

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORDA YAPAY  
ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE MEKANİK HATALARIN  
TEŞHİSİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet AKAR**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA**

**Kasım 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORDA YAPAY  
ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE MEKANİK HATALARIN  
TEŞHİSİ**

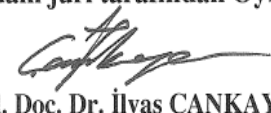
**DOKTORA TEZİ**


**Mehmet AKAR**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

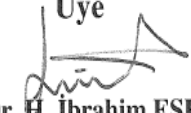
Bu tez 24/11/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. İlhami ÇOLAK  
Jüri Başkanı

  
Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA  
Üye

  
Prof. Dr. Güngör BAL  
Üye

  
Doç. Dr. Saadettin AKSOY  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr. H. İbrahim ESKİKURT  
Üye

## TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu alışma Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA yöneticiliğinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarım esnasında her türlü desteği sağlayan ve yol gösteren, bilgi ve birikimlerinden faydalandığım kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA' ya,

Çalışmalarım esnasında yapıcı eleştirileri ile çalışmalarıma katkıda bulunan tez izleme komitesi yeleri sayın Doç. Dr. Saadettin AKSOY ve Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim ESKİKURT' a,

Beni yetiştiren, hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek olan değerli aile'me, çalışmalarım süresince her konuda beni destekleyen sevgili eşim Kıymet AKAR' a,

Ayrıca bu tez çalışmamda maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen isimlerini sayamadığım herkese teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ .....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY .....	xv
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. Mekaniksel Arızalar.....	3
1.1.1. Rulman arızası .....	3
1.1.1.a. Zaman boyutunda analiz .....	7
1.1.1.b. Frekans boyutunda analiz .....	8
1.1.1.c. Zaman-Frekans boyutunda analiz .....	10
1.1.1.d. Yüksek dereceli spektral analiz .....	11
1.1.1.e. Yapay sinir ağları yaklaşımı .....	11
1.1.1.f. Model tabanlı yaklaşımlar .....	12
1.1.1.g. Motor akım işaretlerinin izlenmesi .....	13
1.1.2. Hava aralığı aksenel kaçıklığı arızası .....	15
1.2. Elektriksel Arızalar .....	18
1.2.1. Stator ile ilgili arızalar .....	18
1.2.1.a. Stator sargı arızaları .....	19
1.2.1.b. Sürücü arızaları .....	22
1.2.1.c. Stator arızaları teşhis yöntemleri.....	23
1.2.2 Rotor ile ilgili arızalar.....	26
1.2.2.a. Rotor çubuğu kırığı ve kısa devre halkası arızası .....	27

1.2.2.b. Rotor mıknatısı arızası .....	32
1.3. Tezin Amacı, Katkıları ve İzlenen Çalışma Yöntemi .....	32
<b>BÖLÜM 2. ....</b>	<b>35</b>
<b>SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR.....</b>	<b>35</b>
2.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Yapıları .....	40
2.1.1. Stator.....	40
2.1.2. Rotor .....	41
2.1.3. Hava aralığı.....	42
2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli .....	42
2.2.1. Üç faz model.....	43
2.2.2. Rotor referans düzlemi modeli .....	46
2.2.3. İki faz sabit düzlem modeli .....	48
<b>BÖLÜM 3. ....</b>	<b>49</b>
<b>KULLANILAN ARIZA TESPİT VE TEŞHİS YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>49</b>
3.1. Tespit Yöntemleri .....	51
3.1.1. Hızlı Fourier dönüşümü.....	51
3.1.2. Alfa-Beta dönüşümü.....	54
3.1.3. Ani akım- hızın izlenmesi.....	57
3.2. Teşhis yöntemleri.....	58
3.2.1. Radyal tabanlı fonksiyon ağları .....	61
3.2.2. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı .....	63
<b>BÖLÜM 4. ....</b>	<b>66</b>
<b>DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>66</b>
4.1. Eksenden Kaçıklık Arızasının Tespiti .....	69
4.1.1. HFD yöntemiyle tespit.....	70
4.1.2. Alfa-Beta dönüşüm yöntemiyle tespit .....	77
4.1.3. Ani akım -hızın izlenmesi yöntemiyle tespit .....	81
4.2. Rulman Arızasının Tespiti .....	83
4.2.1. HFD yöntemiyle tespit.....	84

4.2.2. Alfa-Beta dönüşüm yöntemiyle tespit .....	95
4.2.3. Ani akım-hızın izlenmesi yöntemiyle tespit .....	101
BÖLÜM 5. ....	107
ARIZALARIN YSA İLE TEŞHİSİ .....	107
5.1. Eksenden Kaçıklık Arızasının Teşhisi .....	107
5.1.1. HFD verileri ile eksenden kaçıklık arızasının teşhisi .....	108
5.1.1.a. HFD ve RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	108
5.1.1.b. HFD ve ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	111
5.1.2. Alfa Beta dönüşümü verileri ile eksenden kaçıklık arıza teşhisi... ..	114
5.1.2.a. Alfa Beta-RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	114
5.1.2.b. Alfa Beta-ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	115
5.1.3. Ani akım-hızın izlenmesi verileri ile eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	117
5.1.3.a. Ani akım-hız RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	118
5.1.3.b. Ani akım-hız ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi .....	119
5.2. Rulman Arızasının Teşhisi .....	121
5.2.1. HFD verileri ile rulman arızası teşhisi.....	121
5.2.1.a. HFD-RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi .....	122
5.2.1.b. HFD- ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi.....	124
5.2.2. Alfa Beta verileri ile rulman arızası teşhisi .....	127
5.2.2.a. Alfa Beta-RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi....	127
5.2.2.b. Alfa Beta-ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi .	128
5.2.3. Ani akım-hızın izlenmesi verileri ile rulman arızasının teşhisi.....	130
5.2.3.a. Ani akım-hız RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi .....	130

5.2.3.b. Ani akım-hız ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi .....	131
BÖLÜM 6. ....	133
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	133
6.1. HFD Yöntemi Sonuçları .....	133
6.2. Alfa-Beta Yöntemi Sonuçları .....	136
6.3. Ani akım-Hızın İzlenmesi Yöntemi Sonuçları .....	138
KAYNAKLAR .....	142
ÖZGEÇMİŞ .....	151

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

rms	: Etkin değer
HFD	: Hızlı Fourier dönüşümü
YSA	: Yapay sinir ağı
HGY	: Hata geri yayımlı
DUR	: Denetimsiz uyarlanabilir rezonans
$f_{af}$	: Arıza frekansı
$f_e$	: Taşıyıcı frekans
$f_t$	: Modülasyon frekansı
$f_{da}$	: Dış bilezik arıza frekansı
$f_{ia}$	: İç bilezik arıza frekansı
$f_{ka}$	: Kafes arıza frekansı
$f_{ba}$	: Bilya arıza frekansı
$D_p$	: Rulman dış çapı
$D_B$	: Bilya çapı
$n_b$	: Bilya sayısı
$\alpha$	: Temas açısı
$f_r$	: Rotor frekansı
$f_{ecc}$	: Eksenden kaçıklık arıza frekansı
$Q$	: Rotor çubuğu sayısı
$p$	: Çift kutup sayısı
$f_s$	: Besleme frekansı
$f_b$	: Algılanabilir frekans
$\lambda_d^r$	: d eksenli stator toplam akısı



$i_{ds}^r$	: d eksenli stator akımı
$L_{ds}^r$	: d eksenli stator indüktansı
$v_{qs}^r$	: q eksenli stator gerilimi
$r_s$	: Stator direnci
$\lambda_{d(pm)}^r$	: q eksenli sabit mıknatıs akısı
$\omega_r$	: Rotor açısal hızı
SMSM	: Sabit mıknatıslı senkron motor
NdBF <sub>e</sub>	: Neodyum boron demir
AlNiCo	: Aliminyum nikel kobalt
SmCo	: Sarmanyum kobalt
$v_a, v_b, v_c$	: Stator faz gerilimleri
$i_a, i_b, i_c$	: Stator faz akımları
$R_a, R_b, R_c$	: Stator faz sargıları omik direnç
$e_a, e_b, e_c$	: Sabit mıknatıs tarafından üretilen zıt elektromotor kuvvet
$L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$	: Faz sargısı toplam endüktansı
$L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$	: Faz sargısı karşıt endüktansı
$\psi_a, \psi_b, \psi_c$	: Stator faz sargıları manyetik akı değeri
$\theta_m$	: Rotor mekanik pozisyonu
$\theta_r$	: Rotor elektriksel pozisyonu
$T_e$	: Elektromanyetik moment
$T_L$	: Yük momenti
$i_\alpha, i_\beta$	: İki faz sabit eksen akımları
$a_0, a_k, b_k$	: Fourier katsayıları
$c(k)$	: Karmaşık Fourier katsayısı
KZFD	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü
$x(t)$	: Orijinal işaret
$w(t)$	: Pencere fonksiyonu
$\tau$	: Zamanda öteleme miktarı

$N$	: Veri kümesi
$\Delta f$	: Frekans çözünürlüğü
$\Delta t$	: Öteleme zamanı
$S_{xx}(f)$	: $x(t)$ işaretine ait spektrum değeri
ADALINE	: Adaptif lineer nöron
RTFA	: Radyal tabanlı fonksiyon ağı
ÇKİBA	: Çok katmanlı ileri beslemeli ağ
$X$	: Giriş vektörü
$c$	: Saklı katman nöronun merkezi
$\sigma$	: Sabit dağılma katsayısı
$w_{ji}$	: $j$ 'inci saklı katman nöronu ile $i$ 'inci çıktı katmanı nöronu arasındaki ağırlık
$w_{oi}$	: Çıkış katmanındaki bias terimi
$\phi$	: Lineer olmayan aktivasyon fonksiyonu
$\  \cdot \ $	: Öklidyen normu
$y_k$	: Çıkış katmanındaki $k$ nöronun çıkışı
$d_k$	: Hedeflenen çıkış
$c$	: Saklı katmandaki nöron sayısı
$w_{ji}$	: Giriş ile saklı katman arasındaki bağlantı
$w_{kj}$	: Saklı katman ile çıkış arasındaki bağlantı
$u_k$	: Çıkış katmandaki $k$ . birimin aktivasyon değeri

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Elektrik motor arızaları .....	2
Şekil 1. 2. Asenkron motor kesiti .....	7
Şekil 1. 3. Titreşim sinyalinin zaman boyutunda analizi .....	8
Şekil 1. 4. Motor iç yatağına ait titreşim dalga formu .....	9
Şekil 1. 5. Motor iç yatağına ait titreşim spektrum grafiği .....	9
Şekil 1. 6. Döner tip rulman geometrisi .....	14
Şekil 1. 7. Eksenden kaçıklık tipleri.....	16
Şekil 1. 8. Sağlam stator ve sargıları .....	18
Şekil 1. 9. Tek faz sargı hatası .....	19
Şekil 1. 10. Faz-Faz kısa devre sargı hatası .....	19
Şekil 1. 11. Sarım-Sarım kısa devre hatası .....	20
Şekil 1. 12. Faz- Toprak kısa devre hatası .....	20
Şekil 1. 13. Değişik rotor yapıları .....	27
Şekil 1. 14. Rotor çubuğu kırığı ve kısa devre halkası hatası .....	28
Şekil 1. 15. Değişik sayıda rotor çubuğu kırığı hatasından dolayı oluşan yan band frekansları.....	29
Şekil 1. 16. İnverterle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayma $s=0.061$ olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı(alтта) akım spektrumları .....	30
Şekil 1. 17. İnverterle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayma $s=0.061$ olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı(alтта) hız spektrumları .....	31
Şekil 1. 18. İnverterle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayma $s=0.061$ olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı(alтта) moment grafiğinin zaman ve frekans bileşenleri .....	31
Şekil 2. 1. Şişe otomasyon bandı .....	38
Şekil 2. 2. Üç eksenli SMSM' li CNC freze .....	39
Şekil 2. 3. SMSM kesiti .....	40
Şekil 2. 4. SMSM rotor yapıları .....	42

Şekil 2. 5. SMSM üç faz eşdeğer devresi.....	43
Şekil 2. 6. SMSM rotor referans eşdeğer devresi.....	47
Şekil 2. 7. SMSM rotor referans düzlemi blok diyagramı .....	48
Şekil 3. 1. Akım spektrum grafiği .....	54
Şekil 3. 2. Alfa-Beta vektörü.....	55
Şekil 3. 3. Alfa-Beta benzetim ve deneysel grafiği.....	56
Şekil 3. 4. SMSM üç faz akım ve hız grafiği .....	58
Şekil 3. 5. YSA katman yapısı .....	61
Şekil 3. 6. RTFA yapısı	
Şekil 3. 7. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı.....	63
Şekil 4. 1. Deney düzeneği ve blok diyagramı.....	67
Şekil 4. 2. Sürücü programı arayüzü .....	68
Şekil 4. 3. Spektrum hesaplama program arayüzü .....	69
Şekil 4. 4. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık akım spektrumları .....	71
Şekil 4. 5. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık gerilim spektrumları.....	72
Şekil 4. 6. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık hız spektrumları .....	73
Şekil 4. 7. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık tork spektrumları.....	74
Şekil 4. 8. 150 d/d (10 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri .....	78
Şekil 4. 9. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri .....	79
Şekil 4. 10. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri .....	80
Şekil 4. 11. 150 d/d (10 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği.....	81
Şekil 4. 12. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği.....	82
Şekil 4. 13. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği.....	82
Şekil 4. 14. Kullanılan rulman geometrisi .....	83
Şekil 4. 15. Deneysel çalışmada kullanılan rulmanlar .....	84
Şekil 4. 16. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) akım spektrumları.....	86
Şekil 4. 17. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) gerilim spektrumları .....	88
Şekil 4. 18. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) hız spektrumları.....	89
Şekil 4. 19. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) tork spektrumları .....	91
Şekil 4. 20. 150 d/d (10 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri .....	95
Şekil 4. 21. 150 d/d (10 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri.....	96
Şekil 4. 22. 450 d/d (30 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri .....	97
Şekil 4. 23. 450 d/d (30 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri.....	98

Şekil 4. 24. 750 d/d (50 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri .....	99
Şekil 4. 25. 750 d/d (50 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri.....	100
Şekil 4. 26. 150 d/d (10 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği .....	102
Şekil 4. 27. 150 d/d (10 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği.....	102
Şekil 4. 28. 450 d/d (30 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği .....	103
Şekil 4. 29. 450 d/d (30 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği.....	104
Şekil 4. 30. 750 d/d (50 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği .....	105
Şekil 4. 31. 750 d/d (50 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği.....	106
Şekil 5. 1. Eksenden kaçıklık RTFA-HFD hata- iterasyon değişimi .....	109
Şekil 5. 2. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-HFD hata- iterasyon değişimi .....	111
Şekil 5. 3. Eksenden kaçıklık RTFA-Alfa Beta hata- iterasyon değişimi.....	115
Şekil 5. 4. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-Alfa Beta hata- iterasyon değişimi .....	116
Şekil 5. 5. Eksenden kaçıklık RTFA-Ani akım-hız hata- iterasyon değişimi.....	118
Şekil 5. 6. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-Ani akım-hız hata- iterasyon değişimi.....	119
Şekil 5. 7. Rulman arızası RTFA-HFD hata- iterasyon değişimi.....	122
Şekil 5. 8. Rulman arızası ÇKİBA-HFD hata-iterasyon değişimi .....	124
Şekil 5. 9. Rulman arızası Alfa Beta-RTFA hata-iterasyon değişimi .....	128
Şekil 5. 10. Rulman arızası Alfa Beta-ÇKİBA hata-iterasyon değişimi.....	129
Şekil 5. 11. Rulman arızası Ani akım-hız RTFA hata-iterasyon değişimi.....	130
Şekil 5. 12. Rulman arızası Ani akım-hız ÇKİBA hata-iterasyon değişimi .....	131

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. 1. Elektrik motor arızalarının dağılımı .....	2
Tablo 4. 1. Kullanılan motor ve fren parametreleri .....	67
Tablo 4. 2. Eksenden kaçıklık arıza frekansları .....	70
Tablo 4. 3. 150 d/d (10 Hz) eksenden kaçıklık arızası spektrum değerleri.....	75
Tablo 4. 4. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık arızası spektrum değerleri.....	76
Tablo 4. 5. Kullanılan rulmana ait katalog değerleri .....	83
Tablo 4. 6. 750 d/d (50 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları.....	85
Tablo 4. 7. 150 d/d (10 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları.....	92
Tablo 4. 8. 150 d/d (10 Hz) rulman arızası spektrum değerleri .....	92
Tablo 4. 9. 450 d/d (30 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları.....	93
Tablo 4. 10. 450 d/d (30 Hz) rulman arızası spektrum değerleri .....	94
Tablo 5. 1. RTFA-HFD eksenden kaçıklık boş çalışma test sonuçları .....	110
Tablo 5. 2. RTFA-HFD eksenden kaçıklık yüklü çalışma test sonuçları.....	110
Tablo 5. 3. ÇKİBA-HFD eksenden kaçıklık boş çalışma test sonuçları.....	112
Tablo 5. 4. ÇKİBA-HFD eksenden kaçıklık yüklü çalışma test sonuçları .....	112
Tablo 5. 5. Eksenden kaçıklık için HFD-YSA karşılaştırması .....	113
Tablo 5. 6. Alfa Beta-RTFA eksenden kaçıklık test sonuçları.....	115
Tablo 5. 7. Alfa Beta-ÇKİBA eksenden kaçıklık test sonuçları .....	116
Tablo 5. 8. Eksenden kaçıklık için Alfa Beta-YSA karşılaştırması.....	117
Tablo 5. 9. Ani akım-hız RTFA eksenden kaçıklık test sonuçları .....	118
Tablo 5. 10. Ani akım-hız ÇKİBA eksenden kaçıklık test sonuçları.....	119
Tablo 5. 11. Eksenden kaçıklık için Ani akım-hız YSA karşılaştırması.....	120
Tablo 5. 12. RTFA-HFD rulman arızası test sonuçları.....	123
Tablo 5. 13. ÇKİBA-HFD rulman arızası test sonuçları.....	125
Tablo 5. 14. Rulman arızası için HFD-YSA karşılaştırması.....	126
Tablo 5. 15. Rulman arızası için Alfa Beta-YSA karşılaştırması .....	129
Tablo 5. 16. Rulman arızası için Ani akım-hız YSA karşılaştırması.....	132

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Sabit mıknatıslı senkron motor, hata teşhisi, yapay zekâ

Elektrik motorları endüstride en sık kullanılan tahrik elemanlarının başında gelmektedir. Elektrik motorlarının arızalanmaları hem üretim kapasitesini düşürür hem de maliyetleri yükseltir. Bu yüzden elektrik motorlarının izlenmesi ve öngörülü bakım son zamanlarda üzerinde durulan en önemli konulardan biri olmuştur. Bu motorlardan birisi olan ve cam sanayinden tekstile, savunma sanayinden robot uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahip olan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların da sürekli izlenmesi oldukça önemlidir.

Yapılan çalışmalara göre elektrik motorlarının arızalarının yaklaşık %50' si mekaniksel arızalardan (Rulman arızası, eksenden kaçıklık, mekanik rotor arızası) kaynaklanmaktadır. Mekaniksel arızaların tespitinde motorlara ait akım, titreşim gibi sinyaller izlenmekte zaman, frekans, zaman-frekans boyutunda analizler yapılarak tespitler yapılmaktadır. Tespit çalışması ile açığa çıkarılan öznelik vektörlerini kullanarak arızaların teşhis ve sınıflandırılması yapay zekâ yöntemleri ile başarılı şekilde yapılmaktadır. Asenkron motorlar üzerine bu alanda birçok çalışma mevcuttur. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar için literatürde Hızlı Fourier Dönüşümü ile arıza tespitine yönelik çalışma olmasına karşın Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri ile yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Aynı zamanda bu motorlar için yapay zekâ yöntemleri ile arıza teşhisi ilk olarak bu çalışmada yapılmıştır. Yapılan tez çalışması bu yönleri ile bir ilk olma niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmada, Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda eksenden kaçıklık ve rulman arızası deneysel olarak çalışılmıştır. Motora ait akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri beş farklı yük ve üç farklı hız değerinde izlenmiştir. İzlenen sinyallerin Hızlı Fourier dönüşümü, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleriyle öznelik vektörleri oluşturulmuştur. Elde edilen öznelik vektörleri ise Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ eğitiminde kullanılarak motor durumu izlenmiş ve arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak kullanılan örüntü tanıma yöntemlerinin eksenden kaçıklık ve rulman arızalarını izlemede ve teşhis etmekte %90' lar civarında bir başarı sergilediği sonucuna varılmıştır. Üç farklı tespit yöntemi (Hızlı Fourier dönüşümü, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi) iki farklı teşhis yöntemiyle (Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ) birlikte kullanılmıştır. Sonuçta; Hızlı Fourier Dönüşümü ve Alfa-Beta Dönüşümü sonuçlarının Çok Katmanlı İleri Beslemeli ağ yapısıyla, Ani akım-hızın izlenmesi yöntemiyle elde edilen sonuçların da Radyal Tabanlı Ağ yapısı ile başarılı olduğu bilgisi gözlemlenmiştir.

# **MECHANICAL FAULT DIAGNOSIS IN THE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES**

## **SUMMARY**

**Key Words:** Permanent magnet synchronous motor, fault diagnosis, artificial intelligence

Electric motors are one of the main power machines used in industry. Electric motor faults decrease production capacity while increasing cost. Therefore, monitoring electric motors and estimated maintenance on the subjects on which researchers focus on in recent times. Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), one of the motors used in textile, glass and military industries in addition to robotic applications, should be continuously monitored.

According to the studies, approximately 50% of the faults of electric motors are caused by mechanical faults (bearing faults, eccentricity, and mechanical rotor fault). The signals of current, vibrations, etc. are monitored to detect mechanical faults. Then, time, frequency, time-frequency domains used to analyze and decide the type of those faults. Attribute vectors obtained after determination step are used with artificial intelligence to prognosis and classify the faults. There are several studies on asynchronous motors. There are the fault determination based on Fast Fourier Transform; however, any study related to fault determination based on Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring has not been seen for PMSM in the literature. The fault determination based on artificial intelligence methods has been done in this study for the first time. This dissertation thesis is the first study in this area.

In this thesis, the eccentricity and bearing fault in PMSM were studied experimentally. The current, voltage, speed and electromagnetic torque signals were monitored under five different loads and three different speed values. The attribute vectors were obtained by using Fast Fourier Transform, Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring. These attribute vectors were used in training Radial Basis Function and Multi Layer Feed forward Neural Network and then the faults were detected by these neural network models.

As a result, pattern recognition methods were 90% successful in monitoring and detecting eccentricity and bearing faults. Three different determination methods (Fast Fourier Transform, Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring) were separately used with two different prognosis methods (Radial Basis Function and Multi Layer Feed forward Neural Network). In the results Fast Fourier Transform and Clarke Concordia worked well with Multi Layer Feed forward Neural Network while Instantaneous current-speed monitoring worked well with Radial Basis Function.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik motorları sanayinin en önemli tahrik elemanlarından biridir ve çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu elemanların arızalanmaları hem üretim gücünü düşürür hem de bakım ve maliyet masraflarını artırır. Üreticiler ve kullanıcılar ilk zamanlarda motorlarını korumanın yolunun aşırı akım ve gerilimden korumak olduğunu sanırlardı (Nandi ve ark.,2005). Bu amaçla uzun yıllar boyunca zamanlayıcı, kontaktör, akım ve gerilim röleleri gibi klasik yöntemlerle motorlarını korumaya çalışmışlardır (Bayındır ve ark., 2008). Ancak ilerleyen yıllarda hataların oldukça çeşitli olduğu görülmüştür. Elektrik motorlarının izlenmesi ve hata teşhisi son yıllarda üreticilerin ve kullanıcıların önemli çalışma alanlarının başında gelmektedir. Bunun sebebi ise (Nandi ve ark.,2005);

- Motorların çeşitli parçalarının arızalanması,
- Motor tamiratlarının pahalı olmamasına karşın üretimi aksattığı için maliyetin artmasıdır.
- Motor durumlarının izlenmesinin faydaları;
- Olabilecek arızalar hakkında önceden bilgi sahibi olunur,
- Mevcut bakım ihtiyaçlarını açığa çıkarır,
- Gelecekte hangi parça üzerinde ne zaman bakım yapılması gerektiği anlaşılır,
- Bakım esnasında minimum kesinti sağlanır.
- Hata teşhisinin faydaları ise;
- Teknik elemanlara fazla zaman kaybettirmeden hatanın neden kaynaklandığını ve nerede olduğu bilgisi aktarılır,
- Belirli aralıklarla yapılan genel tamiratlar hata teşhisi sayesinde ortadan kalkarak zaman kaybına engel olunur,

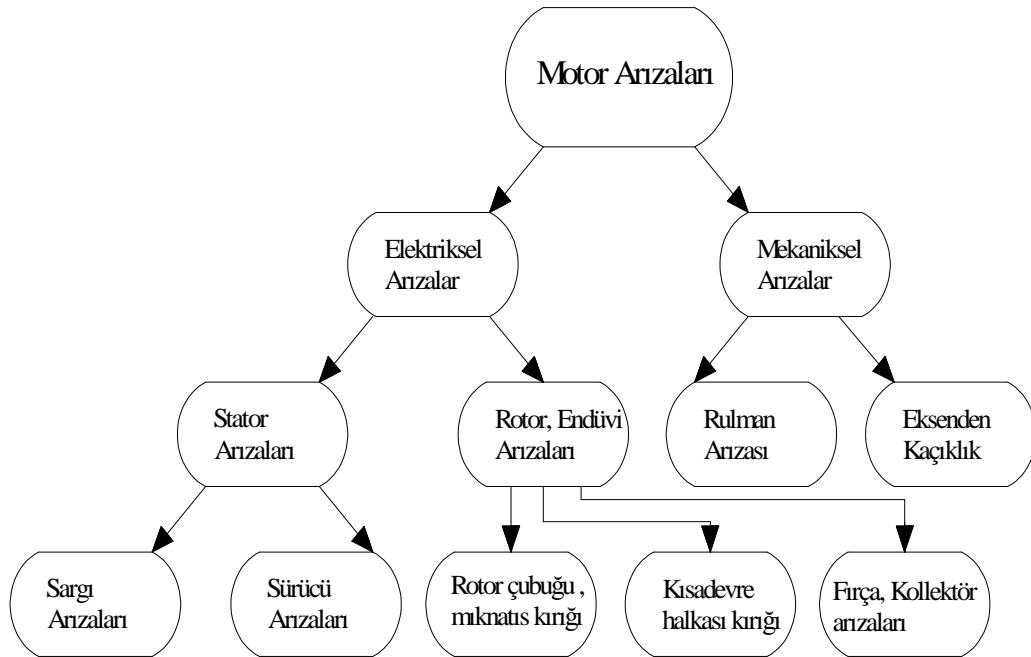
şeklinde sıralanabilir. Hata teşhisinde en çok bilinen yöntem olan motor akım sinyallerinin analizi yanında hız, tork, gürültü ve titreşim gibi diğer sinyal analizleri de geliştirilmiştir. Hata teşhisinde kullanılan insan tecrübesi zamanla yerini bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi insan gibi karar verme yetisine

sahip uzman sistemlere bırakmıştır (Vas,1993). Elektrik motorlarındaki arızaların kaynağına bakıldığında 4 ana unsurun ön plana çıktığı görülmektedir. Bu arızaların uluslararası ölçütlere göre dağılımı Tablo 1.1' de görülmektedir (Yeh ve ark.,2007).

Tablo 1. 1. Asenkron motor arızalarının dağılımı

	IEEE-IAS (%) (Electrical Safety Workshop) 1985 [3]	IEEE-IAS (%) Electrical Safety Workshop 1985 [3]	EPRI (%) Electric Power Research Institute 1985 [2]
Arızalı Motor Sayısı	380	304	1052
Rulmanla İlgili Arızalar	44	50	41
Stator İlgili Arızalar	26	25	36
Rotorla İlgili Arızalar	8	9	9
Diğer Arızalar	22	26	14

Elektrik motorlarına ait arızalar Şekil 1.1' deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 1. 1. Elektrik motor arızaları

Şekil 1.1' deki arızalara sebep olan faktörler;

- Stator faz sargılarının kendi aralarında ve/veya tek başına oluşturdukları açık devre ve/veya kısa devre arızaları,
- Stator sargılarının olağan dışı bağlanması,
- Rotor çubuklarının kırılması, çatlaması veya rulmanlardaki çatlaklar,

- Statik ve/veya dinamik hava aralığı düzensizliği,
- Stator sargılarında ve nüvesinde sürtünmeden dolayı ciddi sorunlara yol açan rotor eğriliği,
- Rotor alan sargılarının kısa devre olması,
- Rulman ve dişli kutusu hatalarıdır.

Bu arızaların elektrik motorları veya çevresindeki elemanlara etkileri;

- Hat akımlarında ve gerilimlerde balanssızlık,
- Tork salınımlarında artış,
- Ortalama torkda azalma,
- Kayıpların artması ve buna bağlı olarak verimin düşmesi,
- Aşırı ısınma olarak sayılabilir.

Bahsedilen bu arızaların teşhisi için şu ana kadar birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Nandi ve ark., 2005);

- Elektromanyetik alanın izlenerek motor sargılarının motor mili boyunca olan akı dağılımı,
- Sıcaklık ölçümü,
- Kızılötesi tanıma,
- Radyo frekans yayılımının izlenmesi,
- Gürültü ve titreşimin izlenmesi,
- Kimyasal analiz,
- Akustik ses ölçümü,
- Motor akım sinyalleri analizi,
- Model, yapay zekâ ve yapay sinir ağları tabanlı tekniklerdir.

## **1.1. Mekaniksel Arızalar**

### **1.1.1. Rulman arızası**

Rulmanlar dönen elemanları içeren makinalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Rulmanlarda imalat sırasında yüzeylerde üretim hataları, yanlış montaj ve işletme sırasında değişik sebeplerden kaynaklanan hatalar oluşabilir. Bu hataların tehlikeli

bir boyuta ulaşmadan tespit edilmesi ve tedbir alınması gerekir. Rulman hasarlarında 4 aşama vardır. Bunlar (Arslan ve ark., 2005);

*1. Aşama:* Arızanın ilk aşamasında spektrum grafiğinde arıza frekansına ait harmonikler meydana gelir. İlk belirtiler genellikle 20 kHz- 60 kHz gibi ultrasonik frekanslarda ortaya çıkar.

*2. Aşama:* Arıza büyüdükçe oluşan harmoniklerin sayısı da artar, titreşim frekansları mil hızı ile modülasyona uğraması sonucu yan bantlar oluşur. Yanbantların genliği esas frekansın (besleme frekansı) genliğini geçerse hasarın önemli olduğu anlaşılmalıdır.

*3. Aşama:* Spektrum grafiğinde hasar titreşim frekansı harmonikleri ve yan bantlarına ek olarak temel hasar frekansı da oluşur. Özellikle yan bant oluşumları rulman hasar frekanslarına eşlik ettiği zaman hasar gözle görülür seviyeye gelmiş demektir. Bu aşamada rulman değiştirilmelidir.

*4. Aşama:* Rulman bozulmaya devam ettiği için rulman elemanlarının bozulmasını hızlandıran iç boşluklar artmaya başlar. Bu boşlukların rulman elemanları arasındaki çarpmaları artırır bu çarpmalar sonucu meydana gelen titreşimin spektrum grafiğinde geniş bant seviyesinde gürültü oluşur. Mil devir frekansı ve harmonikleri yükselir. Rulman hasar frekansları artık dağınık ve geniş bant gürültü frekansları biçimini alır.

Makineleri çalışmalarını engellemeden takip ederek durumlarını yakından izleme olanağı sağlayan yöntemler, lüzumsuz durdurmaları ortadan kaldıracak gibi, gereksiz parça değiştirmelerini de önlemektedir. Arıza çıkacak nokta önceden algılanabildiğinden, geleceğe yönelik bir bakım onarım programı oluşturulabileceği gibi, ani duruşlara neden olan, doğabilecek arızalar da ortadan kaldırılabilir.

Birçok araştırmacı yıllardan beri bu konuyu değişik açılardan ele almışlardır. Rulman dinamiğinin ve titreşimlerinin modellenmesi, sinyal analiz tekniklerinin kullanımı, verilerin değişik metotlarla değerlendirilmesi bu konudaki çalışmaların içeriğini oluşturmaktadır. Deneysel çalışma yapmak isteyen her araştırmacı veya imalatçı

kendi deney düzeneğini kurmuş, mil ve rulman titreşimlerini incelemek için kendi metodunu kullanmıştır. Bu nedenle bir araştırmacı için kabul edilebilir olan bir metod diğeri için gereksiz olabilir. Bu durum uygulanabilecek deney metodlarının sayısını artırmıştır (Arslan ve ark., 2006). Standart test metodları, bilyalı rulmanların imalatında ve kullanıcı tarafından kullanılmasında yaralanılabilecek çok az bilgi verir. Fakat elde edilen sonuçlar üretim kalitesinin korunması veya sökülmüş rulmanların tekrar kullanılabilirliğinin kontrolü için faydalı bir göstergedir (Arslan ve ark., 2006).

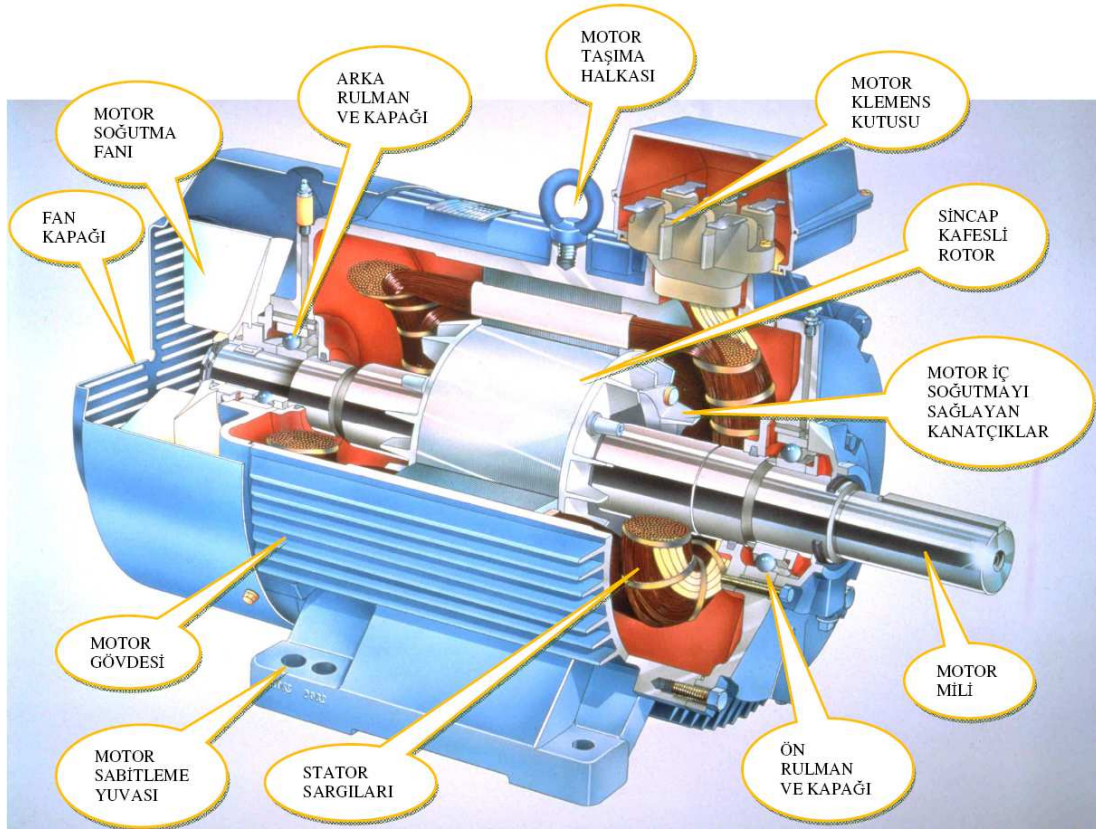
Hemmings ve Smith (1976), Gusstafssonvd ve Tallian (1963), Cena ve Hobbs (1972), Braun ve Datner (1979),Igarashi ve Hamada (1982) gibi araştırmacılar birbirine benzer deney düzenekleri kullanmışlardır. Araştırmacılar rulman yüzeylerinde oluşan arızaları modelleyerek arıza titreşim sinyallerini izlemiş ve deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır. Walford ve Stone (1980) çeşitli yük ve hızlardaki mil merkezinin yatak yuvasına göre bağıl yer değiştirmesini ölçmek için bir deney düzeneği kullanmışlardır. Williams ve ark.,(2001) rulman ömrünü belirlemek için bir test düzeneği kullanmışlar ve bu test düzeneği yardımıyla sabit ve değişken devirlerde, kusursuz rulmanları hasar oluşuncaya kadar teste tabi tutarak, rulmanların hasarlı ve hasarsız durumları için titreşimlerini kaydetmişlerdir (Arslan ve ark., 2006). Alfredson ve ark. (1985a,b) bilyalı rulmanlardaki hasarları belirlemek için bir rulman test düzeneği kullanarak ölçtükleri titreşim sinyallerini zaman ve frekans boyutu metodlarını kullanarak değerlendirmişlerdir. Zhang ve ark., (2000) tek bir bölgesel yüzey kusuru olan rulmanlardan deneysel olarak elde ettikleri verilerle, erken kusur teşhisi yapabilen ve kusur derinliğini tespit edebilen yeni bir gürültü kesici kapasitesi yüksek sinyal işleme metodu geliştirmişlerdir.

Ocak ve Loparo (2004) indüksiyon motorundan alınan titreşim verilerini kullanarak motor çalışma hızını ve rulman kusur frekanslarını tahmin edebilen bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın geçerliliğini araştırmak üzere, motor rulmanı iç ve dış bileziğinde elektriksel ark makinesiyle yapay olarak kusurlar oluşturmuşlar ve titreşim verilerini bu sistem üzerinden toplamışlardır. Tandon ve Choudhury (1999) spark erozyon metodunu kullanarak rulman iç bileziği ve makaralarda kusurlar oluşturmuş, farklı boyuttaki kusurlu ve kusursuz rulmanların akustik emisyonunu

ölçmüşlerdir. Küçük kusur boyutları için akustik emisyon sinyalinin voltaj seviyesini aşan genlik sayısının rulman testlerinde makara ve iç bilezikte kusur taraması için çok iyi bir parametre olduğunu bulmuşlardır.

Bazı araştırmacılar ise çalışan bir sistem üzerinden veri toplayarak bu verileri işleme ve analiz etme yoluna gitmişlerdir. Al Kazaz ve Singh (2003) indüksiyon makinesindeki titreşimleri deneysel olarak incelemişler ve eşzamanlı makine sağlamlık izlemesi ve hata tespiti için gerekli detaylı bilgiye ulaşmak amacıyla, sistemden elde ettikleri sinyalleri zaman boyutunda sayısal işaret işlemci kullanarak korelasyon ve konvelasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar ayrıca sinyalleri Fourier dönüşümü kullanarak frekans boyutuna taşımış ve genlik değişimlerini incelemişlerdir. Ericsson ve ark., (2005) dönen makinalarda rulmanlarda oluşan yerel kusurların otomatik olarak taranması için dalgacık tabanlı birkaç farklı titreşim analiz tekniğinin performansını karşılaştırmışlardır. Aktürk ve Uneeb (1997) bir elektrik santralinde gerçekleştirdikleri uygulama çerçevesinde tespit edilen bir dengesizlik probleminin kestirimci bakım metotlarından titreşim gözlemlene ile belirlenmesi evrelerini göstermişlerdir. Al-Najjar (2000) iki farklı kâğıt fabrikasında uygulanan kestirimci bakım programı kapsamında rulman hasarlarının belirlenmesi, oluşma sebepleri, rulmanların kullanılabilir ömürlerinden yeterince faydalanılması için alınması gereken tedbirleri ve etkili bir bakım için gereken stratejileri ele almıştır. Orhan ve ark., (2006) gerçek operasyon şartlarında çalışan bir makine üzerinden periyodik olarak titreşim ölçümü ve analizi yaparak hatanın oluşumunun erken tespitini çalışmışlar, buldukları sonuçlardan titreşim analizinin rulman hasarlarını belirlemede kestirimci bakım tekniği olarak fabrikalarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Rulman arızasının tespiti maliyetleri düşürme açısından oldukça önemlidir. Örneğin 100 HP' lik bir motorun maliyeti yaklaşık olarak 7500 \$ iken rulman maliyeti 250 \$ civarındadır.

Şekil 1.2' de sincap kafesli asenkron motorun kesiti verilmiştir. Şekilde rulmanların yerleri açıkça görülmektedir. Senkron motorlarda da kullanılan rulman geometrileri ve yerleri asenkron motora benzerdir.



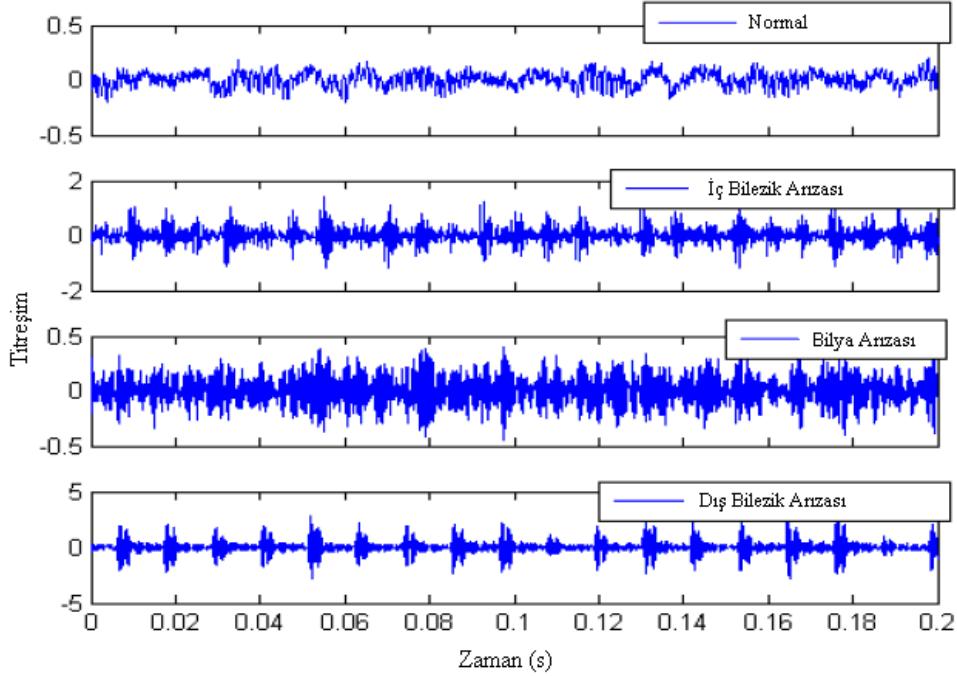
Şekil 1. 2. Asenkron motor kesiti

Titreşim sensörlerinden alınan bilgileri işleyerek rulman arızası tespitine yönelik farklı yöntemler vardır. Bunlardan en sık kullanılanları zaman boyutunda analiz, frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyunda analiz, yüksek dereceden spektrum analizi, yapay sinir ağları ve model tabanlı yaklaşımlardır.

### 1.1.1.a. Zaman boyutunda analiz

Titreşim sensörlerinden alınan bilgileri zaman boyutunda inceleyen en temel ve en ucuz yöntemlerden biridir. Titreşim dalga şeklinin belirli kısımlarına ait istatistiksel parametreleri gözlemlenerek karar verilir. En sık kullanılan istatistiksel parametreler; tepe değeri, etkin değer (rms), kabarma faktörü ve basıklık momentidir. Verilen bu parametreler arızalı rulmanlar için normal değerlerden daha büyük değerdedirler. Tepe ve etkin değerler kullanılarak sağlam rulman için çalışma bölgesi çıkartılır. Diğer taraftan kabarma faktörü ve basıklık moment değeri ise titreşim sinyalinin genliği ile ilgilidir. Ayrıca bu değerlerin hıza ve yük durumuna da bağlı olmadığı görülmüştür. Sonuç olarak; zaman boyutunda analiz yöntemi günümüzde rulmanlara

ait bozulmaları tespit etmede kullanılan yöntemlerden biridir. Şekil 1.3 'te normal ve arızalı durumdaki rulmanlara ait titreşim sinyallerinin zaman boyutundaki grafiği verilmiştir (Ocak, 2004).



Şekil 1. 3. Titreşim sinyalinin zaman boyutunda analizi

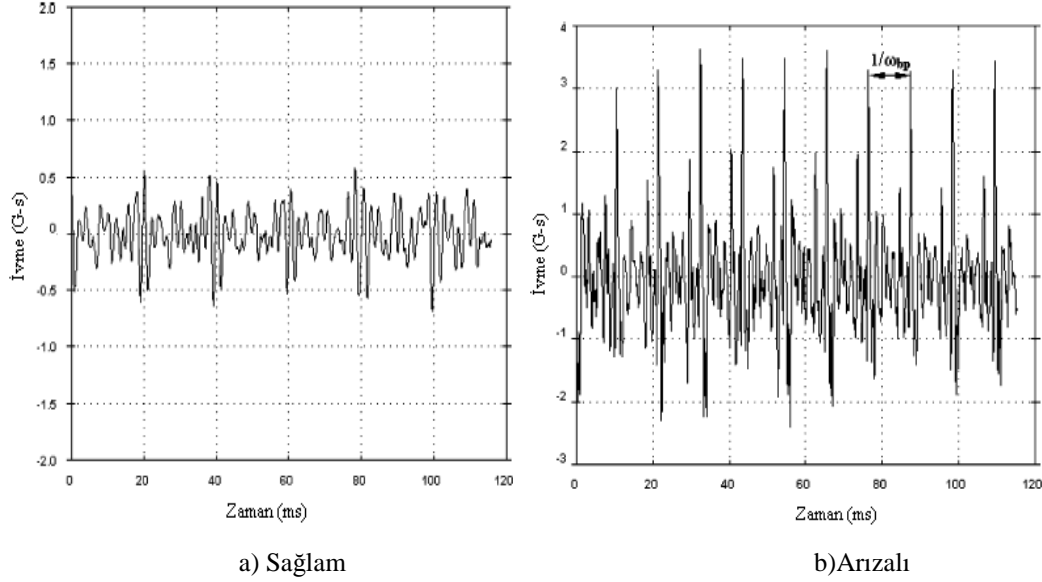
Şekil 1.3 incelendiğinde arızalara ait bozulmaların birbirinden çok net ayırt edildiği görülmektedir. Özellikle dış yüzey arızası için oluşan bozulmalarda bir periyodiklik görülmektedir.

