>	<i>9,61185</i>	<i>Rotor kaçak reaktansı</i>	<i>0,55562 Ω</i>

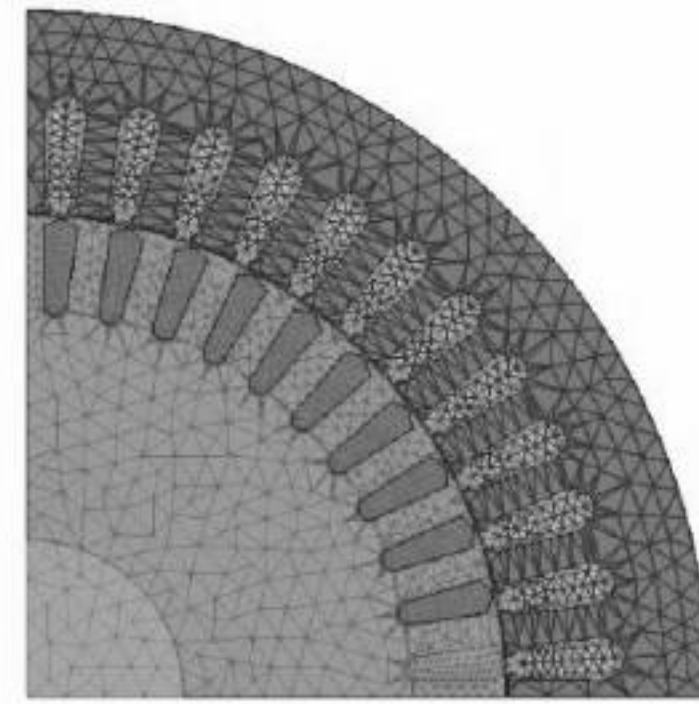
Simülasyon sonucu elde edilen kaçak reaktans, akı yoğunluğu, halka direnci ve halka endüktansı ve diğer veriler Çizelge 7'de verilmektedir.

Çizelge 7 Diğer veriler .

<i>Stator oyuk kaçak reaktans</i>	<i>0,35277 Ω</i>	<i>Stator dış akı yoğunluğu</i>	<i>1,16253 Tesla</i>	<i>Stator akım yoğunluğu</i>	<i>5,26139 A/mm²</i>
<i>Stator sargı halkası kaçak reaktans</i>	<i>0,0719563 Ω</i>	<i>Rotor dış akı yoğunluğu</i>	<i>1,24454 Tesla</i>	<i>Rotor çubuğu akım yoğunluğu</i>	<i>2,57217 A/mm²</i>
<i>Rotor oyuk kaçak reaktans</i>	<i>0,376508 Ω</i>	<i>Stator boyunduruk akı yoğunluğu</i>	<i>1,59471 Tesla</i>	<i>Rotor halkası akım yoğunluğu</i>	<i>2,74389 A/mm²</i>
<i>Rotor halka kaçak reaktans</i>	<i>0,0244437 Ω</i>	<i>Rotor boyunduruk akı yoğunluğu</i>	<i>0,642621 Tesla</i>	<i>Rotor iki çubuk arası halka direnci</i>	<i>2,11561x10⁻⁶ Ω</i>
<i>Stator sargı faktörü</i>	<i>0,759765 Ω</i>	<i>Hava aralığı akı yoğunluğu</i>	<i>0,549397 Tesla</i>	<i>Rotor iki çubuk arası halka endüktansı</i>	<i>1,39027x10⁻⁹ Ω</i>



(a)



(b)

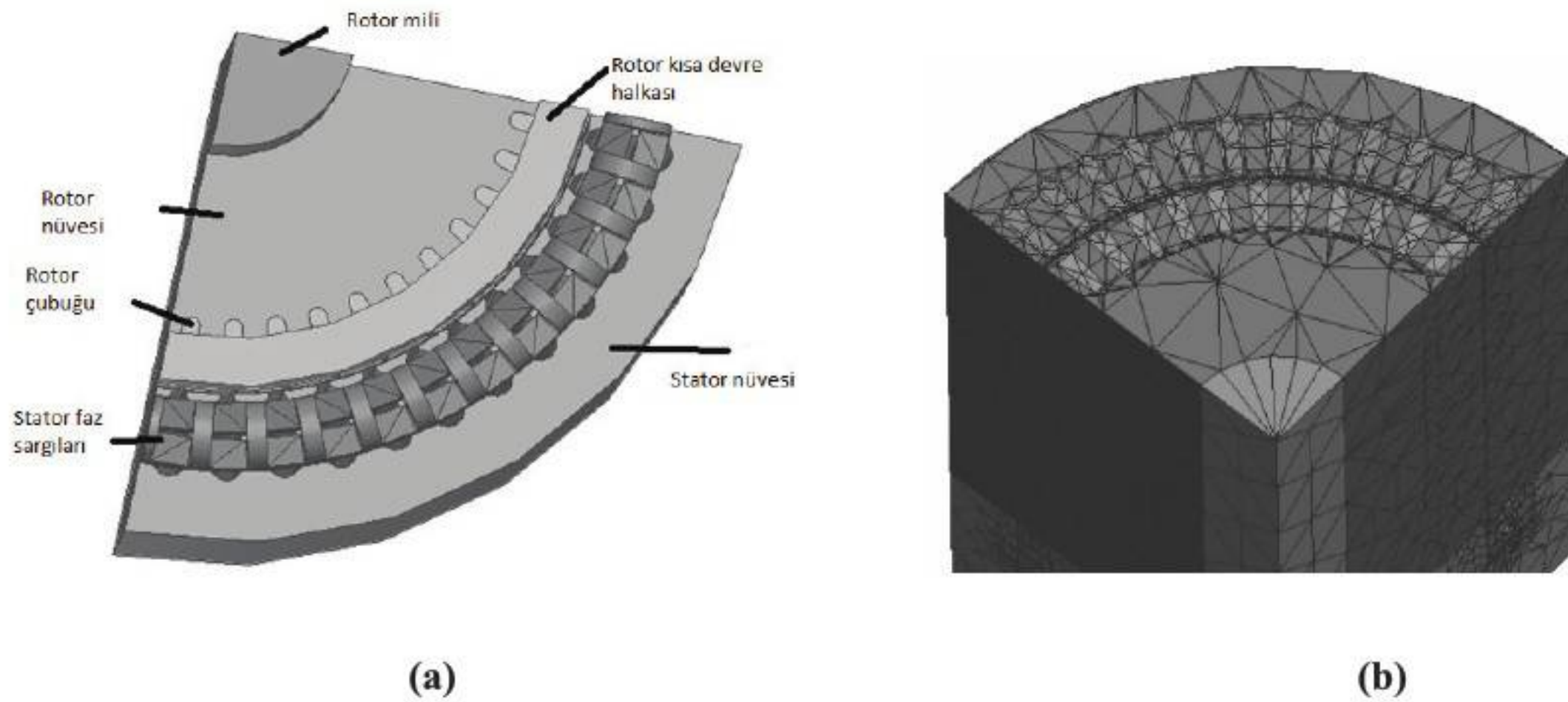
Şekil 7 (a) Motorun iki boyutlu modeli (a) İki boyutlu ağ örüntüsü (mesh).

3.1. İki Boyutlu (2D) Simülasyon

2D modülü ile geçici durum analizi, magnetostatik, eddy akımları, elektrostatik, AC ve analizleri yapılmaktadır. Bu çalışmada geçici durum analizi kullanılmıştır. Geçici durum analizinde; akım, gerilim, akı, moment, nüve kayıpları gibi parametrelerinin hem zaman domeninde hem de frekans domeninde analizi yapılabilmektedir. Bu çalışmada akım, akı ve moment verileri incelenmiştir. İki boyutlu analiz için modellenen motorun $\frac{1}{4}$ kesiti Şekil 7'de görülmektedir. İki boyutlu analizde rotor çubuğu arızalarının etkileri, bir kırık çubuk, iki kırık çubuk, üç kırık çubuk, ve bir çubuğun rotor nüvesinden tamamen yok olması durumları incelenmiştir. Motor tam yük altında çalıştırılarak stator faz akımları, akı ve moment verileri analiz edilmiştir.