#### 1.1.1.b. Frekans boyutunda analiz

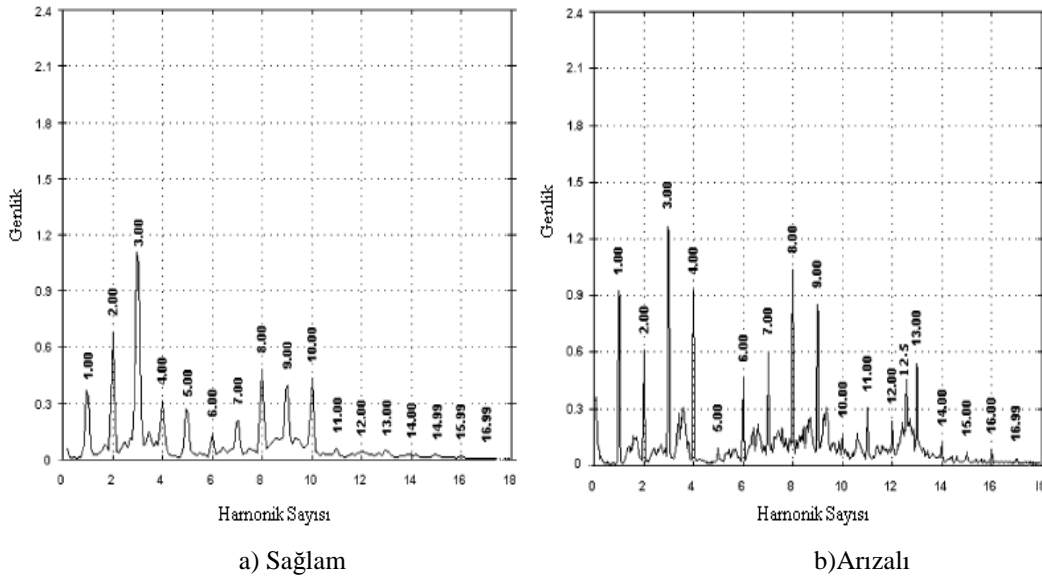
Bir periyodik fonksiyonu oluşturan harmonik fonksiyonları ayırım metoduna Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) denir. Fourier Serisi; periyodik bir sinyali meydana getiren, basit harmonik sinyallerin oluşturduğu seridir. Bu çevirim sonucu belirlenen harmonik sinyallerin, frekans ekseninde dizildiği grafik HFD spektrum grafiği olarak anılır. Bu metotta titreşim sinyalleri zaman boyutu yerine frekans boyutunda HFD yapılarak incelenir. Bu yöntemde rulmanlarda meydana gelen bozulmalara ait frekanslar bilinmeli veya tahmin edilmelidir. Böylece herhangi bir kısımda arıza oluştuğunda o arızaya ait frekans ve harmonikler kolayca algılanabilir. Oluşan arızaya ait tepe değer frekansı etrafında yan bandlar oluşmaktadır. Rulman arızaları HFD grafiğinde mekanik çözülme gibi düzensiz yığıntılı vuruntular verir. Şekil 1.4



ve 1.5' de sırasıyla motor iç yatağına ait sağlam ve arızalı durumda titreşim dalga formu ve bu titreşim sinyallerine ait spektrum grafiği verilmiştir (Orhan ve ark.,2006).



Şekil 1. 4. Motor iç yatağına ait titreşim dalga formu



Şekil 1. 5. Motor iç yatağına ait titreşim spektrum grafiği

Şekil 1.4 incelendiğinde arızalı durumdaki dalga formunda kısa süreli darbeler oluştuğu görülmektedir. Oluşan darbe frekansının ise arıza frekans değerine eşit olduğu görülmektedir. Şekil 1.5' deki spektrum grafiği incelendiğinde ise düşük harmoniklerde genlik artışı, yüksek harmoniklerde ise belirgin yanbandların oluştuğu görülmüştür.

### 1.1.1.c. Zaman-Frekans boyutunda analiz

HFD sinyalin frekans karakteristiği hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Böylelikle zaman boyutundan frekans boyutuna geçilerek sinyal hakkında daha çok bilgi sahibi olunurken zaman boyutunda oluşan kayıplar engellenmiş olur. Zaman-Frekans boyutundaki analiz yönteminin en büyük avantajı ise her iki analiz tipinin de özelliklerini kullanarak sinyalin geçici durumu hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olunmasını sağlamasıdır. Bu yöntemin en sık kullanılan analiz dönüşümleri; Anlık Frekans Dönüşümü; Wigner-Ville Dağılımı ve Dalgacık Dönüşümüdür. Döner elektrik makinalarında gürültü seviyesinin az ancak frekans birleşenlerinin çok olduğu arızalar için en sık kullanılan yöntemlerdir. Ancak Dalgacık dönüşümü diğerlerine göre daha sık kullanılmaktadır (Ocak, 2004).

Dalgacık teorisi, Haar (1909), Franklin (1928), Calderon ve Zygmund (1952) gibi matematikçiler tarafından uzun yıllardan beri çalışılmasına rağmen, mühendislikteki uygulamaları 1980'li yıllardan itibaren olmuştur. Bu, Morlet'in (1982) sismik işaretlerin analizinde dalgacıkları kullanmasıyla başlamıştır. Daha sonra bunu Grossman ve Morlet (1984), Daubechies (1988), Mallat (1988), Rioul ve Vetterli'nin (1991) detaylı bir matematiksel analizi takip etmiştir. Genişleyen ve daralan uzunlukta pencere fonksiyonları kullanılarak durağan veya durağan olmayan bir işaretteki hem zaman hem de frekans (ölçek) bilgisini bir arada elde etmeyi sağlayan dalgacık analizi, birçok mühendislik alanında kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümünün çoklu çözünürlük özelliği, çeşitli hatalar nedeniyle sistemde oluşan geçici durumların analizi için uygundur. Çok çözünürlü dalgacık analizinin elektrik motorlarındaki arıza tanısında kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Dowling (1993), dalgacık dönüşümü gibi durağan olmayan işaret işleme tekniklerinin makina durum izleme ve hata tanısında kullanılma potansiyelinin olduğunu göstermiştir. Motorun yol alma sırasındaki akım işaretine uygulanan zaman-frekans analizi tekniği vasıtasıyla sağlıklı ve bozuk makinanın ayırt edilebilme özelliği ise Burnett ve ark., (1995a) tarafından verilmiştir. Ayrıca Burnett ve Watson (1995b) kalkıştaki akımın analizinin motor sağlığı hakkında bilgi verdiğini ve rotor hatalarını motoru tam yükte işletme gereği olmadan da

tanılabileceğini göstermiştir. Kalkış sırasında motor hızlandığı için kayma değeri sabit değildir. Bu yüzden hata frekansı bileşenleri durağan değildir. Motor sürekli durumdaki hızına erişirken durağan olmayan hata bileşenleri izlenerek başlamakta olan kırık rotor çubuğu tespit edilmiştir.

#### **1.1.1.d. Yüksek dereceli spektral analiz**

Bu yöntem mevcut olan sinyalin değişik frekanslarının birbirlerine göre olan faz bağıntısını ifade eder. Faz bağıntısının büyük değeri mevcut rulmanda hata olduğunu işaret eder. Dönen tip bilyalara sahip rulmanlarda hatanın tam yerinin tespiti için yapılan uygulamalı çalışmalarda bu yöntemin etkili olduğu görülmüştür. McCormick ve Nandi (1999); hata teşhisinde ikili ve üçlü spektral analizlerin performanslarını izlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları güç spektrali ve istatistiksel yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Bu teknik uygulamada kolay olması ve hatanın durumu hakkında bilgi vermesinden dolayı kullanışlıdır (Ocak, 2004).

#### **1.1.1.e. Yapay sinir ağları yaklaşımı**

Bu yöntemde rulman arızası problemi desen tanıma problemi olarak ele alınmıştır. Titreşim sinyallerinin özelliklerini açığa çıkarmak için özellik açığa çıkarma yöntemi kullanılmaktadır. Daha sonra rulmanın durumu hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlayacak bu özellikler (normal, hata1, hata2, vb.) Yapay Sinir Ağını (YSA) eğitmekte kullanılmaktadır. YSA'nın performansı büyük oranda kullanılan özellik çıkarma yönteminin verilerinin hassasiyetine bağlıdır.

Subrahmanyam ve Sujatha (1997) çalışmalarında; rulmanlarda oluşan arızanın yerinin tespiti için; çok katmalı ileri beslemeli ve hata geri yayılmalı (HGY) olarak eğitilen teknik ve denetimsiz uyarlanabilir rezonans (DUR) tabanlı yapay sinir ağı tekniğini kullanmışlardır. Titreşim bilgileri sağlam ve arızalı rulmanlar için ayrı ayrı sabit-değişken yük ve hızlarda elde edilmiştir. Sinir ağını eğitmekte kullanılacak istatistiksel parametreler belirlenmiştir. Kullanılan ağlardan HGY rulman hataları teşhisinde %95'e varan performans gösterirken DUR ağı ise daha hızlı ve %100'e yakın bir performans sergilemiştir.

Li ve ark., (2000) yapmış oldukları çalışmalarında; rulmanların ve titreşimlerinin motor performansı üzerine olan etkisini açıklamışlardır. Motor uygulamalarında rulmanlara bağlı olarak birçok hata meydana gelmektedir. Yazarlar ilk olarak rulman arızalarında gözüken rulman titreşim frekansının özelliklerini incelemişlerdir. Daha sonra yapay sinir ağları tabanlı zaman frekans boyutundaki analiz sonuçlarını kullanan bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Benzetim ve gerçek uygulama sonucu vardıkları kanaate göre; yapay sinir ağları ile değişik tip motorlara ait titreşim sinyalleri ölçülerek ve yorumlanarak arıza tespitinde etkili bir şekilde kullanılabilirdiğini benzetim ve gerçek uygulama sonuçları ile göstermişlerdir (Ocak, 2004).

#### **1.1.1.f. Model tabanlı yaklaşımlar**

Bu tür yöntemler mekaniksel sistemleri matematiksel olarak modellemeyi öngörürler. Böylelikle rulman hatasından dolayı meydana gelecek cevaba ulaşmak daha kolay hale gelir. Ayrıca önerilen model ile balansızlık, eksenden kaçıklık vb. arızaların toplam etkisini de görmek mümkündür. Sistemi doğru modellemek ancak sistem hakkında detaylı bilgi sahibi olmayı gerektirmektedir.

Afshari ve Loparo (1998) model tabanlı yaklaşımı rotor rulman sistemlerindeki hata teşhisinde kullanmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada tek boyutlu çoklu serbestlik derecesine sahip bir model geliştirmişlerdir. Rulmanın iç ve dış yüzeylerinde meydana gelen hataların teşhisi için “Algılanabilir Filtre Tasarımı” teorisine dayanan 2 adet çıkış tanımlamışlar ve sonuçları simüle etmişlerdir (Ocak, 2004).

Titreşim analizi rulman arızaları tespitinde en sık kullanılan etkili bir yöntem olmasına karşın ilave sensörlere ihtiyaç duyduğundan kullanım alanını kısıtlar. Özellikle kritik noktalarda çalışan örneğin nükleer reaktörlerdeki soğutma pompaları gibi motorlara ulaşmak oldukça zordur. Bundan dolayı motorda oluşan mekanik ve elektrik arızaların motor akımlarının izlenerek tespit edilmesi daha kolay olmaktadır.

### 1.1.1.g. Motor akım işaretlerinin izlenmesi

Rulman arızaları titreşim frekansları ile ilgili olduğundan rulman geometrisi ve rotor hızı bilinirse kolaylıkla hesaplanabilir. Titreşim frekansları kendini akım spektrumunda modülasyon frekansı olarak gösterir, bundan dolayı akımlar izlenerek bu bilgiye ulaşmak kolaydır. İç rulman bileziği arızası, dış bilezik arızası ve bilya arızası gibi arızalar makinada titreşime sebep olurlar. Bu tür arızalar zamanla rotor ile stator arasındaki hava boşluğunda dengesizliğe neden olurlar. Hava boşluğu boyunca oluşan osilasyonlar burada oluşan akı yoğunluğunda değişiklik meydana getirir. Akı yoğunluğunun değişmesi makinanın indüktansını değiştirir ve stator akımında harmonikler oluşmasını sağlar.

Ayaz ve Şeker (2001) asenkron motorlarda öngörülü bakım teknolojisine dayalı, rulman arızasının gelişimi üzerine bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Rulman arızası, hızlandırılmış eskitme süreçleri ile yapay olarak oluşturulmuştur. Motordan alınan titreşim ve akım işaretlerinin istatistiksel ve dalgacık analizi sonucu rulman arızasına ilişkin özellik çıkarımı yapılmıştır. Bu işaretlerin bir arada değerlendirilmesi ile koherens fonksiyonu tanımlanarak rotor eksenel bozukluğunu gösteren en baskın frekans değeri belirlenmiştir.

Schoen ve Habetler (1993) yapmış oldukları çalışmada; Kliman'ın dinamik eksenden kaçıklık hatası için kullandığı eşitliklerle titreşim sinyallerinin akım spektrumunda belirlenebileceğini ortaya koymuşlardır. Akım frekansının karakteristiği titreşim sinyalinin karakteristiğine bağlıdır ve şu şekilde hesaplanır;

$$f_{af} = |f_e \pm mf_t| \quad (1.1)$$

Güç sisteminin temel frekansı olan  $f_e$ , taşıyıcı frekans, titreşim frekansı olan  $f_t$  ise modülasyon frekansı ve  $m$  ise katsayı olarak görev yapar.



Şekil 1. 6. Döner tip rulman geometrisi

Şekil 1.6' da döner tip bir rulmana ait resim görülmektedir. Rulmanlarda meydana gelen arızalar rotor hızı ve aşağıda verilen rulman parametreleri ile hesaplanır.

*Dış Bilezik Arıza Frekansı:* Rulmanlarda oluşan dış bilezik arızası bilya boyutu ve karakter sıklığı sabit olduğu için rotor hızıyla ilgilidir. Dış bileziğinde bir kusur bulunan bir rulmanda, frekans piklerinin dış bilezik bilya geçiş frekansı, onun harmonikleri ve yan bantlarında oluşması beklenir. Dış bilezik kusur frekansı veya harmonikleri sistemin doğal frekansı ile çakıştığında şiddetli (genliği yüksek) titreşimler gözlenir (Ocak, 2004). Dış bilezikde oluşan arıza frekansı Eşitlik 1.2 ile hesaplanır.

$$f_{da} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_B \cos \alpha}{D_p}\right) \quad (1.2)$$

Eşitliklerde kullanılan  $D_p$  rulman dış çapını,  $D_B$  bilya çapını,  $n_b$  bilya sayısını,  $\alpha$  temas açısını ve  $f_r$  ise rotor frekansını temsil etmektedir.

*İç Bilezik Arıza Frekansı:* İç bilezik yuvarlanma yüzeyinde bölgesel bir kusur bulunan rulmanda, dış bileziğinde kusur bulunan rulmana göre daha karmaşık titreşimler görülür. Çünkü hatanın kendisi de mil hızıyla dönmektedir. Bu durumda titreşimlerin mil dönme frekansı, iç bilezik bilya geçiş frekansı, harmonikleri ve yan bantlarında (kombinasyonları) oluşması beklenir. İç bilezik kusur frekansının genliği dış bilezik kusur frekansına göre daha düşüktür. Çünkü iç bilezik kusurunun

oluşturduğu titreşim sinyali ivme algılayıcıya varıncaya kadar yuvarlanma elemanları, dış bilezik ve yatak yuvasından geçer. Bu süre içinde sinyal sönümlenir ve genliği oldukça düşer. Rulman iç bilezik arıza frekansı Eşitlik 1.3 ile ifade edilir (Ocak, 2004).

$$f_{ia} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_B \cos \alpha}{D_p}\right) \quad (1.3)$$

*Bilya Arıza Frekansı:* Rulman bilya arıza frekansı Eşitlik 1.4' de görüldüğü gibidir.

$$f_{ba} = \frac{D_p}{2D_B} f_r \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2 \alpha}{D_p^2}\right) \quad (1.4)$$

*Kafes Arıza Frekansı:* Frekans ortamında kusur frekansı ve harmoniklerinin yanında görülebilen diğer frekans türü, mil dönme frekansı ile rulman kusur frekanslarının oluşturduğu yanbantlardır. Kafeste bir kusur olduğunda kafes frekansı, harmonikleri ve yanbantları oluşacaktır. Kafes arızası bilyaların düzensizliğinden meydana gelir ve Eşitlik 1.5' de görüldüğü gibi hesaplanır (Ocak, 2004).

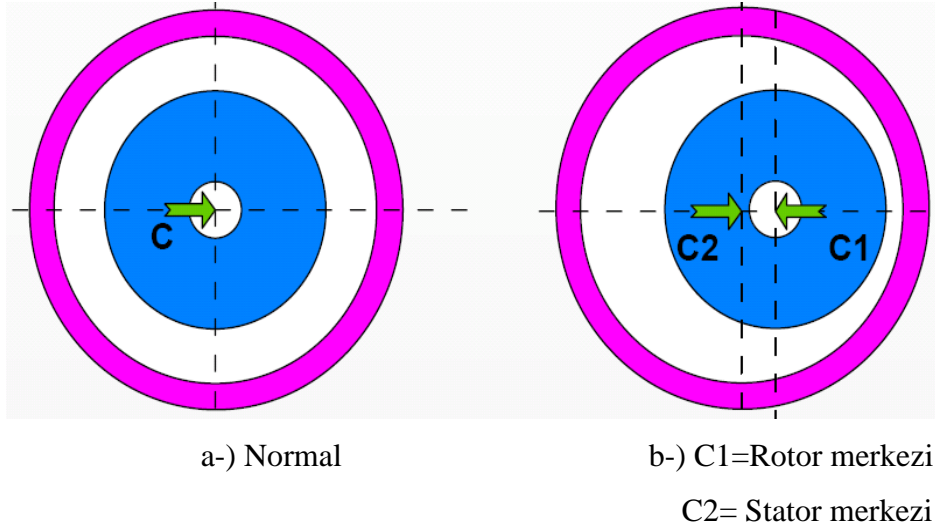
$$f_{ka} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_B \cos \alpha}{D_p}\right) \quad (1.5)$$

### 1.1.2. Hava aralığı aksenal kaçıklığı arızası

Eksenden kaçıklık hatası; stator ve rotor arasındaki eşit olmayan hava boşluğu sonucu oluşan bir durumdur (Vas, 1993). Üreticiler tarafından müsaade edilebilir eksenden kaçıklık oranı %5–10 arasındadır. Ancak üreticiler motorlarda oluşan titreşim ve gürültü seviyesini en azda tutmak için eksenden kaçıklık miktarını olabildiğince düşürmeye çalışırlar. Eksenden kaçıklığın miktarı arttıkça bunun sonucu olarakda rotorun stator sargılarına veya karkasına sürtme durumu ortaya çıkabilir. Eksenden kaçıklığa sebep olan başlıca etkenler şunlardır;

- Motor milinin eğilmesi,
- Motor kaplinlerinin doğru olarak pozisyonlanamaması,
- Rulman aşınmalarıdır.

Statik ve dinamik olmak üzere 2 çeşit eksenden kaçıklık arızası vardır.



Şekil 1. 7. Eksenden kaçıklık tipleri

*Statik eksenden kaçıklık:* Rotor ekseninin merkezi (C1) aynı zamanda dönüş ekseninin de merkezi ise bu durum statik eksenden kaçıklık arızasıdır. Bu durumda, rotorun her iki yatağında titreşim ve faz açısı değerleri birbirine yakın olacaktır. Bu durum Şekil.1 7'b de görülmektedir. Statik kaçıklığa stator nüvesinin ovalliği veya rotor konumunun yanlış konumlandırılması sebep olabilmektedir (Nandi ve ark., 2005).

*Dinamik eksenden kaçıklık:* Bu arıza çeşidinde stator merkezinin dönüş merkeziyle aynı olması durumudur. Rotor ekseni ile dönüş ekseni çakışık değildir ve rotor ile birlikte dönen bir hava boşluğu mevcuttur. Bu olaya rotor milinin eğikliği, rulman aşınması, mekanik rezonans vb. gibi etkenler sebep olabilmektedir (Nandi ve ark., 2005).

Gerçekte hem statik hem de dinamik eksenden kaçıklık arızaları tek başlarına değil birlikte olmaktadır. Oluşan bu karışık eksenden kaçıklık; stator ve rotor arasındaki hava boşluğunda meydana gelen akı dağılımını değiştirmektedir. İndüklenen akımın dalga şeklinde bunlar kendini harmonikler olarak göstermektedir.

Vas (1993) yapmış olduğu çalışmalarda motor da meydana gelen bu arızaların motor akım işaretlerinin izlenerek tespit edilebileceğini iddaa etmiştir. Cameron ve ark., (1986) ise çalışmalarında statik eksenden kaçıklık arızasının rotor yarıklarının



meydana getirdiği titreşimlerin değişimiyle, dinamik eksenden kaçıklık arızasının ise akım ve titreşim sinyallerinde meydana gelen frekans birleşenlerinin kendine özgü görünümüyle tespit edilebileceğini göstermiştir. Yine bu araştırmacı çalışmasında asimetriklikten doğan frekansın Eşitlik 1.6' da görüldüğü gibi hesaplanabileceğini ortaya koymuştur.

$$f_{ecc} = f_s \left[ (kQ_2 \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n_w \right] \quad (1.6)$$

$f_s$ ,  $Q_2$ ,  $n_d = 0, n_d = 1, 2, 3, \dots, s, p, k, n_w$ , sırasıyla besleme frekansı, rotor çubuğu sayısı, statik ve dinamik eksenden kaçıklık derecesini, kayma, çift kutup sayısını, sabit sayıyı ve motoru besleyen güç kaynağından oluşan stator zaman harmoniğinin derecesini ( $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \text{vb} \dots$ ) temsil eder.

Obaid ve Habetler (2003), Dorrell (1993), Nandi ve Toliyat (2005) ise statik ve dinamik eksenden kaçıklığın akımda yan bantlar oluşturduğunu ve bu yan bant frekanslarının akım spektrumunda Eşitlik 1.7 ve 1.8 ile hesaplanabileceğini göstermişlerdir.

$$f_{ecc,i} = f_s \left[ 1 \pm k \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (1.7)$$

Sinüsoidal kaynaktan beslenen bu harmoniklerin etkileşimi sonucu ise güç ve tork spektrumunda yeni harmonikler oluşturur. Bunun frekansı ise Eşitlik 1.8 ile hesaplanır.

$$f_{ecc,p} = f_s k \frac{(1-s)}{p} \quad (1.8)$$

Eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılan akım sinyallerinin izlenmesi tabanlı yöntemlerden biri ise Cardossa ve Saraiva (1993) tarafından detaylı olarak çalışılan Park vektörü yöntemidir. Bu yöntemde sağlam makine için oluşturulan vektörün çembere yakın bir görüntüsü vardır. Ancak makinada arıza belirlemeye başlamasıyla bu vektörün şekli arızanın derecesine bağlı olarak kutuplardan basılarak bozulmuş bir şekil görüntüsünü alır (Nandi ve ark., 2005).

Akar ve Çankaya (2009) yapmış oldukları deneysel çalışma ile SMSM' de eksenden kaçıklık arızasını incelemiştir. Araştırmacılar eksenden kaçıklık arızasının akım ve gerilim spektrumu üzerine olan etkisini spektrum, akım-yüzey ve gerilim yüzey grafiklerinde ortaya koymuşlardır. Arızanın spektrum grafiklerinde rotor frekansının katları şeklinde yanbandlar oluşturduğunu göstermişlerdir.

## 1.2. Elektriksel Arızalar

### 1.2.1. Stator ile ilgili arızalar

Stator; elektrik motorlarının sargılarının yerleştirildiği, yaklaşık 0,35 mm kalınlığındaki birer yüzleri silisyumlu paket saçların preslenerek meydana getirildiği ve üzerinde oluklar bulunan hareket etmeyen kısımdır. Üç fazlı sağlam bir asenkron motora ait stator yapısı Şekil 1.8' de görülmektedir.



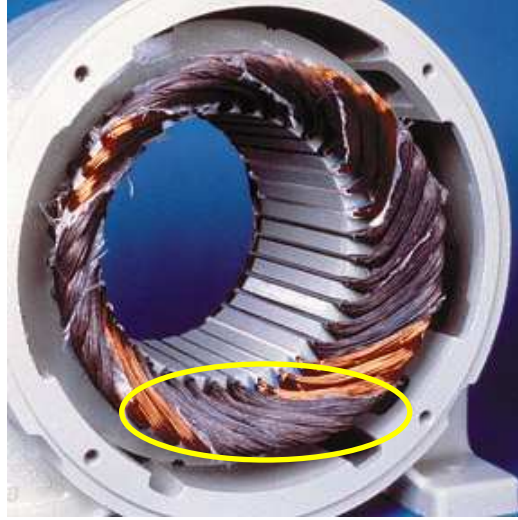
Şekil 1. 8. Sağlam stator ve sargıları

Yapılan birçok çalışmada motor stator hatalarına termal, elektriksel ve çevresel olmak üzere birçok etkinin sebep olduğu görülmüştür. En çok görülen stator sargı hataları şunlardır:

- Tek Faz Sargı Hatası,
- Faz-Faz Kısa Devre Hatası,
- Sarım-Sarım Kısa Devre Hatası,
- Faz-Toprak Kısa Devre Hatası.

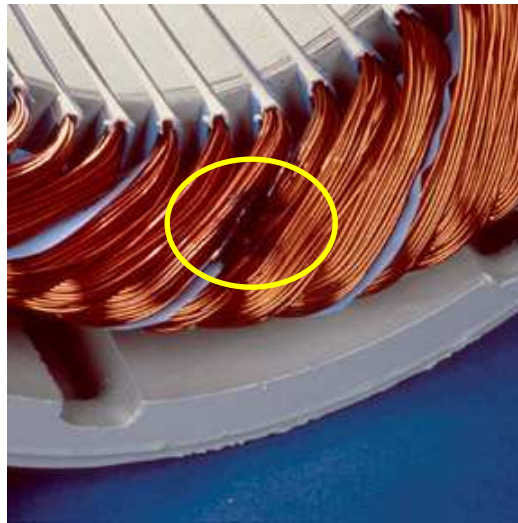
### 1.2.1.a. Stator sargı arızaları

*Tek Faz Sargı Hatası:* Genellikle motoru besleyen güç kaynağının bir fazında açıklık olması sonucu görülen arızadır. Bu olaya genellikle o fazın sigortasının devre dışı kalması, kontaktörün devre dışı kalması, besleme kablosunda kopma veya standartlara göre yapılmamış bağlantı sebep gösterilebilir ([www.easa.com](http://www.easa.com)).



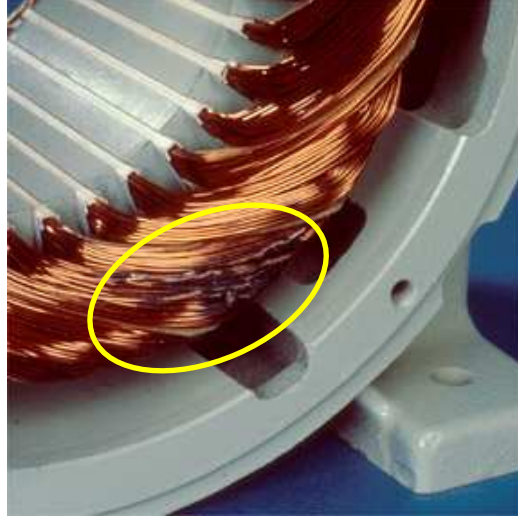
Şekil 1. 9. Tek faz sargı hatası

*Faz-Faz Kısa Devre Sargı Hatası:* Değişik fazlara ait aynı veya farklı oluklardaki sargıların yalıtımının yitilmesi sonucu birbirleri ile temasında meydana gelen arıza türüdür. Bu tür arızalara genellikle nem, aşınma, titreşim ve gerilim kaynağı sebep olur.



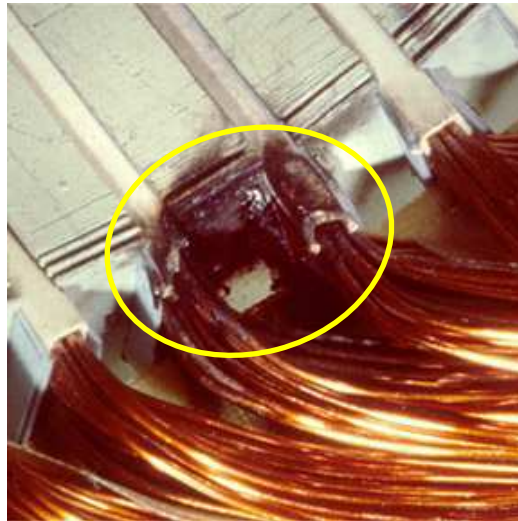
Şekil 1. 10. Faz-Faz kısa devre sargı hatası

*Sarım-Sarım Kısa Devre Hatası:* Bir faz sargı bobine ait sibirlerin kendi aralarında oluşturduğu arızadır. Yine bu arıza çeşidine nem, aşınma, titreşim ve gerilim kaynağı sebep olmaktadır.



Şekil 1. 11. Sarım-Sarım kısa devre hatası

*Faz- Toprak Kısa Devre Hatası:* Motor faz sargılarının birinin veya birden fazlasının yalıtkanlığını kaybederek motorun topraklanmış kısmı ile iletme geçmesi olayıdır. Çoğunlukla sargıların yerleştirildiği oluk kenarlarına gelen yerlerdeki bobinlerin yalıtımını kaybetmesinden kaynaklanır.



Şekil 1. 12. Faz- Toprak kısa devre hatası

Yukarıda anlatılan arızalara birçok etkenler sebep olmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar incelendiğinde 4 temel faktörün ön plana çıktığı görülmektedir. Bunlar termal, elektriksel, mekaniksel ve çevresel zorlanmalardır (Arfat ve ark., 2005).

*Termal Zorlanmalar:* Bu tür zorlanmalar termal yaşlanma ve termal aşırı yüklenmeden kaynaklanabilmektedir. Çünkü sargılarda meydana gelen her  $10^{\circ}C$  'lik artış sargı ömründe yaşlanmalara sebep olur. Yalıtım sisteminin bütünlüğünü kaybetmesi sonucunda diğer yalıtkan malzemelerde çevresel ve mekaniksel etkilere direnç göstermekte başarısız olurlar. Sonuç olarak bu tür zorlanmalara daha fazla karşı koyamayan sargı yalıtkanları iletken hale geçerek sargı hataları meydana getirirler. Termal yaşlanmanın önüne geçmekte genellikle iki yöntem kullanılır. Bunlar; çalışma sıcaklığını düşürmek veya kullanılan yalıtım malzemesinin sınıfını artırmaktır (Arfat ve ark., 2005).

Termal aşırı yüklenmeye ise; uygulanan gerilimdeki değişiklikler, faz gerilimindeki dengesizlikler, aşırı çevre sıcaklığı, havalandırma yetersizliği vb. gibi etkenler sebep olmaktadır. Faz gerilimindeki yaklaşık % 3,5'lik bir düzensizliğin meydana getireceği akımdaki dalgalanma motor sargı sıcaklıklarında % 25'lik bir sıcaklık artışı meydana getirir. Bir diğer termal aşırı yüklenmeye sebepte motorun yol alma anında nominal akımının milindeki yüke de bağlı olarak 3–8 katı arasında bir akım çekmesidir. Yol alma süresinin normalinden uzun sürmesi sargı iletkenlerinin taşıyabileceğinden daha fazla bir akımla yüklenmesine, aşırı ısınmasına ve dolayısıyla da yalıtkanlığını kaybetmesine sebep olur.

Bir diğer husus da motorun konumlandırıldığı yerin temiz ve hava çıkışının sağlandığı kapaklarının etrafının açık olmasıdır. Aksi takdirde rotorun dönmesiyle meydana gelen sirkülasyondan doğan sıcak havanın dışarı atılması engellenmiş olur.

*Elektriksel Zorlanmalar:* Elektriksel zorlanmalar sargılarda dielektrik, korona, geçici gerilim değişimi gibi hataların oluşmasına neden olmaktadır. İletkenlerde oluşan bu elektriksel zorlanmalar genelde faz-faz, sarım-sarım ve faz-toprak hatasını oluştururlar. Korona olayı; 5 kilovoltluk bir gerilim altında çalışan motor sargıları arasında iyonize olarak bulunan gazlardan dolayı yaşanan deşarjdır. Buna sargıların

aşırı ısınması, kimyasal reaksiyonlar sebep olmaktadır. Geçici gerilim değişimi sonucunda ise sargıların ömürleri azalır veya sargılarda zamanından önce arızalar oluşmasını sağlar. Bu tür hatalar genelde; tekrarlanan bir veya çok fazlı faz- faz ve faz-toprak arızaları, akım sınırlama sigortaları, kapasitif özellikli anahtarlar, şalterlerin açılıp kapanması, yalıtım hataları ve değişken frekanslı sürücüler sebep olurlar (Arfat ve ark., 2005).

*Mekaniksel Zorlanmalar:* Bu tür zorlanmalar bobinlerin gevşek kalmasıyla enerjilendiğinde hareketlenmesinden ve rotorun statora sürtmesinden kaynaklanır. Sargılar üzerindeki güç üzerinden geçen akımdan dolayı her yol alma aşamasında en büyüktür. Bu durum sargılarda titreşime sebep olurken iletkenlerin de oluklardan dışarıya doğru hareketlenmesine sebep olurlar. Rotor ise rulman arızaları, mil eğilmesi, eksenden kaçıklık vb. gibi sebeplerden dolayı statora sürtebilir. Eğer sürtme sadece yol alma anında oluyorsa rotordaki kinetik enerji sargılara zarar vererek sargıların iletken hale geçmesine sebep olur. Bunun sonucunda ise faz-toprak arızası meydana gelir. Rotor tam hızında da statora belli bir noktadan sürtüyorsa örneğin olukların içinde bir noktaya o zaman da sürttüğü noktada da aşırı bir ısınma meydana gelir. Sargılardaki bu aşırı sıcaklık artışı sargı üzerindeki vernik tabakasını çatlatarak iletken hale geçmesine ve faz-toprak arızasının oluşmasına sebep olur (Arfat ve ark., 2005).

*Çevresel Zorlanmalar:* Motor elemanları arasında kir, nem, yağ vb. gibi yabancı materyallerin varlığı motorda ısı dağılımında azalma, beklenenden önce rulman arızaları ve yalıtım sisteminin zarar görmesine neden olurlar. Bunun için stator ve rotor yüzeyleri üzerinde nem ve kimyasal reaksiyona sebep olacak parçacıklar bırakılmaz. Diğer yandan oluşabilecek bir diğer problemde oluklar içindeki sargılarda nem ve rutubet kalma sorunudur. Bunun önüne de sarımı yapılan stator sargılarına zarar vermeyecek sıcaklıklarda fırınlanarak geçilir (Arfat ve ark., 2005).

### **1.2.1.b. Sürücü arızaları**

Yarıiletken teknolojisinin hızlı bir şekilde gelişimini sürdürmesi çoğu alanda olduğu gibi elektrik motorlarının sürülmesi ve kontrolü alanında da kendine hatırı sayılır bir yer edinmiştir. Ayarlanabilir hız sürücülerinde genellikle IGBT (Insulated Gate

Bipolar Transistor) kullanılır. Bu elemanlar sürme açısından MOSFET gibi davranırken güç iletimi açısından bipolar tranzistör gibi davranır. Hem sürmesi kolay hem de verimi yüksektir. Genelde bu tür elemanlar kıyıcı köprü devrelerde kullanılırlar. Ancak bunların çalışma mantığı anahtarlama dayanağı ve bu anahtarlama sürelerinin oranı, anahtarladıkları gerilimin ve akımın miktarı motorlarda ilave problemlere yol açarlar (Jouanne ve ark., 1996). Ayrıca endüstride kullanılan motor aksamları ve bağlantı ekipmanları direk hat bağlantısı ile çalışan motorlara göre dizayn edildiğinden sürekli olarak frekansı değiştirilen bu tür sürücülerde tam randıman vermezler.

Tüm bu zorluklara rağmen inverterlerin motor sürücüsü olarak kullanılmaları stator arızalarının gerçek zamanlı olarak tespitinde birçok olanaklar açarlar. İlk olarak birçok inverter beslemeli sürücüler üzerlerinde akım sensörü, aşırı akım koruması, tork kontrol gibi ileri seviye kontrol algoritma ve donanımlarını barındırırlar. İkinci olarak da bu tür sürücüler ya mikro kontrolörlerle ya da sayısal işaret işlemcilerle kontrol edilirler ki bu ise motorların gerçek zamanlı izlenmeleri ve hata tespitinde kullanıcıya büyük olanaklar sağlarlar.

### **1.2.1.c. Stator arızaları teşhis yöntemleri**

Elektrik motorlarının stator arızalarıyla ilgili birçok araştırmacı değişik teşhis yöntemleriyle birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları değişik parametrelere göre 13 kategoride sınıflandırılabilir.

*1. Manyetik Akının İzlenmesi:* Stator arızası nedeniyle hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğunun bozulması mil üzerinde eksenel olarak bir akı dağılımına neden olur ve bu akı dağılımı mil etrafına yerleştirilecek bir bobin ile anlaşılabilir. Penman ve ark., (1994) mil boyunca asimetric olarak yerleştirilecek 4 adet bobinle kısa devre olan sarımın yerinin açığa çıkarılabileceğini göstermiştir. Bowers ve Piety (1993) ise hava boşluğundaki akı dağılımının yine uygun olarak yerleştirilmiş motor bobinleri ile algılanabileceğini göstermişlerdir.

*2. Titreşimin İzlenmesi:* Stator nüvesinde meydana gelen titreşim; sarım hatasının, tek faza kalma ve besleme gerilimindeki dengesizliğin bir fonksiyonudur.

Elektromanyetik güç ve stator arasındaki rezonans elektrik makinalarında meydana gelen gürültünün ana kaynağıdır. Titreşimin izlenmesi statora ait bu arızalarda bilgi sahibi olmamızı sağlar (Arfat ve ark., 2005).

3. *Gürültünün İzlenmesi:* Elektrik motorlarının gürültü spektrumu incelendiğinde havalandırmadan dolayı oluşan gürültü ve akustik gürültünün baskın olduğu görülmektedir. Havalandırma gürültüsü motor içerisindeki dönen parçaların meydana getirdiği hava akımı ile ilgilidir. Bir diğer gürültü kaynağı ise (Singal ve ark., 1987) stator demir kısımlarında Maxwell eşitliklerine göre oluşan manyetik alandan dolayı meydana gelen titreşim ve onun meydana getirdiği sestir. Aerodinamik ve mekaniksel gürültüden dolayı oluşan ses gücü seviyesi yaklaşık 12 dB civarındadır. Motor hızının artması bu oranı artırır (Arfat ve ark., 2005).

4. *Ani Açısız Hızın İzlenmesi:* Elektrik motorlarında meydana gelen birçok asimetriklik hatası stator nüvesinin titreşimi izlenerek ve ani açısız hız tekniği kullanılarak tespit edilebilir. Stator sargılarında arıza veya dengesiz besleme geriliminde titreşim sinyali besleme frekansının civarında bileşenler içerir. Bu bileşen genellikle besleme frekansının 2 katında kendini gösterir (Arfat ve ark., 2005).

5. *Sıcaklığın İzlenmesi:* Bu yöntemde sıcaklık sensörü sargılar üzerine veya sargıları birbirinden ve nüveden elektriksel olarak yalıtılan malzemenin içine yerleştirilir. Sıcaklık kestirimi; termal model veya stator direnci modeli tabanlı elde edilir. Sensörlerden alınan sıcaklık bilgisine ve bilginin motorun çalışma şartlarına göre değişimine bakılarak stator yalıtım ömrü hakkında tahmin yapılır (Arfat ve ark., 2005).

6. *Hava Aralığı Torkunun İzlenmesi:* Döner makinalarda hava aralığı torku motor akımına ve akısına bağlı olarak oluşur. Hava boşluğu harmoniklerindeki frekans değerinin sıfır olması motorun normal olduğunu gösterir. Asenkron motorlarda ileri yönde stator döner alanı sabit bir tork üretirken geri yönde stator döner alanı rotor döner alanı ile etkileşimi sonucu harmonik torku üretir. Bunun anlamı stator sargı veya akımında 2 temel torkun bulunduğudır. Bu torkların izlenmesi ve birbirine göre



durumu stator sargılarının durumu hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar (Arfat ve ark., 2005).

*7. Akımın İzlenmesi:* Motor akım işaretlerinin izlenmesi ve bu işaretlerin spektral analizi motorda var olan veya yeni başlamış arızaların yerinin tespitinde en çok kullanılan yöntemdir. Birçok araştırmacı yapmış oldukları çalışmalarında hata teşhisinde; akımın ardı sıra gelen birleşenlerini, rotor akımını ve hat akımının radyo frekansı birleşenini incelemişlerdir (Arfat ve ark., 2005).

*8. İndüklenen Gerilimin İzlenmesi:* Motor mili boyunca gerilim indüklenir ve bu durum stator nüvesinden veya sargılardaki bozulmadan anlaşılabilir. Ancak bu gerilimin durum izleme açısından yararlı bir parametre olduğu henüz ispat edilememiştir. Çünkü bu gerilimi ölçmek için henüz güvenilir ve sağlıklı bir yöntem bulunamamıştır. Ani faz gerilimlerinin toplamının efektif değerindeki değişimi motor sargılarında kısa devre arızasının varlığını ortaya koyar. Bu ise stator arızalarının tespitinde önemli bir yoldur (Arfat ve ark., 2005).

*9. Ani Gücün izlenmesi:* Motor sargılarında herhangi bir arızanın olması etkisini motor gücünde gösterir. Gücün spektral analizinde bu durum direkt olarak ana frekans etrafında bozucu etki olarak kendini gösterir. Ani gücün izlenmesi motor güvenilirliğini artırması açısından önemli bir unsurdur (Arfat ve ark., 2005).

*10. Kısmi Deşarjın İzlenmesi:* Kısmi deşarj; elektriksel yalıtımın eksikliğinden veya hatasından dolayı oluşan küçük bir elektriksel deşarjdır. Bu yöntem ilk olarak 1976 yılında hidroelektrik generatörlerin test edilmesinde kullanılmıştır. Daha sonraları sensörlerin kullanıma girmesiyle farklı teknikler geliştirilmiştir. Bozulmaya başlamış sargılarda normal sargılara göre yaklaşık olarak 30 kez veya daha üstü bir kısmi deşarj oluşmaktadır. Kısmi deşarj yöntemi kullanılarak arızalı ve bakıma ihtiyaç duyan sargıların tespiti kolaylıkla yapılabilmektedir (Arfat ve ark., 2005).

*11. Gaz Analiz Yöntemi:* Motor sargılarının elektriksel yalıtımında bozulmadan dolayı motor içerisinde karbon monoksit gazı üretilir. Bu gaz hava içerisinde soğuma etkisi yapar ve kızılötesi soğurma tekniği ile tespit edilebilir (Arfat ve ark., 2005).

Yüksek frekanslı darbe genişlik modülasyonu darbeleri gerilimde aşırı tepe değerleri meydana getirerek motor yalıtımının bozulmasında önemli rol oynarlar. Oluşan elektrostatik alan nedeniyle stator ile rotor arasındaki hava boşluğunda iyonizasyon meydana gelir. İyonizasyon ise sargılar üzerinde aşındırıcı etki yapar (Arfat ve ark., 2005).

*12. Kabarma Testi Yöntemi:* Bu yöntem sargı arızalarının tespiti için kullanılmaktadır. Bu yöntemde 2 adet özdeş yüksek genlik ve frekanslı gerilim motor 2 faz sargılarına eş zamanlı olarak uygulanırken diğer faz topraklanır. Osiloskop kullanılarak dalga şekilleri incelenir ve arızalı bobin veya bobin gruplarının yeri tespit edilir. Bu yöntem kullanılarak sarım-sarım yalıtım durumu veya arızası sezilebilir. Endüstride bu testlerin yapılması için çeşitli aletler mevcuttur (Arfat ve ark., 2005).

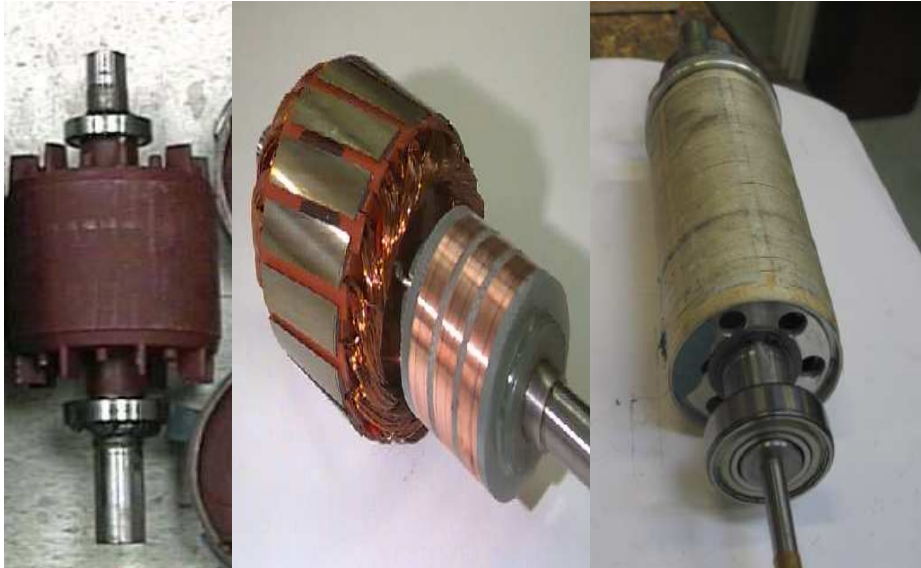
*13. Motor Devre Analizi:* Bu yöntemde ise; motor devresinin analizi yapılarak motordaki değişimler ve bozulmalar belirlenmektedir. Motor devresine küçük miktarda bir enerji uygulanır. Alınan çıkış bilgisine bakılarak sargılar hakkında yorum yapılır.

Yukarıda anlatılan yöntemlerin yanı sıra son zamanlarda artık bilimsel araştırmalar yapay zekâ tabanlı yaklaşımlara doğru eğilim göstermektedir. Bu yöntemlerin en önemli adımları sinyalin özelliğini açığa çıkarma, hata tespiti ve hatayı değerlendirmektir. Birçok yapay zekâ tabanlı yöntem vardır. Bunlardan bazıları; uzman sistemler, yapay sinir ağları, bulanık mantık, bulanık sinir ağları, genetik algoritmalar, uyarlanabilir yapay sinir ağları vb. dir.