3.2 Üç Boyutlu (3D) Simülasyon

Üç boyutlu analiz ile manyetik alan şiddeti, akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu verileri, sağlam ve kırık rotor için incelenmiştir. Üç boyutlu analiz için modellenen motorun $\frac{1}{4}$ kesiti modeli Şekil 8'de görülmektedir.



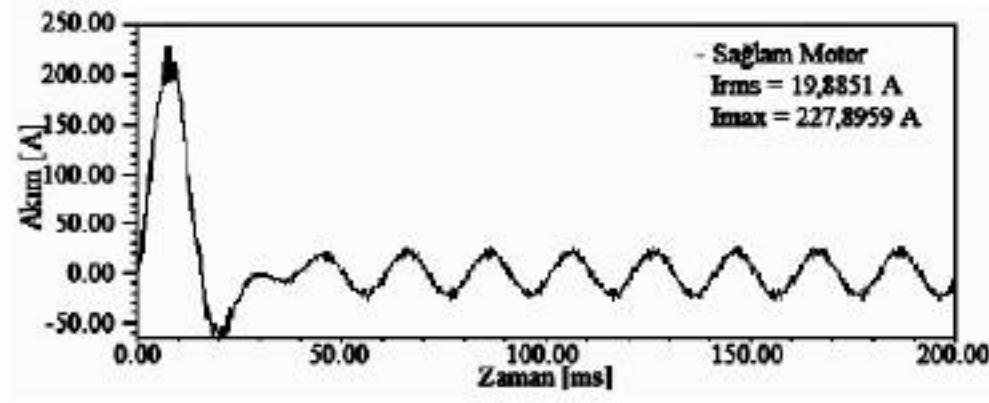
Şekil 8 (a) Modellenen motorun üç boyutlu modeli (a) Üç boyutlu ağ örüntüsü (mesh).

4. ANALİZ SONUÇLARI

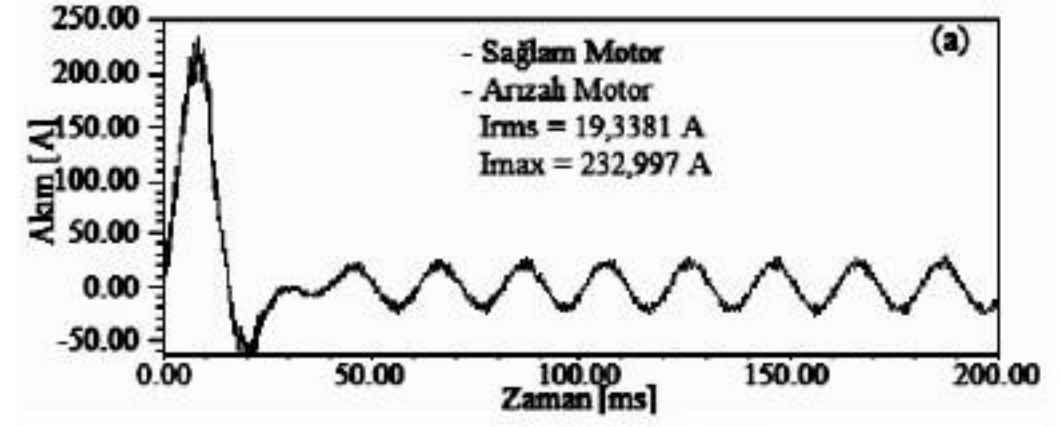
Asenkron motor iki boyutlu ve üç boyutlu modellenerek (arızalı rotor veya rotor kırıklarıyla birlikte) akım, moment, ve akı değerleri incelenmiştir. İki boyutlu çalışmada simülasyon sonuçları; sağlam rotor, bir çubuğu kırık rotor (6. çubuk), iki çubuğu kırık rotor (5. ve 6. çubuklar), ve üç çubuğu kırık rotor (5., 6. ve 7. çubuklar) olmak üzere dört farklı durum için elde edildi. Rotor çubuk numaraları Şekil 7'de verilmektedir.

4.1 Stator Akımları

Bir faz stator akımı (sağlam rotor, tam yük altında çalışma için) Şekil 9 (a)'da görülmektedir. Motorun ilk kalkınma akımı ve normal çalışma akımı rahatlıkla görülmektedir.



(a)

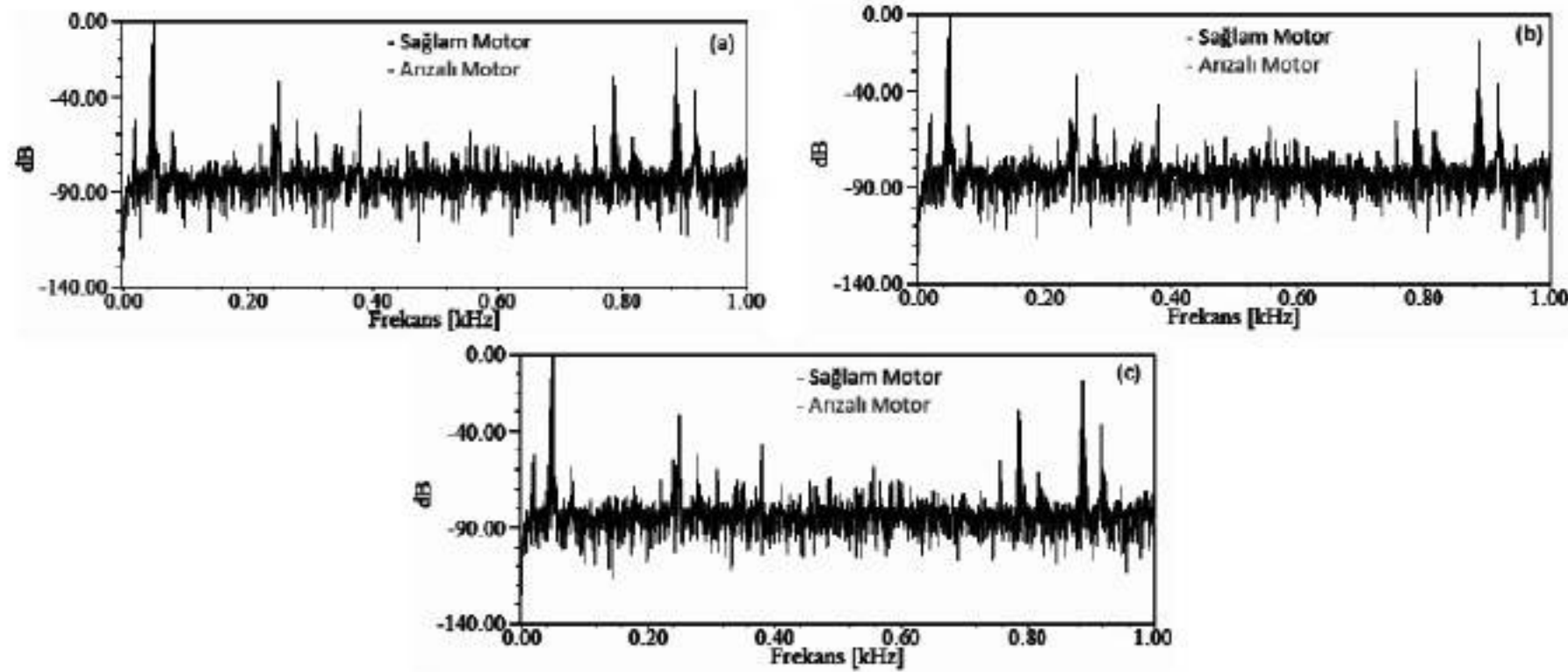


(b)

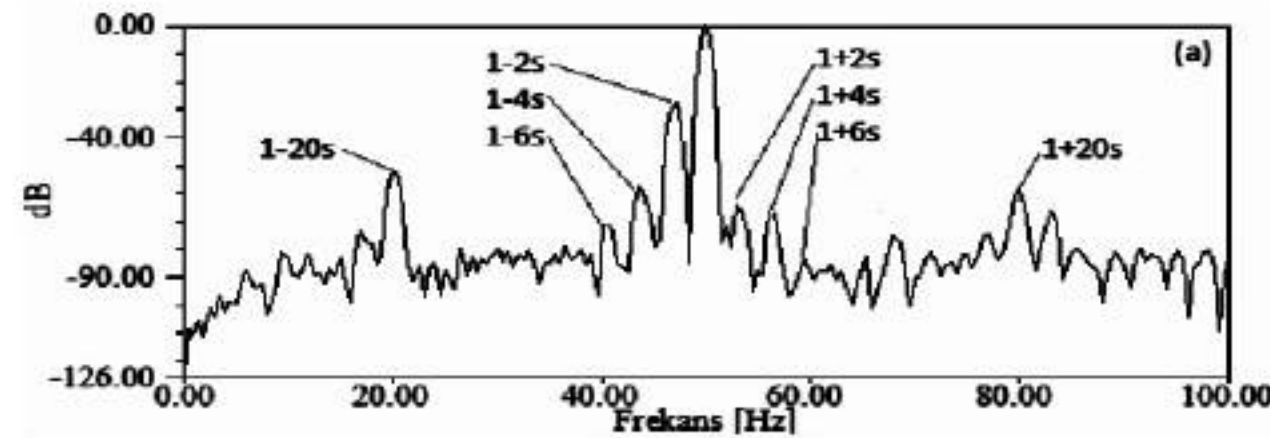
Şekil 9 (a) Sağlam rotorlu motorun stator faz akımı, (b) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu olmayan motor akımları.

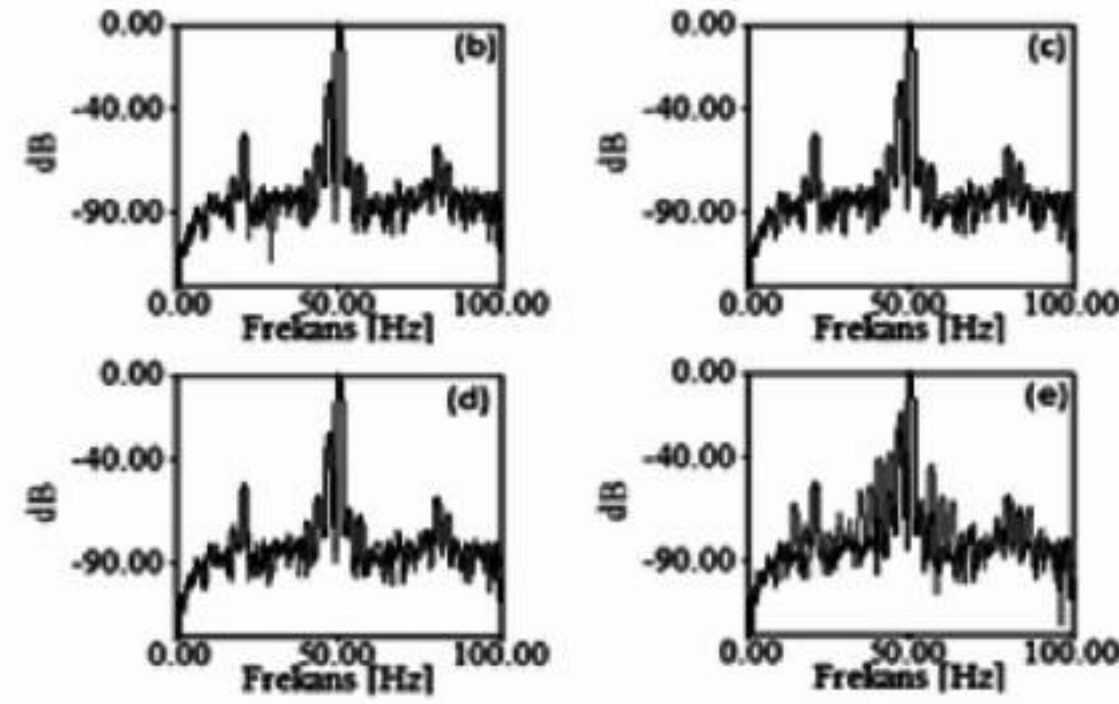
Şekil 9 (b)'de sağlam rotorlu motor ile bir rotor çubuğu kırık motorun stator akımları zaman domeninde görülmektedir. Bir rotor çubuğunun kırık olması durumunda, normal (rms) stator akımı 19,3381 A, maksimum stator akımı da 232,997 A olarak elde edildi. Arızalı rotordan dolayı motor akımını (sağlam rotorlu motora göre), etkin değerinde %2,75 azalma, maksimum değerinde de %2,19 artış meydana gelmiştir.

Arızalı rotor etkilerinin stator akımdaki etkilerinin zaman domeninde izlenmesi oldukça zordur. Bunda dolayı stator akımları frekans domeninde incelendi. Frekans domeni analizi için Ansoft Paket programının hazır modülleri kullanıldı. Sağlam motor ile bir, iki, ve üç çubuğu kırık rotorlu motorun stator faz akımları Şekil 10'da görülmektedir. Rotor çubuklarındaki kırık sayısı arttıkça akımdaki bozulma daha belirgin hale gelmektedir.