### **1.2.2 Rotor ile ilgili arızalar**

Rotor elektrik makinelerinin dönen kısımlarıdır. Elektrik makinesinin yapısına bağlı olarak rotor yapısı da değişmektedir. Endüstride en sık kullanılan asenkron motorlarda genellikle kısa devreli rotor (sincap kafesli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere 2 çeşit rotor kullanılmaktadır. Yine endüstride özellikle servo kontrol işlemlerinde kullanılan sabit mıknatıslı motorlarda ise rotorda kalıcı tip

mıknatıslar kullanılmaktadır. Sincap kafesli rotorlarda; kalıpla preste kesilmiş olan silisyumlu demir saçlar paket edildikten sonra, rotor kanalları içine alüminyum eritilerek pres dökümle kısa devre kafes sargıları meydana getirilir. Rotorun 2 tarafına rotor çubuklarını kısa devre eden halkalarda, alüminyum döküm yapılırken küçük kanatçıklar meydana getirilir. Sargılı rotorda ise; rotor üzerindeki oluklara 3 fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilir.  $120^{\circ}$  faz farklı olan 3 fazlı sargılar yıldız veya üçgen bağlandıktan sonra çıkarılan üç uç rotor miline yalıtılarak yerleştirilen 3 bileziğe bağlanır. Sabit mıknatıslı rotorda ise rotor üzerindeki sargı veya kısa devre çubukları yerine sabit mıknatıslar kullanılmaktadır. Mıknatısların rotorun yüzeyine veya iç kısmına yerleştirilmesine göre rotorlar farklı isimlendirilirler. Şekil.1. 13'de 3 değişik tip rotor yapısı görülmektedir.



a-) Sincap kafesli

b-) Bilezikli

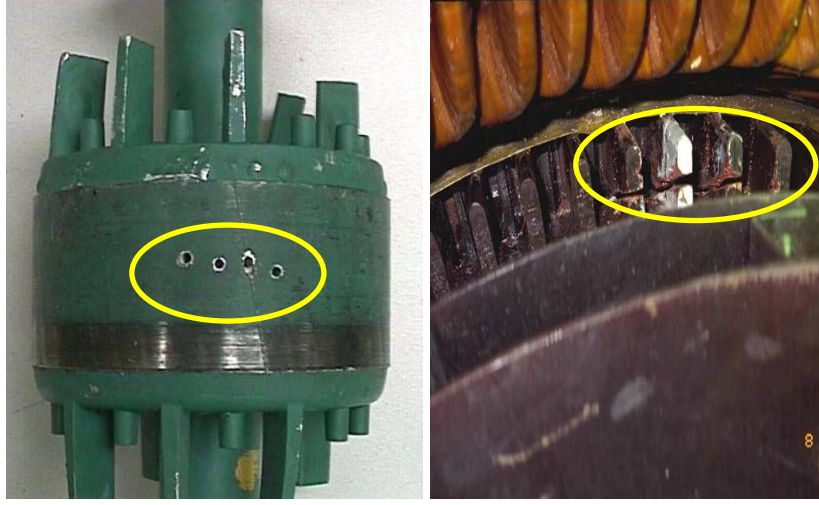
c) Sabit mıknatıslı

Şekil 1. 13. Değişik rotor yapıları

### 1.2.2.a. Rotor çubuğu kırığı ve kısa devre halkası arızası

Statora göre rotor yapıları yıllar boyunca çok az değişime uğramıştır. Sonuç olarak rotor hataları indüksiyon makinelerinin toplam hatalarının %5' ile %10'u civarındadır (Kliman ve ark., 1996). Endüstride kullanılan motorlarda sincap kafesli rotor yapısı daha fazla tercih edilmektedir. Zamanla bu rotorlarda çubuk kırılması veya kısa devre halkalarında arızalar meydana gelmektedir. Laboratuvar çalışmaları

için oluşturulan düzenekte rotor çubuğu kırığı hatası ve kısa devre halkası hatası Şekil.1.14' de görülmektedir.



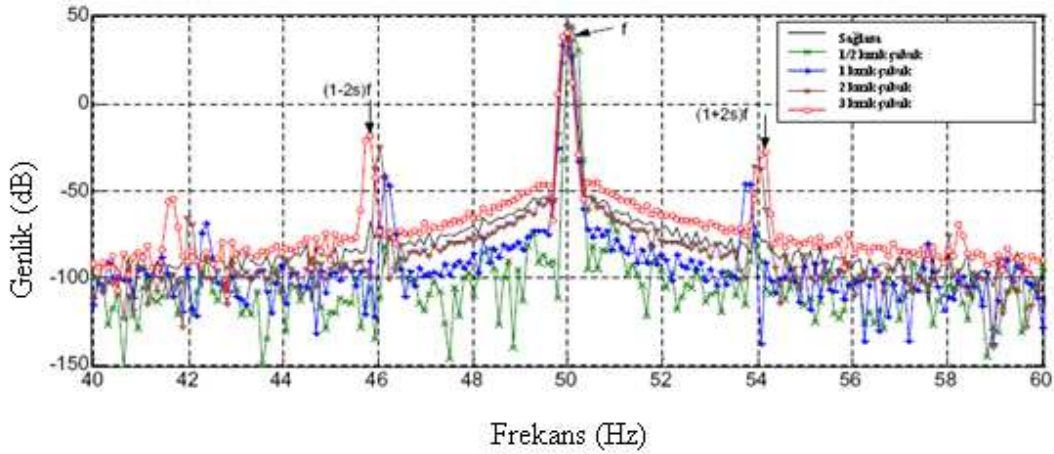
Şekil 1. 14. Rotor çubuğu kırığı ve kısa devre halkası hatası

Rotorda meydana gelen bu arızaların birkaç sebebi vardır. Bunlar:

- Termal olarak aşırı yüklenmeden dolayı oluşan kayıplar ve çubuklardaki gözenekler,
- Düzensiz manyetik çekimlerden dolayı oluşan gürültü, titreşim,
- Üretici hatasından dolayı oluşan hatalar,
- Motor milindeki yükün oluşturduğu tork, merkezkaç ve dairesel dönmeden dolayı oluşan hatalar,
- Nem, kimyasal, kir gibi çevresel şartlardan dolayı oluşan arızalar şeklinde sınıflandırılabilir.

Rotorda oluşan bu hataların teşhisi için birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Kliman ve ark., (1996), Thomson ve Stewart (1988), Flippetti ve ark., (1996) ve Elkasabgy ve ark. (1992), Çalış ve Çakır (2006) rotor çubuğu kırığı hatasının teşhisi için motor hat akımının spektral analizini kullanmışlardır. Tüm bu araştırmacılar ana frekansın etrafında yanbandların oluştuğunu ve bu yanbandların 1.9' daki eşitlikle hesaplanabileceğini ortaya koymuşlardır (Nandi ve ark., 2005).

$$f_b = (1 \pm 2s)f \quad (1.9)$$



Şekil 1. 15. Değişik sayıda rotor çubuğu kırığı hatasından dolayı oluşan yanband frekansları

Araştırmacılar Şekil 1.15' de oluşan bu yan bandlardan düşük frekanslı olanının rotor çubuğu kırığından, yüksek frekanslı olanının ise hızdaki dalgalanmadan olduğunu ifade etmişlerdir. Rotordaki kırık çubuk sayısı oluşan bu yanbandların genliğine etki etmektedir. Bu durum Eşitlik 1.10 ile ifade edilmektedir. Aynı zamanda motor yükünün eylemsizliğide bu ya bandların genliğine etki etmektedir.

$$f_b = (1 \pm 2ks)f, k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.10)$$

Bunun yanı sıra Kliman ve Gaydon (1996) stator hat akımlarının spektrum analizinin yapılarak diğer kırık rotor çubuklarına ait algılanabilir frekansı ortaya koydular (Nandi ve ark., 2005).

$$f_b = \left[ \left( \frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] f \quad (1.11)$$

Yukarıda verilen formülde  $f_b$  algılanabilir frekans iken  $k/p$  ise 1, 3, 5... şeklindeki sabit sayılardır.

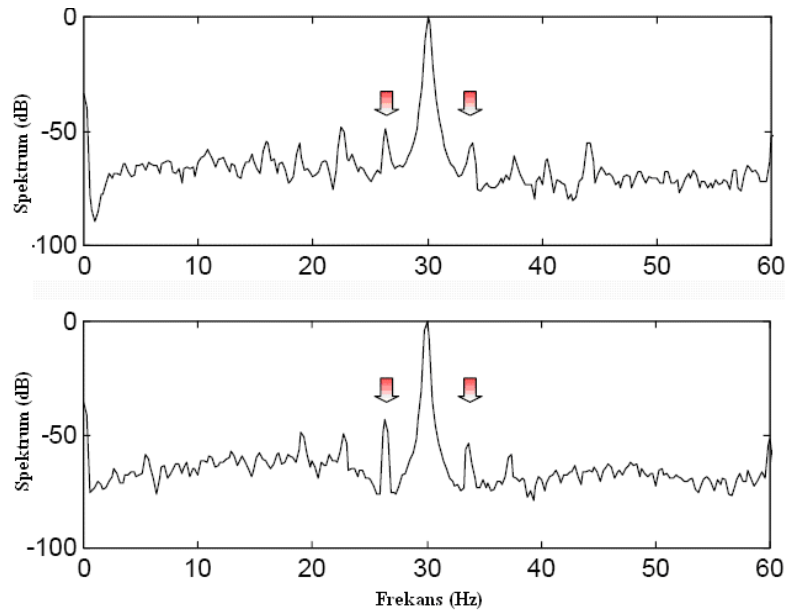
Elkasabgy ve ark., (1992); rotor çubuğu kırığı hatasının stator ek yerleri civarına içeriden veya motor gövdesine ilave olarak yerleştirilecek bobinlerde indüklenen gerilimin zaman ve frekans boyutundaki analizi ile de tespit edilebileceğini göstermiştir. Hız ve moment sinyalleri kırık çubuk hatasına ait  $2sf$  ve  $4sf$  frekans birleşenleri içermektedir.

Penman ve ark., (1986) tarafından gerçekleştirilen çalışma incelendiğinde ise bu tür arızaların rotor akısının frekans boyutunda analizi veya ilave olarak yerleştirilen bobinle tespit edilen aksel kaçak akının analizi ile tespit edilebileceği görülecektir. Yine rotor çubuğu kırığı hatası parametre kestirimi yöntemi ile de teşhis etmek mümkündür (Nandi ve ark., 2005).

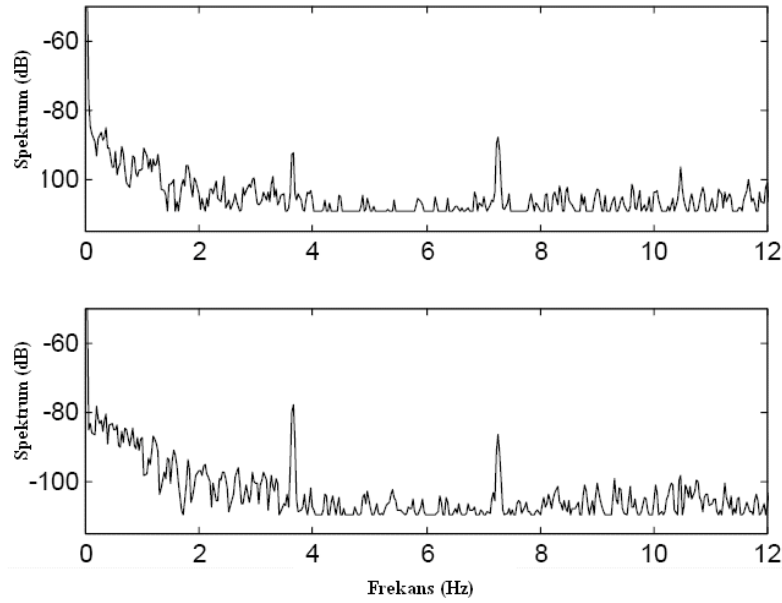
Masoud ve Toliyat (2001) ise rotor çubuğu kırığı hatasının teşhisi için örüntü tanıma yöntemini önermişlerdir. Rotor hızını stator akımından tahmin etmişler ve daha sonra Bayesian sınıflandırılmasında giriş olarak kullanılacak özellik vektörünü açığa çıkarmışlardır.

Akar ve Çankaya (2009) yapmış oldukları deneysel çalışmada evirici ile sürülen kısadevre çubuklu asenkron motorda rotor çubuğu kırığı arızasının akım spektrumu üzerine olan etkisini incelemişlerdir. 2 değişik hızda arızanın akım spektrumunda ve akım-zaman-genlik yüzey grafiğinde etkisini ortaya koymuşlardır.

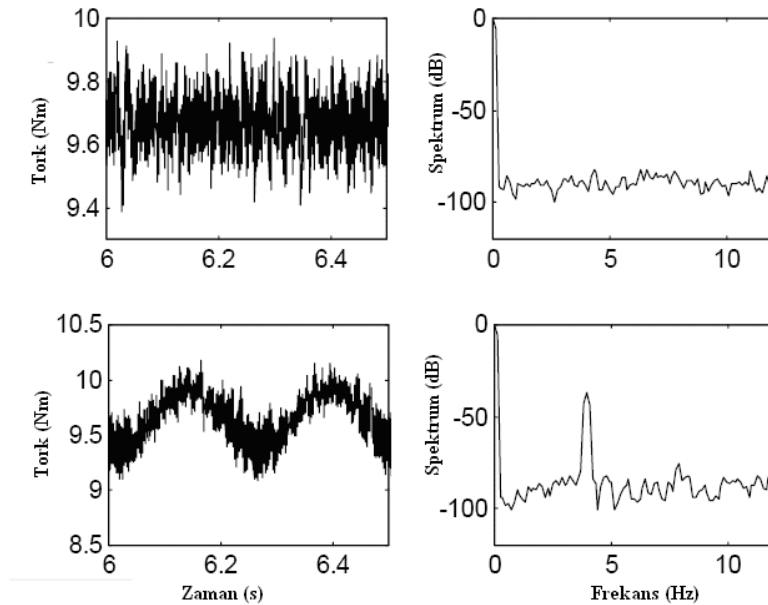
Şekil 1.16-19' da üç fazlı 3 HP, 60 Hz, 4 kutuplu ve 44 rotor çubuklu asenkron motorun akım, hız ve torkuna ait uygulama sonucu elde edilen dalga şekilleri ve onlarla ilgili spektrumları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde rotor çubuğu kırığı hatasının akım, hız ve tork üzerine olan etkileri açıkça görülmektedir.



Şekil 1. 16. İnvterlerle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayması  $s=0.061$  olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı (altta) akım spektrumları



Şekil 1. 17. İnverterle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayması  $s=0.061$  olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı (altta) hız spektrumları



Şekil 1. 18. İnverterle sürülen, 2 adet rotor çubuğu kısmen kırık olan, kayması  $s=0.061$  olan motorun sağlam (üstte) ve arızalı (altta) moment grafiğinin zaman ve frekans bileşenleri

Akım spektrumuna bakıldığında 26.34 Hz ve 33.66 Hz frekanslarında arızalı duruma ait yanband frekansları görülmektedir. Şekil 1.17 ' de ki hız spektrumunda ise arızaya ait yanbandlara 3.75 Hz ve 7.5 Hz frekanslarında rastlanmıştır. Tork spektrumu (şekil 1.18) içinde 3.75 Hz' de sağlam duruma göre genlik değişimi artış göstermektedir.

### 1.2.2.b. Rotor mıknatısı arızası

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda (SMSM) normal senkron motorlarda bulunan uyarım sargısının yerini rotora yerleştirilmiş mıknatıslar almıştır. Sabit mıknatısların fiyatlarının gittikçe rekabet edebilir hale gelmesi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, kayıpların az olması ve kontrol yöntemlerinin her geçen gün gelişmesi bu malzemelerin kullanıldığı motorlara ilgiyi artırmaktadır (Wiehan ve ark., 2003).

Daha önce rotorla ilgili yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından rotor çubuğu kırığıyla ilgili değişik eşitlikler ortaya konulmuştur. Ancak SMSM' lerde rotor çubuğu olmaması ve rotorun senkron hızda dönebilmesinden dolayı ( $s=0$ ) elde edilen eşitliklerin bu motorda kullanılması olanaksızdır.

Wiehan ve ark., (2003) yapmış oldukları çalışmalarında bu sorunu aşabilmek için kullanılan mıknatısın mukavemetini tahmin edecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemin temeli  $d$  ekseninde stator sargılarındaki mıknatıs akısını tahmin etmeye dayanmaktadır. Buna bağlı olarak Eşitlik 1.12 elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}\lambda_{d(pm)}^r &= \lambda_{ds}^r - L_{ds}^r i_{ds}^r \\ &= \frac{v_{qs}^r - r_s i_{qs}^r - L_{ds}^r p i_{qs}^r - p \lambda_{q(pm)}^r}{\omega_r} - L_{ds}^r i_{qs}^r\end{aligned}\quad (1.12)$$

Eşitlik 1.12' de kullanılan tüm değerler ani değerlerdir. Denklemden yer alan ifadeler sırasıyla;  $\lambda_d^r$   $d$  eksenindeki stator sargıları toplam akısı,  $i_{ds}^r$   $d$  eksenindeki stator akımı,  $L_{ds}^r$   $d$  eksenindeki stator indüktansı,  $v_{qs}^r$   $q$  ekseninde stator gerilimi,  $r_s$  stator direnci,  $\lambda_{d(pm)}^r$   $d$  eksenindeki stator sargılarında oluşan sabit mıknatıs akısı,  $p$  türev operatörü ve  $\omega_r$  rotor açısal hızıdır. Yapılan uygulama çalışmasında rotor üzerindeki mıknatıs malzemesinin % 5,2'lik bir kısmı kopartılmıştır. Bu durumu sunulan yöntem %  $\pm 1$  hatayla teşhis etmiştir.

### 1.3. Tezin Amacı, Katkıları ve İzlenen Çalışma Yöntemi

Gerçekleştirilen tez çalışmasında SMSM' de eksenden kaçıklık ve rulman arızası gibi mekaniksel arızaların tespiti ve bu arızaların yapay zekâ teknikleri ile teşhisi amaçlanmıştır. SMSM son yıllarda özellikle hassas kontrol gerektiren yerlerde



sıklıkla kullanılmaktadır. Mekaniksel arızalara bakıldığında toplam motor arızalarının yaklaşık %50' si civarındadır. Bu motorların temininde yurtdışına bağımlı olunması sebebiyle bu motorların arızalanmaları üretim kapasitesini olumsuz etkileyecektir. Asenkron motorlar için bu arızalara ait çok sayıda çalışma olmasına karşın SMSM için böyle bir çalışma yoktur. Asenkron motorda özellikle eksenden kaçıklık için kullanılan formüller senkron motorda kaymanın sıfır olması sebebiyle kullanılmamaktadır. Yapılacak bu çalışma ile frekans spektrumunda arızaya ait bulguların yerlerini belirten formüller SMSM için yeniden düzenlenecektir. Tez çalışmasında; arızaların motor akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri üzerine etkisi incelenecektir. Bu amaçla SMSM sağlam durumda 150 d/d (10 Hz), 450 d/d (30 Hz) ve 750 d/d (50 Hz) çalışma hızlarında %0, %25, %50, %75 ve %100 yükte çalıştırılacak, motor faz akımı, faz gerilimi, rotor hızı ve elektromanyetik tork değerleri kayıt altına alınacaktır. Aynı işlemler sırasıyla eksenden kaçıklık ve rulman arızası durumları için tekrarlanacaktır. Rulman arızası dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilya arızası olmak üzere 4 farklı arıza türü olarak incelenecektir. Elde edilen sinyaller HFD, Alfa-Beta Dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri ile detaylı olarak işlenecek ve arızalara ait öznitelik vektörleri oluşturulacaktır. Elde edilen öznitelik vektörleri ise RTFA ve ÇKİBA yapısında eğitim amaçlı kullanılarak mekaniksel arızalara yönelik teşhis çalışması gerçekleştirilecektir. Tespit ve teşhis çalışmasında kullanılan yöntemleri birden fazla tutmaktaki amaç eksenden kaçıklık ve rulman arızası türleri için en uygun tespit ve teşhis yöntemini belirlemektir.

Yapılan tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Tezin 1. Bölümünde konuyla ilgili genel bilgiler verilmiş ve literatür çalışması yapılmıştır. 2. Bölümde senkron makinaların yapıları ve çeşitleri açıklanmış ve tez çalışmasında kullanılan SMSM' nin matematiksel modellemesinde kullanılan eşitlikleri verilmiştir. Tezin 3. Bölümünde çalışılan arızaların tespit ve teşhisinde kullanılan yöntemlere ait literatür bilgileri, yöntemlerin matematiksel alt yapısı verilerek yöntemlerle ilgili örnek grafikler sunulmuştur. Tezin 4. Bölümü yapılan deneysel çalışmayı kapsamaktadır. Bu bölümde deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler HFD, Alfa-Beta Dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri ile işlenmiş ve arızalara ait öznitelik vektörleri oluşturulmuştur. 5. Bölümde ise oluşturulan öznitelik vektörlerini kullanan

Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ yapıları oluşturularak teşhis çalışması yapılmıştır. Tezin 4. ve 5. bölümlerinde elde edilen sonuçlar grafiksel ve tablo halinde ilgili bölümlerde ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Tezin son bölümünde ise bütün bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar tartışılmış ve yapılan çalışmanın değerlendirilmesi sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca gelecekte yapılacak araştırmalar için faydalı olacağı düşünülen öneriler sunulmuştur.

## **BÖLÜM 2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR**

Senkron makinalar bir veya çok fazlı olarak üretilen, motor veya generator olarak çalışabilen cihazlardır (Çolak, 2003). Bu makinaların stator (endüvi) sargıları alternatif akım kaynağından, rotor (endüktör) sargısı ise doğru akım kaynağından beslendiği için çift uyarılı makinalar grubunda sınıflandırılırlar. Senkron makina mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılıyorsa senkron alternatör, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürüyorsa senkron motor olarak isimlendirilir. Bu makinalar endüvi yapısına göre sınıflandırılırsa;

- Duran endüvili, dönen endüktörlü
- Duran endüktörlü, dönen endüvili

isimlerini alırlar (Çolak, 2003). Duran endüvili senkron makinalarda hareketli kısım uyarım sargılarının bulunduğu endüktör kısmıdır. Bu kısımdaki sargıları besleyen doğru akım kaynağı yaklaşık birkaç yüz voltluk dc gerilimi fırçalar ve bilezikler yardımıyla uyarım sargılarına aktarır. Duran endüktörlü senkron makinada ise hareketli kısım endüvidir. Endüvide yüksek gerilim üreten alternatif akım sargıları mevcuttur. Üretilen bu gerilimi dışarı almak için kullanılması gereken fırça, bilezik ve yalıtım malzemeleri pahalıdır. Dolayısıyla senkron makinalarda duran endüvili, dönen endüktörlü yapı daha çok tercih edilir.

Diğer yandan senkron makinalar kutup yapısına göre iki kısma ayrılırlar. Bunlar;

- Silindirik kutuplu
- Çıkık kutuplu

senkron makinalardır. Silindirik kutuplu senkron makinalarda endüktör boyları uzun, çapları ise küçük olup yüksek hızlarda dönebilirler. Çıkık kutuplu senkron makinalar ise çok kutuplu olarak imal edilirler ve düşük hızlarda çalışırlar. Çıkık kutuplu senkron makinaların boyları kısa, rotor çapları ise silindirik kutuplulara göre daha büyüktür.

Senkron motorlar; 3 faz stator sargısı ile rotorunda doğru akımla beslenen bir sargıdan meydana gelmiştir. Devir sayıları yük ile değişmez ancak frekans veya kutup sayısı ile değiştirilir (Demirbaş, 2001). Geleneksel senkron motorlarda rotor sargısına elektrik uyarımı fırça ve kollektörler yardımıyla uygulandığından asenkron motorlara göre daha karmaşık yapıya sahiptirler. Senkron motorların rotor sargılarının kalıcı mıknatıslarla değiştirilmesiyle elde edilen motorlara SMSM denir (Bal ve ark., 2007). SMSM' ler 0,1 kW değerinden 200 kW güç değerine kadar üretilebilmektedirler. SMSM' ler genellikle duran endüvili dönen endüktörlü senkron makinalar sınıfında ve yüksek hızla dönebildikleri içinde silindirik kutuplu olarak imal edilirler.

SMSM' lerin kullanılmaya başlamasıyla artık düşük hızlarda da yüksek verim almak mümkün olmuştur. Zira asenkron motorlarda en yüksek verim tam yük ve nominal hız değerlerinde sağlanmaktadır. Bu ise düşük hızlar için redüktör kullanımını zorunlu kılmakta, kayıpların artmasını sağlamaktadır. Ayrıca asenkron motorlarda stator akımı hem tork üretmek hem de rotoru mıknatıslamakta kullanılmaktadır.

SMSM' ler yüksek verim ve güç faktörü, yüksek güç-ağırlık oranı ve yüksek moment-eylemsizlik oranı gibi üstünlüklerinden dolayı, endüstride, özellikle servo sistemlerde, sıklıkla kullanılmaktadır. Bu motorların bazı avantajları şunlardır;

- Şebeke frekansına bağlı olarak sabit bir hızda çalışabilirler,
- Güç yoğunlukları ve verimleri yüksektir,
- Yüksek moment elde edilebilir,
- Asenkron motorlara göre daha verimlidirler,
- Aynı güçteki diğer motorlara göre hacim ve ağırlıkları daha azdır,
- Bütünleşik tasarıma sahiptirler,
- İş makinalarına şekilsel uyum sağlarlar,
- Hız kontrolü olanakları çok iyidir,
- Yüksek hızlarda çalışma imkân verirler,
- Düşük eylemsizliğe sahiptirler,
- Rotorunda sargılar, fırçalar, bilezikler ve kollektörler bulunmamaktadır.

Bu nedenlerle;

- Fırça sistemi bulunmadığından fırçalardan çıkacak olan karbon tozları bulunmamaktadır,
- Rotorunda daimi mıknatıs bulunduğundan uyarma akımına gerek yoktur (Uyarmayı, rotorlarında bulunan daimi mıknatıslı malzeme sağlamaktadır),
- Rotorda sargılar olmadığından bakır kayıpları yoktur ve soğutulması daha kolaydır,
- Aşınma, komütasyon gibi problemler yoktur,
- Hacim ve kütleleri azdır,
- Sessiz çalışma sağlarlar.

Bu avantajlarından dolayı üzerlerinde en çok araştırma yapılan motorlardan biridir. Birçok endüstriyel uygulamada hız ve moment kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu motorların kullanım alanlarından bazıları şunlardır (<http://www.siemens.com.tr/>);

- CNC tezgâhları,
- Tekstil makinaları,
- Cam sanayi,
- Robotik uygulamaları,
- Askeri sistemler,
- Ağaç İşleme Makinaları,
- Özel Fabrika Otomasyonu Makinaları,
- Metal İşleme Makinaları,
- Matbaa Makinaları,
- Paketleme Makinaları.

Otomotiv sektöründe yüksek hassasiyet istenen makinalar digital sürücüler ve gelişmiş kontrol teknolojisi ile daha basite indirgenmiş bulunmaktadır. SMSM' ler sayesinde krank şaft işleme makinalarında değişik şekillerdeki krank şaftlara maksimum esneklik ve en yüksek hassasiyette şekil verilmektedir. SMSM' ler tahrik ve CNC kontrol sistemlerinin doğrusal yataklama teknolojisi ile beraber kullanımı krank şaftlarının eksantrik işleme operasyonunda devrim yaratmıştır (<http://www.siemens.com.tr/web>).

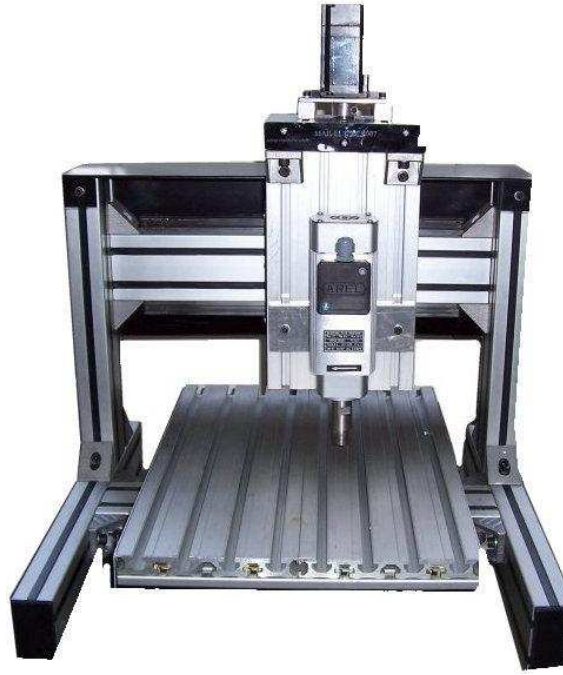
SMSM' ler ve sürücüleri ile ambalaj makinalarında yüksek hız ve hassasiyetlere en ekonomik şekilde ulaşmak mümkündür. Etiket, paket, form veya gazete baskı makinalarında ac servolar konvensiyonel sistemlerdeki mekanik şaftları ve dişlileri kaldırarak yüksek hassasiyetlere ulaşan elektronik bir çözüm ile karşımıza çıkmaktadır. Bu çözüm sadece kaliteyi arttırmakla kalmayıp aynı zamanda üretim adedini de arttırmaktadır (<http://www.siemens.com.tr/web>).



Şekil 2. 1. Şişe otomasyon bandı

Şekil 2.1' de verilen şişe kontrol otomasyon sisteminde hassasiyet sistem dinamiklerinin sabitliği ön plandadır. Kullanılan SMSM' ler ile saatte 10000 'den fazla şişenin kontrolü yapılmakta sağlam olmayanlar sistem dışına alınmaktadır. Bu sistemde kullanılan SMSM' ler yeteri kadar hassas konumlanmaması ve hızlı olmaması kendinden sonraki kademelerde sıkıntı doğuracağından, arızalanmalarını veya arızalarının önceden tespit edilmesinin önemi büyüktür.

SMSM' lerin bir diğer kullanım alanı ise CNC tezgâhlarıdır. Bir CNC tezgâhı üç ana ünitelerden oluşur: Mekanik aksam, güç besleyici amplifikatör ve motorlar, bilgisayar üniteleridir. Mekanik aksam tezgâhın motorsuz çıplak halidir. Her ana mile bir SMSM direkt veya bir kademeli redüktör aracılığıyla bağlanır. Seçilen motor kalkış ve kesim sırasındaki dinamik ve statik yükleri istenilen hızlarda taşıyabilmelidir.

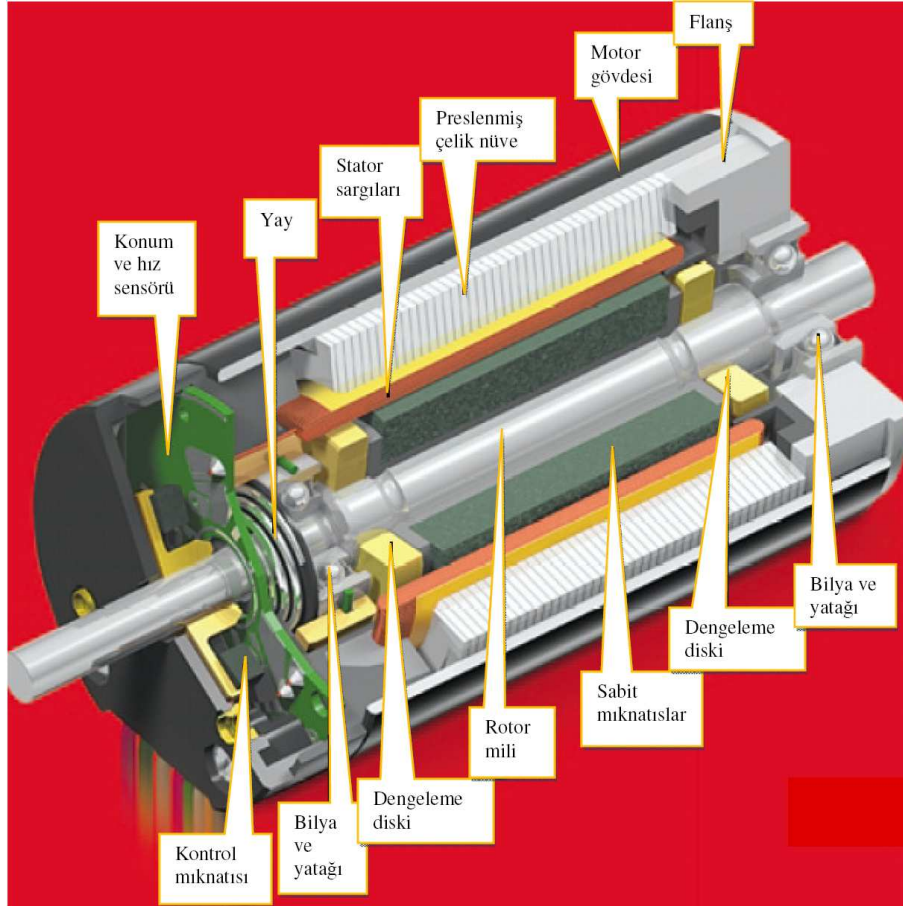


Şekil 2. 2. Üç eksenli SSM' li CNC freze

Kalkış sırasında tezgâh tablası ve ana millerinin ataletini istenilen ilerleme hızına getirirken gelecek dinamik moment, statik sürtünmeden gelen sabit moment ve viskoz sürtünmeden gelen hızla orantılı değişken momentlerin toplamı motorun yükünü oluşturur. Talaş kesme kuvvetleri de tezgâh tablası ile ana mili bağlayan somun vasıtasıyla ana mile ve motora kesme momenti olarak taşınır. Seçilen motorun moment kapasitesi toplam yük momentlerinin üstünde olmalıdır. Motora en fazla yük, ivmelendirme sırasında ortaya çıkan ve atalet momentleriyle orantılı olan dinamik momentlerdir. Motorun güç besleyici devresinin (amplifikatör) yaklaşık 2 saniye zaman aralığı süresince normalin üstünde moment verebilme kapasitesi vardır ve ivmelendirme sırasında kullanılır. İlerleme mili sabit bir hıza ulaştınca dinamik moment sıfır olur. Kesme kuvvetlerinden ve sürtünmeden gelen statik- sabit momentler motoru yükler ki bunlarında şiddeti düşüktür. Motorun sürekli moment kapasitesi bu statik yükleri taşıyabilecek seviyede olmalıdır. Görüldüğü üzere sanayide çok sık kullanılan CNC tezgâhlarının ana elemanlarından birisi üzerlerindeki motorlardır. Bunlardan birisinin arızalanması veya tam kapasite ile çalışmaması hem üretimi aksatacak hem de büyük maddi kayıplara neden olacaktır.

## 2.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Yapıları

SMSM' ler duran kısım (stator), dönen kısım (rotor), hava aralığı ve şafttan oluşmaktadır. Şekil 2.3' te SMSM' ye ait kesit ve Tablo 2.1' de ise bu motora ait parçalar görülmektedir ( <http://www.maxonmotor.com>).



Şekil 2. 3. SMSM kesiti

### 2.1.1. Stator

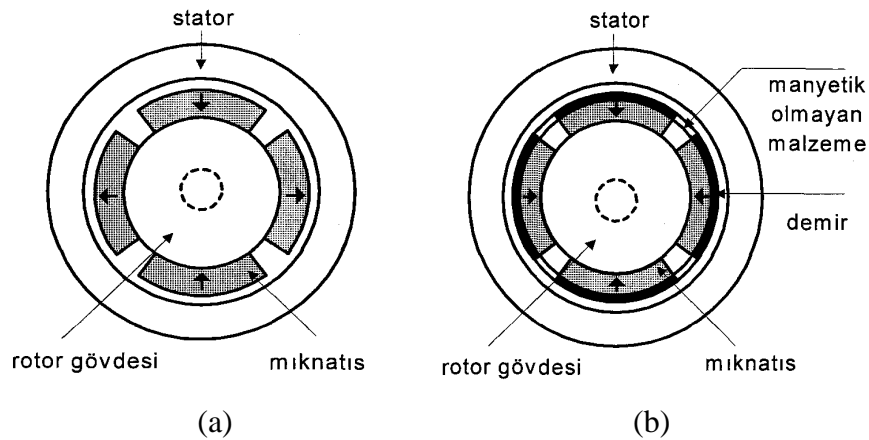
SMSM' lerin stator yapıları teorik olarak yıldız bağlı senkron motorlar ile aynıdır. SMSM' lerin statorlarına yerleştirilen üç fazlı sargılara, üç fazlı alternatif akım verilmesiyle çalışır. Rotor pozisyonuna bağlı olarak üç fazlı alternatif akım stator sargılarına uygulandığında statorunda senkron hızda döner manyetik alan meydana gelir. Burada senkron hız, motorun kutup sayısı ile ters, alternatif akımın frekansı ile doğru orantılıdır (Akar, 2005).

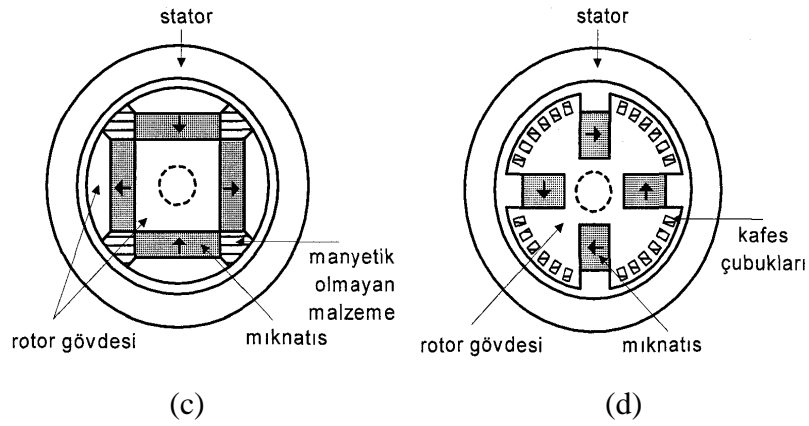


### 2.1.2. Rotor

Rotor, motorun hareketli kısmıdır ve mil üzerine yerleştirilmiş mıknatıslardan oluşur. Rotor üzerinde saf demirden veya haddelenmiş delikli saçlardan yapılmış bir göbek bulunur. Sabit mıknatıslar özel bir donanımla bu göbek üzerine hava aralığında manyetik alan oluşturabilmek için N-S kutupları oluşturacak şekilde sabitlenir. Çok değişik şekilde ve türde sabit mıknatıslar mevcuttur. Ancak NdBFe (Neodyum-Boron-Demir) türü mıknatıslar doğal mıknatısiyetinin ve enerjisinin daha fazla olması sebebiyle AlNiCo (Aliminyum-Nikel-Kobalt) ve SmCo (Samaryum-Kobalt) türü mıknatıslara göre daha sık kullanılmaktadır.

SMSM' lerde mıknatısın durumuna göre değişik türde rotor yapıları mevcuttur (Üstün, 2004). Şekil 2.4.a' da gösterilen rotor yapısında mıknatıslar rotor göbeğinin dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu tasarımda meydana gelen rotor akısı daireseldir. Üretim açısından en kolay ve en ucuz tasarım olmasına karşın hava aralığı etkisi fazla ve rotor direnci yüksektir. Şekil 2.4.b' de ise mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilerek sağlamlığı manyetik olmayan malzemelerin yüzeyine sarılmasıyla artırılmıştır (Üstün, 2004). SMSM' lerde yüksek güç elde edilmek istendiğinde şekil 2.4.c' de verilen rotor yapısı kullanılır. Bu tasarımda mıknatıslar rotor gövdesine gömülüdür. Hat beslemeli motorların rotorlarında ise şekil 2.4.d' de görüldüğü gibi kısa devre çubukları bulunmaktadır (Üstün, 2004).





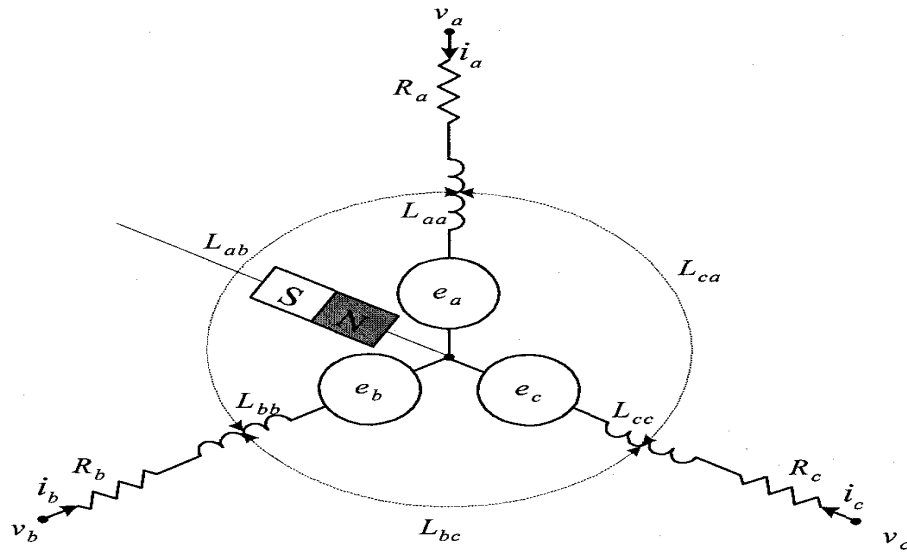
Şekil 2. 4. SMSM rotor yapıları

### 2.1.3. Hava aralığı

Hava aralığı döner elektrik makinalarında stator ile rotor arasındaki boşluk olarak tanımlanır. Hava aralığı motor açısından önemli bir etkidir. Hava aralığının büyük olması kalıcı mıknatıslar tarafından üretilen manyetik akının azalmasına ve sonuç olarak da motor torkunun azalmasına sebep olur (Üstün, 2004).

## 2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

SMSM' ler için genellikle 3 farklı matematiksel model kullanılmaktadır. Bunlar; değişkenlerin stator düzleminde ifade edilmesi (3 faz model), değişkenlerin rotor düzleminde ifade edilmesi (2 faz  $dq$  model) ve değişkenlerin 2 faz sabit düzleme aktarılması (2 faz  $\alpha\beta$  model) olarak sıralanabilir. Üç fazlı yıldız bağlı bir SMSM için üç faz eşdeğer devresi Şekil 2.5 'te verilmiştir (Üstün, 2004).



Şekil 2. 5. SMSM üç faz eşdeğer devresi

### 2.2.1. Üç faz model

Eşdeğer devrede verilen  $v_a, v_b, v_c$  ifadeleri stator faz gerilimlerinin ani değerlerini,  $i_a, i_b, i_c$  ifadeleri stator faz akımlarının ani değerlerini,  $R_a, R_b, R_c$  stator faz sargılarına ait omik dirençleri,  $e_a, e_b, e_c$  sabit mıknatıs tarafından stator sargılarında oluşturulan zıt elektromotor kuvvetlerini (e.m.k.),  $L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$  faz sargılarının toplam endüktanslarını ve  $L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$  faz sargılarının karşılıklı endüktanslarını ifade etmektedir. Eşdeğer devrenin gerilim ifadesi Eşitlik 2.1 ile verilir (Alger, 1970).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)' deki  $R_a, R_b$  ve  $R_c$  faz dirençleri eşit olduğundan bunlar  $R_s$  ile gösterebilir. Eşitlik 2.1'de verilen endüktans ve zıt emk ifadeleri manyetik akı terimleri ile yazılırsa Eşitlik (2.2) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$L_{ss}$  faz sargısı toplam endüktansı; kaçak endüktans ve faz sargısı öz endüktansına bağlı olarak eşitlik 2.3 'te,  $M$  karşılıklı endüktans faz sargısı öz endüktansına bağlı olarak Eşitlik 2.4 'te ki gibi yazılabilir.

$$L_{ss} = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_l + L_{ms} \quad (2.3)$$

$$M = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -\frac{1}{2}L_{ms} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.3 ve 2.4'te verilen ifadeler manyetik akılar için yerine konulacak olursa Eşitlik 2.5 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_f \cos(\theta_r) \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.2' de verilen gerilim ifadesinde Eşitlik 2.5 yerine konulursa Eşitlik 2.6' ya ulaşılır.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} \lambda_f \cos(\theta_r) \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6' da ki sinüsel ifadeler sabit sayılarla ifade edilirse Eşitlik 2.7 üretilir.

$$\begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_f \cos \theta_r \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \lambda_f \cos(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Bu katsayılara bağlı motor zıt emk değerleri ise Eşitlik 2.8' deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega_r \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.7' de verilen ifade Eşitlik 2.6'da yerine konularak Eşitlik 2.9 oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Motor dengeli olduğuna göre faz akımları Eşitlik 2.10 ile ifade edilir.

$$i_a = -i_b - i_c \quad (2.10)$$

Buradan da  $Mi_a = -Mi_b - Mi_c$  ifadesi eşitlik 2.9'da yerine yazılarak 2.11 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss}-M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss}-M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ss}-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$L_{ss}-M$  ifadesi senkron endüktans olan  $L_s$  'ye eşittir. Bu ifade eşitlik 2.11' de yerine konur ve akım ifadeleri eşitliğin bilinmeyen kısmına alınır eşitlik 2.12' ye ulaşılır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \right\} \quad (2.12)$$

Rotorun elektriksel pozisyonu  $\theta_r$ , mekanik pozisyon  $\theta_m$  'e ve rotor kutup sayısı  $p$  'ye bağlı olarak eşitlik 2.13'te ve elektriksel hız  $\omega_r$ , mekanik hız  $\omega_m$  'e, rotor kutup sayısı  $p$  'ye bağlı olarak eşitlik 2.14'te olduğu gibi yazılabilir (Alger, 1970).

$$\theta_r = \frac{p}{2} \theta_m \quad (2.13)$$

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.14)$$

Motorun elektromekanik hız ifadesi Eşitlik 2.15' de verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{p}{2} \left( T_e - T_L - B \left( \frac{2}{p} \right) \omega_r \right) / J \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15'te gösterilen elektriksel torkun zıt emk, faz akımları, elektriksel hız ve kutup sayısı cinsinden ifadesi ise Eşitlik 2.16 ve 2.17' de görülmektedir.

$$T_e = \frac{p}{2} \left( \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \right) \quad (2.16)$$

$$T_e = \frac{p}{2} \left( k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c \right) \quad (2.17)$$

Eşitlik 2.17'deki elektriksel tork ifadesi Eşitlik 2.15'te yerine konulursa Eşitlik 2.18 elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{p^2}{4J} \left( k_a i_a + k_b i_b + k_c i_c \right) - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{p}{J} T_L \quad (2.18)$$

Rotor pozisyonun türevi alınır, rotor hızı ve sabit sayı olan yük momentinin türevi sıfır değerini verir. Bu durumlar Eşitlik 2.19-2.20'de görülmektedir.

$$\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \quad (2.19)$$

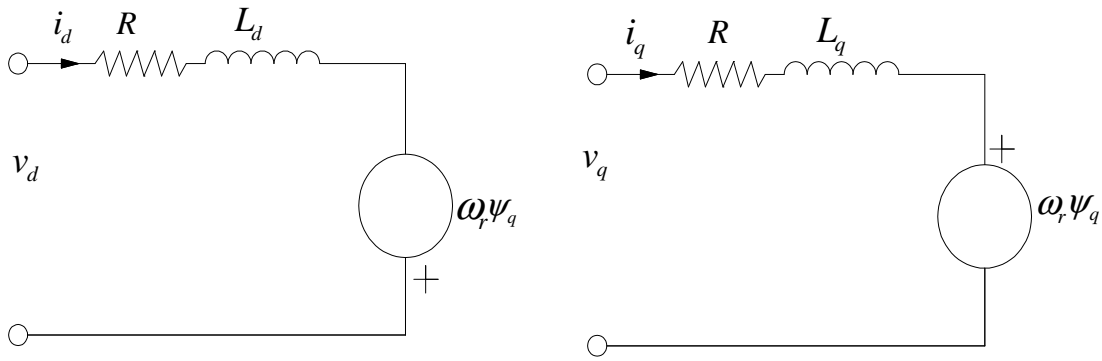
$$\frac{d}{dt}T_L = 0 \quad (2.20)$$

Elde edilen diferansiyel denklemler (2.12,2.18,2.19,2.20) matris oluşturacak şekilde düzenlenirse, SMSM' a ait 3 faz benzetim modeli Eşitlik 2.21' de ki gibi ifade edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \theta_r \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 & 0 & -\frac{k_a}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & -\frac{k_b}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{k_c}{L_s} & 0 & 0 \\ \frac{p^2 k_a}{4J} & \frac{p^2 k_b}{4J} & \frac{p^2 k_c}{4J} & -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{p}{2J} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_r \\ \theta_r \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

### 2.2.2. Rotor referans düzlemi modeli

SMSM' lerin modellenmesinde kullanılan bir diğer yöntem de stator büyüklüklerinin rotor düzlemine aktarılarak elde edilen  $dq$  modelidir. Elde edilen bu model yabancı veya serbest uyarımlı olarak bilinen doğru akım motoruna benzemektedir. Rotor referans düzleminde eşitliğin mertebesi küçüldüğü için hesaplama yapmak daha hızlı ve kolaydır. Üç faz akım ve gerilim eşitlikleri Park dönüşümü olarak bilinen eşitlikler vasıtasıyla rotor referans düzlemine taşınır. Şekil 2.6' da SMSM' nin rotor referans düzlemine aktarılmış eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2. 6. SMSM rotor referans eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrenin gerilim eşitlikleri ve Park dönüşümü ise Eşitlik 2.22' de görülmektedir (Demirbaş, 2001).

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Manyetik akı bileşenleri Eşitlik 2.23' deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.22 ve 2.23 düzenlenerek durum uzay formu çıkartılır ise Eşitlik 2.24 elde edilir.

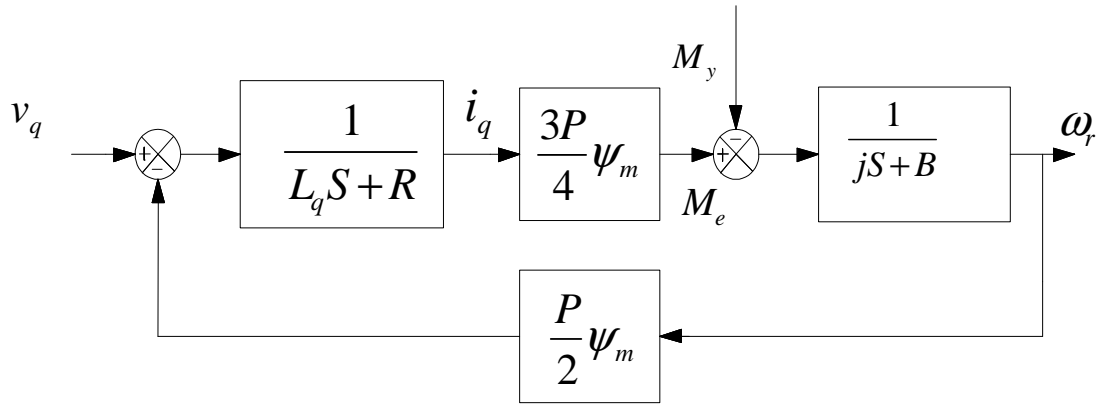
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{p}{2} \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi_m \end{bmatrix} \right\} \quad (2.24)$$

Elektromanyetik moment;

$$M_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\Psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2.25)$$

SMSM' lerin rotor manyetik akısı sabit mıknatıslar tarafından karşılanmaktadır. Dolayısıyla akımın mıknatıslanma bileşeni  $i_d$  sıfırdır. Aynı şekilde SMSM' nin  $d$  ve

$q$  endüktansaları ( $L_d = L_q$ ) da birbirine eşittir. Buna göre SMSM için rotor referans düzlemindeki blok diyagramı Şekil 2.7' de verilmiştir (Demirbaş, 2001).



Şekil 2. 7. SMSM rotor referans düzlemi blok diyagramı

### 2.2.3. İki faz sabit düzlem modeli

Bu model çok sık kullanılmamasına karşın konum ve hız tahmininde kullanılmaktadır. Bu modelde değişkenler birbirinden  $90^\circ$  faz farklı sabit bir düzleme aktarılırlar. Stator akım ve gerilimleri 3 fazdan 2 faza dönüştürülürler. Eşitlik 2.26 ve 2.27' de motor akım ve moment eşitlikleri verilmiştir (Demirbaş, 2001).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(L-M)} \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \omega_r \Psi_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta_r) \\ \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \right\} \quad (2.26)$$

$$M_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\Psi_m [-i_\alpha \sin(\theta_r) + i_\beta \cos(\theta_r)]) \quad (2.27)$$



### **BÖLÜM 3. KULLANILAN ARIZA TESPİT VE TEŞHİS YÖNTEMLERİ**

Elektrik motorlarının arızalarının tespitinde birçok yöntem başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Motordan alınan sinyaller zaman boyutunda, frekans boyutunda ve zaman-frekans boyutunda analiz edilmekte ve arıza durumuna ait öznitelikler çıkarılmaktadır. Çıkarılan bu öznitelikler kullanılarak hatalar teşhis edilmekte ve sınıflandırılmaktadır. Tespit yöntemi olarak “HFD”, “ Dalgacık Dönüşümü”, “Alfa-Beta Dönüşümü” ve “Ani Akım-Hızın İzlenmesi”, vb. yöntemler başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yöntemlerle açığa çıkarılan öznitelik vektörlerini kullanan yapay zekâ teknikleri ise hataları başarılı bir şekilde teşhis etmekte ve sınıflandırmaktadır. Bu alanda en sık kullanılan yapay zekâ yöntemi YSA’dır. Yapılan tez çalışmasında HFD, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri tespit yöntemleri olarak kullanılmıştır.

HFD uzun yıllardır elektrik motor arızalarının tespitinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yöntem kullanımı kolay ve maliyeti ucuzdur. Bir faz akımı ve rotor devrinin bilinmesi ile motor akım spektrumu hesaplanarak hıza bağlı spektrum değişimi gözlemlenebilir. Bu yöntem asenkron motorlarda eksenden kaçıklık ve rulman arızalarının tespitinde sıkça kullanılmıştır. SMSM’ de stator ve rotor hızlarının aynı olması yani kaymanın sıfır olması özellikle eksenden kaçıklık arızasında asenkron motorda kullanılan formüllerin bu motor için yeniden revize edilmesi ihtiyacını gündeme getirmiştir. Bu yöntem ve revize edilmiş formüller kullanılarak SMSM için eksenden kaçıklık arızasının hangi parametreye bağlı olarak değiştiği ortaya konulması faydalı olmuştur.

Alfa-Beta yönteminde ise faz akımlarından ikisinin bilinmesi yeterlidir. Üçüncü faz akımı dengeli sistemlerde üç faz akımının toplamının sıfır olacağından dolayı hesaplanabilir. Bu yöntemde asenkron motorların stator sargı arızalarının, rulman arızasının ve eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılmıştır. Motor devir

bilgisine ihtiyaç yoktur. Arıza oluşması durumunda motor faz akımlarına arızanın etkileri yansıtacağı için bu yöntemin eksenden kaçıklık ve rulman arızasının tespit çalışmasında kullanılması mantıklıdır.

Kullanılan bir diğer yöntem ise üç faz ani akım ve rotor hızının izlenmesidir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında üç faz için ve rotor devrini izlemek için ayrı ayrı sensör gerektirmesi yöntemi diğerlerine göre maliyetli kılmaktadır. Ancak deneysel çalışmada kullandığımız SMSM rotor konumuna göre inverterle sürülen bir motor olması ve bu motorlarda kullanılan sürücülerin akım, gerilim, hız sensörlerini içermesi bu yöntemin dezavantajını ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca daha öncede bahsedildiği üzere motorla ilgili ne kadar çok parametre izlenebilirse durumu hakkında daha net karara varılabilir. Ayrıca bu yöntemde HFD ve Alfa-Beta dönüşümünde olduğu gibi dönüşümlere ihtiyaç duyulmaması yöntemin karmaşıklığını ortadan kaldırmaktadır.

Görüldüğü gibi kullanılan üç yöntemde de motor akım, gerilim ve hız gibi motor bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sürücülerin kabiliyetlerinden dolayı ve özellikle de son nesil sürücülerin mikroişlemci veya sayısal işlemci tabanlı üretilmeleri, SMSM'lerin bu yöntemler kullanılarak sürekli izlenebilmesi ve hata tespiti yapılmasına fırsat vermektedir.

Arıza tespit çalışmasıyla ortaya çıkarılan öznitelik vektörleri YSA eğitiminde kullanılarak motorun durumu hakkında teşhis yapılabilir. Böylelikle tespit çalışması ile varılan sonuçların her seferinde uzman kişiler tarafından yorumlanarak arıza teşhisi yapılmasına gerek kalmaz. Arıza teşhisi için kullanılan YSA yapılarına baktığımızda Radyal tabanlı ağlar ve Çok katmanlı ileri beslemeli hata geri yayımlı ağlar yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

SMSM için eksenden kaçıklık ve rulman arızasının tespitinde ve teşhisinde yukarıda bahsedilen tespit ve teşhis yöntemlerinin uygulanması ve hangi arıza türü için hangi tespit ve teşhis yönteminin avantajlı veya dezavantajlı olduğunun belirlenmesi faydalı olacaktır. Çünkü SMSM'ler ve sürücülerini yurtdışından ithal edilmektedir. Bu motorların arızalanmaları istenmeyen aksamalara sebebiyet vereceğinden

izlenmeleri, hata tespit ve teşhisi maliyet ve zaman kaybı açısından oldukça önemlidir.

### 3.1. Tespit Yöntemleri

#### 3.1.1. Hızlı Fourier dönüşümü

Sistem elemanlarının ve sistemlerin birbirleriyle etkileşmesini sağlayan her türlü ölçülebilir büyüklüklere sinyal ismi verilmektedir. Sinyaller bağlı buldukları sistemlere göre çeşitli isimlerle ifade edilmektedir. Elektriksel sistemlerde bu değerler akım, gerilim olurken mekaniksel sistemlerde hız, ivme veya titreşim olarak adlandırılmaktadır. Ancak sistemin türü ne olursa olsun bir sinyali oluşturan bazı parametreler vardır. Bu parametreler; sinyalin genliği, frekansı ve faz açısı olarak bilinir. Genel bir sinüs fonksiyonu Eşitlik 3.1 'deki gibi ifade edilir.

$$x(\omega t) = X_M \sin(\omega t + \theta) \quad (3.1)$$

Eşitlikte ifade edilen  $X_M$  sinüs fonksiyonun maksimum genlik değerini,  $\omega t$  sinüs fonksiyonun argümanını ve  $\theta$  ise faz açısını temsil etmektedir.

Elektrik motorlarının hata teşhisinde birçok elektriksel ve mekaniksel parametreler izlenmekte, bu parametreler analiz edilmekte ve motor durumu hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. En sık izlenen motor parametreleri motor akımı, besleme gerilimi, motor ani güç değişimi, motor elektriksel ve yük momenti, motor hızı ve titreşim sinyalleridir. Bu sinyaller zaman boyutunda, frekans boyutunda ve zaman-frekans boyutunda analiz edilmekte ve arıza durumuna ait öznitelikler çıkarılmaktadır. Motor hata teşhisinde en bilindik ve en sık kullanılan yöntem HFD' dir.

Sinyal işleme alanında ilk sunulan teorem olan Fourier dönüşümü; 1807 yılında Fransız matematikçi Joseph Fourier tarafından geliştirilmiştir. Bu teorem sinyallerin spektrumlarının incelenmesinde ve frekans bölgesinde sunulmasında oldukça başarılıdır (Çankaya ve Vatansever, 2002). Fourier dönüşümü sinyallerin sinüs ve kosinüs toplamı ile ifade edilebileceğini göstermiştir. Buna göre bir sinyal seri şeklinde ifade edilebilir ve analizi gerçekleştirilebilir. Eşitlik 3.2' de bir  $f(x)$  fonksiyonunun seri şeklinde gösterimi verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (3.2)$$

Eşitlikte yer alan  $a_0$ ,  $a_k$  ve  $b_k$  ifadeleri Fourier katsayılarıdır ve aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (3.3)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (3.4)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (3.5)$$

Karmaşık üstel Fourier seri gösterimi ise eşitlik 3.6' daki gibidir (Çankaya ve Vatansever, 2002);

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad (3.6)$$

$$c(k) = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Eşitlik 3.6 'da ifade edilen  $c(k)$  değeri karmaşık Fourier katsayıları olup  $c_{-k} = c_k^*$  olarak gösterilir. Fourier serilerinden Fourier dönüşümüne geçilirse Eşitlik 3.7' deki Fourier ve ters Fourier dönüşümleri elde edilir (Çankaya ve Vatansever, 2002).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.7)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Fourier dönüşümü durağan işaretlerde başarılı sonuçlar verirken, dinamik sinyallerde yetersiz kalmaktadır. Bu durum 1946 yılında Denis Gabor tarafından ortaya atılan “Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD)” yöntemiyle aşılmıştır (Çankaya ve Vatansever, 2002). KZFD' e göre dinamik bir sinyal zamanda durağan kabul edilebilecek kadar küçük parçalara bölünerek analiz edilir (Altınbaş, 2007). Bunun için sinyal çeşitli pencereleme fonksiyonları kullanılarak pencerelenir ve her bir pencere içinde sinyal durağan kabul edilir. Sıklıkla kullanılan pencereleme fonksiyonlarının başında “dikdörtgen”, “üçgen”, “hanning”, “hamming”, “chebyshev”

ve ‘‘kaiser’’ gelmektedir (Akar ve ankaya, 2009). KZFD’ nün matematiksel ifadesi Eşitlik 3.8’ deki gibi ifade edilebilir (Altınbaş, 2007).

$$KZFD(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t)w^*(t - \tau)]e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.8)$$

Eşitlikte kullanılan  $x(t)$  orijinal işareti,  $w(t)$  pencere fonksiyonunu,  $*$  karmaşık eşleniği,  $f$  frekansı ve  $\tau$  ise zamanda öteleme miktarını temsil etmektedir. Eşitlikten de görüleceği gibi her bir  $f$  ve  $\tau$  değeri için yeni KZFD katsayıları hesaplanır. Bu yöntemin başarılı sonuç vermesi pencere genişliği ile ilgilidir. Pencerenin genişliği sinyalin durağan kabul edildiği miktar kadar olmalıdır. Pencerenin dar seçilmesi Fourier dönüşümü ile elde edilemeyen çözünürlüğü artırırken geniş seçilmesi ise frekans çözünürlüğünü artırırken zaman çözünürlüğünü azaltacaktır. Bu yöntemde ise işaretin tamamı için aynı pencere kullanıldığında tüm frekanslar için aynı çözünürlük vermesi bir sorun teşkil etmektedir (Akar ve ankaya, 2009).

Günümüzde kullanılan ve ayrık işaretlerin Fourier dönüşümünde etkin bir şekilde kullanılan HFD 1965 yılında Cooley ve Tukey tarafından sunulmuştur (Akar ve ankaya, 2009). Motor arıza teşhisinde de kullanılan ve spektrum analiz, konvolüsyon, korelasyon gibi işlemlerde başarılı sonuçlar veren ayrık Fourier dönüşümünün bu başarısı HFD algoritmalarından kaynaklanmaktadır.

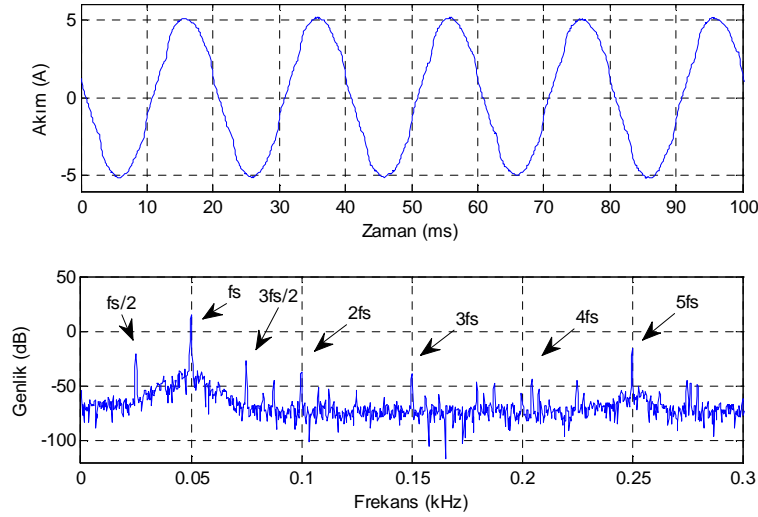
Güç spektrum yoğunluğu ise ayrık Fourier dönüşümü kullanarak işareti frekans bölgesine taşır (Arabacı ve ark., 2004).  $N$  örnekli bir veri kümesi için  $\Delta f$  frekans çözünürlüğü ve  $\Delta t$  de örnekleme zamanı olmak üzere  $m\Delta f$  frekansındaki dönüşüm:

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t)e^{-j2\pi km/N} \quad (3.9)$$

ifadesi ile elde edilir.  $X(t)$  işareti ait güç spektral yoğunluğu ise Eşitlik 3.10 ile hesaplanır;

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)|^2, f = m\Delta f \quad (3.10)$$

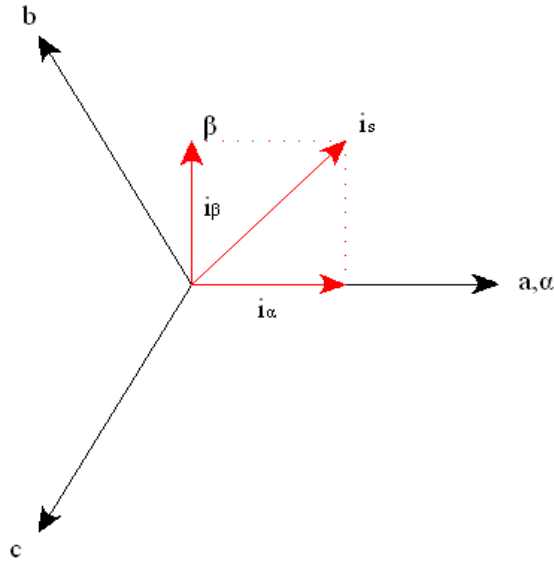
Şekil 3.1’ de SMSM’ de sağlam çalışma durumu için 2 kHz örnekleme frekansı ile kaydedilmiş bir faz motor akımının zaman boyutundaki ve “Hanning” pencereleme fonksiyonu kullanılarak elde edilmiş güç spektrum dönüşümünün 0-300 Hz aralığı verilmiştir. Çalışma frekansımız 50 Hz ( $f_s$ ) olduğu için temel frekans 50 Hz ’ de çıkmıştır. 25 Hz ( $f_s/2$ ), 75 Hz ( $3f_s/2$ ), 100 Hz ( $2f_s$ ), 150 Hz ( $3f_s$ ), vb., frekanslarda ise temel frekansın harmonikleri meydana çıkmıştır.



Şekil 3. 1. Akım spektrum grafiği

### 3.1.2. Alfa-Beta dönüşümü

Elektrik motorlarında arıza teşhisinde en sık kullanılan yöntemlerden birisi motor akımlarının izlenmesidir. Motorların bağlı bulunduğu sistemlerde bu akımları izleyecek donanımların bulunması ve özellikle SMSM gibi sürücü ile kontrol edilen motorlarda sürücülerin akım sensörleri içermesi bu yöntemin kullanılabilirliğini artırmaktadır. Clarke-Concordia dönüşümü olarak da bilinen bu yöntemde motor sinyalleri 3 faz stator sabit eksenden 2 faz birbirine  $90^\circ$  dik sabit eksene taşınır. Faz dönüşümleri ile motor dinamik eşitliklerinde değişkenlerin sayısı azaltılmakta ve çözüm kolaylaşmaktadır. Şekil 3.2’ de Alfa-Beta vektör diyagramı verilmiştir.

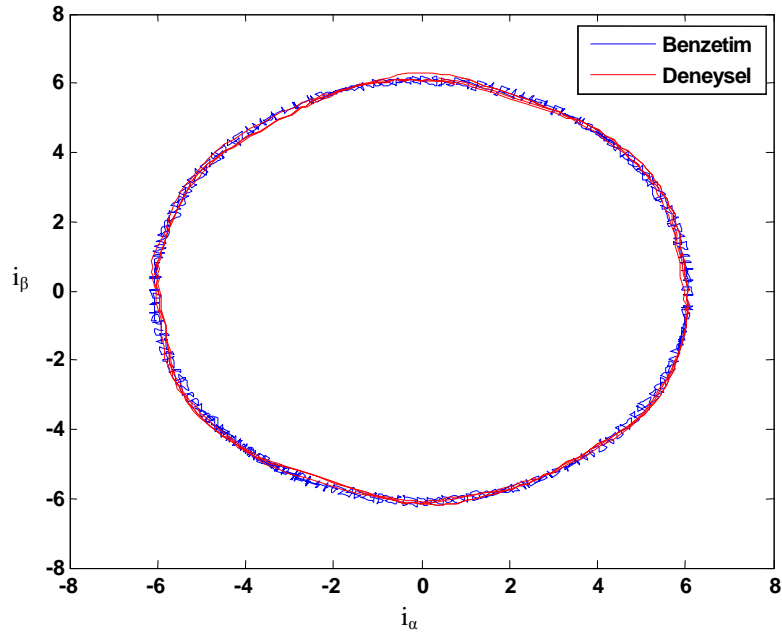


Şekil 3. 2. Alfa-Beta vektörü

Bu dönüşüm 3 faz akım, gerilim ve akı için Eşitlik 3.11' i kullanarak gerçekleştirilmektedir. Eşitlikte kullanılan  $a, b$  ve  $c$  değerleri 3 faz değerlerini temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Sağlam çalışan bir motorda teorik olarak Alfa-Beta dönüşümü sonucu oluşacak şeklin bir daire şeklinde çıkması beklenir. Ancak motorun sürüldüğü sisteme bağlı olarak oluşacak şekil eliptik bir yapıya kayabilir. Örneğin motor inverterden besleniyorsa motor uçlarına uygulanan sinyal sinüsoidal yapıda olmadığı için motor sargılarından geçen akım da saf sinüsoidal yapıda olmayacaktır. Şekil 3.3' de SMSM' nin Matlab modelinden elde edilmiş akım verileri ve deneysel çalışma sonucu elde edilmiş akım verileri ile çizilmiş Alfa-Beta şekli verilmiştir.



Şekil 3.3. Alfa-Beta benzetim ve deneysel grafiği

Şekil 3.3 incelendiğinde uygulamaya ait şeklin bazı bölgelerde benzetim çalışmasından ayrıldığı görülmektedir. Buna motorun bağlı olduğu yükteki dengesizlikler ve motorda meydana gelen uzay harmonikleri sebep olmaktadır.

Alfa-Beta yöntemi birçok araştırmacı tarafından değişik arızaların tespitinde kullanılmıştır. Cardoso ve ark., (1993) asenkron motorda stator akımlarını izleyerek eksenden kaçıklık arızasını çalışmışlar ve arızanın boyutuna bağlı olarak oluşan şekilde sağlam duruma göre farklılaşmalar olduğunu tespit etmişlerdir.

Benbouzid (2000) bu yöntemle asenkron motorlarda gerilim dengesizliklerini ve stator sargılarındaki yalıtım problemlerini tespit etmişlerdir.

Martins ve ark., (2002) bu yöntemi kullanarak güç sistemlerindeki arızaları tespit etmişlerdir. Araştırmacılar faz-toprak, faz-faz, 3 faz kısa devre arızaları durumunda oluşan Alfa-Beta şekillerini YSA eğitiminde kullanmışlar ve arızaları sınıflandırmışlardır.

Önel ve Benbouzid (2007) yaptıkları deneysel çalışmada asenkron motorlarda rulman arızasını “Park dönüşümü” ve “Concordia dönüşümü” ile karşılaştırmalı



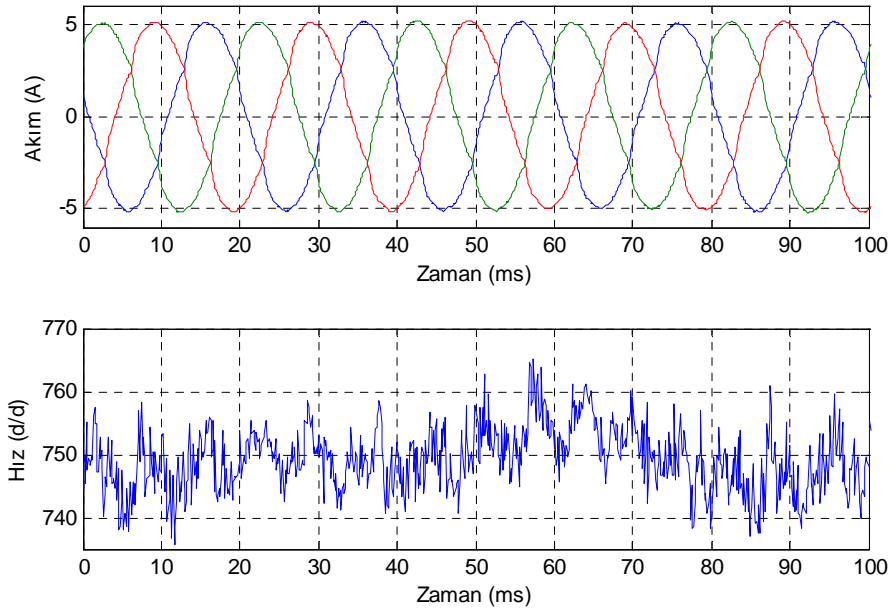
olarak çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara bakıldığında bu 2 yönteminde rulman arızası tespitinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Önel ve ark., (2009) inverterle beslenen asenkron motorlarda rulman arızasının tespiti için Alfa-Beta dönüşümünü kullanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada elde ettikleri verileri Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağlarını (RTFA) teşhis amaçlı kullanmışlar ve rulmanın durumu hakkında %93.75 doğrulukla teşhis yapmışlardır.

### **3.1.3. Ani akım- hızın izlenmesi**

Motor arıza tespitinde motordan alınan bilgi miktarı arttıkça motorun durumu hakkında daha detaylı bilgi sahibi olunabilir (Önel, 2006). Motor 3 faz akımından başka ulaşılabilecek bir diğer bilgidir rotor hızıdır. Motorda herhangi bir arıza oluşması durumunda bu durum motor akımına yansiyacak bu ise motor hızına etki edecektir. Motor akım ve hızında meydana gelecek bozulma sağlam çalışma durumundan ayırt edilerek arıza türü hakkında sonuca varılabilir.

Bu yöntem motor arıza teşhisinde çok sık kullanılmamıştır. Alla (2006) yapmış olduğu çalışmada asenkron motorda rulman arızası ve bir faz sargıları arasındaki kısa devre arızasının tespitini yapmıştır. Yaptığı uygulama çalışması sonucu elde ettiği 3 faz akım ve açısal hız değerini RTFA eğitiminde kullanmış ve sunulan yöntemin motorun sağlam, rulman arızası ve kısa devre arızasını başarılı bir şekilde ayırt ettiğini göstermiştir. Şekil 3.4' te SMSM' ye ait 750 d/d (50 Hz) çalışma frekansında nominal yükünde üç faz akım ve hız grafiği görülmektedir.



Şekil 3. 4. SSM üç faz akım ve hız grafiği

### 3.2. Teşhis yöntemleri

Motordan alınan bilgilerin değerlendirilmesi, yorumlanması, hatanın yeri ve boyutu ile ilgili sonuca varmak oldukça önemlidir. Geleneksel yöntemlerde bu işlem uzman bir kişi tarafından yapılır. Bu ise hem kişiye bağımlı olunması hemde sürecin gecikmesi açısından çok kullanışlı değildir.

Hata teşhisinde son zamanlarda yapay zekâ tabanlı sistemler teşhis amaçlı kullanılmaktadır. Yapay zekâ; “İnsanların bilgisayarlardan daha iyi yaptıkları işleri bilgisayarların yapabilmesi için çalışan bilim dalıdır”(Sağiroğlu,2003). İlk defa 1956 yılında kullanılan bu terim “Makineleri zeki yapan mühendislik ve bilim dalı ” olarakta bilinmektedir (Crevier, 1993). En bilindik ve sık kullanılan yapay zekâ yöntemleri; “YSA”, “Bulanık Mantık”, “Uzman Sistemler” ve “ Genetik Algoritma” yöntemleridir.

Bu yöntemlerden birisi olan YSA insan fizyolojisinde var olan biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır (Erdem ve Uzun, 2005). İlk YSA modeli 1943 yılında, bir sinir hekimi olan Warren McCulloch ile bir matematikçi olan Walter Pitts tarafından gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts, insan beyninin hesaplama

yeteneğinden esinlenerek, elektrik devreleriyle basit bir sinir ağı modellemiştir. 1949 yılında ise Hebb "Organization of Behavior" adlı eserinde öğrenme ile ilgili temel teoriyi ele almıştır (www.yapay-zekâ.org). Yazar kitabında öğrenebilen ve uyum sağlayabilen sinir ağları modeli için temel oluşturacak "Hebb kuralı"nı ortaya koymuştur.

1957 yılında Frank Rosenblatt'ın Perceptron'u geliştirmesinden sonra, YSA'lar ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Perceptron; beyin işlevlerini modelleyebilmek amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan tek katmanlı eğitilebilen ve tek çıkışa sahip bir ağ modelidir (Elmas,2003). 1959 yılında Bernard Widrow ve Marcian Hoff (Stanford Üniversitesi) ADALINE (Adaptive Linear Neuron) modelini geliştirmişler ve bu model YSA'ların mühendislik uygulamaları için başlangıç kabul edilmiştir. Bu model uzun mesafelerdeki telefon hatlarındaki yankıları ve gürültüleri yok eden bir adaptif filtre olarak kullanılmış ve gerçek dünya problemlerine uygulanan ilk YSA olma özelliğini kazanmıştır. Bu yöntem günümüzde de aynı amaçla kullanılmaktadır (www.yapay-zekâ.org).

YSA' lar simüle edilen sinir hücreleri (nöronlar) içerirler ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağ oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir. Bir insanın, düşünme ve gözleme yeteneklerini gerektiren problemlere yönelik çözümler üretebilmesinin temel sebebi ise insan beyninin ve dolayısıyla insanın sahip olduğu yaşayarak veya deneyerek öğrenme yeteneğidir. YSA'nın geleneksel yöntemlere göre avantajları şunlardır (Sağiroğlu, 2003);

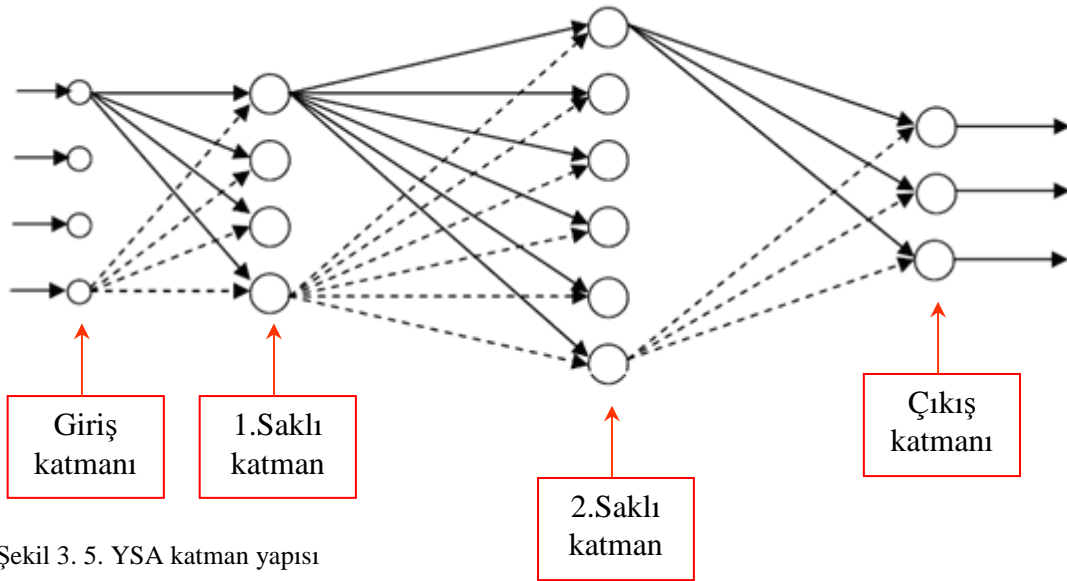
- Doğrusal olmayan özelliğe sahip olmaları,
- Öğrenme kabiliyetlerinin olması,
- Genelleme yapabilmeleri,
- Adaptasyon kabiliyetlerinin olması,
- Gürültüye karşı toleranslarının olması,
- Donanımsal olarak gerçekleştirilebilmeleri,
- Paket yazılımlarının bulunmasıdır.

Bu avantajlar YSA' ları birçok alanda kullanılır hale getirmiştir. Bunlar; Sınıflandırma, Modelleme ve Tahmin uygulamalarıdır (Öztemel, 2003). Başarılı uygulamalar incelendiğinde, YSA' ların çok boyutlu, gürültülü, karmaşık, kesin olmayan, eksik, kusurlu, hata olasılığı yüksek sensör verilerinin olması ve problemi çözmek için matematiksel modelin ve algoritmaların bulunmadığı, sadece örneklerin var olduğu durumlarda yaygın olarak kullanıldıkları görülmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş ağlar;

- Muhtemel fonksiyon kestirimleri,
- Sınıflandırma,
- İlişkilendirme veya örüntü eşleştirme,
- Zaman serileri analizleri,
- Sinyal filtreleme,
- Veri sıkıştırma,
- Örüntü tanıma,
- Doğrusal olmayan sinyal işleme,
- Doğrusal olmayan sistem modelleme,
- Optimizasyon,
- Kontrol,

fonksiyonları gerçekleştirmektedir (Öztemel, 2003).

YSA genel yapıda 3 temel katmanın paralel yapıda bir araya gelmesiyle oluşur (Bozkurt, 2008). Bu katmanlar giriş katmanı, ara katmanlar ve çıkış katmanıdır. Giriş katmanı YSA' da kullanılacak ve dış ortamdan gelen bilgilerin sisteme giriş yaptığı yer olarak adlandırılır. Saklı katman olarak da bilinen ara katman bir veya birden fazla yapıda olabilir. Bilgilerin işleme tabii tutulduğu kısımdır. Çıkış katmanı ise; ara katmandan gelen bilgileri işleyerek giriş katmanından gelen bilgilere göre çıkış üretilen kısımdır. YSA'nın katman yapısı Şekil 3.5' te görülmektedir.

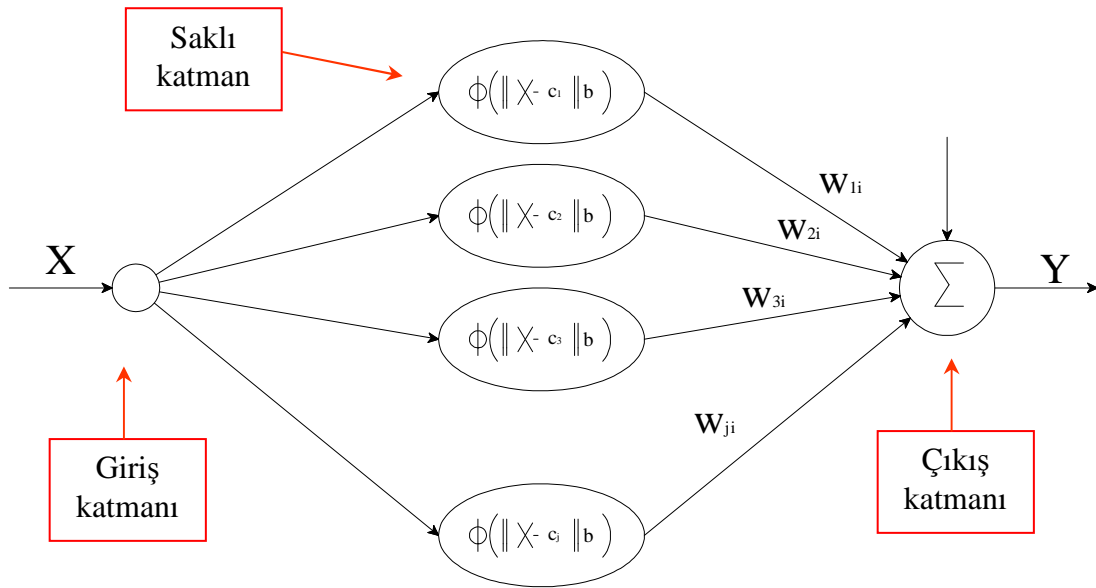


Şekil 3. 5. YSA katman yapısı

YSA algoritması mimari yapısına göre; geri beslemeli, ileri beslemeli olarak sınıflandırılırken öğrenme yaklaşımlarına göre ise; danışmalı öğrenme, danışmasız öğrenme ve takviyeli öğrenme olarak sınıflandırılırlar. YSA hücrelerinin bağlantı durumlarına, aktivasyon fonksiyonlarına ve öğrenme kurallarına göre çeşitli YSA yapıları mevcuttur. Bu çalışmada Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ yapısı üzerinde durulacaktır.

### 3.2.1. Radyal tabanlı fonksiyon ağları

RTFA, çok değişkenli modelleme ve yakınsama yapmakta kullanılan ağ yapılarından (Ravi, 2000). Ara katmandaki işlemci elemanlar giriş katmanından gelen bilgilerin ağırlıklandırılmış şeklini kullanarak YSA girişleri ile temel fonksiyonun merkezi arasındaki uzaklığa göre RTFA çıkış üretmektedirler. RTFA yapısı Şekil 3.6' da verilmiştir (Doğan ve Işık, 2005).



Şekil 3. 6. RTFA yapısı

Saklı katmanda bulunan işlemci elamanı için üç birleşen mevcuttur. İlk katman giriş ve saklı katman arasındaki ağırlık vektörüdür. İkinci katman giriş vektörünün merkezden ne kadar uzakta olduğunun Öklit uzaklığı kullanılarak hesaplandığı kısımdır. Son katman ise uzaklık fonksiyonunun çıkışını giriş olarak kullanan ve çıkış elamanının değerinin belirlendiği aktivasyon fonksiyonudur. RTFA’ da kullanılan işlemci elemanların çıkışına ait toplama fonksiyonu Eşitlik 3.12 ile hesaplanmaktadır (Doğan, 2005).

$$I_j = \left( \|X - c_j\| b \right) = \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - c_{ji})^2} b \right), j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.12)$$

Radyal temelli tabakanın bias terimi ise Eşitlik 3.13’ deki gibidir.

$$b = \frac{0.833}{\sigma} \quad (3.13)$$

RTFA ‘nın j. çıkışı Eşitlik 3.14 ile ifade edilir.

$$d_j = w_{oi} + \sum_{j=1}^N w_{ji} \phi(\|X - c_j\| b) \quad (3.14)$$

Burada,  $X$  giriş vektörünü,  $c$  saklı katman nöronunun merkezini,  $\sigma$  sabit olan dağılma katsayısı,  $w_{ji}$  j’ inci saklı katman nöronu ile i’ inci çıktı katmanı nöronu arasındaki ağırlık,  $w_{oi}$  çıkış katmanının bias terimini,  $\phi$  lineer olmayan aktivasyon fonksiyonu ve  $\| \cdot \|$  öklidiyen normunu ifade etmektedir.

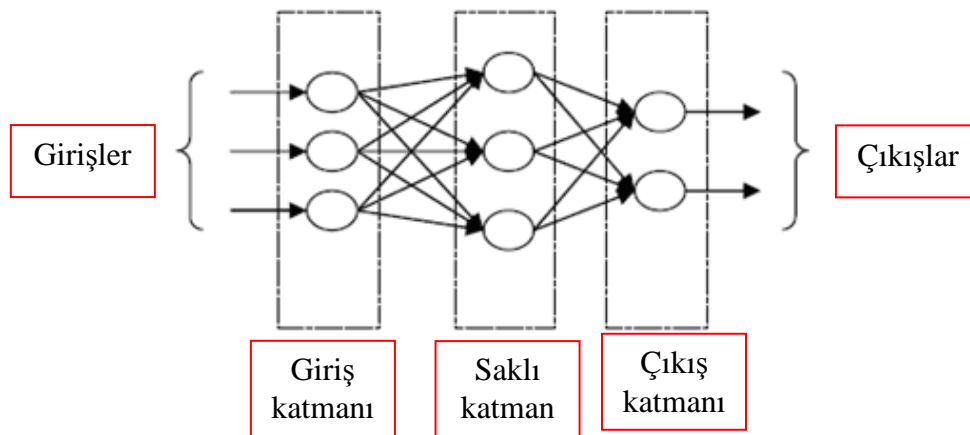
RTFA ilk defa Powell (1985) tarafından çok değişkenli bir interpolasyon probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bromhead ve Lowe (1988) radial basis fonksiyonu sinir ağlarını tasarlamak için kullanmıştır. Moody ve Darken (1989), Renals (1989), radial basis fonksiyonu tasarımı ve uygulamaları konusunda çalışmışlardır. RTFA hata teşhisinde de sıklıkla kullanılmıştır. Alla (2006) asenkron motorda rulman ve kısa devre arızalarının teşhisinde RTFA yapısını kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre bu arızaların teşhisinde ve sınıflandırılmasında RTFA başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Fang ve Zijie (2007) yayınladıkları çalışmalarında rulman arızasının teşhisi için RTFA'yı kullanmışlardır. Titreşim sinyallerini dalgacık dönüşümü ile işleyerek özellik vektörünü çıkarmışlar ve daha sonra bu vektörü RTFA eğitiminde kullanarak rulmanın durumu hakkında bir sınıflandırma yapmışlardır.

Önel ve ark., (2009) asenkron motorlarda rulman arızalarını Concordia dönüşümü ile tespit etmişlerdir. RTFA ile arızalı veya sağlam durumu %93' lük bir başarı ile ayırt etmişlerdir.

### 3.2.2. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı

Ağ yapısı giriş işaretlerinin tanıtıldığı giriş katmanı, bir veya daha fazla sayıda saklı katman ve çıkış katmanı olmak üzere 3 katmandan oluşur. Genellikle çok zor ve doğrusal olmayan problemlerin çözümünde başarıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.7' de Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ (ÇKİBA) yapısı görülmektedir (Koca, 2006).



Şekil 3. 7. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı

ÇKİBA' da kaç tane saklı katman ve her saklı katmanda kaç nöron bulunacağı tamamen problemin yapısı ile ilgilidir. ÇKİBA yapısında genellikle geri yayılım algoritması kullanılır. Çıkış katmanı ile saklı katman arasındaki ağırlıklar, ağırlık gerçeği ile hedeflenen çıkış arasındaki fark kullanılarak hesaplanır (Eser, 2006). Ancak giriş ile saklı katman veya birden fazla saklı katman varsa bunlar arasındaki ağırlıkların hesaplanması problem teşkil etmektedir. Geri yayılım algoritması her bir saklı katman için etkili bir şekilde hata hesaplaması yaparak girişten saklı katmana veya saklı katmanlar arasındaki ağırlıkların güncellenmesinde başarılı sonuç verir. Bu yöntemle ağ eğitilmek istendiğinde; girişler giriş katmanından ağ yapısına sokulur ve bir çıkış elde edilir. Ağırlık gerçeği ile hedeflenen çıkış arasındaki farka bağlı olarak bir hata fonksiyonu hesaplanır. Bu hata fonksiyonunun değeri hedeflenen hata değerine kadar minimize edilmeye çalışılır. En son elde edilen hata değerine eğitim hatası denir ve ağırlık gerçeği ile hedeflenen çıkış arasındaki farkın karesi olarak hesaplanır. Eğitim hatasının hesabı Eşitlik 3.15' de görülmektedir (Eser, 2006).

$$J(w) = E^p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^c (d_k - y_k)^2 \quad (3.15)$$

Eşitlikte ifade edilen  $y_k$  çıkış katmanındaki  $k$  nöronunun çıkışını,  $d_k$  hedeflenen çıkışı,  $c$  saklı katmandaki nöron sayısını temsil etmektedir. Geri yayılım algoritması ise Eşitlik 3.16' dak gibidir.

$$\Delta w_{ji} = -\eta (\partial J / \partial w_{ji}) \quad (3.16)$$

Burada  $\eta$  öğrenme oranı yani ağırlık hataya karşı duyarlılığıdır. Ağırlıkların yeni değerleri ise eski değerleri ile değişim miktarının toplanmasıyla hesaplanır.

$$w(m+1) = w(m) + \Delta w(m) \quad (3.17)$$

Tek saklı katmana sahip üç katmanlı bir ağ ele alınacak olursa;  $w_{ji}$  giriş ile saklı katman arasındaki bağlantıları,  $w_{kj}$  saklı katman ile çıkış arasındaki bağlantıları  $u_k$  çıkış katmanındaki  $k$ . birimin aktivasyon değeri olmak üzere zincir kuralı uygulanırsa (Eser, 2006) ;

$$\frac{\partial J}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial J}{\partial u_k} \frac{\partial u_k}{\partial w_{kj}} = -\delta \frac{\partial u_k}{\partial w_{kj}} \quad (3.18)$$

$$\delta_k = -\frac{\partial J}{\partial u_k} \quad (3.19)$$



sonuçlarına ulaşılır. Aktivasyon fonksiyonu türevi alınabilen bir fonksiyon olarak kabul edilirse Eşitlik 3.20 elde edilir.

$$\delta_k = -\frac{\partial J}{\partial u_k} = \frac{\partial J}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial u_k} = (d_k - y_k) f'(u_k) \quad (3.20)$$

$y_j = \frac{\partial u_k}{\partial w_{kj}}$  eşitliği kullanılarak saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki öğrenme

kuralı ise Eşitlik 3.21 ile hesaplanır.