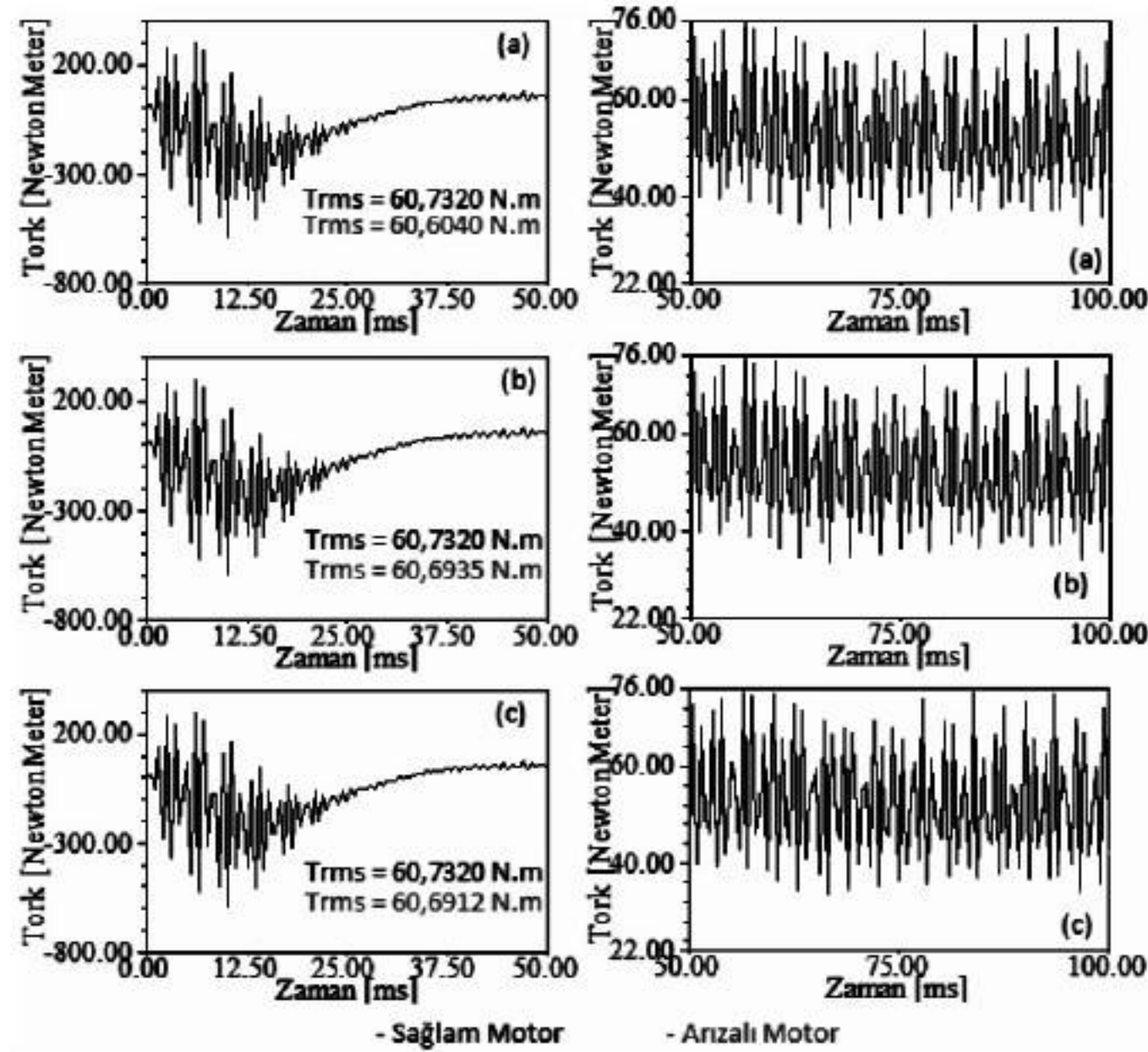
Şekil 10 (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motor, (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motor, (c) Sağlam motor ile üç rotor çubuğu kırık motor.





Şekil 11 (a) Sağlam motor, (b) Sağlam motor ile bir çubuğu kırık rotorlu motor, (c) Sağlam motor ile iki çubuğu kırık rotorlu motor, (d) Sağlam motor ile üç çubuğu kırık rotorlu, (e) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu olmayan motor.

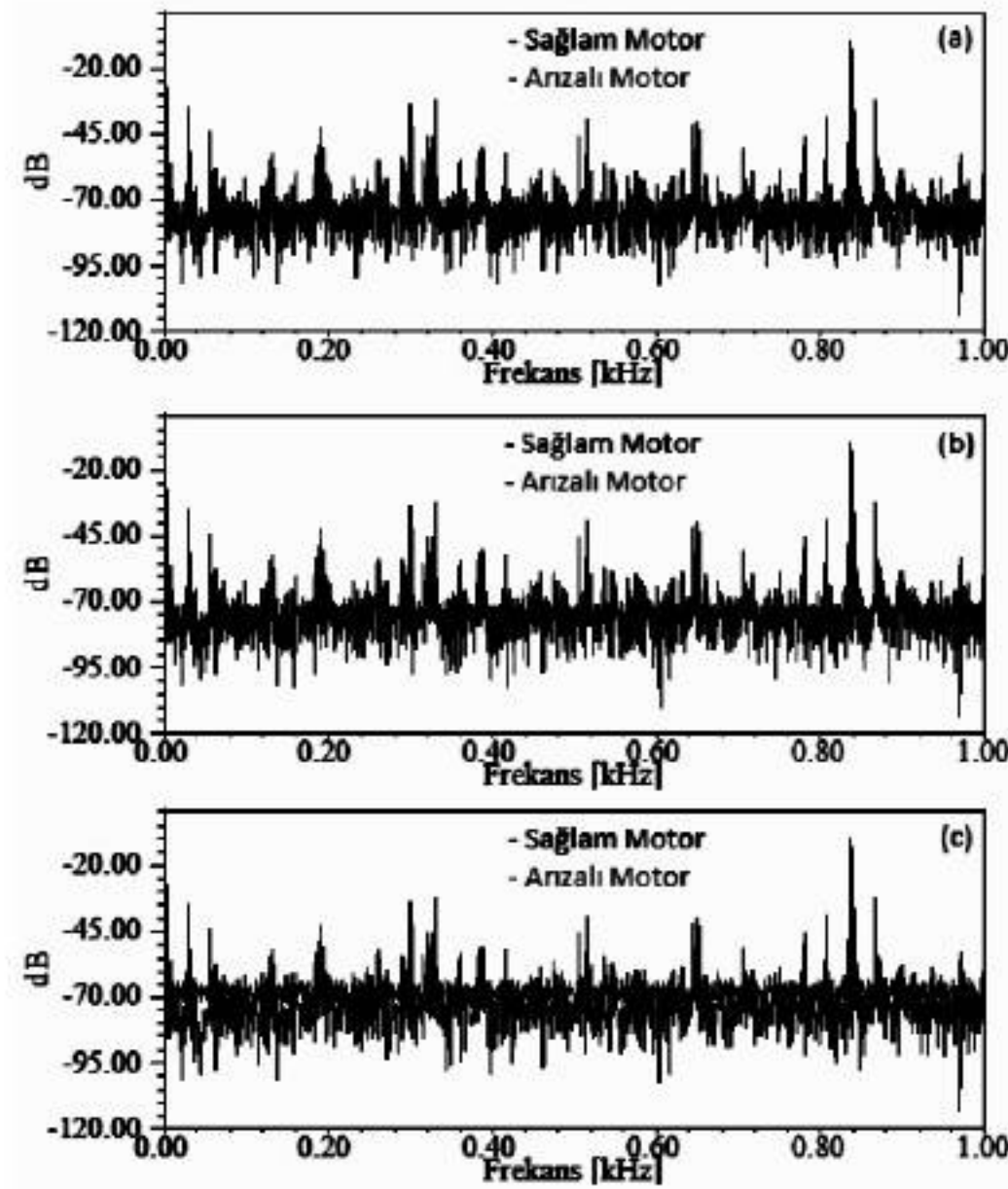
Şekil 11 (a)'da görülen sağlam motora ait stator akımı görülmektedir. Yan bant frekansları ana frekansın (50 Hz) sağında ve solunda eşitlik (1)'e göre oluşmuştur. Şekil 11 (b), (c) ve (d)'de rotor çubuğunun veya çubuklarının kırılmaları durumunda yan bant frekanslarının genliğinde çok az artış göstermiştir. Ancak Şekil 11.(e) yan bant frekansının genliğindeki artış net olarak görülmektedir.



Şekil 12 (a) Sağlam motor ile bir çubuğu kırık rotorlu motor, (b) Sağlam motor ile iki çubuğu kırık rotorlu motor, (c) Sağlam motor ile üç çubuğu kırık rotorlu motor.

4.2 Moment

Asenkron motorlarda rotor arızalarının tespitinde kullanılan yöntemlerden biri de elektromanyetik moment sinyallerinin izlenmesidir. Sağlam motora ve kırık çubuklu rotorlu motora ait tam yük elektromanyetik moment sinyalleri karşılaştırmalı olarak Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12’te sağlam bir motorun moment sinyali ile rotor çubukları tamamen kırık bir motorun moment sinyalleri karşılaştırmalı görülmektedir. Bir rotor çubuğu kırık motorun elektromanyetik momentinin etkin değeri sağlam motorun momentine göre göre %4,73 düşmüştür. İki rotor çubuğu kırık motorun elektromanyetik momentinin etkin değerinde de sağlam motorun momentine göre %9,62 düşüş meydana gelmiştir. Moment sinyallerinin zaman domeninde izlenmesi ile rotor arızalarının tespit edilmesi oldukça zordur. Sağlam motor ile arızalı motor moment sinyalleri arasındaki fark frekans domeninde daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 13).