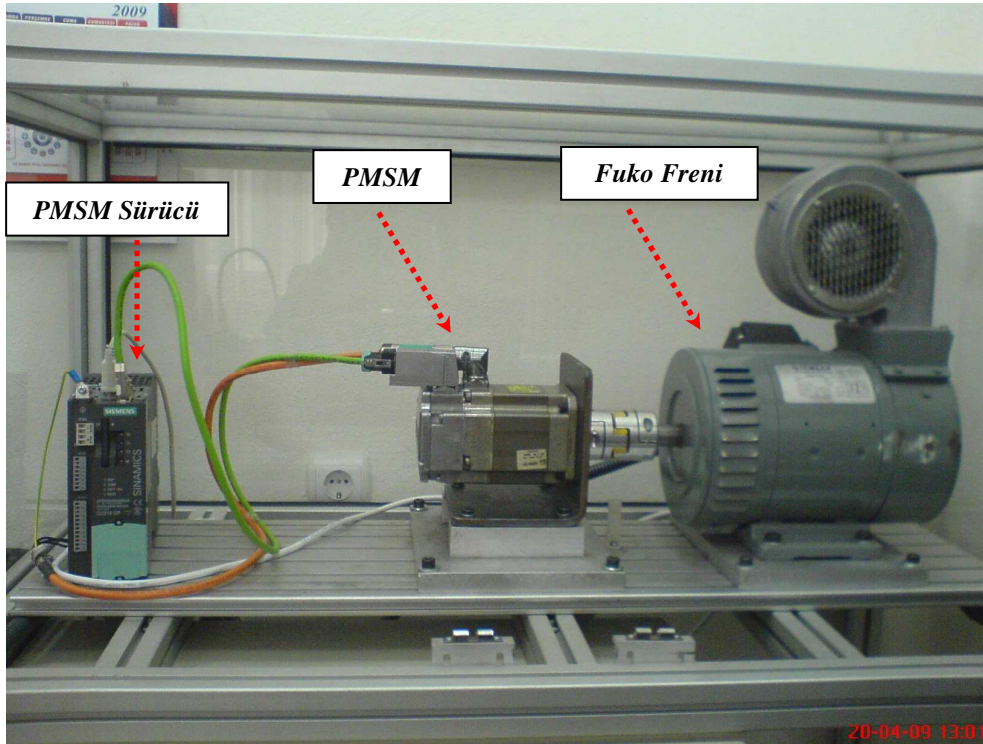
$$\Delta w_{kj} = \eta \delta_k y_j = \eta (d_k - y_k) f'(u_k) y_j \quad (3.21)$$

ÇKİBA hata teşhisinde yıllardır farklı araştırmacılar tarafından değişik arızaların tespitinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Şeker ve Ayaz (2003) yapmış oldukları çalışmada asenkron motorda rulman arızalarını titreşim algılayıcılarından aldıkları bilgiyi kullanarak yapmışlardır. Zaman boyutundaki sinyallerin spektral analizi yapılmış ve spektrum sonuçları ileri beslemeli geri yayımlı ağ eğitiminde kullanılmıştır.

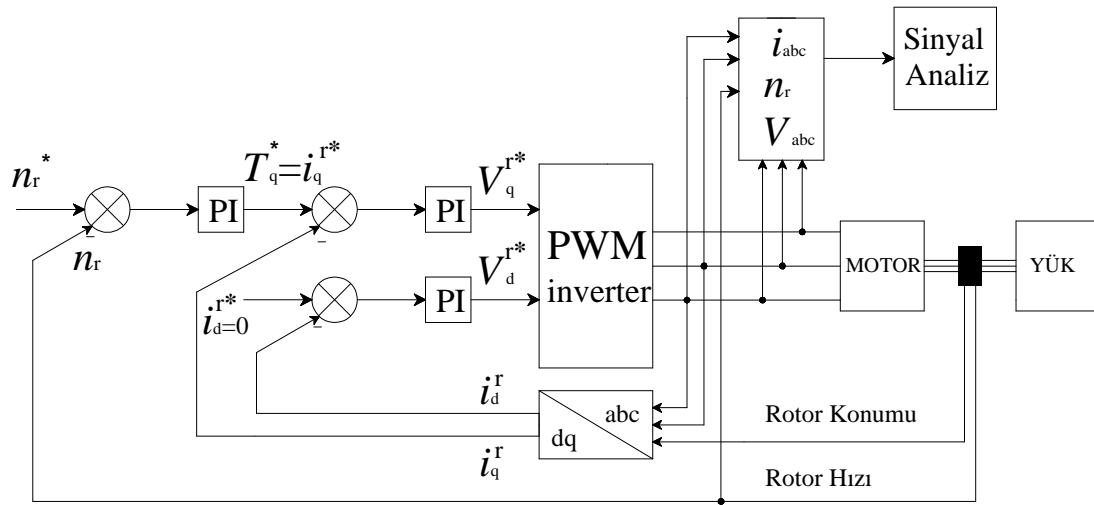
Arabacı ve Bilgin (2004) asenkron motorlarda rotor çubuğu kırığının teşhisi için akımın spektrum birleşimini hesaplayarak YSA eğitiminde kullanmışlar ve değişik sayıda kırık arızasını başarılı şekilde tespit etmişlerdir. Li ve ark., (2000) rulman titreşim sinyallerinin zaman-frekans analiz sonuçlarını kullanarak arızalara ait özellikleri açığa çıkarmışlar ve bu arızaların YSA ile teşhisini yapmışlardır. Liu ve ark., (2000) sabit mıknatıslı dc motorda parametre tahmini yapmışlar ve arıza durumunda bu parametrelerdeki değişimleri YSA eğitiminde kullanarak hata teşhisi yapmışlardır. Ayhan ve ark., (2006) rotor çubuğu kırık arızasının teşhisinde YSA' yı kullanmışlardır. Bunun için 10 kHz örnekleme ile motor bir faz akımını değişik yük şartlarında kayıt altına almışlar ve bunu YSA eğitiminde kullanarak hata teşhisi yapmışlardır. Huangh ve ark., (2007) sürücü ile kontrol edilen asenkron motorlarda eksenden kaçıklık arızası üzerine çalışmışlardır. Değişik çalışma hızlarında ve yüklerinde akım ve gerilim sinyallerini kayıt altına almışlar ve daha sonra YSA kullanarak arızalı ve sağlam çalışma durumunu teşhis ettirmişlerdir.

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde SMSM' nin eksenden kaçıklık ve rulman arızası ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 4.1' de görülen deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde ilk önce eksenden kaçıklık arızası gerçekleştirilmiş motor sağlam ve arızalı durumdaki akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri izlenerek kayıt altına alınmıştır. Daha sonra motor ön kapağında bulunan rulmanda 4 değişik arıza tipi sırasıyla oluşturularak her bir durum için izleme ve kayıt altına alma işlemi tekrarlanmıştır. Bu arızalar hakkında daha detaylı bilgi alt başlıklarda sunulacaktır. Ayrıca bu bölüm eksenden kaçıklık ve rulman arızasının analizi sonucu elde edilen HFD grafiklerini, Alfa-Beta grafiklerini ve Ani Akım-Hız grafiklerini içerecektir. Deneysel çalışma için oluşturulan deney düzeneği ve deney düzeneğinin blok diyagramı Şekil 4.1' de görülmektedir.



a) Deney düzeneği



b) Blok diyagramı

Şekil 4. 1. Deney düzeneği ve blok diyagramı

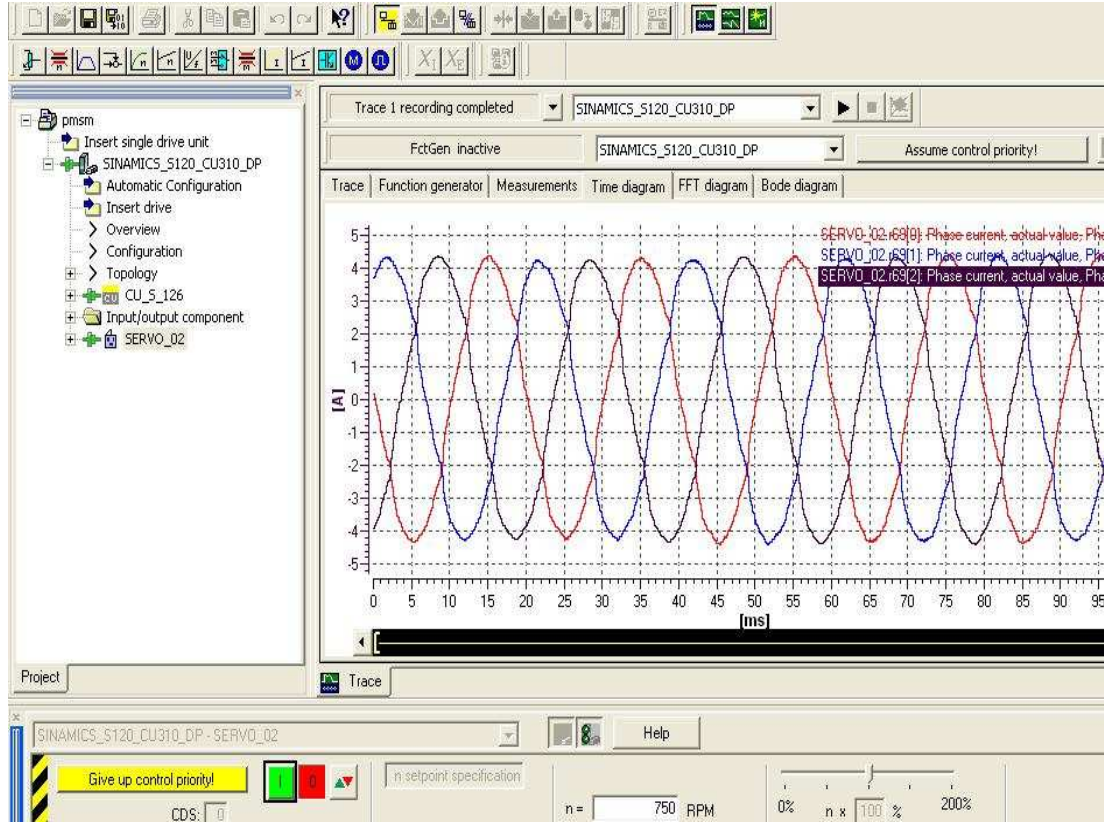
DeneySEL çalışmada kullanılan motor inverter tarafından sürülmektedir. Motoru yüklemekte ise Fuko freni kullanılmaktadır. Fuko freni kutuplarına uygulanan gerilim ve buna bağlı olarak çektiği akıma göre 0-20 Nm arasında bir yük torku üretmektedir. Deneyde kullanılan motorun nominal torku 2.6 Nm olduğu için motor istenilen oranda rahatlıkla yüklenebilmektedir. Kullanılan motor ve fuko freninin etiket değerleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Kullanılan motor ve fren parametreleri

Sabit Mıknatıslı Senkron Motor		Fuko Freni	
Güç	0.82 kW	Güç	110 W
Gerilim	$U_{1N} = 147$ V	Gerilim	$U_{1N} = 50$ V <sub>dc</sub>
Kutup	$p = 4$	Hız	$N_n = 4000$ d/d
Faz	3	Tork	$M_0 = 20$ Nm
Hız	$n_{mak.} = 9000$ d/d, $n_n = 3000$ d/d	Akım	$I_0 = 2.2$ A
Tork	$M_0 = 3$ Nm, $M_n = 2.6$ Nm		
Akım	$I_0 = 3.9$ A, $I_n = 3.5$ A		

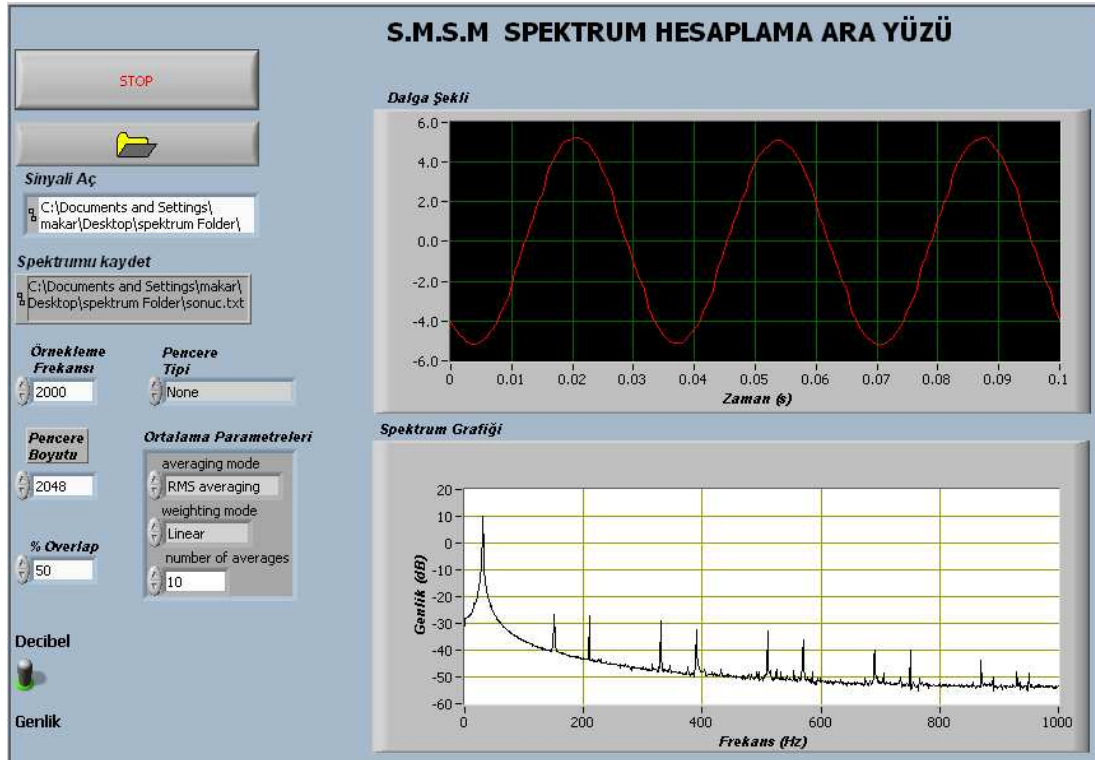
Motor, sürücü programı üzerinden çalıştırılmakta üç faz akım, üç faz gerilim, rotor hızı, rotor konumu, motor elektromanyetik torku yine aynı program üzerinden izlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır. Kullanılan program 8 kHz örnekleme frekansına kadar hızda veriyi kayıt altına almaya ve kaydedilen veriyi “ Microsoft

Excel ” veya “ Metin Belgesi ” dosyası olarak bilgisayara kayıt etmeye olanak sağlamaktadır. Sürücü programın kullanıcı ara yüzü Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4. 2. Sürücü programı arayüzü

Kayıt altına alınan verilerin spektrum incelemesi “LabVIEW 8.2.1” de geliştirilen arayüz ile kolaylıkla sağlanmaktadır. LabVIEW 1980’lerin başında ilk ortaya çıkan, günümüzde gittikçe kullanımı yaygınlaşan, veri toplama ve kontrolünde, veri analizi ve sunumunda kullanılan grafiksel program dilidir (Akar ve Çankaya, 2007). Tasarlanan bu arayüz ile elde edilen spektrum değerleri yine istenilen uzantıda (txt, xls, mat, vb.) kaydedilebilmektedir. Oluşturulan arayüzle istenilen sinyal istenilen pencereleme fonksiyonu, pencere genişliği ve % düzeltme faktörü ile analiz edilebilmekte ve sonuçlar eşzamanlı arayüz grafiğinde çizdirilmektedir. Spektrum değerleri yine genlik veya decibel cinsinden gösterilebilmektedir. Şekil 4.3’ de LabVIEW programında oluşturulan arayüz görülmektedir.



Şekil 4. 3. Spektrum hesaplama program arayüzü

#### 4.1. Eksenden Kaçıklık Arızasının Tespiti

Eksenden kaçıklık arızası stator ile rotor arasındaki hava aralığının eşit olmamasından kaynaklanmaktadır. Buna rotorun statora göre doğru pozisyonlanamaması, rulmanlarda meydana gelen arızalar, stator nüvesinin ve rotor milinin zamanla şeklinde meydana gelen bozulmalar sebep olmaktadır. Eksenden kaçıklık arızası meydana geldiğinde hava aralığındaki akı düzgün olarak dağılmayacak bu ise akımda bozulmalara sebep olacaktır. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi SMSM bir kızak sistemi içerisinde Fuko frenine bağlıdır. Motor ön bağlantı vidaları gevşetileterek bağlı bulunduğu eksenden yatay doğrultuda kaydırılmış ve tekrar sabitlenerek eksenden kaçıklık arızası oluşturulmuştur.

Eksenden kaçıklık arızasının tespiti için HFD yöntemi, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani Akım-Hızın izlenmesi olmak üzere üç değişik yöntem kullanılmış ve bunların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Motor 150 d/d (10 Hz), 450 d/d (30 Hz) ve 750 d/d (50 Hz) hızlarında beş farklı (%0, %25, %50, %75 ve %100)

yükte çalıştırılmıştır. Motor Fuko freni vasıtasıyla yüklenmektedir. Frenin kutup sargıları ayarlı bir *dc* kaynak tarafından beslenmektedir.

#### 4.1.1. HFD yöntemiyle tespit

Motor sinyallerinde eksenden kaçıklık arızası sebebiyle oluşan bozulmalar akım, gerilim, hız ve tork spektrumlarında kendini temel frekansın sağında ve solunda yanbandlar olarak göstermesi beklenmektedir. Oluşan bu yanbandların yeri Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$f_{ecc} = f_s \pm k \cdot f_r \quad (4.1)$$

Eşitlikte ifade edilen  $f_{ecc}$ ,  $f_s$ ,  $k$  ve  $f_r$  sırasıyla eksenden kaçıklık frekansını, besleme frekansını, sabit katsayıyı ve rotor frekansını temsil etmektedir. Rotor frekansı ise Eşitlik 4.2 ile hesaplanır.

$$f_r = \frac{n_r}{60} \quad (4.2)$$

Eşitlikteki  $n_r$  ifadesi rotorun devir/dakika cinsinden hızıdır.

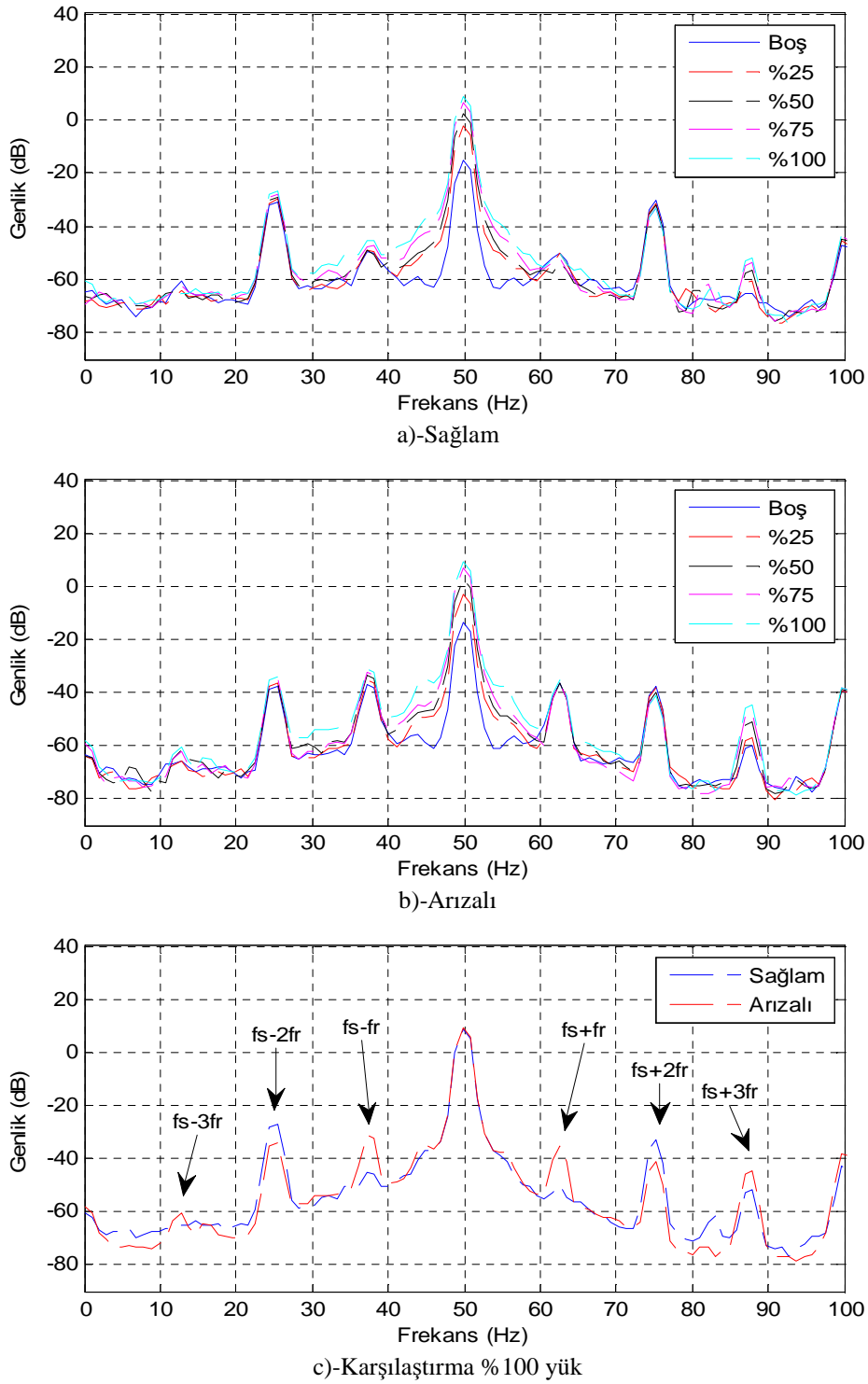
Motora ait akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri 2 kHz örnekleme hızıyla 4 s boyunca kayıt altına alınmıştır. Harmonik analizi 200 periyotluk zaman sinyali ve 4096 noktalı “Hanning” pencereleme fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 4.2’ de değişik çalışma hızlarında SMSM’ nin eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılacak frekanslar verilmiştir. Eksenden kaçıklık arızası; spektrum dönüşümü sonucu elde edilen grafiklerde en belirgin olarak  $\pm 3$ . harmoniğe kadar görülmektedir.

Tablo 4. 2. Eksenden kaçıklık arıza frekansları

$f_s$	$n_r$	$f_r$	$f_s - f_r$	$f_s + f_r$	$f_s - 2f_r$	$f_s + 2f_r$	$f_s - 3f_r$	$f_s + 3f_r$
10 Hz	150 d/d	2.5	7.5	12.5	5	15	2.5	17.5
30 Hz	450 d/d	7.5	22.5	37.5	15	45	7.5	52.5
50 Hz	750 d/d	12.5	37.5	62.5	25	75	12.5	87.5

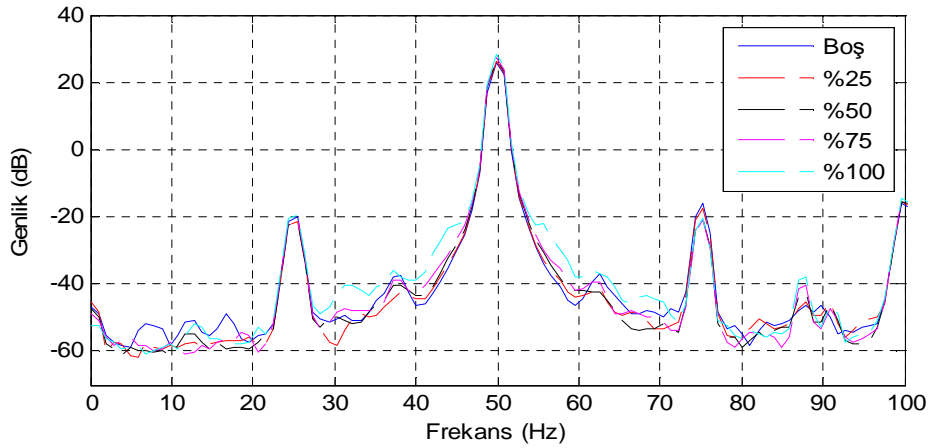
Şekil 4.4’ de 750 d/d (50 Hz) hızda sağlam ve arızalı motora ait beş farklı çalışma yükünde elde edilen akıma ait frekans spektrumları verilmiştir. Frekans spektrumu Tablo 4.2’ ye bağlı olarak 0-100 Hz arasında çizdirilmiştir.



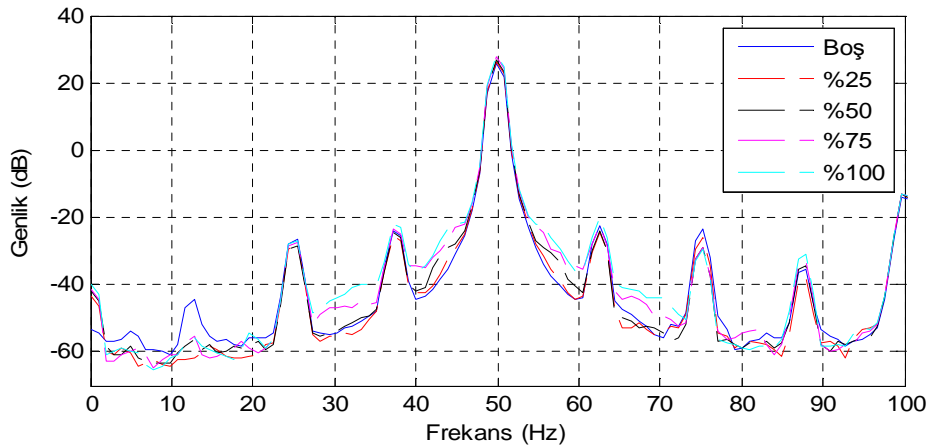
Şekil 4. 4. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık akım spektrumları

Şekil 4.4' deki tam yük değerinde karşılaştırmalı olarak verilen grafik incelendiğinde şu hususlar ortaya çıkmaktadır; temel frekansın sağında ( $f_s+f_r=62.5$  Hz) genlik değişimi  $-50$  dB' den  $-35$  dB' ye yükselirken solunda ( $f_s-f_r=37.5$  Hz) genlik değişimi  $-45.5$  dB' den  $-31.2$  dB' ye yükselmiştir. Ortaya çıkan arıza yanband

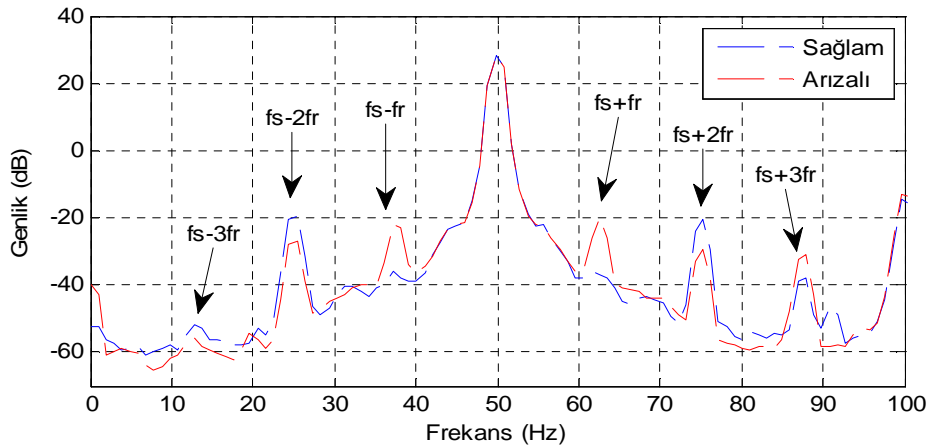
harmoniklerinde en büyük genlik değişimi temel frekansa en yakın harmoniklerde gözlemlenmiştir. Diğer arıza yanband harmonikleri ise; ( $f_s+2f_r=75$  Hz) -33dB' den -41 dB' ye ve ( $f_s-2f_r=25$  Hz) -26 dB 'den -34 dB' ye değişim göstermiştir. Arıza yanband frekansının üçüncü harmoniğinde ise değişim; ( $f_s+3f_r=87.5$  Hz) sağlam için -51.7 dB'den -44.7 dB 'ye ( $f_s-3f_r=12.5$  Hz) -65 dB 'den -60 dB' ye yükselmiştir.



a)-Sağlam



b)-Arızalı

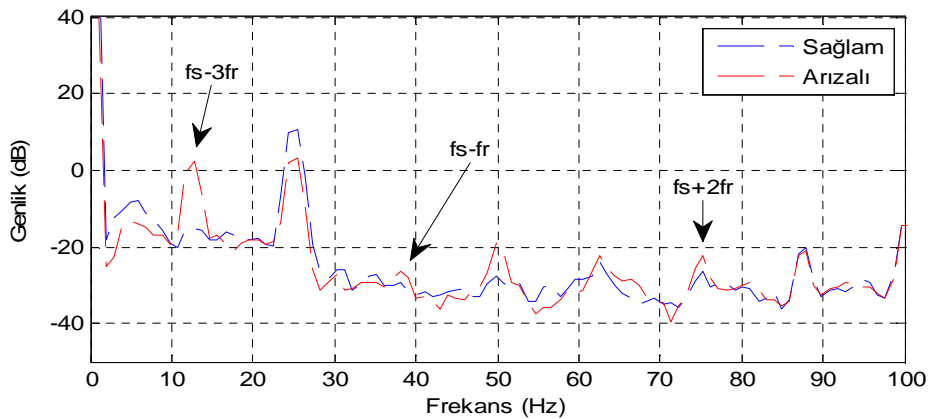
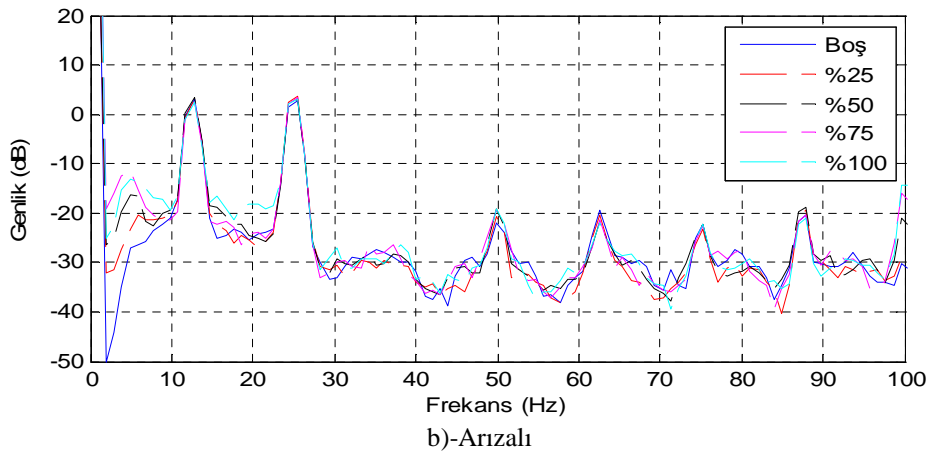
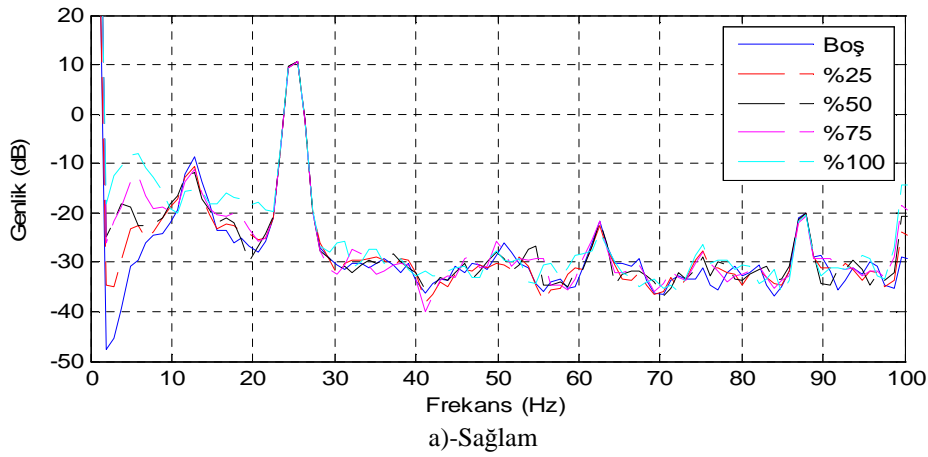


c)-Karşılaştırma % 100 yük

Şekil 4. 5. 750 d/d (50 Hz) ekseninden kaçıklık gerilim spektrumları

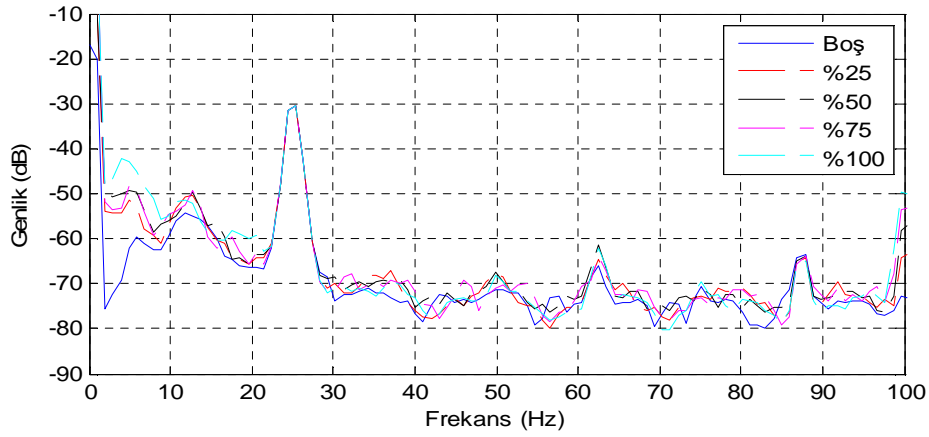


Şekil 4.5' deki gerilim spektrumları incelendiğinde genlik değişimleri; birinci sağ yanbanda ( $f_s+f_r=62.5$  Hz)  $-37$  dB' den  $-20$  dB'ye ve birinci sol yanbanda ( $f_s-f_r=37.5$  Hz)  $-36$  dB'den  $-22$  dB' ye yükselmiştir. İkinci sağ yanband ( $f_s+2f_r=75$  Hz) için değişim  $-20.4$  dB' den  $-29.4$  dB' ye düşmüş, ikinci sol yanband ( $f_s-2f_r=25$  Hz) içinse değişim  $-19.7$  dB' den  $-27.4$  dB' ye azalmıştır. Üçüncü harmoniklerde ise durum;  $-37.9$  dB' den  $-31.6$  dB' ye ( $f_s+3f_r=87.5$  Hz),  $-51.5$  dB' den  $-55.6$  dB' ye ( $f_s-3f_r=12.5$  Hz) azalmıştır.

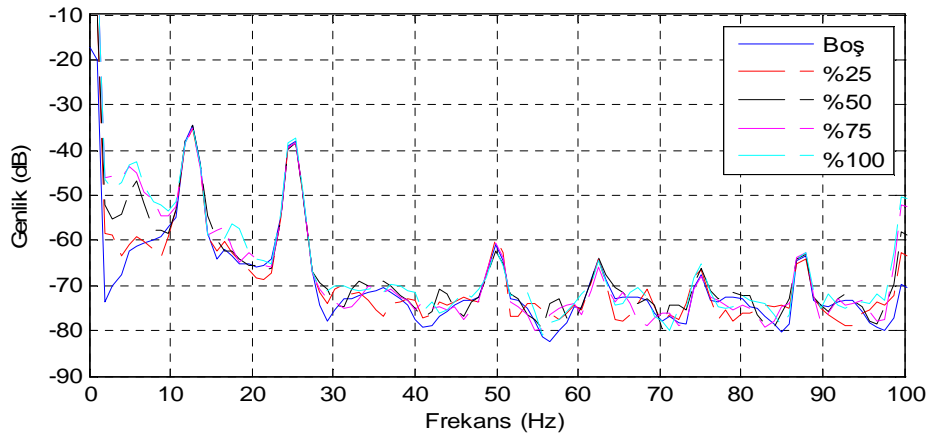


Şekil 4. 6. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık hız spektrumları

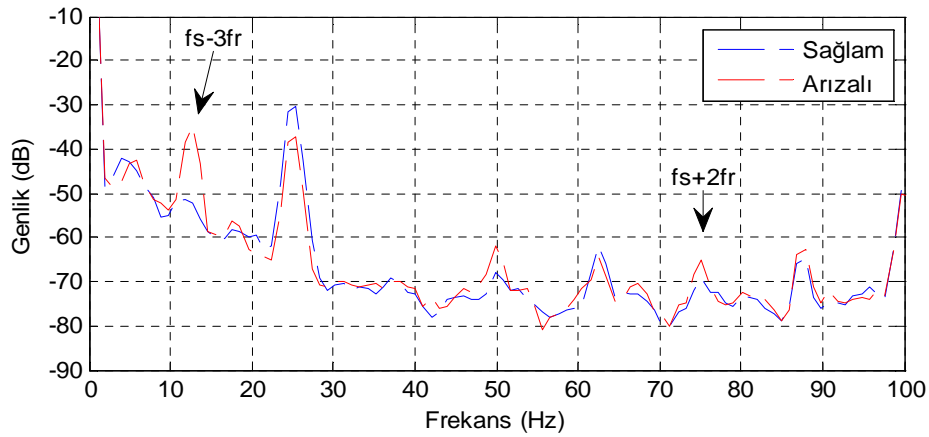
Şekil 4.6' da verilen hız spektrumunda akım ve gerilim spektrumlarında olduğu gibi çok belirgin yanband harmonikleri görülmemiştir. Şekil 4.6.c incelendiğinde hız spektrumundaki değişim;  $-15.2$  dB' den  $1.7$  dB' ye ( $f_s-3f_r=12.5$  Hz) artış şeklinde görülmüştür. Yine  $-26.3$  dB' den  $-22.3$  dB' ye ( $f_s+2f_r=75$  Hz) değişim ikinci sağ yanband harmoniğinde artmıştır.



a)-Sağlam



b)-Arızalı



c)-Karşılaştırma %100 yük

Şekil 4. 7. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık tork spektrumları

Şekil 4.7’ deki tork spektrum grafiklerinde ise; genlik değişimi -52 dB’ den -35.5 dB’ ye ( $f_s-3f_r=12.5$  Hz) artış şeklinde olmuştur. İkinci sağ yanband da değişim -69.5 dB’ den -65.5 dB’ ye ( $f_s+2f_r=75$  Hz) artmıştır. Diğer çalışma hızlarında elde edilen değerler ise sırasıyla Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’ de verilmiştir. Tablolarda görülen “S” ve “A” ifadeleri sağlam ve arızalı durumdaki genlik değerlerini temsil etmektedir.

Tablo 4. 3. 150 d/d (10 Hz) eksenenden kaçıklık arızası spektrum değerleri

Yük	150 d/d (10 Hz) Hızda Akım Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-51	-47.5	-50	-46.5	-28.5	-36.9	-30.1	-37.8	-62	-66	-59.5	-61.7
%25	-40.5	-38.5	-39	-38.7	-29.7	-37.3	-32	-39.5	-59.8	-62.4	-59.6	-60.4
%50	-37	-32.8	-33	-32.8	-29.3	-34.5	-32.2	-37.4	-58.7	-58.2	-59.7	-57.3
%75	-28	-28.3	-28.7	-28.3	-25	-30.7	-28.1	-33.7	-52.9	-55.7	-55.3	-53.4
%100	-25	-26.1	-26.5	-26	-22.2	-27.9	-25.1	-30.8	-52.4	-53.1	-52.8	-49.8
Yük	150 d/d (10 Hz) Hızda Gerilim Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-21.5	-21.1	-21.5	-24.4	-16.7	-23.6	-16.4	-23.6	-48.4	-49.8	-44.9	-47.8
%25	-19.4	-19.1	-19.3	-18.8	-21.3	-28	-18.3	-25.8	-47.7	-48.2	-44.5	-47.2
%50	-17.6	-17.6	-17.5	-17.3	-20.8	-26.8	-18.4	-24.2	-45.7	-46.6	-44.6	-45.5
%75	-16.4	-16	-16.3	-15.7	-18.3	-23.4	-17.2	-22.5	-44.9	-43.8	-43.1	-41.7
%100	-15.2	-14.8	-15.1	-14.8	-15.6	-20	-15.1	-19.3	-43.1	-44.7	-42.1	-42.1
Yük	150 d/d (10 Hz) Hızda Hız Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-27.3	-28.3	-31.5	-34.7	3.7	-5	-40	-35.5	-31.4	-22.3	-32.9	-30
%25	-25.7	-30.5	-30.4	-35.1	3.6	-4.1	-37	-34.1	-30.7	-20.5	-30.8	-31.4
%50	-26.2	-27.5	-28.7	-29.8	5.7	-4.5	-33.5	-33.4	-25	-23.8	-31.3	-28.4
%75	-24.9	-24.7	-29.9	-29	5.6	-2.3	-3.1	-28.4	-24.2	-18.8	-26.8	-28
%100	-25.4	-27.6	-28.3	-28.7	5	-1.8	-32.1	-25.5	-20.7	-20.6	-27.1	-21.5
Yük	150 d/d (10 Hz) Hızda Tork Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-61.2	-63	-71.2	-73.4	-28	-36.5	-75.3	-73.7	-60.5	-47.5	-72.9	-71.7
%25	-60	-65	-70.5	-72.5	-30.5	-38	-75.5	-72.5	-56.8	-47.8	-75.9	-72.5
%50	-58.7	-61.4	-73.5	-68.7	-30.4	-37.6	-74.1	-68.2	-50	-47.7	-69.6	-67.4
%75	-61.1	-62.9	-67.2	-68.8	-29.4	-36.2	-71.6	-71.1	-53.8	-48.1	-72.2	-71.4
%100	-58.1	-62.2	-66.9	-67	-27.2	-33.1	-66.2	-71.8	-47.1	-47.2	-67.4	-68.2

150 d/d (10 Hz) hızdaki akım ve gerilim spektrum değerlerinin değişimleri Tablo 4.3' den incelendiğinde eksenden kaçıklık arızasının teşhisi için çok önemli ipuçları elde edilmemiştir. İlgili yanband arıza harmoniklerinin genlik değişimleri çok fazla değildir. Ancak bu çalışma hızında da 750 d/d çalışma hızında olduğu gibi “ $f_s-2f_r$ ” ve “ $f_s+2f_r$ ” frekanslarında sağlam çalışma için genlik değerleri arızalı durumdaki genlik değerlerinden daha büyüktür. Bu durum ilgili tabloda iki değişik renk ile ifade edilmiştir. Hız ve tork spektrumlarında ise 750 d/d (50 Hz) çalışma hız spektrumlarında olduğu gibi “ $f_s-3f_r$ ” ve “ $f_s+2f_r$ ” frekanslarında arızalı ve sağlam durum genlikleri arasında değişim görülmüştür. Bu değişim “ $f_s-3f_r$ ” frekansında daha belirgindir. 450 d/d (30 Hz) çalışma hızındaki spektrum değerleri ise Tablo 4.4' de sunulmuştur.

Tablo 4. 4. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık arızası spektrum değerleri

Yük	450 d/d (30 Hz) Hızda Akım Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-48.9	-32.8	-49.5	-34.1	-33.1	-40	-32.6	-39.9	-66	-67.4	-68	-63.4
%25	-43.2	-32.4	-45.8	-35.2	-31.8	-38.7	-33.1	-40.7	-65.4	-67.2	-64.1	-59
%50	-42.4	-30.3	-46.4	-34.3	-30.4	-37.2	-33.8	-41.4	-64.4	-65.9	-61	-53.5
%75	-44.1	-28.7	-47.7	-28.7	-29.2	-35.5	-34	-40.8	-62.1	-63	-57.5	-49.4
%100	-43	-27.7	-45.3	-27.7	-27.8	-34.4	-32.7	-39.7	-63.2	-61.1	-54.9	-46.5
Yük	450 d/d (30 Hz) Hızda Gerilim Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-35.5	-20.4	-35	-20.3	-22.4	-27.3	-21.2	-26.6	-53.9	-43.8	-55.6	-39
%25	-35.8	-22.9	-34.2	-21.6	-24.1	-30.6	-24.4	-31	-58.1	-57.1	-56.5	-45
%50	-36.6	-20.9	-33.6	-19.2	-23.2	-30.1	-24.3	-31.2	-57.9	-56.4	-51.8	-42.2
%75	-33.1	-20.8	-32	-19.1	-22	-29.1	-22.8	-29.7	-57.8	-57.4	-47.9	-40.1
%100	-33.7	-19.8	-31.6	-17.9	-21.2	-27.1	-21.5	-27.6	-54.9	-55	-44.3	-37.3
Yük	450 d/d (30 Hz) Hızda Hız Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-35.6	-29.7	-26.2	-28.3	6.4	0	-32.7	-26.4	-12.2	2	-24.9	-24.1
%25	-29.7	-30	-24.2	-27.8	6.5	-0.3	-29.6	-28	-13.7	2.2	-24	-25.1
%50	-30.5	-28.8	-27.9	-26.4	6.9	-0.1	-30.3	-29.1	-13.4	1.7	-25.8	-25.2
%75	-28.4	-25.3	-25.6	-26.2	6.7	-0.7	-31	-27.8	-14.6	1.3	-25.5	-23.5
%100	-28.6	-27.6	-25.6	-26.7	6.4	-0.8	-27.8	-26.2	-13.5	0.5	-24.3	-24.5

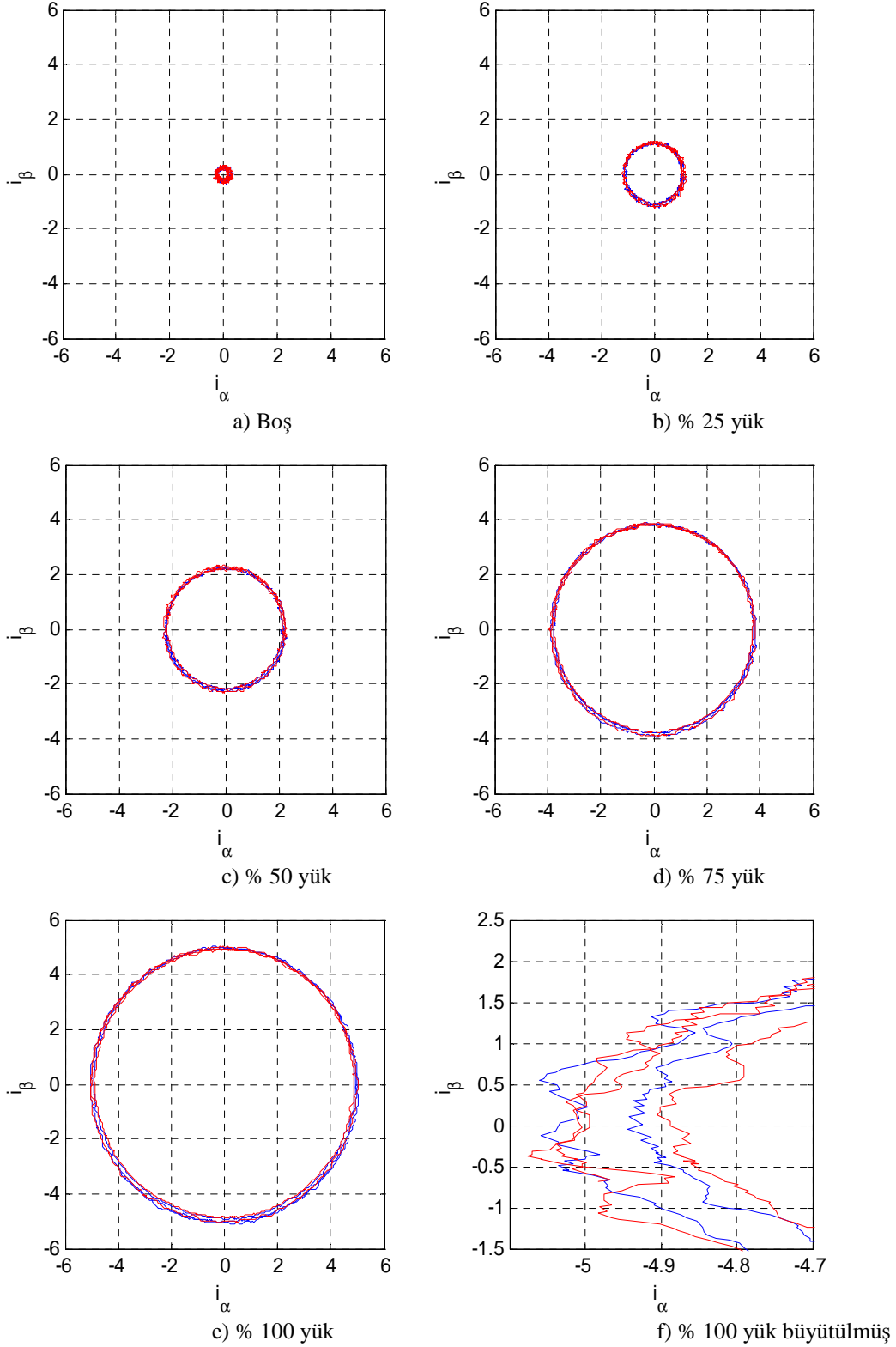
Tablo 4. 5. Devamı												
Yük	450 d/d (30 Hz) Hızda Tork Spektrum Tablosu											
	$f_s-f_r$ (dB)		$f_s+f_r$ (dB)		$f_s-2f_r$ (dB)		$f_s+2f_r$ (dB)		$f_s-3f_r$ (dB)		$f_s+3f_r$ (dB)	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Boş	-76	-72.8	-70.3	-69.2	-32.6	-40	-75	-69.3	-48.2	-33.4	-67.5	-66.7
%25	-71.5	-71.1	-67.8	-68.1	-32.5	-40.1	-74.4	-69.7	-49.4	-33	-67.1	-66.8
%50	-71.7	-68.9	-68.5	-68.7	-32.7	-39.9	-74.1	-69.1	-48.3	-33.6	-67.3	-66.5
%75	-68.3	-69	-67.9	-67.7	-32.4	-41	-72.5	-70.7	-47.3	-34.2	-67.8	-68.8
%100	-75	-64.6	-68.6	-66.3	-32.7	-39.7	-75.3	-70.4	-47.6	-34.4	-66.8	-66.4

Akım spektrum tablosu incelendiğinde 750 d/d (50 Hz) çalışma hızında olduğu gibi temel frekansın sağında ( $f_s+f_r$ ) ve solunda ( $f_s-f_r$ ) yer alan arıza yanbandlarının genlik değişimi en büyük değerler olarak elde edilmiştir. Bu durum var olan arızanın tespitini kolaylaştırmaktadır. 150 d/d (10 Hz) hızda bu durum net olarak görülmezken, hız arttıkça arıza yanband harmonikleri akım spektrumunda daha net görülmektedir. Yine arıza frekasının pozitif üçüncü ( $f_s+3f_r$ ) harmoniğinde de genlik değişimi görülmektedir. Genlik değişim miktarı birinci harmonik kadar olmasada arıza tespitinde kolaylık sağlamaktadır. Yine diğer çalışma hızlarında görülen temel harmoniğin solunda ( $f_s-2f_r$ ) ve sağındaki ( $f_s+2f_r$ ) frekanslarda sağlam durumun genlik değeri arızalı duruma eşit veya büyüktür. Akım spektrumunda elde edilen bulgular gerilim spektrumunda da görülmüştür. Hız ve tork spektrumları incelendiğinde ise 150 d/d (10 Hz) ve 750 d/d (50 Hz) hızlarda olduğu gibi “ $f_s+2f_r$ ” ve “ $f_s-3f_r$ ” harmonikleri arıza tespiti için ayırt edici harmonikler olarak görülmüştür. Özellikle “ $f_s-3f_r$ ” arıza yanband harmoniğinin genlik değişimi yaklaşık -15 dB mertebesinde dir. Yine tüm spektrumlarında görülen “ $f_s-2f_r$ ” frekansında sağlam durumun genlik değerinin arızalı durumdan büyük olması bütün hız ve tork spektrumlarında da gerçekleşmiştir.

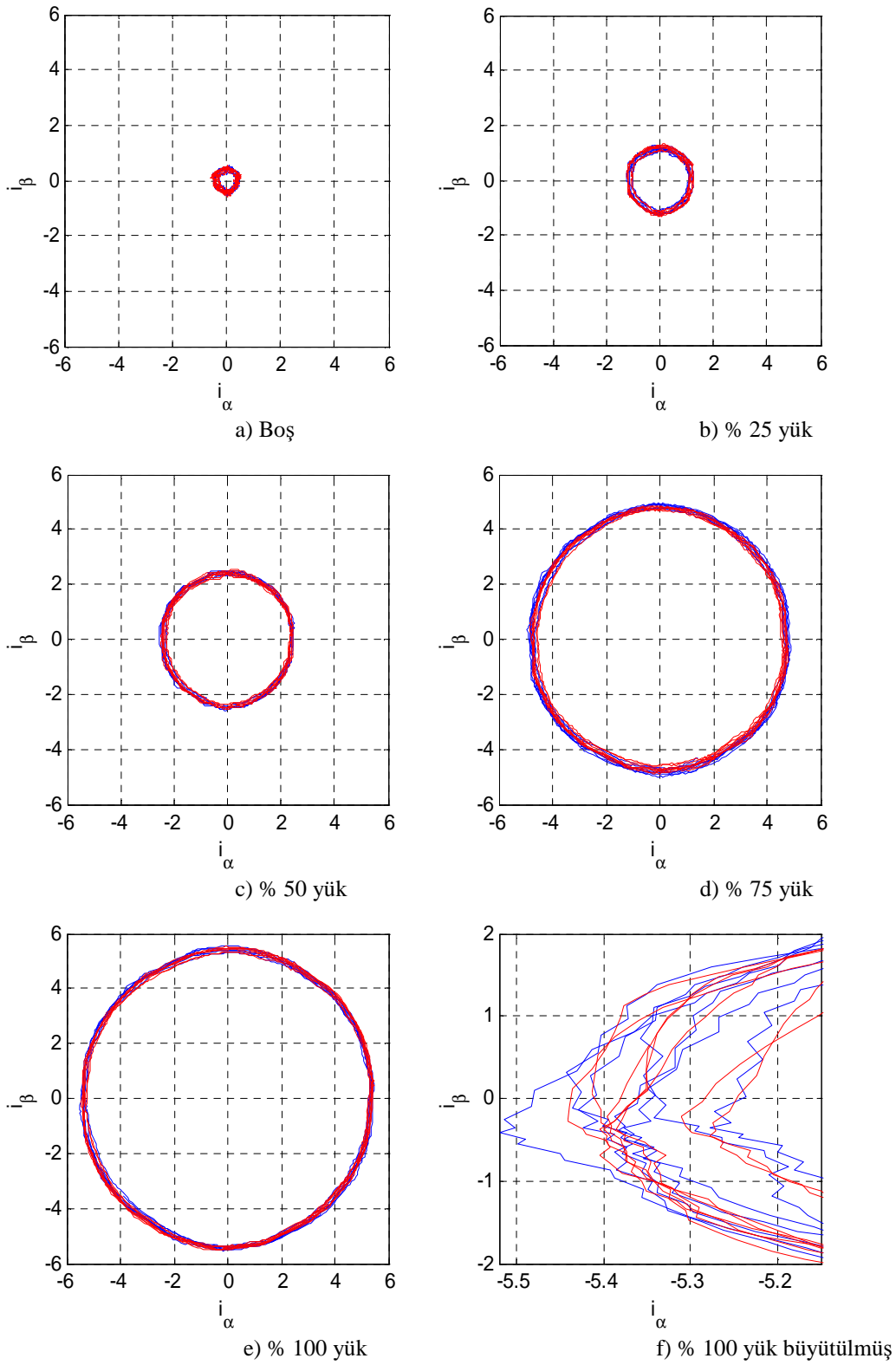
#### 4.1.2. Alfa-Beta dönüşüm yöntemiyle tespit

Eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılan bir diğer yöntemde Alfa-Beta dönüşümüdür. Bu yöntemde motor sağlam ve arızalı durumda üç farklı hız ve beş farklı yük durumu için çalıştırılmıştır. Motor 3 faz akımı 8 kHz örnekleme hızıyla kayıt altına alınmıştır. HFD yönteminde 2kHz örnekleme frekansı yeterli olmasına karşın bu yöntemde en küçük değişimler dahi oluşacak şekli etkileyeceğinden 8 kHz

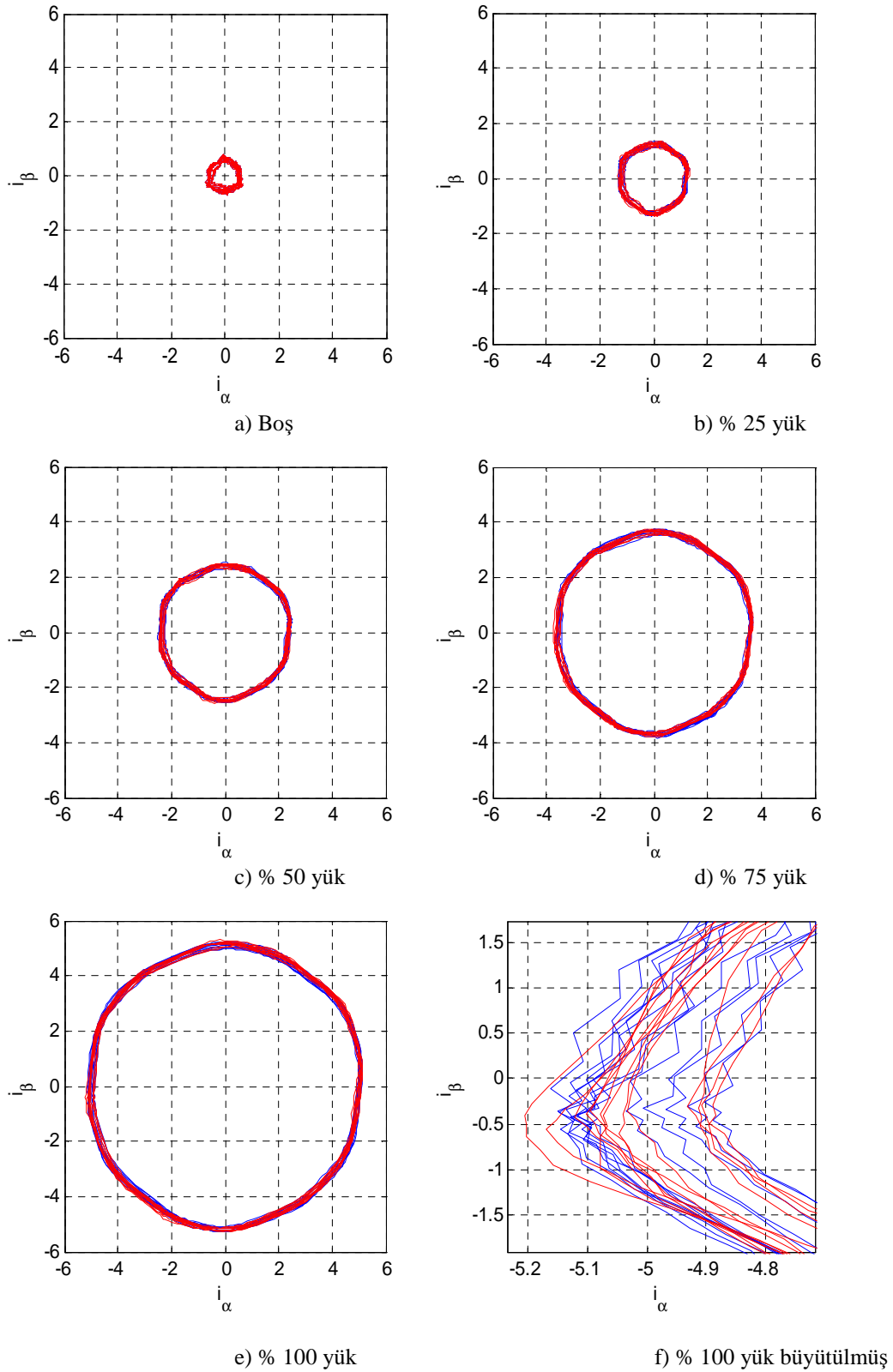
örnekleme frekansı seçilmiştir. Eşitlik 3.11 ile elde edilen Alfa-Beta akımlarına bağlı olarak oluşan şekillerde sağlam çalışma durumu mavi renk ile arızalı çalışma durumu ise kırmızı renk ile sunulmuştur.



Şekil 4. 8. 150 d/d (10 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri



Şekil 4. 9. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri



Şekil 4. 10. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık alfa-beta grafikleri

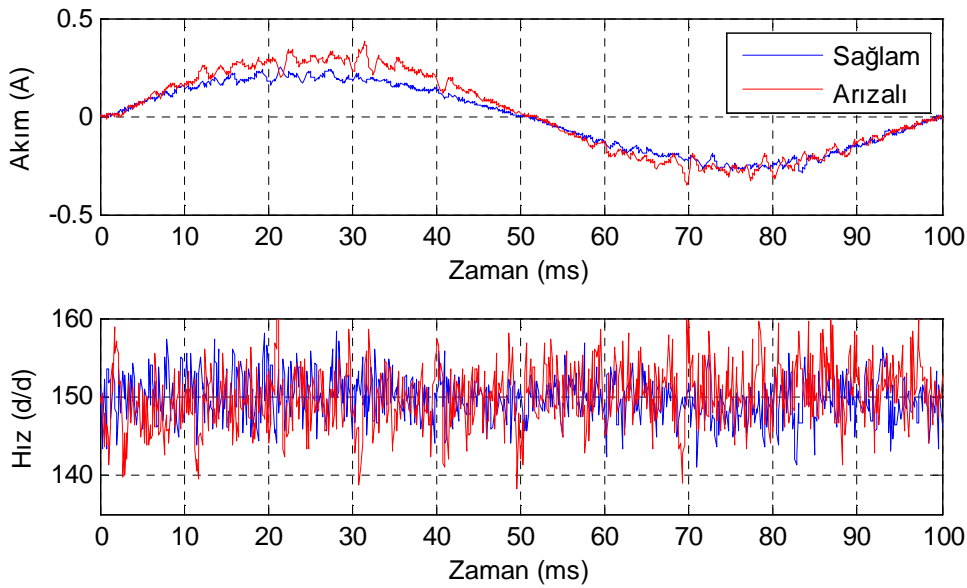
Şekil 4.8-4.10 incelendiğinde özellikle boş çalışma durumunda grafiklerde birbirinden sapmalar görülmektedir. Motorun sürücüden beslenmesi ve motora



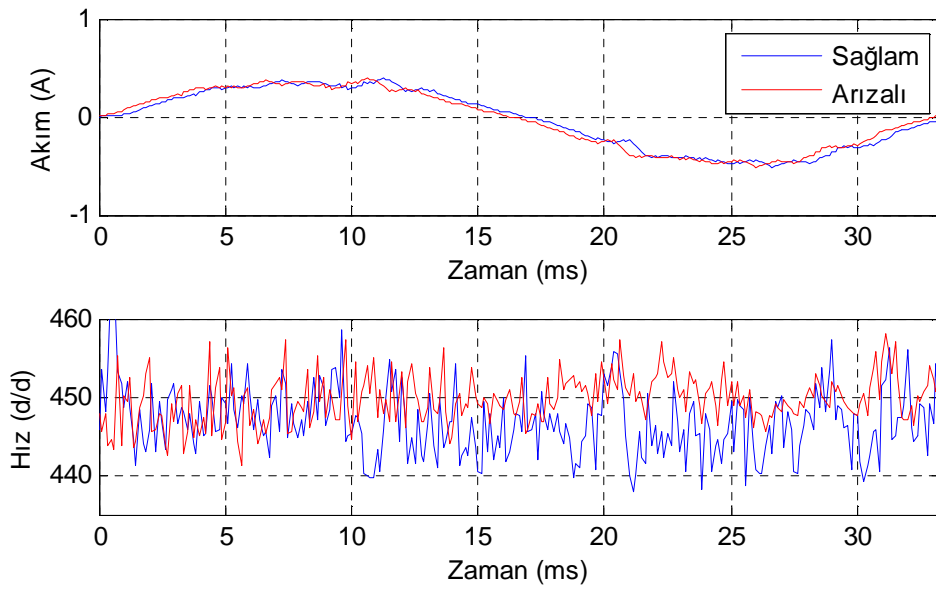
uygulanan gerilimin saf sinüsoidal yapıda olmaması sebebiyle geometrik olarak çembere yakın çıkması gereken şekiller çember teşkil etmemiştir. Buna sürücünün katmış olduğu harmoniklerin her birinin motorda oluşturduğu uzay harmonikleri sebep olmuştur. Yüklü çalışma grafikleri ise üst üste çıkmış gibi görülsede Şekil 8-10.c' de verilen büyütülmüş grafikler incelendiğinde üst üste olmadığı görülmektedir. Bu durum sağlam ve arızalı durumun ayırt edilmesinde rahatlıkla kullanılabilir.

#### 4.1.3. Ani akım-hızın izlenmesi yöntemiyle tespit

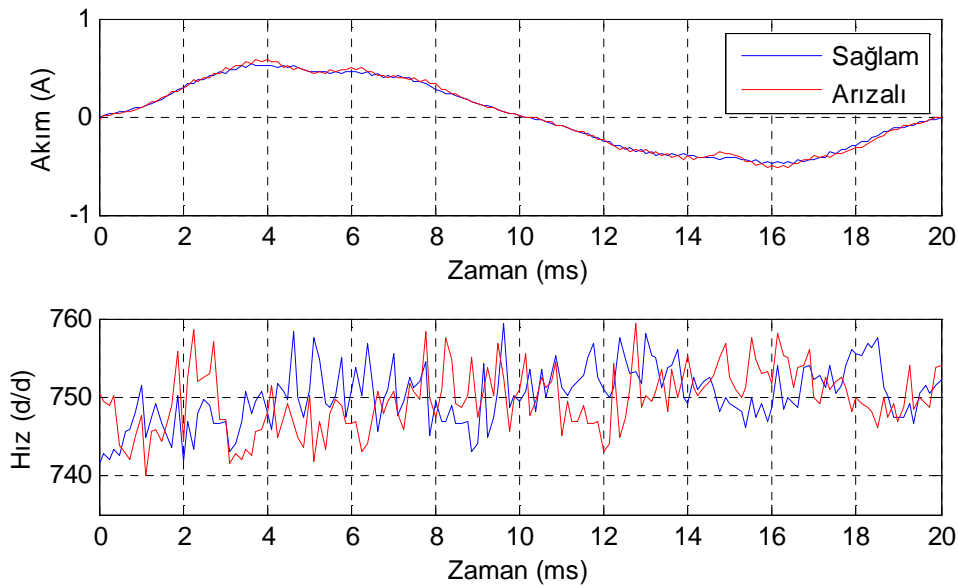
Motordan alınan veri sayısı arttıkça ve farklılaştıkça motorun durumu hakkında daha fazla bilgi sahibi olunur. Motor üç faz akımından başka bir diğer izlenebilecek parametrede motor hızıdır. Motorda herhangi bir arıza oluşması durumunda motor akımıyla birlikte motor hızında da değişim olacaktır. Bu bilgileri kullanmak motorda oluşan arızalar hakkında bilgi verecektir. Bu yöntemde de motor üç faz akımı ve rotor hızı 8 kHz örnekleme hızıyla kaydedilmiştir. Üç farklı çalışma hızında akım ve hızdaki değişim Şekil 4.11-4.13' de verilmiştir. Şekillerde karmaşıklıktan kurtulmak için bir faz akımının ve hızının bir periyotluk değişimi çizdirilmiştir.



Şekil 4. 11. 150 d/d (10 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği



Şekil 4. 12. 450 d/d (30 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği



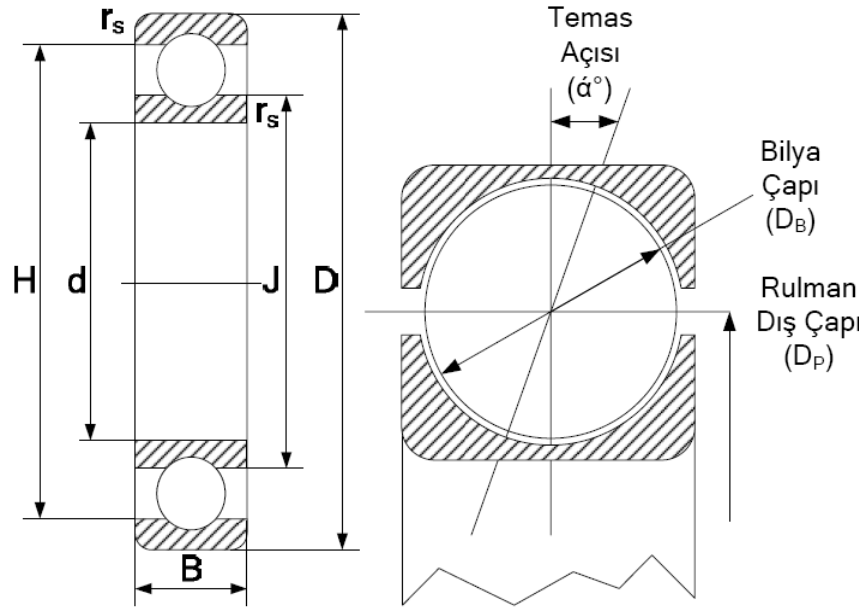
Şekil 4. 13. 750 d/d (50 Hz) eksenden kaçıklık ani akım-hız boş çalışma grafiği

Sunulan grafikler incelendiğinde sağlam ve arızalı durumlarda; motor akımlarında ve hızındaki değişimler görülmektedir. Bu durum üç değişik çalışma hızında da görülmüştür. Özellikle motor hızındaki değişim ve salınımlar açıkça görülmektedir. Bu değişimler sağlam ve eksenden kaçıklık durumu ayırt etmekte YSA gibi çok küçük değişimleri ayırt edebilen bir yapıyla başarılı bir şekilde kullanılabilir. Grafiklerde bir faz için değişimler verildiği unutulmamalıdır. Üç faz için bu değişimler daha belirleyici olacaktır.

## 4.2. Rulman Arızasının Tespiti

Rulmanlar elektrik motorlarının en önemli parçalarındandır. Bu parçaların arızalanmaları zamanla motorda diğer arızaların ortaya çıkmasına sebep olur. Örneğin rulmanda meydana gelen bir arıza rotorun dönüş ekseninden kayarak eksenden kaçıklık arızasına sebep olabilir. Eğer bu arıza zamanında giderilmezse rotorun statora sürtmesi sonucu daha ciddi arızaları ortaya çıkartabilir. Eğer motor tipi SMSM gibi rotor ile stator arasındaki hava aralığı yaklaşık 1 mm civarında bir motor ise bu arızaların tespiti ve teşhisi çok daha fazla önem arz etmektedir.

Deney düzeneğimizde kullanılan motorda 6204ZZ kodlu rulman tipi kullanılmaktadır. Kullanılan rulman geometrisi Şekil 4.14’ de görülmektedir.



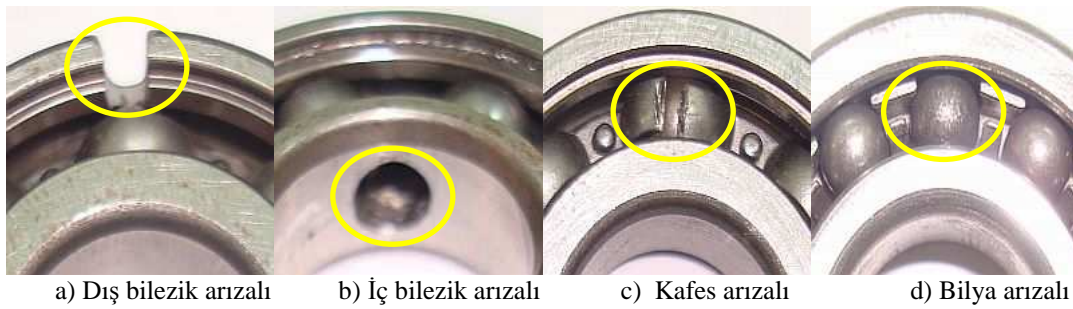
Şekil 4. 14. Kullanılan rulman geometrisi

Şekil 4.14’ de verilen rulman geometrisinde ifade edilen ölçüler ise Tablo 4.5’ de verilmiştir.

Tablo 4. 6. Kullanılan rulmana ait katalog değerleri

Boyutlar						$N_B$	$\alpha^{0}$	Hız (d/d)
d[mm]	D[mm]	B[mm]	rsmin[mm]	$D_B$ [mm]	$D_P$ [mm]			
20	47	14	1	7.94	33.5	8	0	18000

Rulmanlarda meydana gelebilecek muhtemel arızaları simule etmek için 4 farklı arıza tipi üzerinde durulmuştur. Rulman dış ve iç bilezik yüzeylerinde suni arızalar oluşturularak akım, gerilim, hız ve tork sinyalleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yine rulmanda bilyaları tutmakta kullanılan kafeste çatlak arızası oluşturulmuştur. Bilya arızası ise aynı boyutlarda, aynı kodlu çift sıralı bir rulman üzerinde oluşturulmuştur. Bilya arızası rulmanda diğer kısımlara herhangi bir arıza vermeden gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan arızalı rulmanlar Şekil 4.15’ de görülmektedir.



Şekil 4. 15. Deneysel çalışmada kullanılan rulmanlar

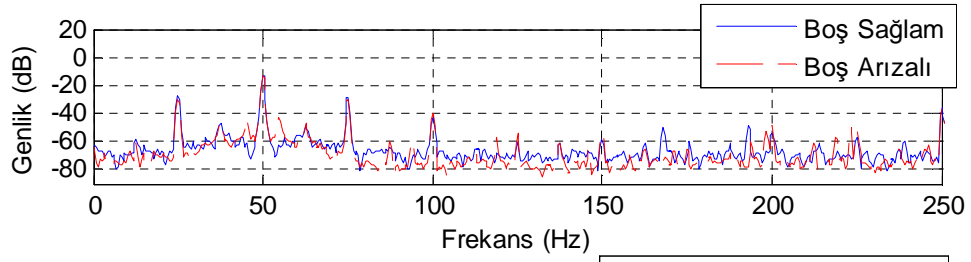
Rulman arızasının tespiti için de eksenden kaçıklık arızasında kullanılan yöntemler kullanılmıştır. Motor yine 3 değişik çalışma hızında ve 5 değişik yük altında çalıştırılmıştır.

#### 4.2.1. HFD yöntemiyle tespit

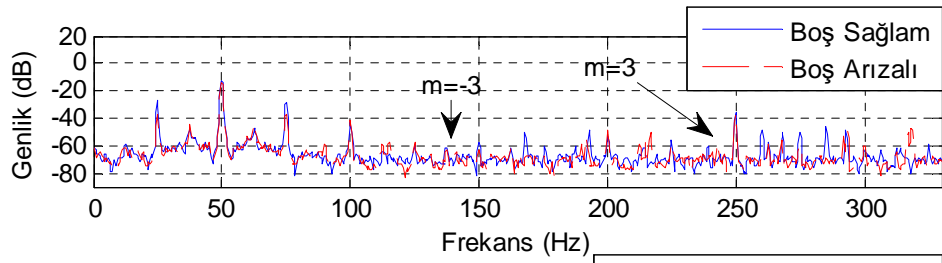
Rulmanda herhangi bir arıza oluşması durumunda arızanın yerine bağlı olarak frekans spektrumunda genlik değişimleri oluşur. Hangi arızada frekans spektrumunda hangi bölgede değişim olacağı Eşitlik 1.2-1.5 ile hesaplanmaktadır. Spektrumda beliren arıza frekansı ise  $f_a = |f_s \pm mfv|$  ile hesaplanır. Eşitlikte kullanılan “*m*” katsayıdır. Bu uygulamada da spektrumlar 4096 noktali ve Hanning pencereleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. 750 d/d (50 Hz) çalışma hızında meydana gelen arıza harmonik frekansları Tablo 4.6’ da sunulmuştur.

Tablo 4. 7. 750 d/d (50 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları

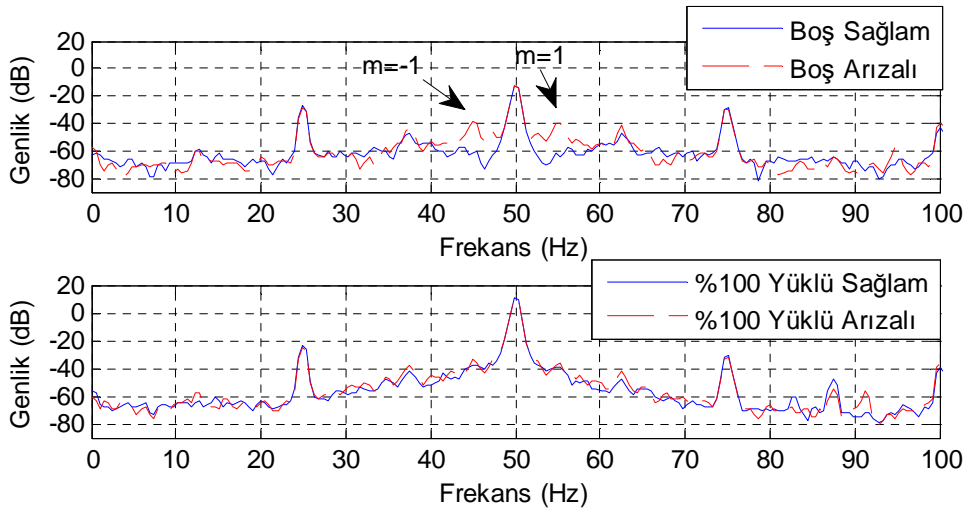
fv (Hz)	fs= 50 Hz							
	m=-1	m=1	m=-2	m=2	m=-3	m=3	m=-4	m=4
$f_{da}=38$ Hz	12	88	26	126	64	164	102	202
$f_{ia}=63.5$ Hz	13.5	113.5	77	177	140.5	240.5	204	304
$f_{ka}=4.76$ Hz	45.2	54.7	40.4	59.5	35.72	64.2	30.9	69
$f_{ba}=49.6$ Hz	0.04	99.6	49.2	149.2	98.8	198.8	148.4	248.4



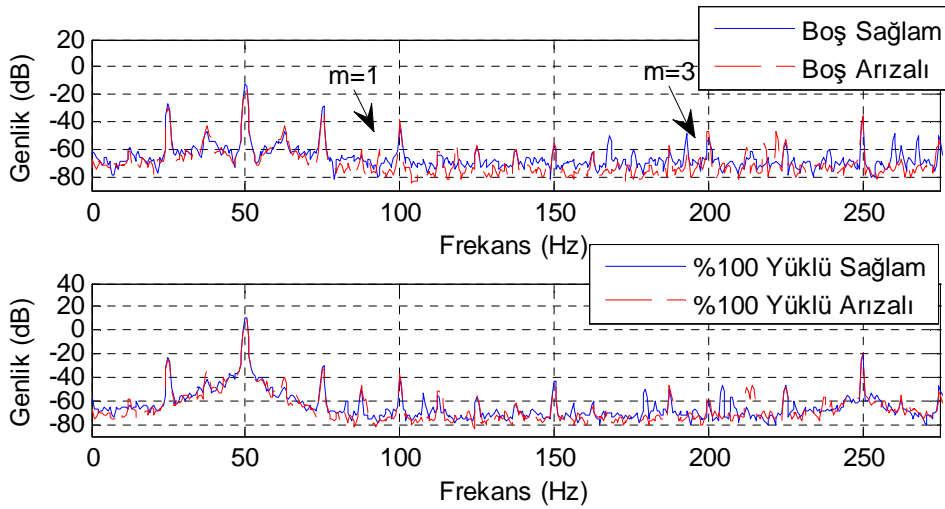
a) Dış bilezik arızası iki farklı yükte



b) İç bilezik arızası iki farklı yükte



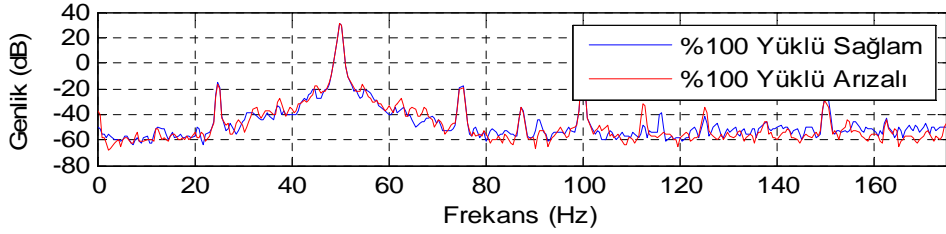
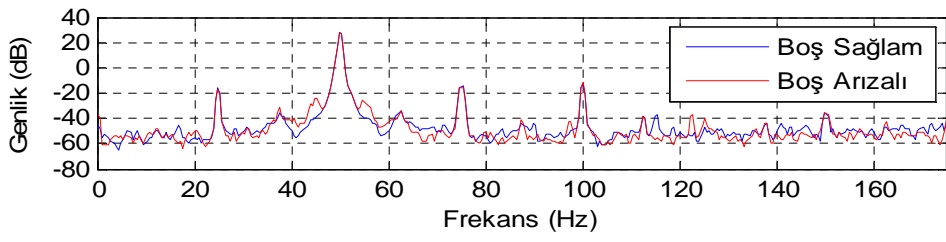
c) Kafes arızası iki farklı yükte



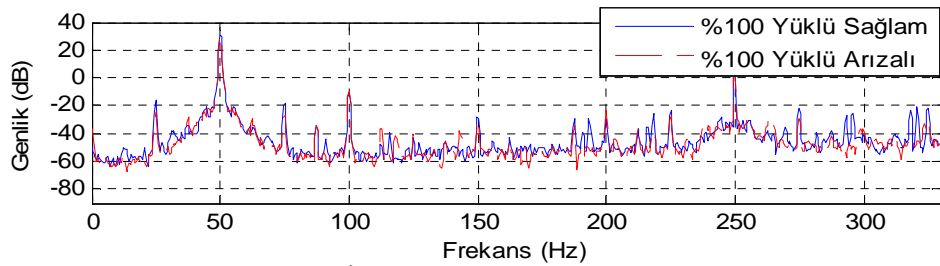
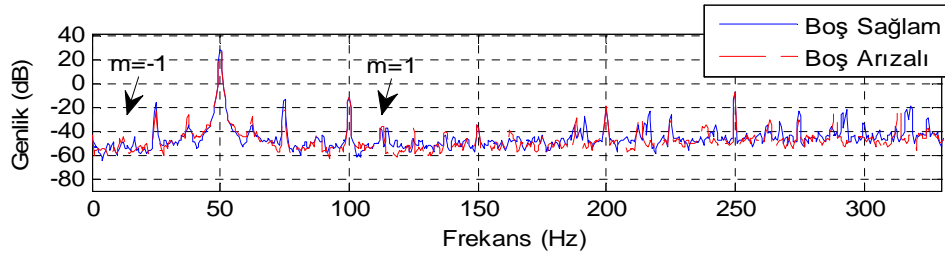
d) Bilya arızası iki farklı yükte

Şekil 4. 16. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) akım spektrumları

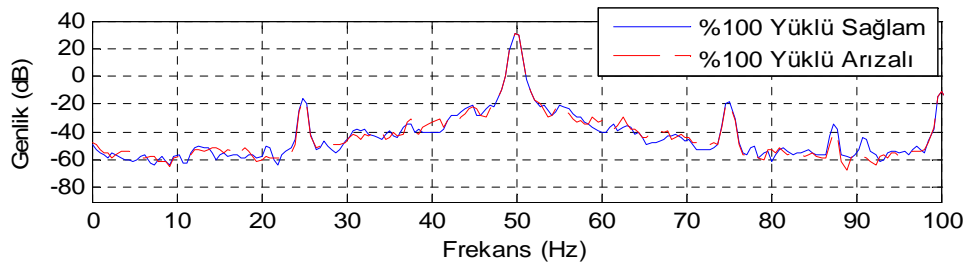
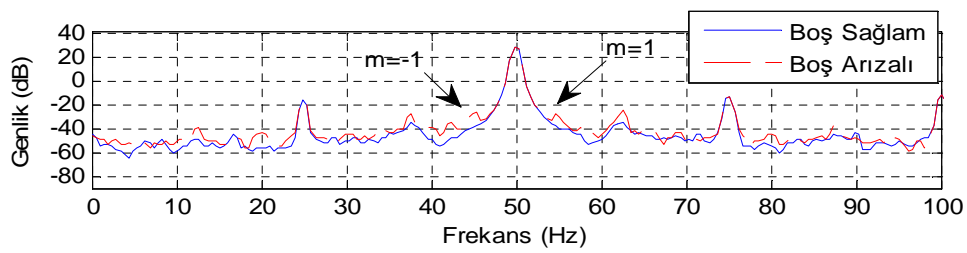
750 d/d (50 Hz) akım spektrumları incelendiğinde Tablo 4.6' da verilen karakteristik harmoniklere boş çalışma spektrumlarında düşük genlikli olarak rastlanmıştır. Dış bilezik arızası için akım spektrumunda karakteristik genlik değişimleri küçük olmasına karşın rulman yüzeyinde meydana gelen bozulma akım spektrumunda eksenden kaçıklık pikleri oluşturmuştur. Bu ise ayırt edici bir durumdur. İç bilezik arızası içinse  $m=-3$  için genlik değeri  $-73$  dB' den  $-66$  dB' ye,  $m=3$  için  $-76$  dB' den  $-66$  dB' ye yükselmiştir. Kafes arızasına ait grafiklerde ise  $m=\pm 1$  değerlerinde  $-62$  dB' den  $-40$  dB' ye bir yükselme dikkat çekmektedir. Bilya arızasında ise  $m=\pm 1$  değerlerinde  $-47$  dB' den  $-41$  dB' ye bir yükselme görülürken,  $m=\pm 3$  değerinde bu artış  $5$  dB civarındır. Yüklü çalışma spektrumlarında kayda değer herhangi bir genlik değişimine rastlanmamıştır. Gerilim spektrumları ise Şekil 4.17' de sunulmuştur.



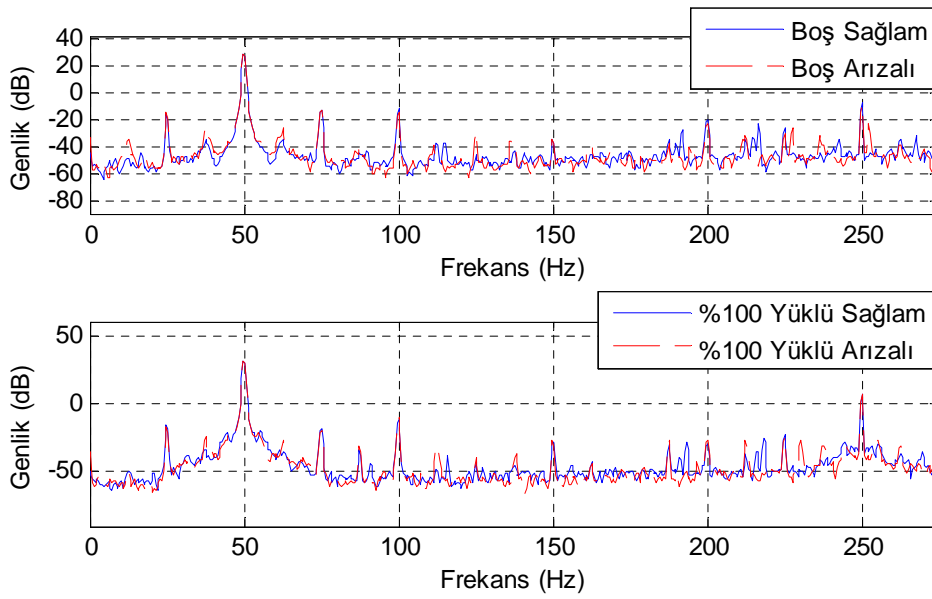
a) Dış bilezik arızası iki farklı yükte



b) İç bilezik arızası iki farklı yükte



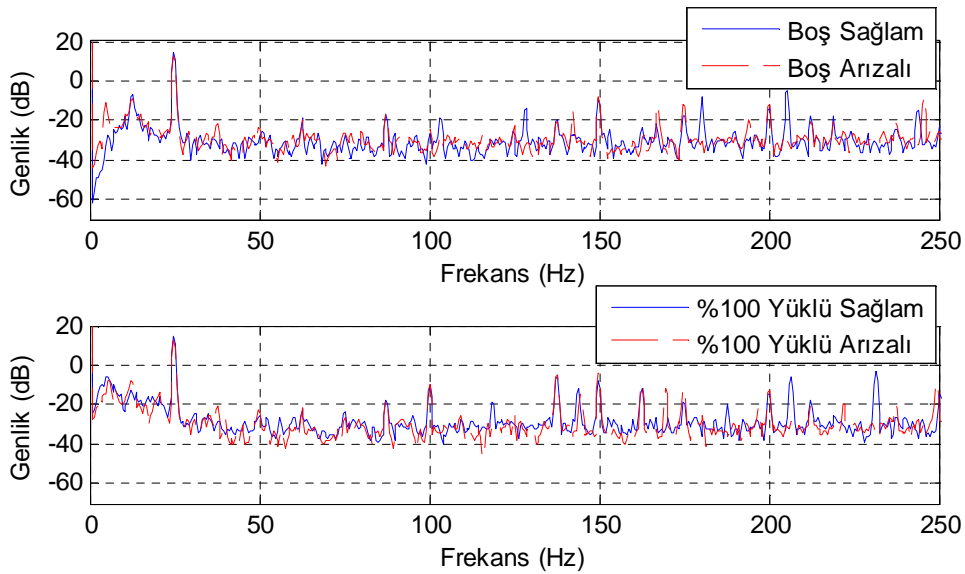
c) Kafes arızası iki farklı yükte



d) Bilya arızası iki farklı yükte

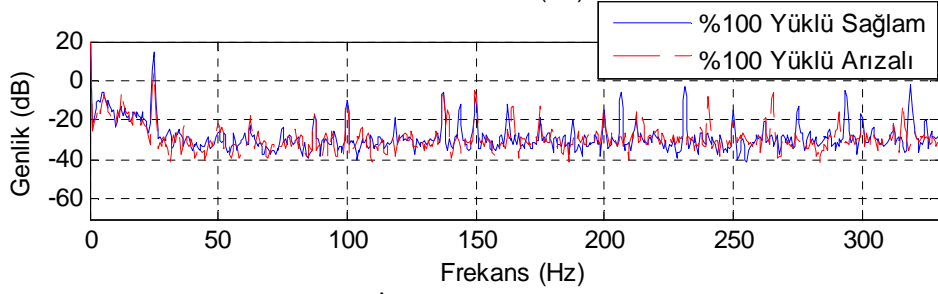
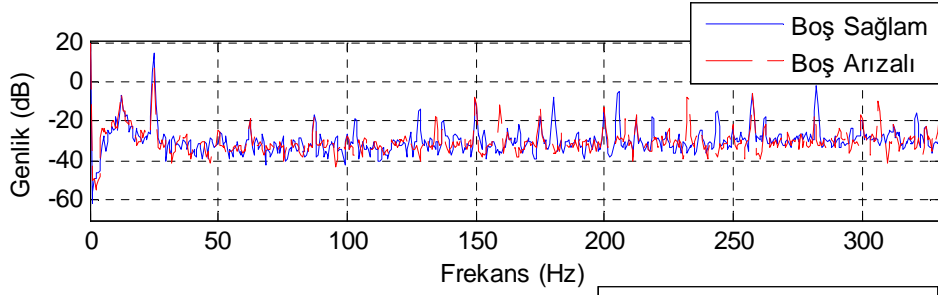
Şekil 4. 17. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) gerilim spektrumları

Gerilim spektrumunda da iç bilezik arızası ve kafes arızasına ait  $m=\pm 1$ . harmoniğinde genlik değişimi görülmüştür. İç bilezik arızasında  $m=-1$  için -55 dB' den -50 dB'ye,  $m=1$  için -53 dB' den -40 dB'ye artış olmuştur. Kafes arızasında ise bu değişim sırasıyla  $m=-1$  için -39 dB' den -27 dB'ye,  $m=1$  için -38 dB' den -28 dB' ye artış şeklindedir. Dış bilezik arızası içinde durum akımda olduğu gibi genlik değişimi az olmasına karşın küçük genlikli eksenden kaçıklık yanbadları görülmüştür. Bilya arızasında da düşük genlikli eksenden kaçıklık yanbadları mevcuttur. Hız spektrumları incelendiğinde ise Şekil 4.18 elde edilmiştir.