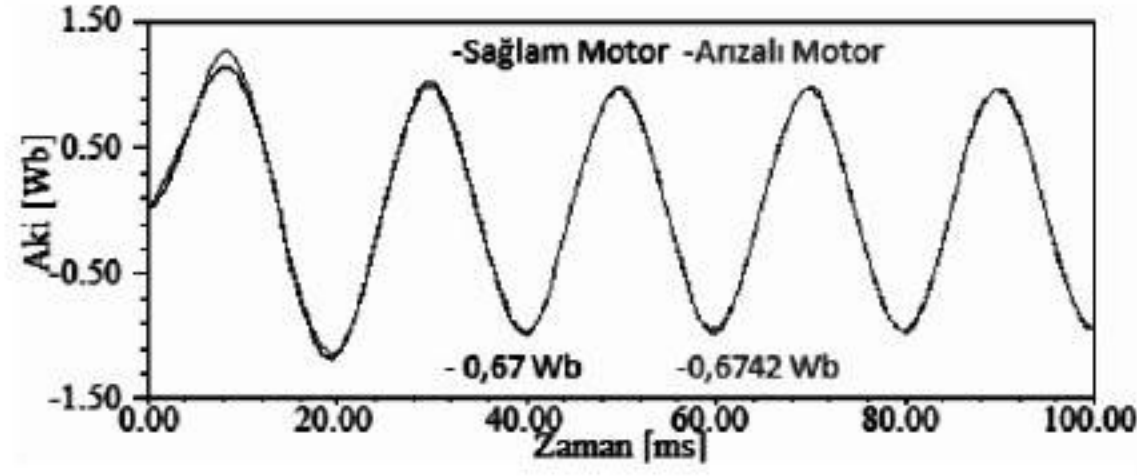


Şekil 13 (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motor, (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motor, (c) Sağlam motor ile üç rotor çubuğu kırık motor.

Şekil 13’te sağlam motor ile rotor çubukları kırık motorun moment sinyalleri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Rotordaki kırık sayısı arttıkça moment sinyalindeki bozulmanın arttığı görülmektedir. Frekans domeninde elde edilen moment sinyalleri motorun rotor arızalarını tespit etmekte etkili bir yöntem olarak kullanılabilir.

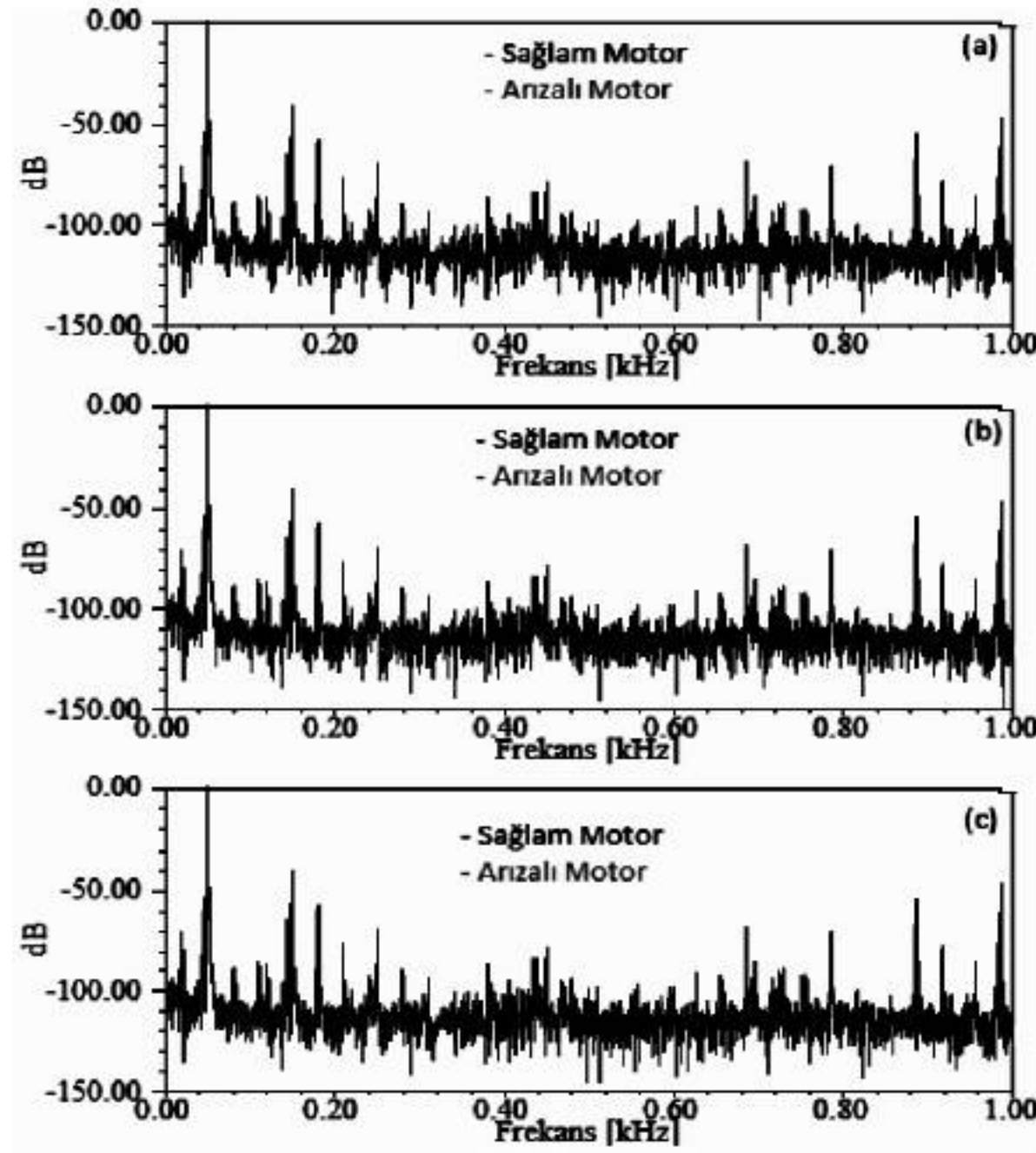
4.3 Akı Sinyalleri

Asenkron motorlarda rotor çubuğu veya çubukları arızalarının tespitinde kullanılan yöntemlerden biri de sargı akı değişiminin izlenmesidir. Sağlam motor ile rotor çubukları kırık motorun akı sinyallerinin arasındaki fark (zaman domeninde tespit edilememiştir (Şekil 14).



Şekil 14 Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motorun akıları.