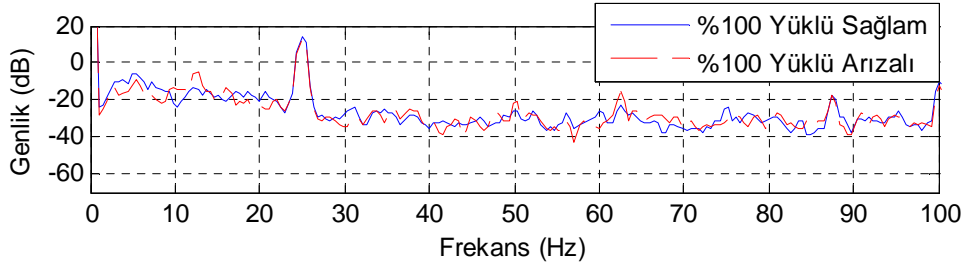
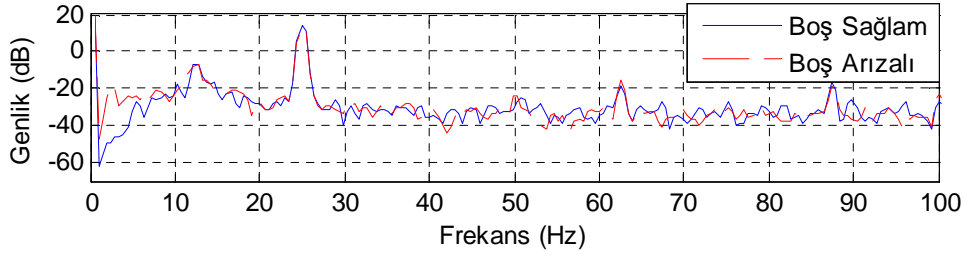


a) Dış bilezik arızası iki farklı yükte

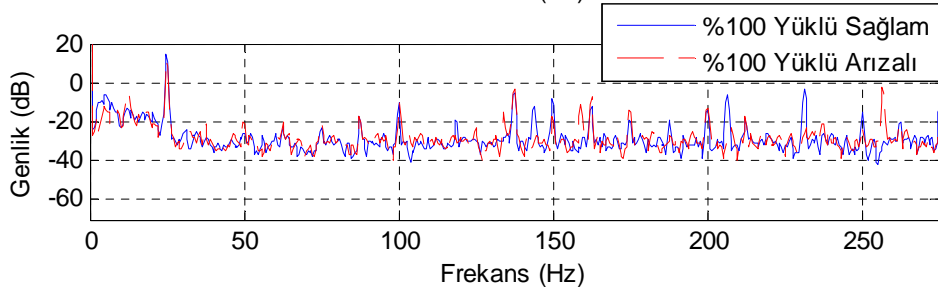
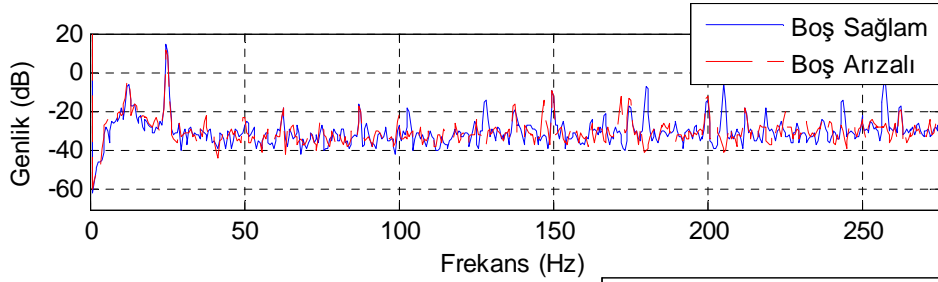




b) İç bilezik arızası iki farklı yükte



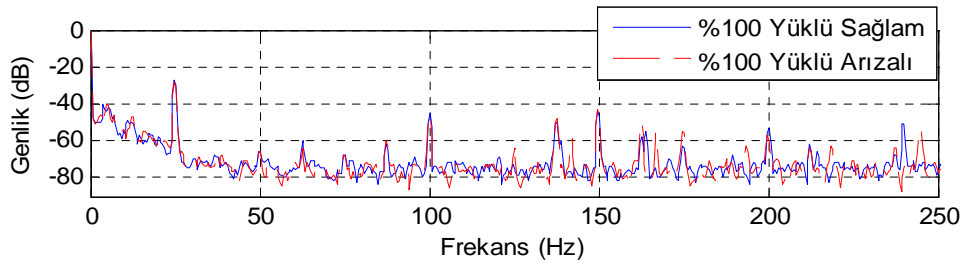
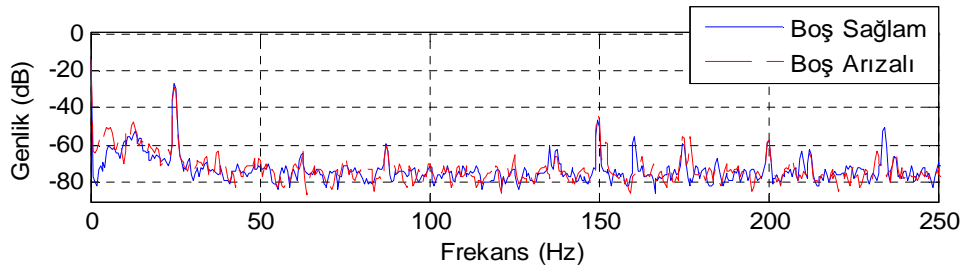
c) Kafes arızası iki farklı yükte



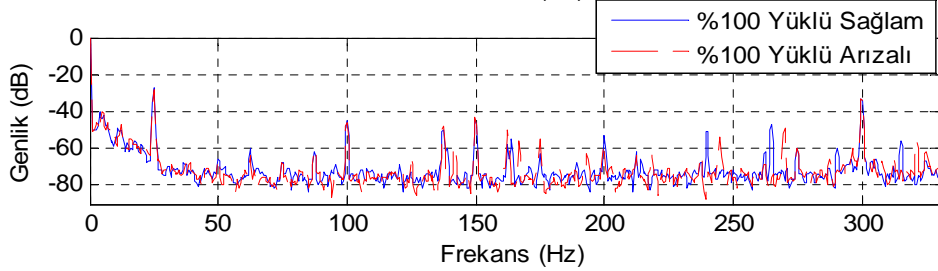
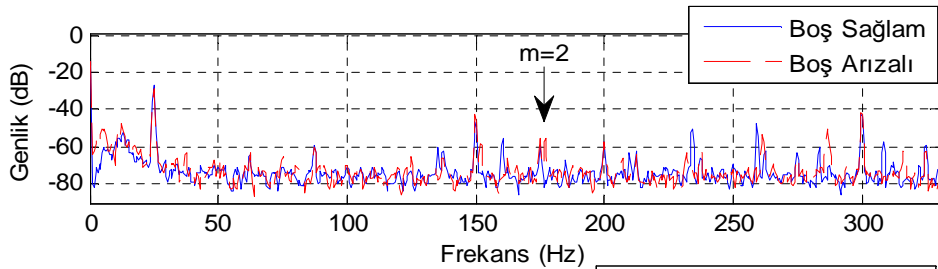
d) Bilya arızası iki farklı yükte

Şekil 4. 18. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) hız spektrumları

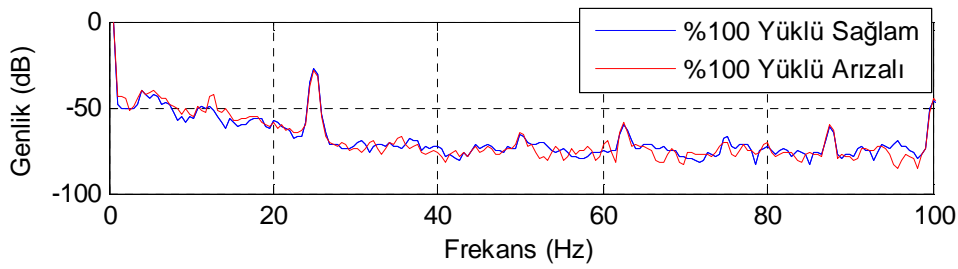
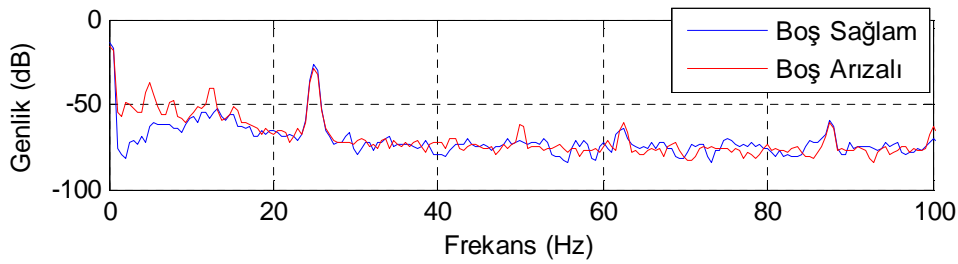
Hız spektrum grafikleri incelendiğinde dış bilezik arızasına ait Tablo 4.6' da verilen arıza frekans harmoniklerine rastlanmasada bu arızadan dolayı oluşan eksenden kaçıklık harmoniklerine rastlanmıştır. Bilya ve kafes arızası için bazı genlik değişimleri görülsede bunların değeri yaklaşık 5 dB civarındadır. İç bilezik arızası incelendiğinde bu değişimler görülmemiştir. Arızaların tork üzerine etkisini görmek için tork spektrumları çizdirilmiş ve elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 4.19' da görülmektedir.



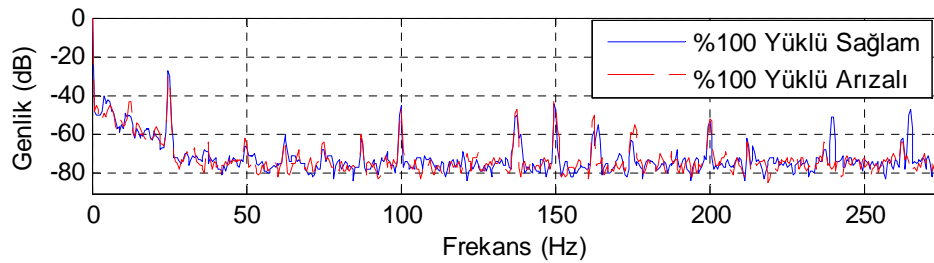
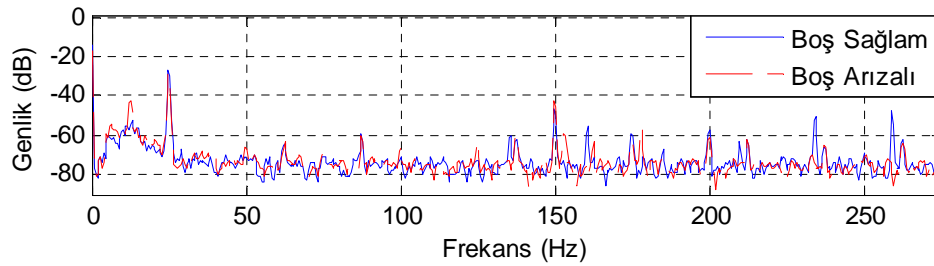
a) Dış bilezik arızası iki farklı yükte



b) İç bilezik arızası iki farklı yükte



c) Kafes arızası iki farklı yükte



d) Bilya arızası iki farklı yükte

Şekil 4. 19. Rulman arızası için 750 d/d (50 Hz) tork spektrumları

Tork spektrumunda ise sadece  $m=2$  için iç bilezik arızasının harmoniği görülmüştür ve genlik değişimi  $-79$  dB' den  $-56$  dB'ye artış göstermiştir. Dış bilezik ve bilya arızası için de diğer spektrumlarında olduğu gibi Tablo 4.6' da verilen karakteristik değerlere düşük genlikli olarak rastlanırken kafes arızasında bu değişim görülmemiştir. Motor 150 d/d (10 Hz) ve 450 d/d (30 Hz) hızlarda çalışırken izlenen sinyallere ait spektrumlar tekrar incelenmiş ve hızın arıza üzerine etkisi araştırılmıştır. 150 d/d (10 d/d) hızda spektrumlarında çıkması beklenen arıza frekans değerleri Tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4. 8. 150 d/d (10 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları

fv (Hz)	fs= 10 Hz							
	m=-1	m=1	m=-2	m=2	m=-3	m=3	m=-4	m=4
f <sub>da</sub> =7.63 Hz	2.37	17.63	5.26	25.26	12.89	32.89	20.52	40.52
f <sub>ia</sub> =12.37 Hz	2.37	22.37	14.74	34.74	27.11	47.11	39.48	59.48
f <sub>ka</sub> =0.95 Hz	9.05	10.95	8.1	11.9	7.15	12.85	6.2	13.8
f <sub>ba</sub> =9.95 Hz	0.05	19.95	9.9	29.9	19.85	39.85	29.8	49.8

Tablo 4.7' de 150 d/d (10 Hz) hızda rulman arızası için hesaplanan arıza harmonik frekansları verilmiştir. Tablo 4.8' de ise boş çalışma spektrumu için genlik değişimleri görülmektedir. 750 d/d (50 Hz) hız için elde edilen grafikler incelendiğinde arızalara ait harmonikler çok düşük genlikli olarak boş çalışma grafiklerinde görülmüştür. Yüklü çalışma grafiklerinde bu durum görülmemiştir. Bundan dolayı Tablo 4.8 motor boş sağlam ve boş arızalı durumda her bir arıza türü için oluşturulmuştur. Tablo 4.8' de görülen "S" ve "A" ifadeleri sırasıyla sağlam ve arızalı durumdaki genlik değerlerini temsil etmektedir.

Tablo 4. 9. 150 d/d (10 Hz) rulman arızası spektrum değerleri

Arıza Tipi	150 d/d (10 Hz) Hızda Akım Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-65	-46	-65	-44	-28	-27	-28	-29	-63	-37	-76	-72	-62	-57	-65	-64
İç	-65	-63	-67	-64	-28	-38	-75	-81	-75	-72	-83	-75	-63	-63	-73	-74
Kafes	-36	-36	-36	-35	-58	-46	-57	-46	-65	-46	-63	-46	-58	-48	-57	-48
Bilya	-53	-58	-55	-53	-15	-18	-74	-73	-56	-54	-60	-63	-74	-73	-47	-50
Arıza Tipi	150 d/d (10 Hz) Hızda Gerilim Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-56	-40	-49	-42	-16	-16	-60	-49	-36	-30	-59	-58	-30	-25	-30	-31
İç	-51	-42	-51	-40	-15	-22	-48	-44	-60	-46	-57	-40	-45	-39	-51	-40
Kafes	-6	-6	-6	-7	-27	-26	-27	-26	-37	-32	-36	-31	-42	-37	-39	-35
Bilya	-31	-27	-23	-21	16	16	-43	-47	-24	-22	-39	-42	-43	-48	-15	-18
Arıza Tipi	150 d/d (10 Hz) Hızda Hız Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-31	-37	-32	-28	5	4	-38	-36	-33	-34	-39	-36	-34	-37	-31	-29
İç	-31	-27	-41	-33	-40	-36	-28	-25	-38	-38	-39	-39	-33	-26	-33	-33
Kafes	-39	-26	-40	-25	-35	-19	-36	-29	-27	-23	-33	-33	-25	-11	-42	-33
Bilya	45	45	-32	-38	-37	-31	-16	-29	-33	-39	-28	-25	-16	-29	-32	-34

Tablo 4. 10. Devamı																
Arıza Tipi	150 d/d (10 Hz) Hızda Tork Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-58	-59	-80	-70	-28	-29	-82	-79	-71	-71	-82	-78	-79	-76	-74	-71
İç	-58	-50	-86	-79	-74	-74	-73	-68	-78	-77	-78	-80	-73	-73	-66	-65
Kafes	-72	-60	-74	-63	-68	-55	-76	-59	-63	-50	-71	-64	-57	-35	-76	-68
Bilya	-16	-21	-73	-79	-64	-65	-60	-63	-73	-78	-69	-67	-60	-62	-83	-75

150 d/d (10 Hz) çalışma hızında SMSM' nin dört değişik rulman arızası için akım, gerilim, hız ve tork sinyallerinden elde edilen boş çalışma spektrum değerleri Tablo 4.8' de verilmiştir. Rulmanda meydana gelen dış bilezik arızası akım spektrumunda m=-1 ve m=1 nolu harmoniklerde yaklaşık 20 dB'lik bir artış gerçekleştirirken m=-3 içinde 25 dB' lik bir artış gözlemlenmiştir. Akım spektrumunda yine kafes arızasının harmonikleri m=±3 ve m=±4' de görülmüştür. Gerilim spektrumunda ise dış ve iç bilezik arızasına ait arıza harmoniklerinde genlik artışı mevcuttur. Hız spektrum tablosunda ise kafes ve bilya arızasının harmonikleri mevcuttur. Ancak bilya arızasının m=2 ve m=-4 nolu harmonikleri aynı frekans değerine denk geldiği için 2 farklı frekansta genlik artışı gibi gözüksede tek genlik değişimidir. Tork spektrumunda ise dış bilezik ve kafes arızasının harmonikleri görülmektedir. 150 d/d (10 Hz) hızda arıza durumunda meydana gelen genlik değişimlerinin sayısal değeri Tablo 4.8' den daha net görülmektedir. 450 d/d (30 Hz) hızda çalışırken meydana gelen titreşim frekansları ve spektrumunda oluşacak harmonikler Tablo 4.9' da sunulmuştur.

Tablo 4. 11. 450 d/d (30 Hz) hızda meydana gelen harmonik frekansları

fv (Hz)	fs= 30 Hz							
	m=-1	m=1	m=-2	m=2	m=-3	m=3	m=-4	m=4
f <sub>da</sub> =22.8 Hz	7.2	52.8	15.6	75.6	38.4	98.4	61.2	121.2
f <sub>ia</sub> =37.1 Hz	7.1	67.1	44.2	104.2	81.3	141.3	118.4	178.4
f <sub>ka</sub> =2.86 Hz	27.1	32.8	24.2	35.72	21.4	38.5	18.5	41.4
f <sub>ba</sub> =29.8 Hz	0.02	59.8	29.6	89.6	59.4	119.4	89.2	149.2

Tablo 4.9' a göre oluşturulan boş çalışma spektrum tablosu ise Tablo 4.10' da verilmiştir. Diğer çalışma hızlarında olduğu gibi bu çalışma hızında da arızalara ait karakteristik harmonikler özellikle boş çalışma spektrumlarında gözlemlenmiştir. Akım spektrumunda iç bilezik arızasının m=1 ve m=-3 nolu harmoniğinde genlik

artışı mevcuttur. Yine akım spektrumunda kafes arızasının  $m=\pm 1$ . harmoniğinde yaklaşık 20 dB' lik bir artış görülmüştür. Bilya arızası içinse sadece  $m=3$ . harmoniğinde değişim -67 dB' den -57 dB' ye artış şeklinde olmuştur. Gerilim spektrumunda iç bilezik arızasının  $m=4$ . harmoniği görülmüş ve genlik değişimi 8 dB' lik bir artış göstermiştir.

Tablo 4. 12. 450 d/d (30 Hz) rulman arızası spektrum değerleri

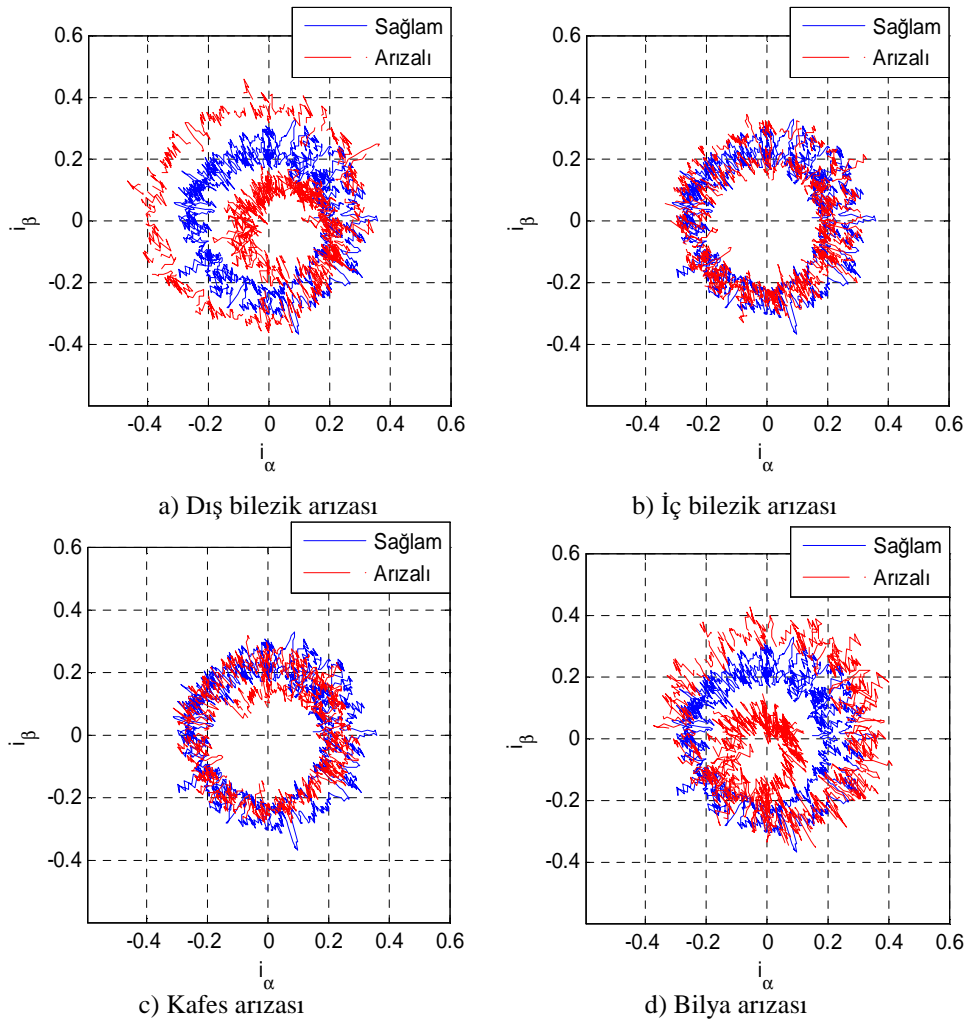
Arıza Tipi	450 d/d (30 Hz) Hızda Akım Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-65	-65	-67	-66	-39	-41	-70	-69	-56	-53	-76	-77	-71	-76	-75	-76
İç	-65	-67	-69	-80	-49	-57	-72	-79	-79	-69	-76	-71	-74	-74	-72	-77
Kafes	-67	-48	-67	-45	-50	-48	-52	-49	-56	-51	-56	-50	-61	-61	-60	-60
Bilya	-66	-61	-51	-47	-18	-19	-52	-49	-60	-57	-67	-57	-71	-69	-58	-57
Arıza Tipi	450 d/d (30 Hz) Hızda Gerilim Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-56	-60	-54	-49	-28	-29	-55	-56	-40	-41	-50	-55	-54	-54	-55	-54
İç	-67	-66	-65	-60	-55	-50	-49	-44	-45	-38	-47	-36	-44	-38	-50	-42
Kafes	-31	-29	-30	-29	-38	-29	-36	-29	-41	-38	-41	-37	-52	-44	-52	-47
Bilya	-42	-41	-18	-20	-19	-19	-45	-45	-31	-30	-38	-40	-52	-52	-30	-32
Arıza Tipi	450 d/d (30 Hz) Hızda Hız Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-11	-6	-24	-24	0	-10	-36	-33	-33	-33	-33	-33	-37	-35	-36	-35
İç	-12	-7	-39	-37	-31	-35	-30	-31	-36	-38	-33	-34	-34	-36	-32	-26
Kafes	-34	-37	-39	-37	-36	-36	-38	-38	-34	-30	-34	-32	-38	-35	-38	-42
Bilya	-44	-42	-20	-22	-19	-20	-45	-43	-31	-30	-40	-41	-55	-53	-40	-38
Arıza Tipi	450 d/d (30 Hz) Hızda Tork Spektrum Tablosu															
	m=-1		m=1		m=-2		m=2		m=-3		m=3		m=-4		m=4	
	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A	S	A
Dış	-49	-46	-66	-67	-39	-40	-81	-78	-76	-75	-80	-79	-76	-82	-78	-77
İç	-48	-42	-77	-80	-78	-75	-72	-72	-78	-79	-84	-73	-76	-76	-76	-76
Kafes	-75	-74	-78	-76	-74	-76	-77	-79	-72	-70	-77	-78	-71	-64	-82	-80
Bilya	-15	-19	-80	-72	-72	-69	-58	-52	-81	-74	-70	-72	-69	-63	-78	-78

Hız spektrumunda ise dış bilezik arızasının  $m=-2$  harmoniğinde 10 dB' lik azalma söz konusudur. Tork spektrumunda herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Bu durum Tablo 4.10' da daha net görülmektedir. Motor özellikle tam yükte çalışırken oluşan harmoniklerin çoğu yok olmuş kalanların ise genlik seviyeleri çok düşük seviyede olmuştur. SMSM' de uygulanan akım ve gerilimin saf sinüsoidal olmaması sisteme

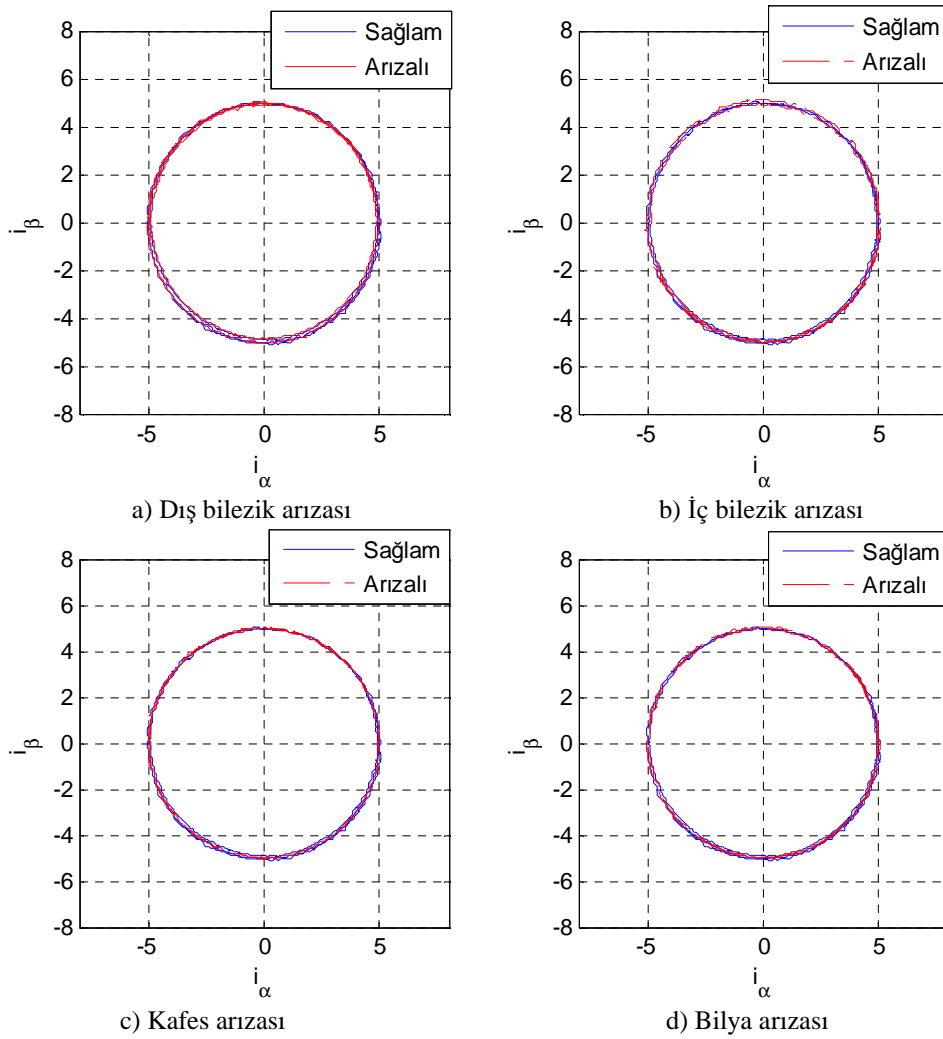
ilave harmonikler eklemekte bu ise spektrum grafiklerinde karakteristik harmoniklere denk geldiğinde onları söndürmektedir. Rulman arızasının HFD ile tespitinde eksenden kaçıklık arızasında olduğu gibi belirgin yanband harmonikleri görülmemiştir. Sadece küçük değerli genlik değişimlerine rastlanmıştır. Rulman arızasının tespiti için sırasıyla Alfa-Beta dönüşüm yöntemi ve Ani Akım-Hızın izlenmesi yöntemi uygulanmıştır.

#### 4.2.2. Alfa-Beta dönüşüm yöntemiyle tespit

Rulman arızalarının motor akımında meydana getirdiği değişimleri incelemek amacıyla motor akımları 8 kHz örnekleme frekansı ile kayıt altına alınmıştır. Matlab programı vasıtasıyla akımın Alfa-Beta birleşenleri bulunmuştur. Deneysel çalışma üç farklı hızda 4 farklı rulman arızası için boş ve %100 yükte gerçekleştirilmiştir.



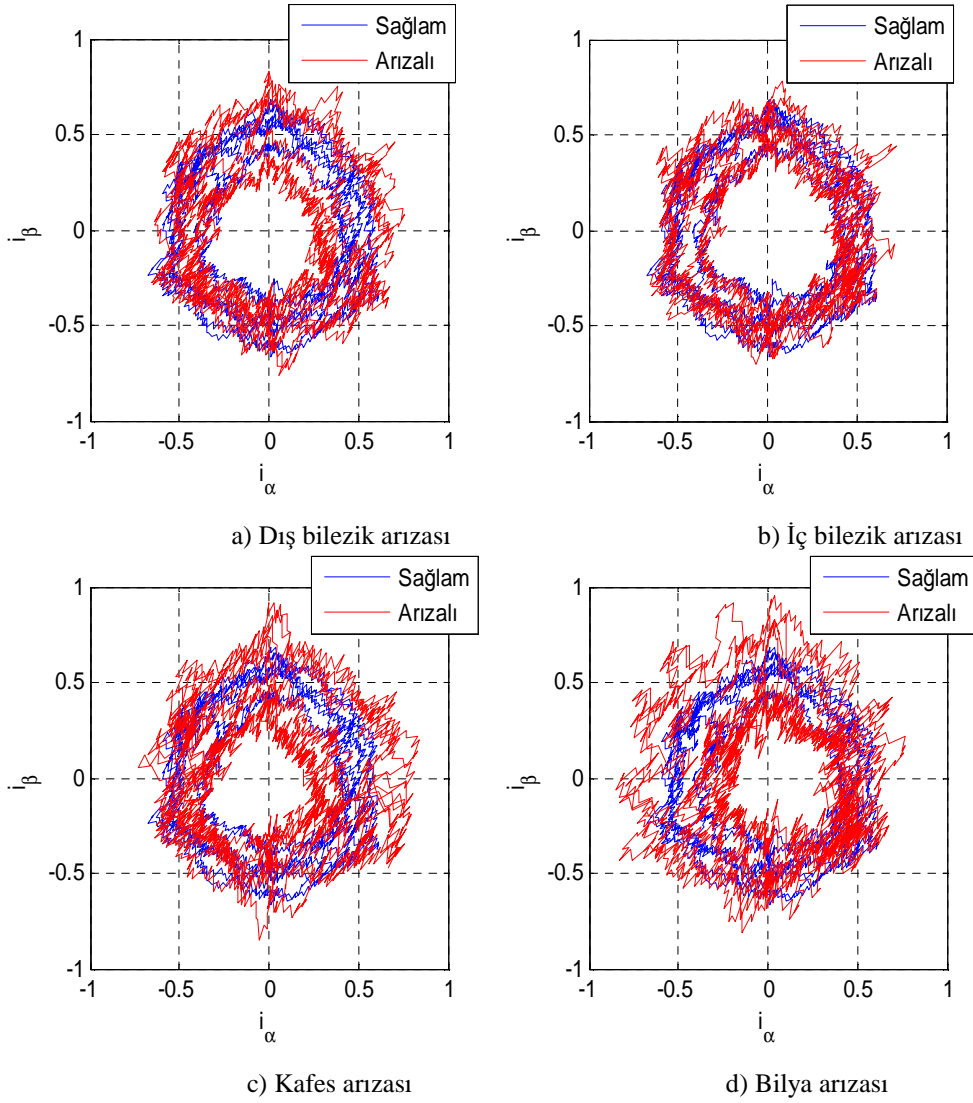
Şekil 4. 20. 150 d/d (10 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri



Şekil 4. 21. 150 d/d (10 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri

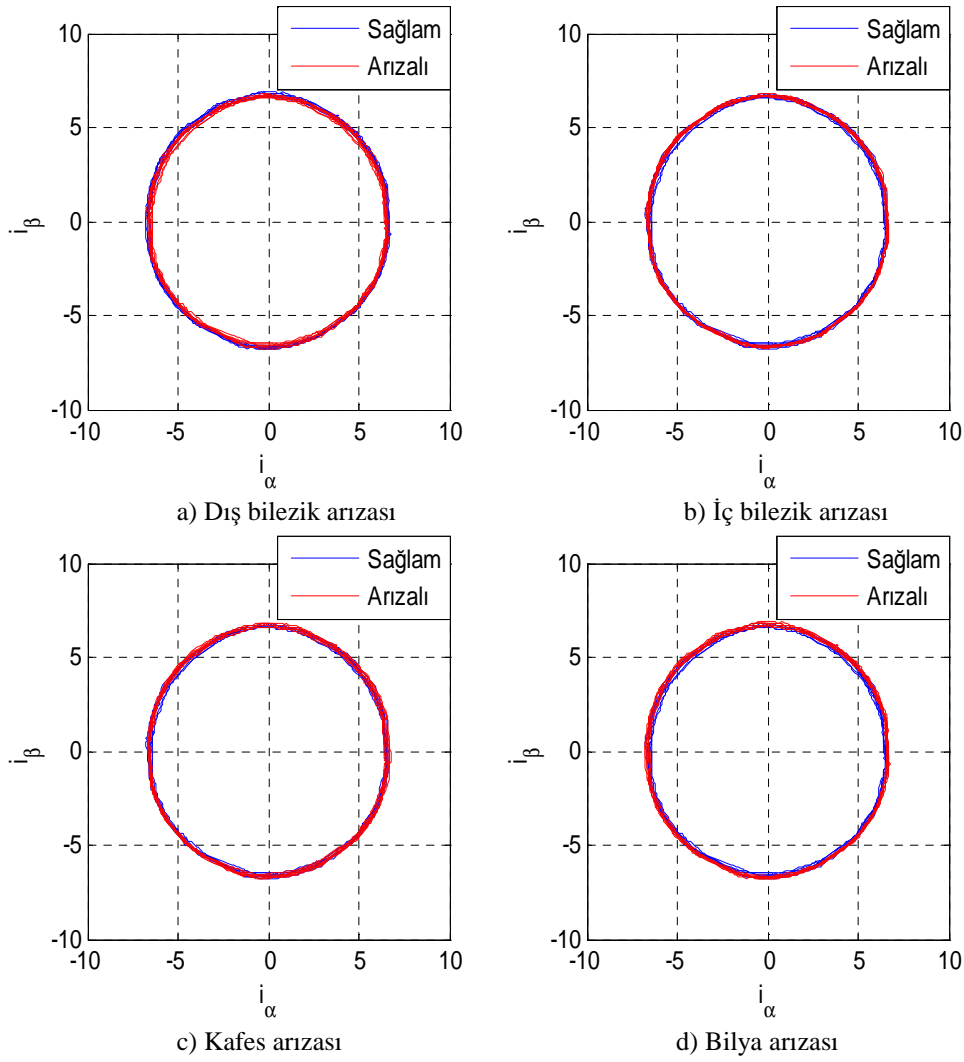
Yüklü çalışmada rulman arızalarının sağlam durumdan ayırt edilmesi boş çalışma kadar net görülmesede sağlam duruma göre farklılıklar içermektedir. Özellikle YSA gibi bir algoritma ile bu fark başarılı bir şekilde ayırt edilebilir. 450 d/d (30 Hz) çalışma hızında Alfa-Beta dönüşümüyle rulman arızası tekrar incelenmiştir.





Şekil 4. 22. 450 d/d (30 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri

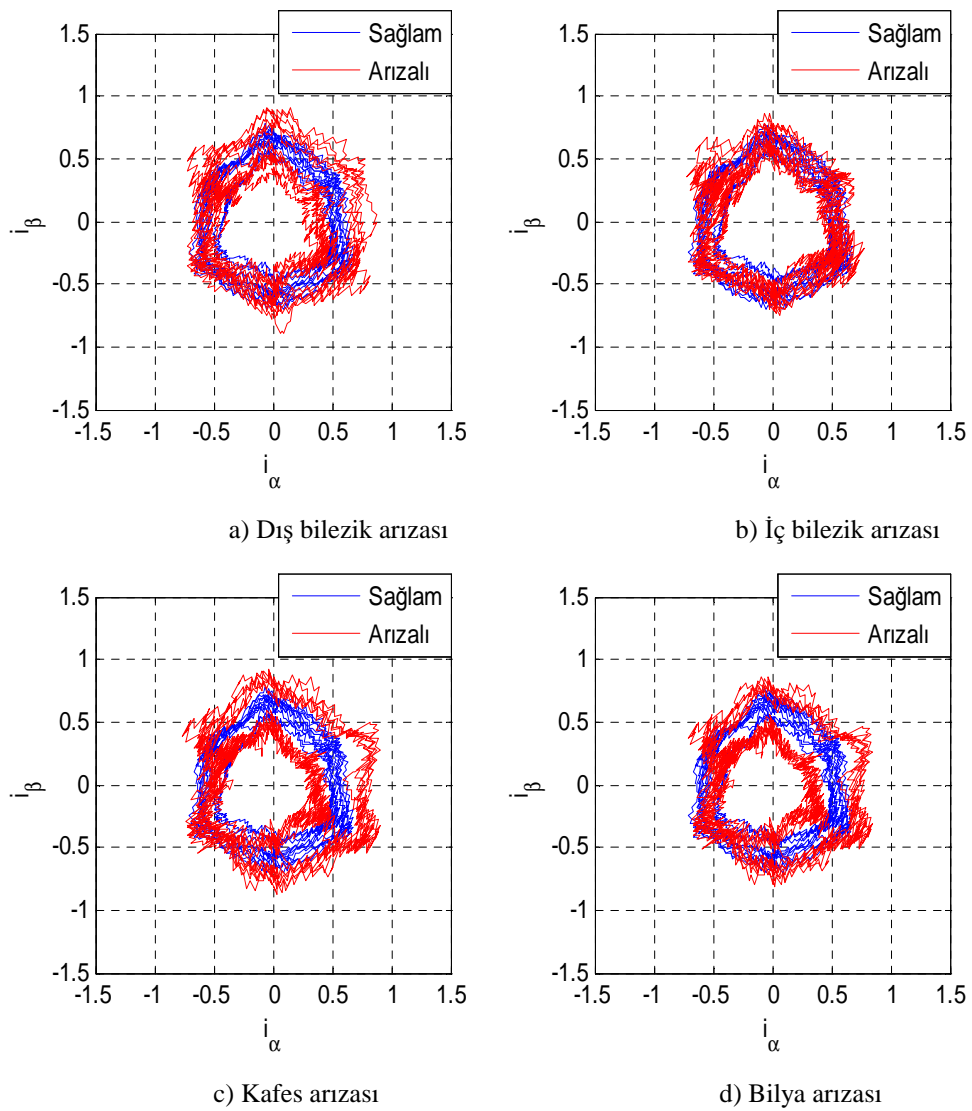
450 d/d (30 Hz) çalışma hızında da 150 d/d (10 Hz) çalışmada olduğu gibi boş çalışma durumunda sağlam ve arızalı durum rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. Şekil 4.22' ye bakıldığında desenlerin çoğu yerde birbirinden ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca arızaların kendi arasında sınıflandırılması da kolaylıkla yapılabilir.



Şekil 4. 23. 450 d/d (30 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri

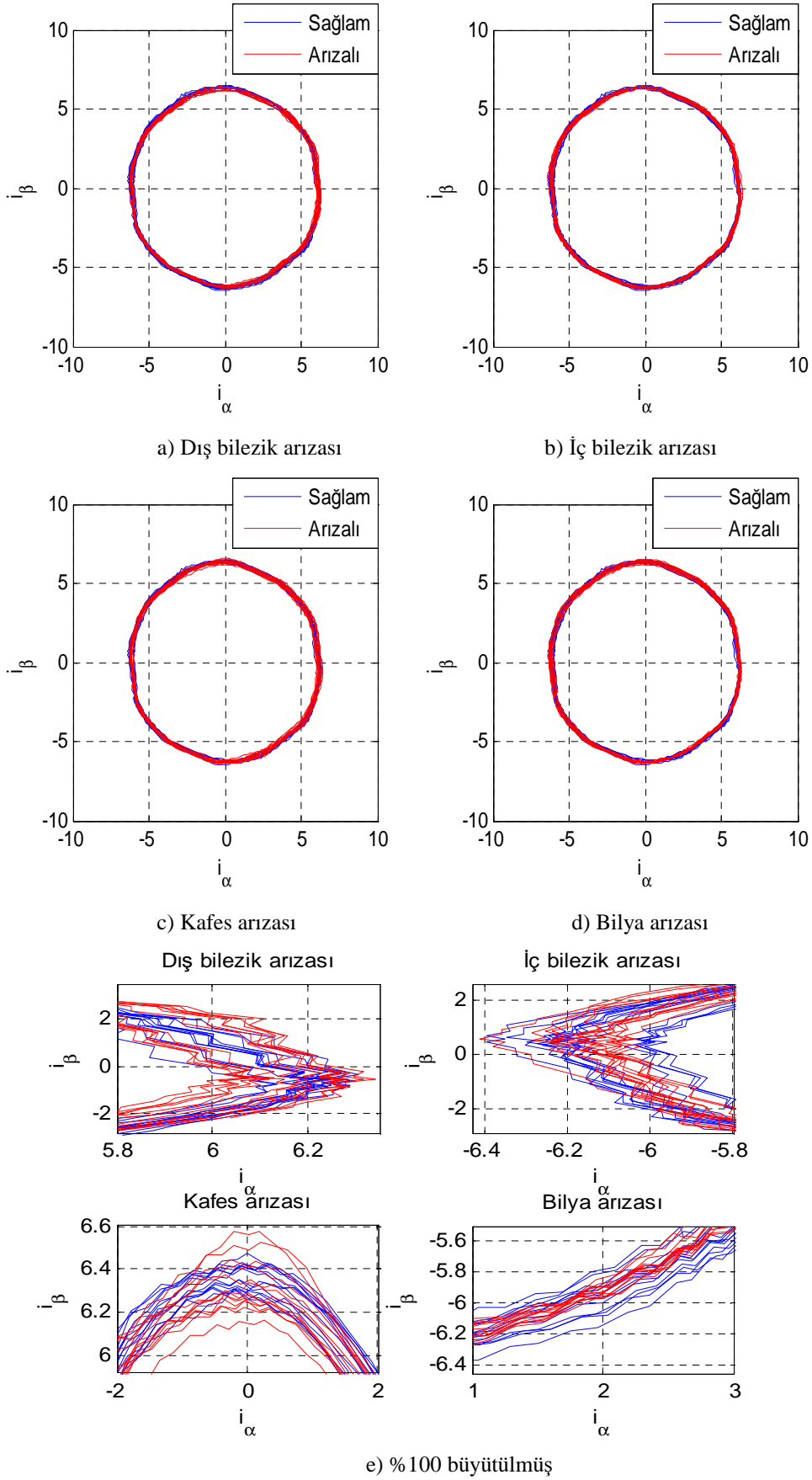
Yüklü çalışmada arızaların sağlam durumdan ayırt edilmesi boş çalışmadaki gibi net görülmesede geometrik şekli oluşturan akımın alfa ve beta birleşenlerinin arızalardan dolayı belirli noktalarda sağlam durumdan saptığı Şekil 4.23' de görülmektedir.

50 Hz çalışma için deneysel olarak elde edilen verilerle yapılan Alfa-Beta dönüşümü sonucu ortaya çıkan grafikler Şekil 4.24 ve 4.25' de verilmiştir.



Şekil 4. 24. 750 d/d (50 Hz) rulman alfa-beta boş çalışma grafikleri

Boş çalışma için elde edilen grafikler incelendiğinde özellikle dış bilezik, kafes ve bilya arızalarının sağlam durumdan çok net ayrıldığı görülmektedir. Yine aynı grafiklere bakıldığında arıza türleri içinde birbirinden farklılaşmalar çok net görülmektedir. Yüklü çalışma verilerinin kullanılması ile elde edilen Alfa-Beta dönüşüm grafikleri Şekil 4.25' de verilmiştir. Yüklü çalışma grafiklerinde de sağlam durum ve arızalı durum birbirinden belirli bölgelerde Şekil 4.25-e' de görüldüğü gibi ayrılmaktadır.