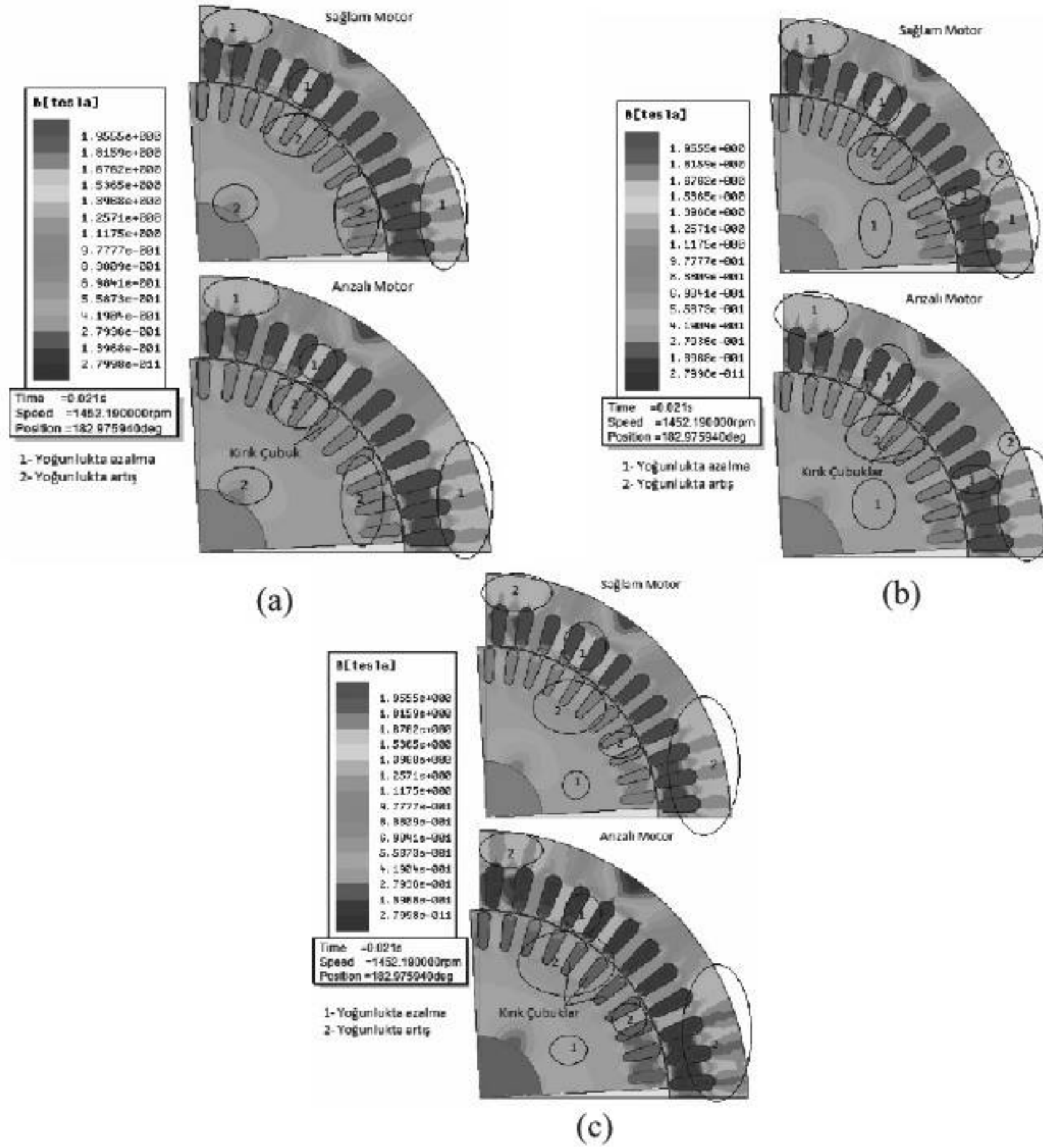
Sağlam motor ile arızalı motor arasındaki farkı akı sinyalinden daha belirgin olarak görebilmek için akı sinyalleri frekans domeninde, karşılaştırmalı olarak, gösterilmiştir (Şekil 15). Sinyaldeki bozulmaların rotor kırık sayısı arttıkça arttığı görülmektedir (Şekil 15). Frekans domeninde elde edilen sonuçlar, zaman domeninde elde edilen sonuçlara göre motorun arıza durumu tespitinde daha etkili bir yöntem olduğu kullanılabilir. Rotor çubuklarının olmaması durumundaki fark daha belirgindir.



Şekil 15 Sargı akısı - (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motor, (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motor, (c) Sağlam motor ile üç rotor çubuğu kırık motor.

4.4 Akı Yoğunluğu

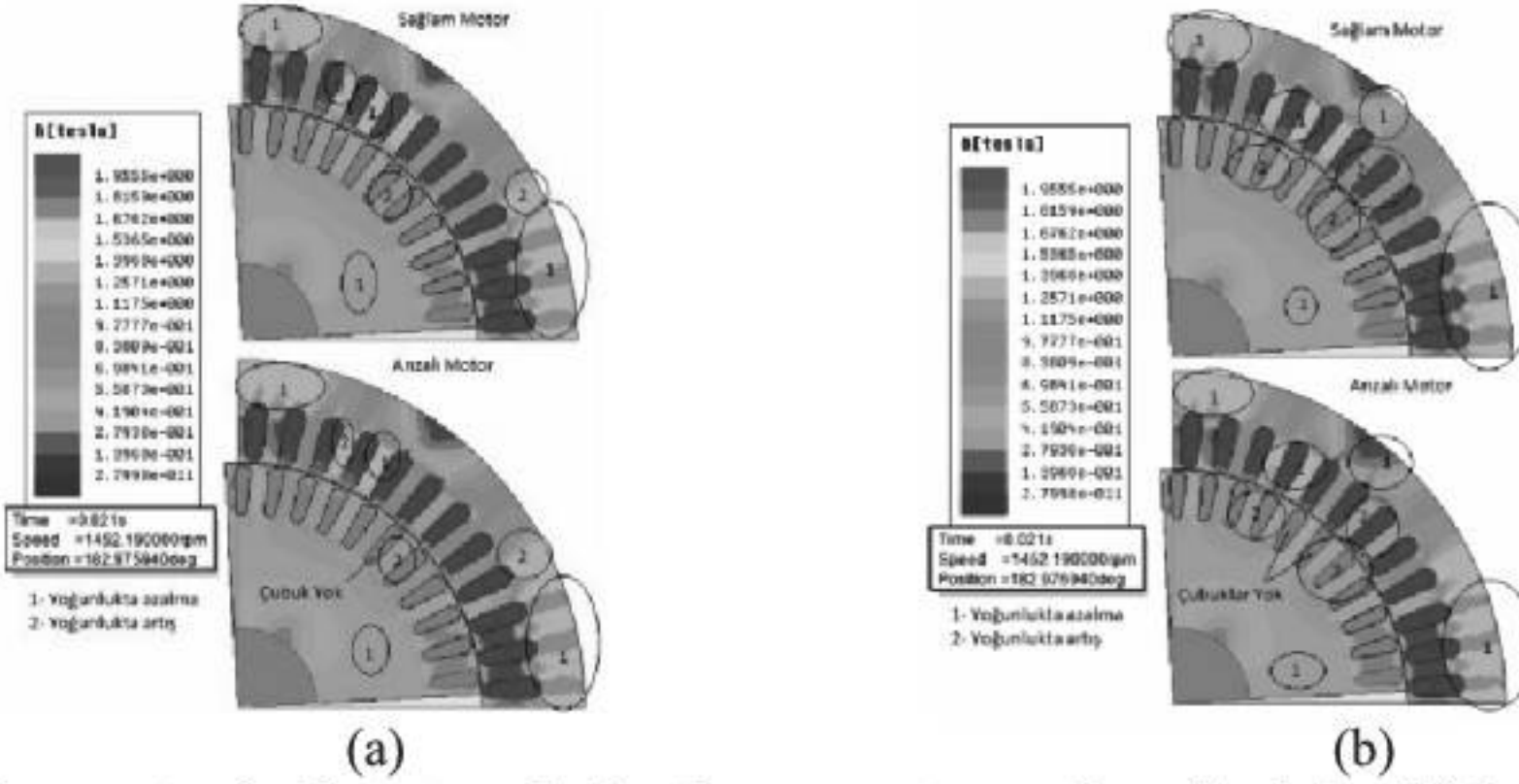
Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun rotorunda meydana gelen arızaların tespit edilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)'dir. SEY yönteminde elde akı yoğunluğunun izlenmesi rotor arıza tespitinde kullanılmaktadır. Sağlam motor ile rotor çubukları kırık motorun akı yoğunluğu Şekil 16'da gösterilmiştir.



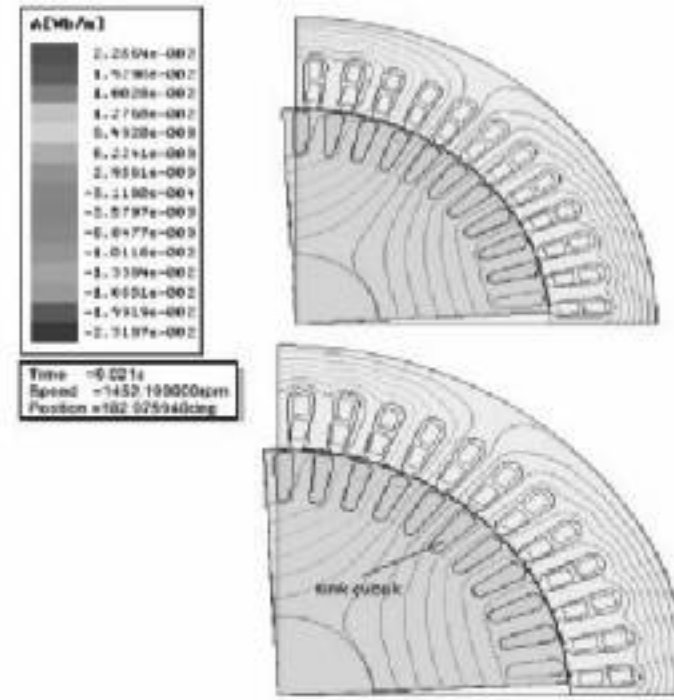
Şekil 16 (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motorun akı yoğunluğu, (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motorun akı yoğunluğu, (c) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motorun akı yoğunluğu.

Şekil 16 (a) incelendiğinde 1 ile numaralandırılmış kısımlarda akı yoğunluğunda azalma, 2 ile numaralandırılmış kısımlarda akı yoğunluğunda artış görülmektedir. Statorda genelinde akı yoğunluğunda azalma söz konusudur. Rotorda ise akı yoğunluğu çubuklar etrafında ve motor milinin etrafında artmış, rotorun genelinde azalma göstermiştir. Azalma iki ve üç rotor çubuğu kırık motorda daha çok meydana geldiği Şekil 16 (a) ve Şekil 16 (b)'de görülmektedir.

Sağlam motor ile bir ve iki rotor çubuğu olmayan motorun akı yoğunlukları karşılaştırmalı olarak Şekil 17'de görülmektedir. Motorun rotor çubuk olmayan kısımlarda akı yoğunluğunun arttığı diğer kısımlarda azaldığı görülmektedir. Genel itibariyle akı yoğunluğu azalmıştır.



Şekil 17 (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu olmayan motorun akı yoğunluğu, (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu olmayan motorun akı yoğunluğu.



Şekil 18 Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motorun akı çizgileri.

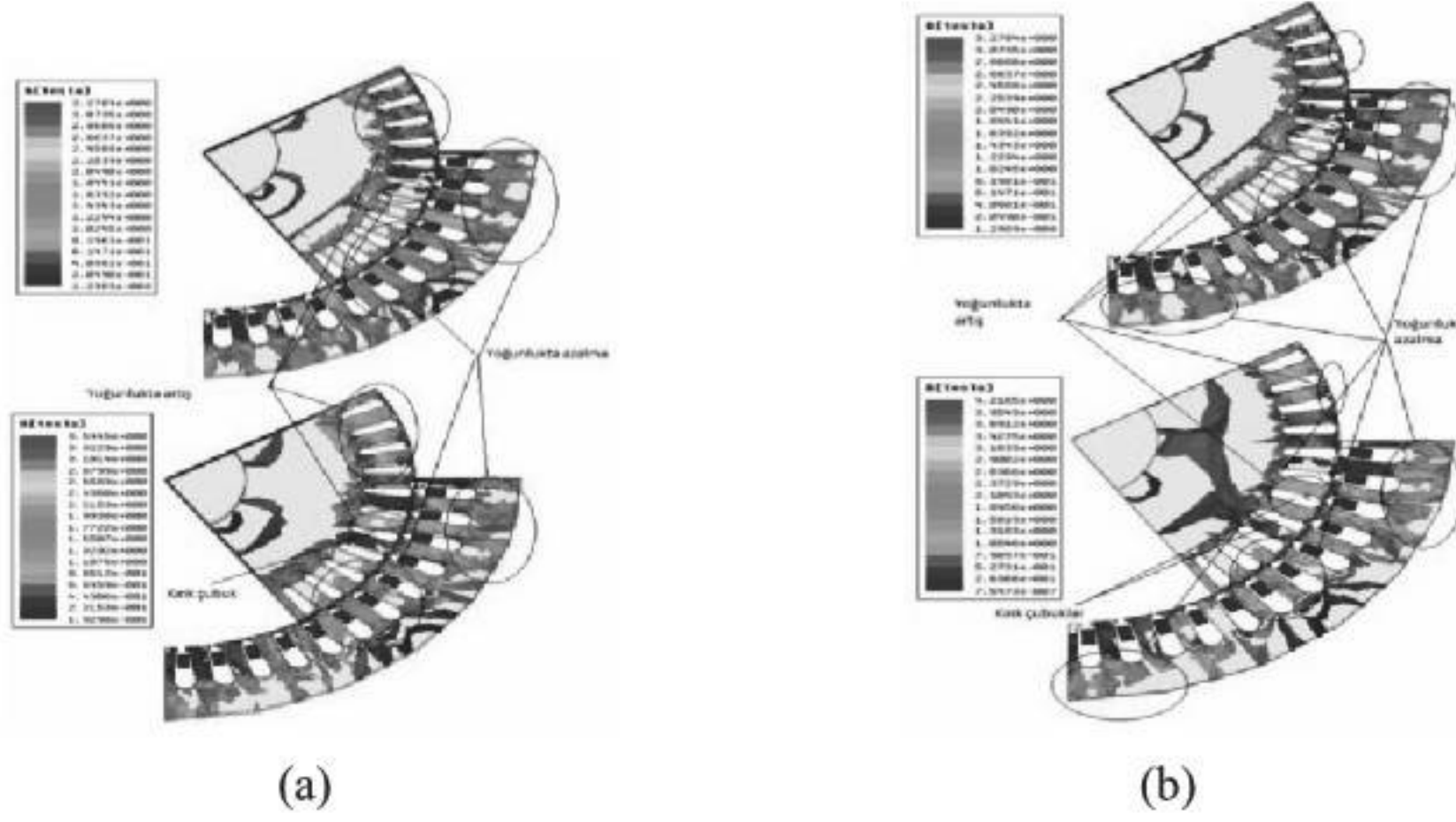
4.5 Akı Çizgileri

Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun SEY yönetimiyle yapılan analizinden elde edilen akı çizgilerinin dağılımı rotor arızası tespitinde fayda sağlayacağı düşünüldüğü için Şekil 18’de, sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motora ait akı çizgilerinin dağılımları verilmektedir. Şekilde sağlam motor ile arızalı rotorlu motorun akı dağılımı arasında belirgin bir fark tespit edilememiştir. Akı çizgilerinin dağılımının rotor kırık arızasının tespitinde iyi bir yöntem olmadığı görülmektedir. Arızalı rotorlu motorun akı çizgilerinin yoğunluğu sağlam motorun akı çizgilerinin yoğunluğuna göre azalmıştır. Bunun sebebi çizgilerin azaldığı noktalarda manyetik direncin (relüktansın) artmış olmasıdır.

4.6 Üç Boyutlu (3B) Simülasyon

SEY yöntemi ile asenkron motor 3B olarak da modellenmiştir. 3B analizde, sağlam motor ile arızalı motorun akı yoğunlukları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sağlam motor, bir rotor çubuğu kırık motor, iki rotor çubuğu kırık motora ait akı yoğunlukları (stator ve rotor üzerindeki) karşılaştırmalı olarak Şekil 18’de verilmiştir. Rotor çubuklarının kırılması sonucu manyetik akı değişimi stator ve rotor nüvelerinin her yerinde gözle görülebilir niteliktedir. Özellikle kırık çubuk etrafında manyetik akı yoğunluğunun arttığı, stator ve rotor nüvelerinin diğer bölgelerde ise düştüğü görülmüştür. Kırık rotor çubuğunun direnci artarken kısa devre halkası ile rotor çubuğu arasındaki hava aralığında dirençte artış söz konusudur. Kırık rotor çubuğunun direncindeki artış nedeniyle üzerinden geçen akı azalmış ve kendisine en yakın çubuklardaki akının arttığı görülmüştür. Çubuklardaki akı artışı kırık çubuktan uzaklaştıkça azalmıştır. Rotor çubuğunu tamamen kırık

olması durumunda, boş oyuğa en çubukta akı artışı meydana gelmiş, boş oyuktan uzaklaştıkça akı artışının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle kırık çubuğu veya çubuklarının bitişiğindeki çubuklar çevresinde akı yoğunluğunda artış meydana gelmiştir.



Şekil 19 (a) Sağlam motor ile bir rotor çubuğu kırık motorun akı yoğunluğu (3D), (b) Sağlam motor ile iki rotor çubuğu kırık motorun akı yoğunluğu.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç fazlı, 4 kutuplu, 7,5 kW bir asenkron motorun rotor arızaları (kırık rotor çubukları) Ansoft/Maxwell paket yazılım programı ile iki boyutlu ve üç boyutlu olarak modellendi. İki boyutlu modellemede, motorun rotor çubuklarında kırıklar oluşturuldu. Rotor kırıklarının tespit edilmesi için, motor stator akımı, elektromanyetik moment, ve akı değişimleri, ve manyetik akı çizgilerinin dağılımları incelendi. Bu parametreler, aynı özellikte sağlam bir motorun parametreleriyle karşılaştırıldı. Üç boyutlu modellemede de elektromanyetik akı yoğunluğunun stator ve rotor nüvesine dağılımı (aynı özellikte sağlam bir motorun akı yoğunluğu dağılımı ile karşılaştırmalı olarak) incelendi. Rotor çubuğu/çubukları kırık motorun akım, elektromanyetik moment ve sargı akısındaki değişim miktarı, sağlam motora göre çok azdır. Sinyallerin zaman domeninde izlenmesi ile rotor arızalarının tespit edilmesi oldukça zordur. İncelenen sinyallerde motor stator akımının rotor arızalarının tespit edilmesinde en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

SEY yöntemi ile yapılan modellemede sağlam motor ile arızalı motorun manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin birbirinden oldukça farklı olduğu tespit edilmiştir. Ancak akıdaki dağılım ve akı çizgilerinde gözlemlenen değişim sadece rotorda, genel olarak, arıza olduğunu göstermektedir. Bu metotta arızanın durumu hakkında daha fazla bilgi elde edilememektedir. Üç boyutlu yapılan analizde manyetik akı yoğunluğu sağlam motora göre kırık çubuk etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Ansoft/Maxwell yazılımı ile yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu modelleme ile rotor arızalarının rahatlıkla modellenerek eğitim amaçlı kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu yazılım paketi ile stator arızaları da modellenerek eğitim amaçlı olarak incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Yeh, C., Sayed-Ahmet, A. and Povinelli, R., A reconfigurable motor for experimental emulation of stator winding inter-turn and broken bar faults in polyphase induction machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 4, 1005-1014 p (2008).
- [2] Akar, M., Fenercioğlu, A. ve Soyaslan, M., Asenkron motorlarda rotor çubuğu kırık arızasının elektromanyetik tork ile tespiti, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'11), Elazığ, Türkiye (2011).
- [3] Akar, M. ve Çankaya, İ., Evirici ile sürülen asenkron motorlarda rotor çubuğu kırık arızasının tespiti, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye (2009).
- [4] Arabacı, H., Bilgin, O., Ceylan, M. ve Ceylan, R., Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızalarının yapay sinir ağları ile teşhisi, ELECO'2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa (2004).
- [5] Douglas, H., Pillay, P ve Ziarani, A. K., Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20, 135-141 p (2005).
- [6] Szabo, L., Dobai, J. B. and Biro, K. A., 2004, Rotor detection in squirrel-cage induction motors by current signature analysis, IEEE-TTTC-International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, Romania.
- [7] Ayaz, E., 2002, Asenkron motorlarda dalgacık analizi yaklaşımı ile rulman arıza tanısı ve yapay zeka tabanlı bir durum izleme sistemi, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [8] Sutherland, P.E. ve Salon, S.J., 2002, Analysis of rotor faults in three phase induction machines, Industry Applications Conference.
- [9] Nandi, S., Toliyat, H.A. and Li, X., 2005, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors, IEEE Transaction on Energy Conversion, 20, 719-729 p.
- [10] Erbay, S., 1999, Multi-sensor Fusion for Induction motor aging analysis and fault diagnosis., PhD Thesis, The University of Tennessee, Knoxville.
- [11] Gojko, M.J. and Penman, J., 2000,. The detection of inter-turn short circuits in stator windings of operating motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 147, 1078-1084 p.
- [12] Şeker S., Ayaz E., Upadhyaya, B. R. and Erbay, A.S.,. 2000, Analysis of motor current and vibration signals for detecting bearing damage in electric motors, MARCON 2000 Maintenance and Reliability Conference, Knoxville.
- [13] Tandon, N., Yadava, G.S., Ramakrishna, K.M., 2007, A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings, Mechanical Systems and Signal Processing, 21, 244-256 p.

- [14] Schoen, R.R., Habetler, T.G., Kamran, F. and Bartheld R.G., 1995, Motor bearing damage detection using stator current monitoring, *IEEE Trans. on Ind. Application*, 31, 1274–1279 p.
- [15] Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. and Vas P., 1996, AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect, *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, San Diego, California*, 655–662 p.
- [16] Thomson” W.T. and Stewart” I.D., 1998, On-line current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors”, *Proc. IEE Third Int. Conf. Power Electronics and Variable-Speed Drives, London, UK*,432–435 p.
- [17] Thomson, W.T. and Fenger, M., 2001, Current signature analysis to detect induction motor faults, *IEEE Ind. Applicat. Mag.*, vol. 7, 26–34 p.
- [18] Thomas, V. V., 2002, Non-invasive techniques for rotor fault detection of three phase squirrel cage induction motors, *Doctor of Philosophy thesis, India*,
- [19] Voltanen, M., 2007, Performance characteristics of an axial-flux solid-rotor-cage induction motor, *Doctor of science thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland*.
- [20] Liang, B., Payne, B. S., Ball, A. D. and Iwnicki, S. D., 2002, Simulation and fault detection of three-phase induction motors, *Mathematics and Computers in Simulation* 61, 1-15 p.
- [21] Aroui, T., Koubaa, Y. and Toumi, 2007, **A. Modeling and diagnostics of inductions machines under rotor failures**, *ICGST-ACSE Journal, Volume 7, Issue 2, November 2007*.
- [22] Yang, Z., Merrild, U. C., Runge, M. T., Pedersen, G., Borsting, H., 2009, A study of rolling-element bearing fault diagnosis using motor’s vibration and current signatures, *Preprints of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, 356 p.
- [23] Thorsen, O. V., Dolva, M., 1995, A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, 1186-1187 p.
- [24] Rahimi, S., 2006, Modeling of rotor bars in induction motors with sepecial focus on starting performance, *Master of science thesis, Royal Institute of Technology, Stockolm*.