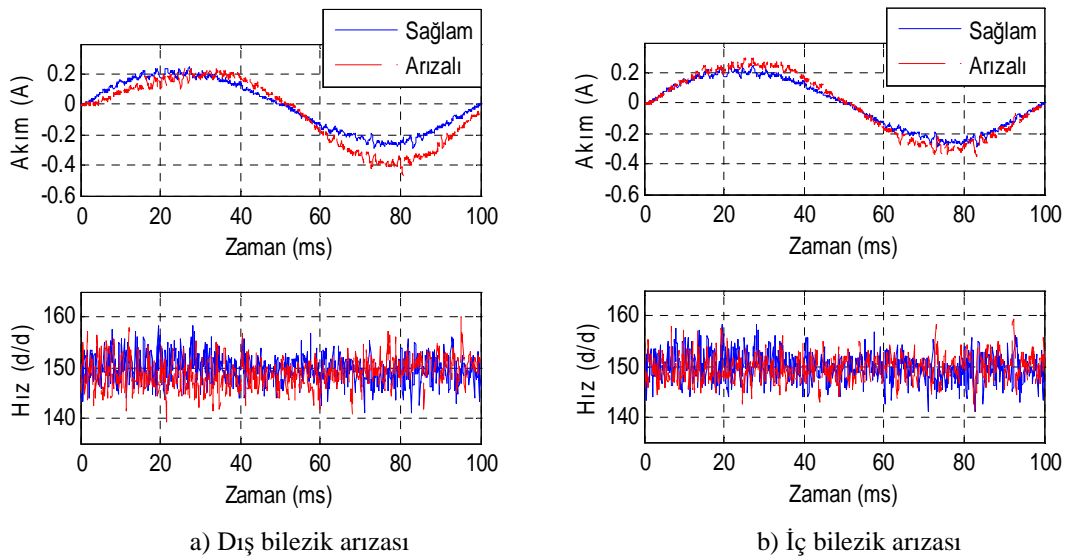


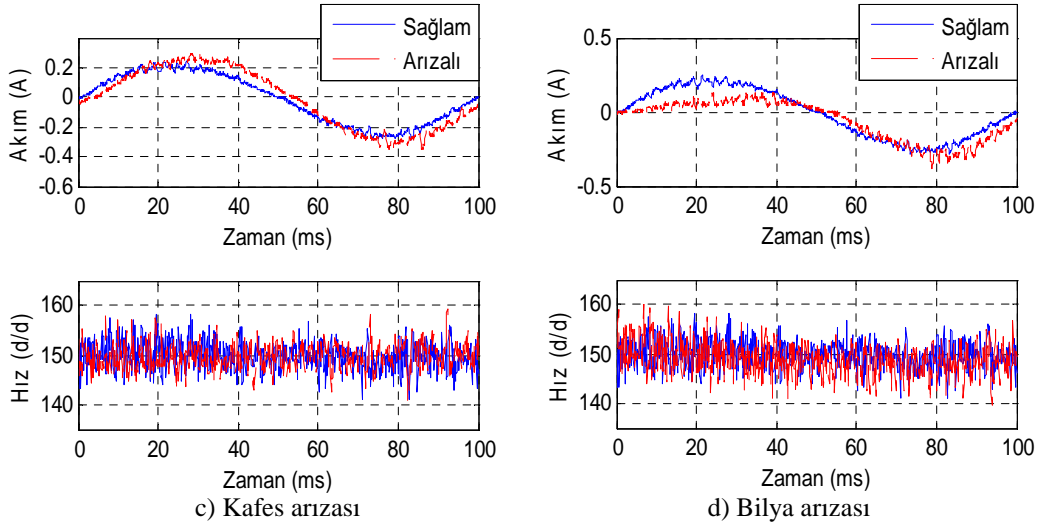
Şekil 4. 25. 750 d/d (50 Hz) rulman alfa-beta yüklü çalışma grafikleri

Rulman arızası için Alfa-Beta dönüşümü uygulanmış ve 3 farklı hızda boş ve %100 yükte çalışma için elde edilen grafikler Şekil 4.20-4.25' de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde rulman arızasının tespitinde elde edilen dönüşüm sonuçlarının ve özellikle 750 d/d (50 Hz) sonuçlarının kullanılmasının faydalı olacağı görülmüştür. Ancak grafiklerin sağlam durumdan çok farklı çıkmamasının sebebi ise; bilindiği üzere rulman arızası hava aralığını etkilemektedir. Hava aralığının değişimi ise hava aralığındaki akı dağılımını etkileyerek motor akımını etkilemektedir. Yani sargı arızaları gibi direkt olarak değilde dolaylı olarak akımı etkilediği için grafiklerin çoğu noktada çakışık çıkması normaldir. Ancak şekli oluşturan sinyallerin birbirinden kopma noktaları YSA gibi çok küçük değişimleri fark edip sınıflandıran bir algoritma ile rahatlıkla fark edilebilir.

#### 4.2.3. Ani akım-hızın izlenmesi yöntemiyle tespit

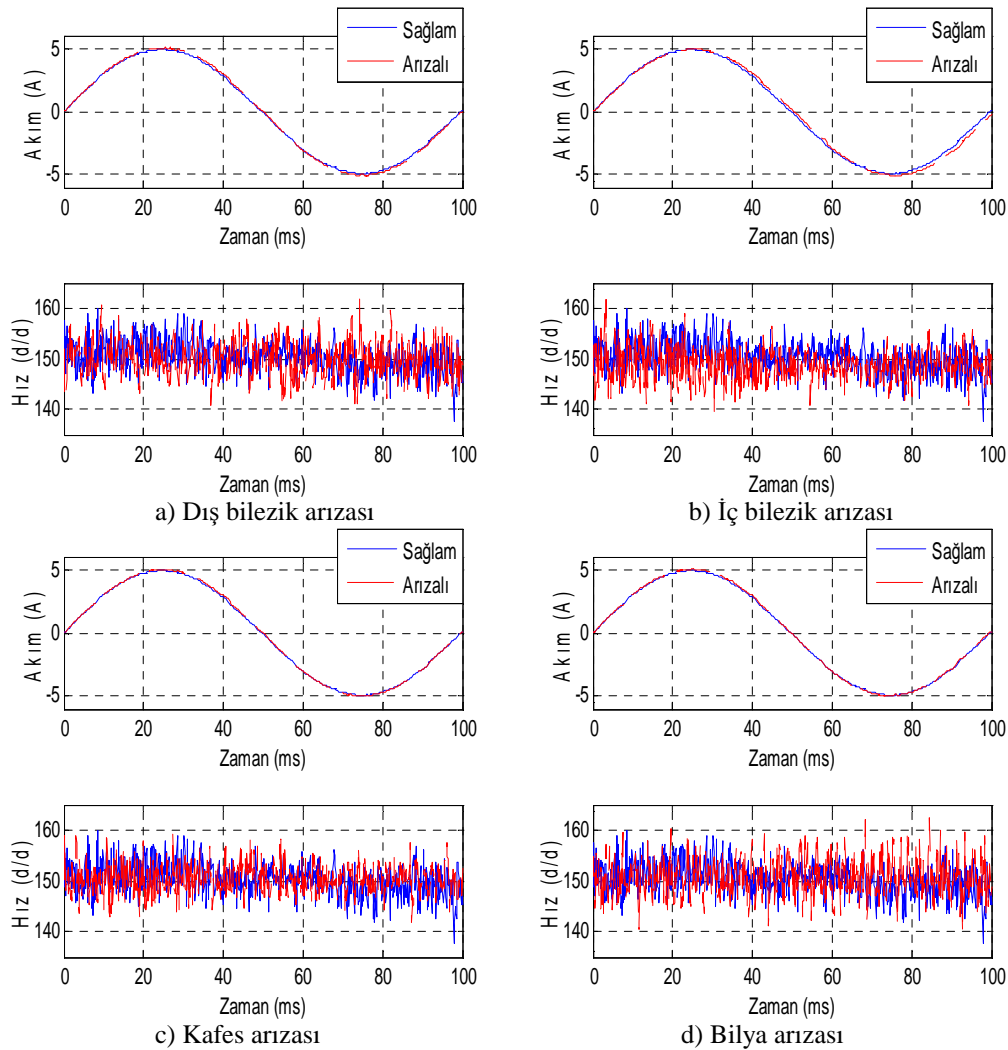
Motor rulman arızalarının tespitinde kullanılan bir diğer yöntem de motor ani akım ve hız değişiminin incelenmesidir. Bu amaçla motor üç faz akımı ve rotor devri 8 kHz örnekleme frekansı ile kayıt altına alınmıştır. Motor boş ve tam yük değerinde çalıştırılmış ve ölçülen değerler kayıt altına alınarak sağlam çalışma durumu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.26-31' de bir faz akım ve hız değişimleri sunulmuştur.





Şekil 4. 26. 150 d/d (10 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği

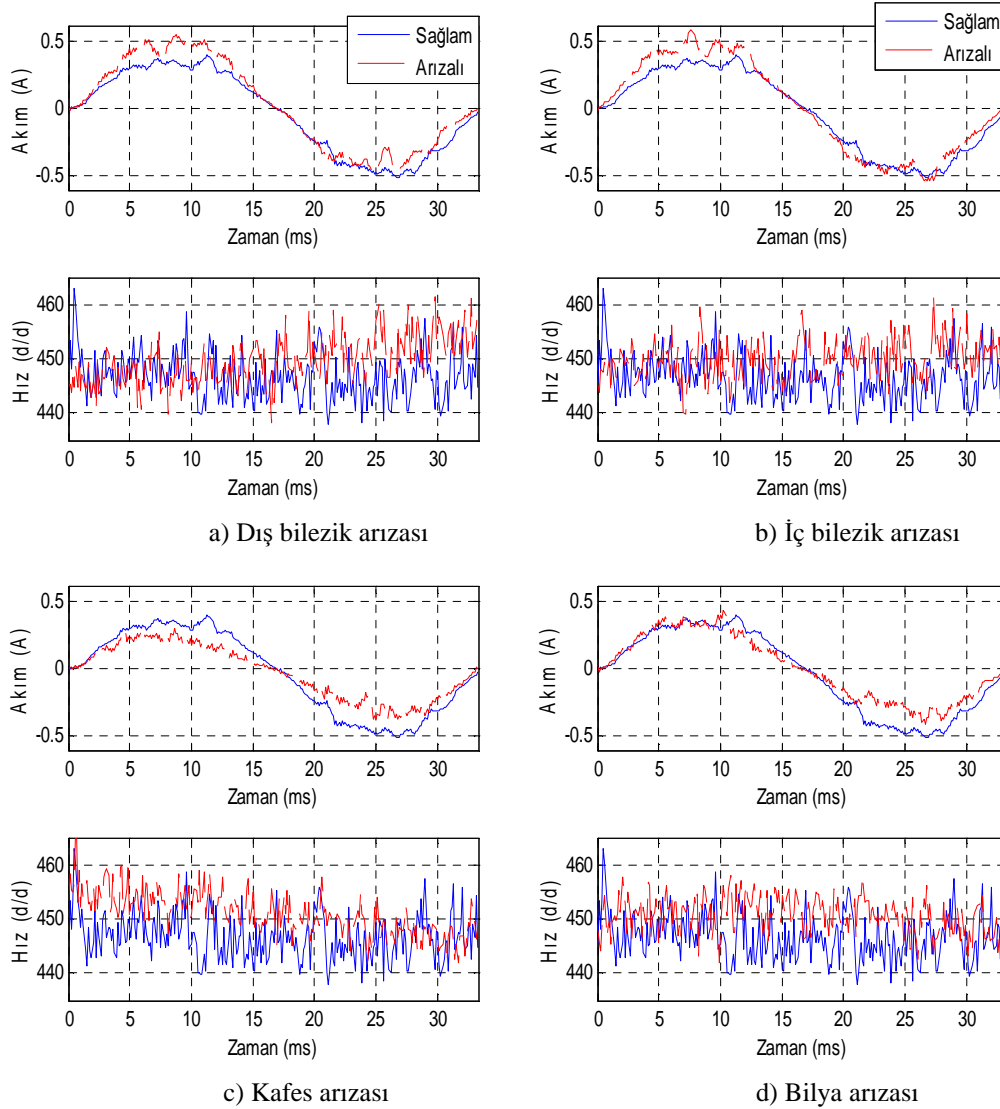
Yüklü çalışma durumu için Ani akım-hız dönüşümü tekrar uygulanmış ve elde edilen veriler Şekil 4.27' de sunulmuştur.



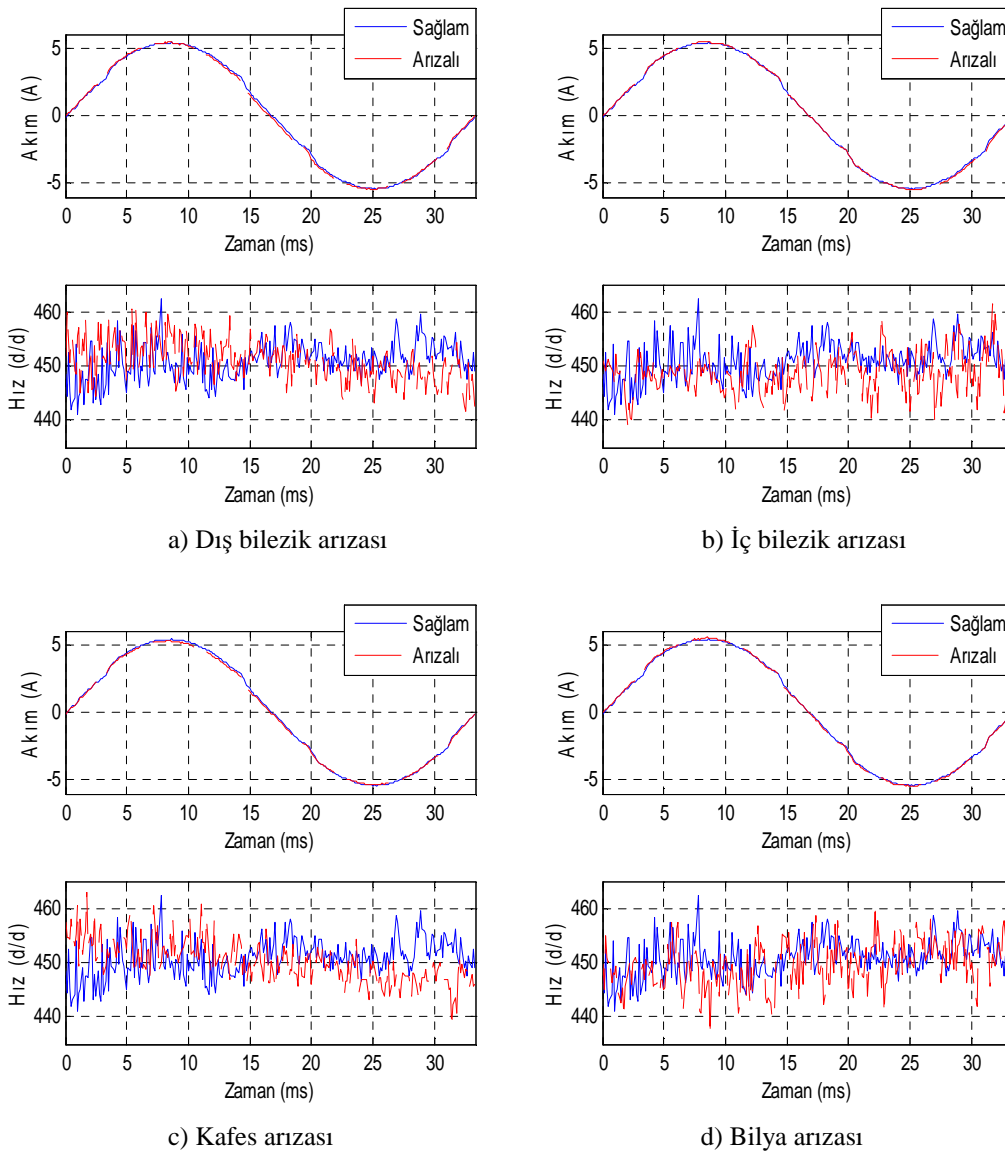
Şekil 4. 27. 150 d/d (10 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği

Yüklü çalışma durumunda akımlar sağlam durumla hemen hemen aynı çıkmakta ve örtüşmekte iken hızda farklılık ve sağlam durumdan sapmalar görülmüştür. Ancak unutulmaması gereken husus grafiklerde bir faz akımı ve hızının bir periyotluk değişimi sunulmuştur. Kaydedilen sinyal 12 periyotluk olduğu için tamamında arızalarla ilgili belirtiler daha net görülmektedir.

150 d/d (10 Hz) çalışma hızında elde edilen sonuçların, 450 d/d (30 Hz) ve 750 d/d (50 Hz) çalışma hızında tekrarlanıp tekrarlanmayacağını görmek için bu çalışma hızlarında da Ani Akım-hız dönüşümleri tekrar incelenmiştir. 450 d/d (30 Hz) için elde edilen sonuçlar Şekil 4.28' de verilmiştir.



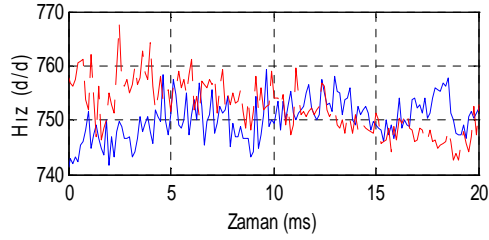
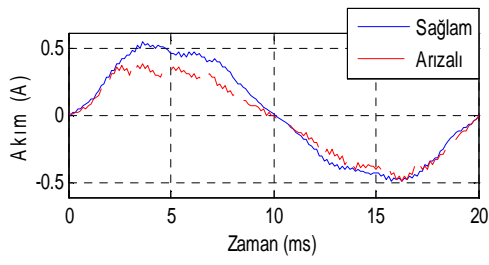
Şekil 4. 28. 450 d/d (30 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği



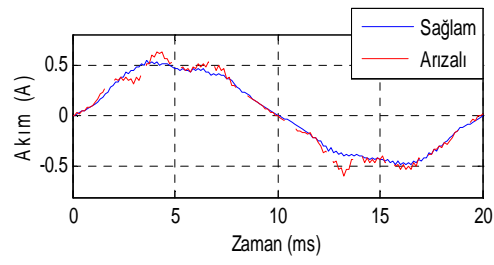
Şekil 4. 29. 450 d/d (30 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği

450 d/d (30 Hz) çalışma hızında da 150 d/d (10 Hz)' de olduğu gibi boş çalışma durumunda sağlam ve arızalı durum ayırt edilirken, yüklü çalışma grafiklerine bakıldığında akımdan ayırt etmek zorlaşmıştır. Ancak unutulmamalıdır ki burada bir faz akımı grafiksel olarak sunulmuştur. Diğer fazlarda da azda olsa sağlam ve arızalı durumu ayırt etmek için kullanılacak bilgi mevcuttur. Yine unutulmaması gereken bir diğer husus burada akımların bir periyotluk kısmı sunulmuştur. Sinyalin tamamı incelendiğinde de sağlam durumdan ayrılmalara söz konusu olacaktır. 750 d/d (50 Hz) çalışma hızı için tekrarlanan deneyler sonucunda elde edilen grafikler ise sırasıyla Şekil 4.30 ve 4.31' de verilmiştir.

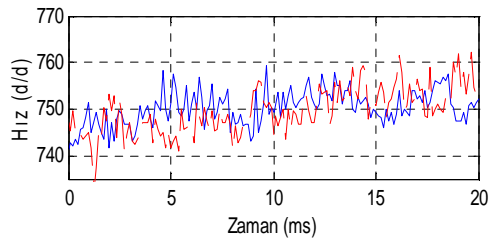
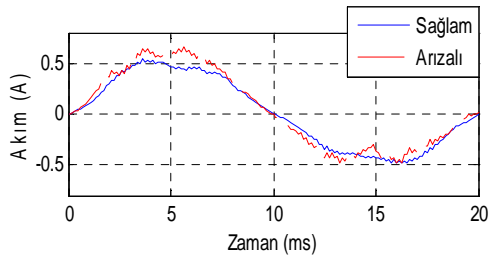




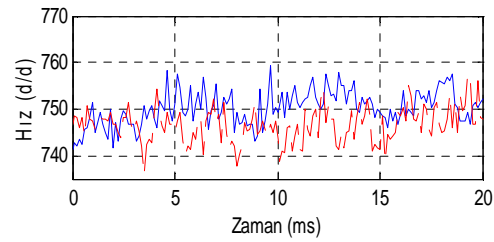
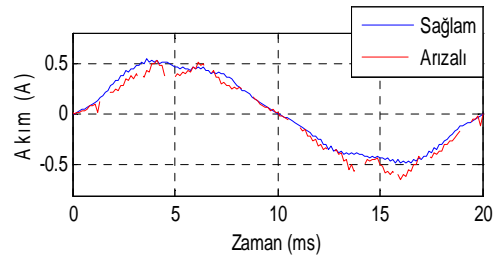
a) Dış bilezik arızası



b) İç bilezik arızası

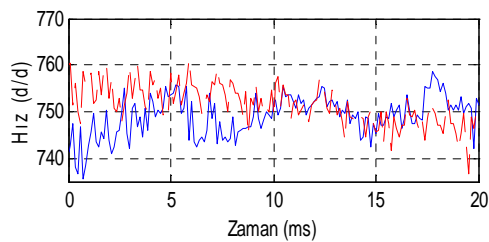
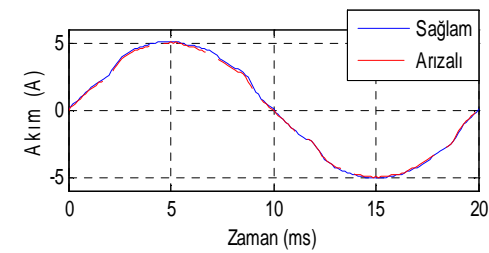


c) Kafes arızası

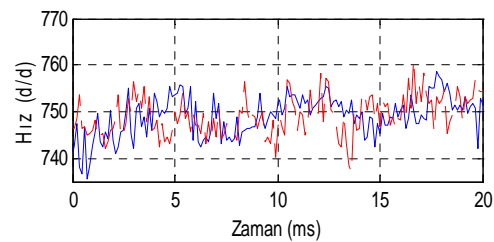
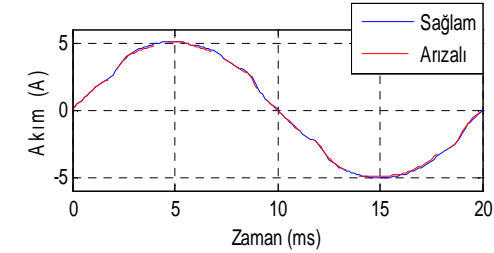


d) Bilya arızası

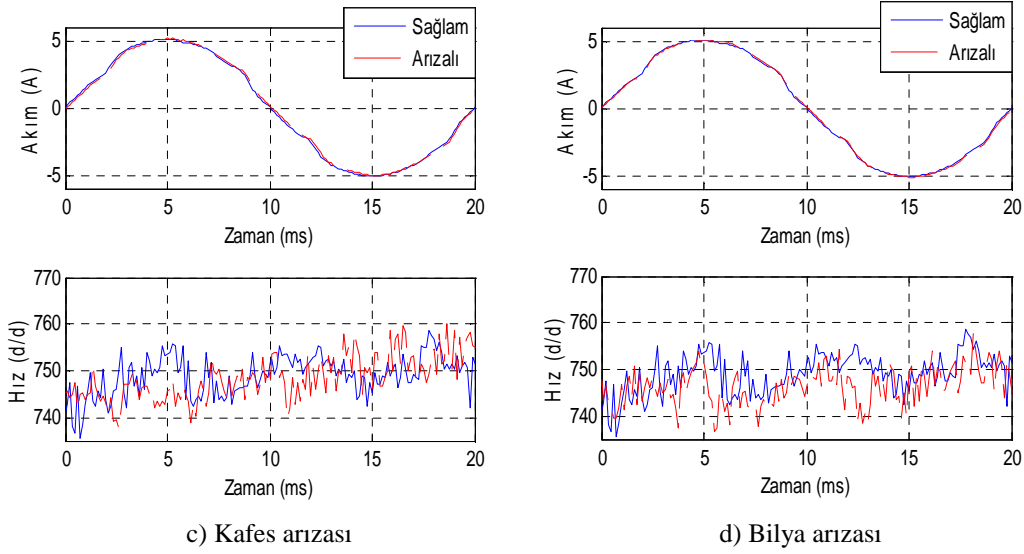
Şekil 4. 30. 750 d/d (50 Hz) rulman ani akım-hız boş çalışma grafiği



a) Dış bilezik arızası



b) İç bilezik arızası



Şekil 4. 31. 750 d/d (50 Hz) rulman ani akım-hız yüklü çalışma grafiği

750 d/d (50 Hz) çalışma hızında da diğer çalışma hızlarında olduğu gibi arızalara ait bulgulara ulaşılmıştır. Boş çalışmada akımda ki değişim çok net gözükürken hızdaki arızalı durumlara ait farklılık yüklü ve boş çalışmada çok net görülmektedir. Hızdaki bu değişimler arızaların tespitine ve sınıflandırılmasına yönelik bulgular içermektedir. Bu bulgular kullanılarak arıza türleri rahatlıkla sınıflandırılabilir.

## **BÖLÜM 5. ARIZALARIN YSA İLE TEŞHİSİ**

Bu bölümde YSA kullanılarak SMSM' de eksenden kaçıklık ve rulman arızasının teşhisi gerçekleştirilmiştir. Arıza teşhisinde Bölüm 4' de detaylı bir şekilde analizi yapılan farklı çalışma hızlarından arıza hakkında en net bilgileri verdiği için 750 d/d (50 Hz) verileri kullanılmıştır. Bölüm 4' de her bir arıza türü farklı metodlarla, farklı yük ve hız değerlerinde analiz edilmiş ve belirli sonuçlara varılmıştır. O halde teşhis çalışmasında arıza ile alakalı en net bilgiyi veren verilerin kullanılması faydalı olacaktır. Ayrıca arızalara ait belirtilerin incelenen sinyallerde hangi aralıkta görüldüğünün tespiti de yapıldığı için bu aralığın teşhis amaçlı kullanılması hem süre kaybına engel olmuş hem de oluşturulan ağın yapısını karmaşıklıktan kurtarmıştır.

Arıza teşhisinde RTFA ve ÇKİBA olmak üzere 2 farklı YSA yapısı kullanılmıştır. Sağlam çalışma durumu için elde edilen tespit verileri oluşturulan ağ yapısına eğitim ve test verisi olarak sunulmuş ağın sağlam durumu öğrenmesi ve test edilerek de ağın güvenilirliği sağlanmıştır. Yani ağa denetimli bir öğrenme yaptırılmıştır. Daha sonra sırasıyla incelenen arızalar için kullanılan tespit yönteminden elde edilen veriler ağa öğretilmiş ve test edilmiştir. Böylelikle YSA incelenen arızanın türünü ve yerini öğrenerek motorun durumu hakkında teşhis yapmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar daha detaylı olarak alt bölümlerde verilmiştir.

### **5.1. Eksenden Kaçıklık Arızasının Teşhisi**

Eksenden kaçıklık arızası Bölüm 4' de ayrıntılı olarak incelenmiş ve üç farklı yöntemle arızanın elektriksel (akım, gerilim, elektromanyetik tork) ve mekaniksel (hız) parametreler üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde arıza tespiti sonucu elde edilen ve arıza ile ilgili en iyi sonuçları veren bilgiler kullanılmıştır.

### 5.1.1. HFD verileri ile eksenden kaçıklık arızasının teşhisi

Eksenden kaçıklık arızasının tespitinde motor akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri 2 kHz örnekleme hızıyla kayıt altına alınmış ve Bölüm 4’ de spektrumları hesaplanarak arızanın tespiti yapılmıştır. Spektrumlar 0-1000 Hz arasında hesaplanmış olmasına karşın arızaya ait en belirgin değişimler 0-100 Hz arasında gözlemlenmiştir. O halde bu bölgenin YSA eğitiminde kullanılması hem kullanılan veri sayısını azaltacak hem de süreyi kısaltacaktır. Yapılan deneysel çalışmada üç farklı hız durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak en belirgin genlik değişimleri motor 750 d/d (50 Hz) hızda çalışırken görülmüştür. O halde bu çalışma hızının verilerin kullanılması arıza teşhisini kolaylaştıracaktır.

Zaman boyutunda 2 kHz örnekleme hızı ile kayıt altına alınan sinyal 4096 noktalı HFD’ ye tabi tutulduğunda elde edilen spektrum grafiği 0-1000 Hz aralığında olmaktadır. Oluşan spektrumda 0-100 Hz aralığı kullanılacağından oluşan eğitim verisi 1x206 boyutundadır. Sağlam ve arızalı durum için 5’ er kez sinyal alınmış ve spektrumları hesaplanmıştır. Yani eğitim amacıyla kullanılan veri boyutumuz 10x206 boyutlu bir matris oluşturmuştur. Eğitilen ağıın testi amacıyla eğitim için kullanılan sinyallerin haricinde yine sağlam ve arızalı durum için 5 tekrar yapılmış ve test veri boyutumuz da 10x206 boyutunda olmuştur. Çıkışta ise sağlam durum için “0” ve arızalı durum için “1” değerleri atanmıştır. Hata değeri olarak  $1e^{-10}$  değeri referans olarak seçilmiştir. Ağıın performansı ise;

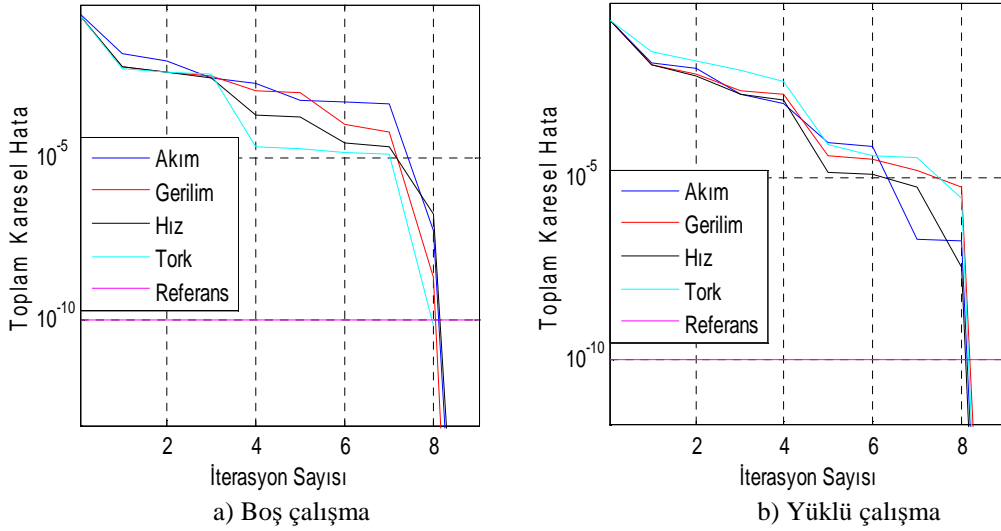
$$\%Verim = \frac{Sonuç}{İstenen} \times 100$$

formülü ile hesaplanmıştır. Uygulanan her bir test verisi için verim değeri bulunmuş ve toplam test verisine bölünerek ağıın aritmetik performansı hesaplanmıştır.

#### 5.1.1.a. HFD ve RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Eksenden kaçıklık arızasının teşhisi amacıyla oluşturulan RTFA yapısında giriş katmanında 206 nöron, saklı katmanda 9 nöron ve çıkış katmanında ise 2 nöron bulunmaktadır. Çıkışlar sağlam durum “Q1” ve arızalı durum “Q2” tarafından temsil edilmektedir. RTFA yapısı Matlab programında YSA alt programı (nntool) kullanılarak oluşturulmuştur. SMSM sağlam ve arızalı durumda çalıştırılmış olup

elde edilen spektrum grafikleri RTFA' ya sırasıyla uygulanmıştır. Yani eğitici bir öğrenme yaptırılarak ağ eğitilmiştir. Daha sonra test amacıyla oluşturulan veriler ağa uygulanarak ağın performansı belirlenmiştir. Ağın eğitilmesi sonucu akım, gerilim, hız ve tork bilgilerinin kullanılması ile elde edilen toplam karesel hatanın iterasyon sayısına bağlı değişimi motor boş çalışma ve tam yük değerleri için Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5. 1. Eksenden kaçıklık RTFA-HFD hata- iterasyon değişimi

Şekil 5.1 incelendiğinde boş çalışmada; referans değere akım 8.11, gerilim 8, hız 8.13 ve tork 7.9 iterasyonda ulaşılmıştır. Yüklü çalışmada ise akım 8.13, gerilim 8.18, hız 8 iterasyon ve tork 8.17 iterasyonda ulaşılmıştır. Boş ve yüklü çalışma için istenilen hataya ulaşma iterasyon sayısı ortalama 8 iterasyondur. Eğitilen RTFA' ya boş çalışma test verisi uygulandığında elde edilen sonuçlar Tablo 5.1' de verilmiştir. RTFA boş çalışmada akım verilerini kullandığında sağlam durumu %95.4 arızalı durumu ise %99.6 başarıyla teşhis ettiği görülmektedir. Gerilim için sağlam çalışma %70, arızalı çalışma için %99' dur. Hız değerleri ile yapılan teşhis sonuçlarına bakıldığında sağlam çalışmayı %81.2 arızalı çalışmayı ise %98 başarı ile ayırt edebilmektedir. Tork verilerini kullandığında ise durum sırasıyla %84 ve %98.8' dir. Arızalı durumda spektrumlara ilave yanband harmoniklerinin girmesi sebebiyle RTFA arızalı durumu daha yüksek başarı ile tespit etmektedir.

Tablo 5. 1. RTFA-HFD ekseninden kaçıklık boş çalışma test sonuçları

	Hedef		Çıkışlar							
	Q2	Q1	Akım		Gerilim		Hız		Tork	
Boş Çalışma	0	1	0.00	1.00	0.18	0.82	0.18	0.82	0.00	0.74
	0	1	0.00	1.00	0.36	0.64	0.16	0.84	0.00	0.88
	0	1	0.15	0.85	0.35	0.65	0.14	0.86	0.00	0.93
	0	1	0.04	0.96	0.34	0.66	0.24	0.76	0.00	0.74
	0	1	0.04	0.96	0.28	0.72	0.22	0.78	0.00	0.91
	1	0	1.00	0.00	0.99	0.01	0.98	0.02	0.98	0.05
	1	0	0.99	0.01	0.99	0.01	0.98	0.02	0.99	0.07
	1	0	1.00	0.00	0.99	0.01	0.98	0.02	0.99	0.07
	1	0	0.99	0.01	0.99	0.01	0.98	0.02	0.99	0.08
	1	0	1.00	0.00	0.99	0.01	0.98	0.02	0.99	0.08

Motor tam yük değerinde çalıştırıldığında elde edilen sağlam ve arızalı durum verileri ile eğitilen RTFA 'nın test edilmesi sonucu ulaşılan değerler ise Tablo 5.2' de görülmektedir.

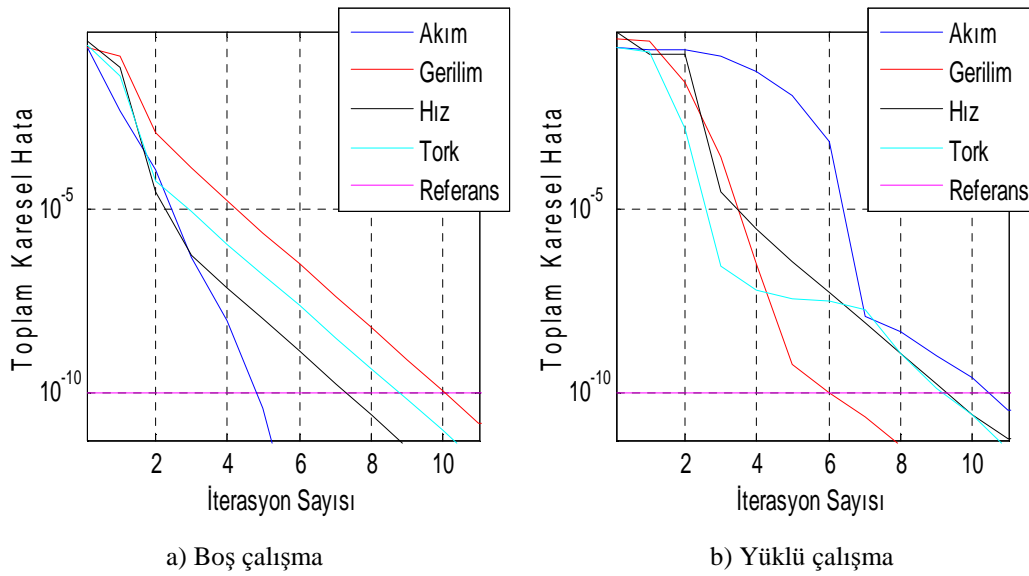
Tablo 5. 2. RTFA-HFD ekseninden kaçıklık yüklü çalışma test sonuçları

	Hedef		Çıkışlar							
	Q2	Q1	Akım		Gerilim		Hız		Tork	
Yüklü Çalışma	0	1	0.00	1.00	0.04	0.96	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.01	0.99	0.02	0.98
	0	1	0.00	1.00	0.03	0.97	0.01	0.99	0.19	0.81
	0	1	0.00	1.00	0.06	0.94	0.01	0.99	0.08	0.92
	0	1	0.00	1.00	0.06	0.94	0.02	0.98	0.12	0.88
	1	0	0.95	0.05	1.00	0.00	1.00	0.00	0.96	0.04
	1	0	0.93	0.07	1.00	0.00	0.99	0.01	0.99	0.01
	1	0	0.93	0.07	0.99	0.01	0.97	0.03	1.00	0.00
	1	0	0.92	0.08	0.99	0.01	0.96	0.04	1.00	0.00
	1	0	0.92	0.08	0.99	0.01	0.93	0.07	1.00	0.00

Kullanılan RTFA yüklü çalışma drumunda akım verilerini kullanarak teşhis yaptığında sağlam durumu %100, arızalı durumu %93 başarı ile teşhis etmektedir. Gerilim içinse sağlamda %96.2, arızalıda da %99.4 gibi bir başarı sergilemektedir. Hızda ise bu oranlar %99 ve %97' dir. Tork sinyali ile yapılan teşhiste ise %91.8 ve %99' dur.

### 5.1.1.b. HFD ve ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Eksenden kaçıklık arızasının teşhisi için kullanılan bir diğer ağ yapısında ÇKİBA yapısıdır. Teşhis amacıyla oluşturulan YSA' da eğitim fonksiyonu olarak çok hızlı olmasından dolayı "TRAINLM" ve geri yayılım algoritmasında başarılı sonuçlar verdiği için adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak "LEARNGDM", aktivasyon fonksiyonu olarak "TANSIG" kullanılmıştır. Oluşturulan YSA' da 206 giriş düğümü, saklı katmanda 10, çıkış katmanında ise 2 çıkış düğümü bulunmaktadır.



Şekil 5. 2. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-HFD hata- iterasyon değişimi

Şekil 5.2' de boş ve yüklü çalışma durumları için eğitim esnasında elde edilen toplam karesel hatanın iterasyon sayısı ile değişimi verilmiştir. Boş çalışmada istenilen hata değerine akım 4.8 iterasyonda, hız 7.2 iterasyonda, tork 8.7 iterasyonda gerilim ise 10 iterasyonda ulaşmıştır. Yüklü çalışmada ise gerilim 6 iterasyonda, hız ve tork yaklaşık birbirine eşit olarak 9.2 iterasyonda akım ise 10.2 iterasyonda referansa ulaşmıştır.

Eğitilmiş YSA'ya boş çalışma için oluşturulan test verisi uygulandığında elde edilen sonuçlar Tablo 5.3' de sunulmuştur.

Tablo 5. 3. ÇKİBA-HFD ekseninden kaçıklık boş çalışma test sonuçları

	Hedef		Çıkışlar							
	Q2	Q1	Akım		Gerilim		Hız		Tork	
Boş Çalışma	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.05	0.95	0.01	0.99
	0	1	0.08	0.92	0.01	0.99	0.00	1.00	0.01	0.99
	0	1	0.15	0.75	0.01	0.99	0.03	0.97	0.00	1.00
	0	1	0.15	0.75	0.00	1.00	0.07	0.93	0.01	0.99
	0	1	0.10	0.90	0.00	1.00	0.03	0.97	0.00	1.00
	1	0	0.99	0.01	1.00	0.00	0.91	0.09	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00	0.95	0.05	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00	0.93	0.07	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00	0.88	0.12	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00	0.86	0.14	0.99	0.01

Test sonuçlarına bakıldığında akım verileri ile test edildiğinde oluşturulan YSA sağlam durumu %86.4, arızalı durumu ise %99.8 ile teşhis etmiştir. Gerilimde ise durum sağlam için %99.6, arızalı durum içinde %100' lük bir performans sergilemiştir. Hız spektrum değerleri ile oluşturulan test verisi ağa uygulandığında sağlam durumu %96.4, arızalı durumu %90.6 doğrulukla sınıflandırmıştır. Tork için durum sağlam çalışmada %99.4, arızalı çalışmada ise %99 şeklindedir. Yüklü çalışma durumu için test edildiğinde Tablo 5.4' deki değerlere ulaşılmıştır.

Tablo 5. 4. ÇKİBA-HFD ekseninden kaçıklık yüklü çalışma test sonuçları

	Hedef		Çıkışlar							
	Q2	Q1	Akım		Gerilim		Hız		Tork	
Yüklü Çalışma	0	1	0.01	0.99	0.01	0.99	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.01	0.99	0.01	0.99	0.00	1.00	0.01	0.99
	0	1	0.00	1.00	0.01	0.99	0.00	1.00	0.03	0.97
	0	1	0.01	0.99	0.01	0.99	0.00	1.00	0.02	0.98
	0	1	0.01	0.99	0.01	0.99	0.00	1.00	0.02	0.98
	1	0	1.00	0.00	0.96	0.04	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.98	0.02	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.96	0.04	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.95	0.05	0.99	0.01	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.94	0.06	0.99	0.01	1.00	0.00



Yüklü çalışma test sonuçlarına göre akımda sağlam çalışmayı %99.2, arızalı çalışmayı ise %100 ile teşhis etmiştir. Gerilim verileri ile testte sağlam durumu %99, arızalı durumu %95.8 performansla teşhis etmektedir. Hız için sağlam değer %100, arızalı için %99.6' dır. Tork test verisi sonuçlarına göre YSA sağlam çalışmayı %98.4, arızalı çalışmayı %100' oranında teşhis etmiştir. RTFA ve ÇKİBA için elde edilen sonuçların daha net görülebilmesi için Tablo 5.5 oluşturulmuştur.

Tablo 5. 5. Eksenden kaçıklık için HFD-YSA karşılaştırması

Sağlam Çalışma	Ağ Yapısı	Teşhis doğruluğu (%)							
		Akım		Gerilim		Hız		Tork	
		Boş	Yüklü	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü
Sağlam Çalışma	RTFA	95.4	100	75	96.2	81.2	99	84	91.8
	ÇKİBA	86.4	99.2	99.6	99	96.4	100	99.4	98.4
Arızalı Çalışma	Ağ Yapısı	Teşhis doğruluğu (%)							
		Akım		Gerilim		Hız		Tork	
		Boş	Yüklü	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü
Arızalı Çalışma	RTFA	99.6	93	99	99.4	98	97	98.8	99
	ÇKİBA	99.8	100	100	95.8	90.6	99.6	99	100

Tablo 5.5 verilerine göre RTFA sağlam durumu akımla %97.7, gerilimle %85.6, hızla %90.1 ve torkla %87.9 başarı ortalamasıyla teşhis ederken bu oranlar arızalı durum için sırasıyla %96.3, %99.2, %97.5 ve %98.9' dur.

ÇKİBA ise sağlam durumu akımla %92.8, gerilimle %99.8, hızla %98.2 ve torkla %98.9 başarı ortalamasıyla teşhis etmiştir. Arızalı durum için sırasıyla %99.9, %97.9, %95.1 ve %99.5 elde edilmiştir. Bu değerlere göre RTFA akımda biraz daha başarılı gibi görülsede genele bakıldığında HFD verileri ile arıza teşhisinde ÇKİBA daha başarılıdır.

Tablo 5.5 incelendiğinde RTFA ve ÇKİBA' nın arızalı durumu sağlam duruma göre daha yüksek doğrulukla teşhis ettiği görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan SMSM inverter ile sürülmektedir. Yani motor uçlarına uygulanan gerilim saf sinüsoidal yapıda değildir. Dolayısıyla izlenen sinyallere ilave harmonikler eklenmektedir. Eklenen bu harmonikler frekans spektrumunda değişik yerlerde ve genliklerde yanbandlar oluşturmaktadır. Yapılan teşhis çalışmasında oluşturulan

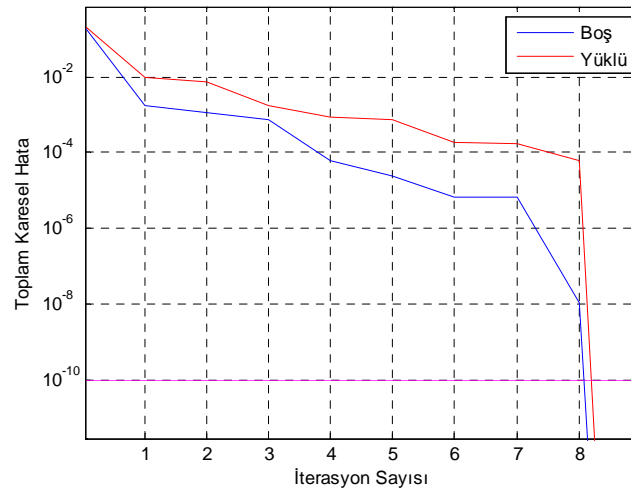
eğitim ve test seti farklı çalışma zamanlarında motordan alınan verilerle oluşturulmuştur. YSA yapıları test verileri ile test edildiğinde inverterin kattığı bu harmonikler sebebiyle sağlam çalışmada teşhis doğruluğu bir miktar dűřmektedir. Arızalı alışma şartlarında da inverter sisteme ilave yanbandlar enjekte etmektedir. Ancak arızalı durumda arızaya ait harmonikler sağlam durumdan büyük genlik değişimleri ile ayrılmaktadır. Bu ise inverterin enjekte ettiği yanbandların etkisini azaltarak YSA' nın eksenden kaçıklık arızasını daha yüksek teşhis doğruluğu ile teşhis etmesini sağlamaktadır.

### **5.1.2. Alfa Beta dönüşümü verileri ile eksenden kaçıklık arıza teşhisi**

Eksenden kaçıklık arızasının teşhisinde Alfa-Beta dönüşümü sonucu elde edilen veriler kullanılmıştır. Bölüm 4' de ayrıntılı olarak incelendiği gibi motor 3 faz akımı 8 kHz örnekleme hızıyla kaydedilmiştir. Daha sonra bu akımların Alfa- Beta dönüşümleri yapılarak sağlam ve arızalı duruma ait desenler oluşturulmuştur. Bu kısımda 750 d/d (50 Hz) alışma hızında boş ve tam yük değerleri sonucu elde edilen veriler YSA eğitiminde ve testinde kullanılarak arıza teşhisi yapılmıştır. Motor bir faz akımının periyot süresi 0.02 saniyedir. Bunu örnekleme frekansı ile arpıtığımızda bir faz akımının bir periyotluk örnek sayısı 160, üç faz akımı için bu miktar  $3 \times 160 = 480$ ' dir. Bu akımlara Alfa-Beta dönüşümü uygulandığında 160 adet Alfa, 160 adet Beta birleşeni elde edilir. Bu değerler oluşturulan YSA için giriş teşkil etmektedir. YSA 2 ıkışlı olup Q1 ıkışı sağlam çalışmayı, Q2 ıkışı ise arızalı çalışmayı gösterir. Alfa-Beta dönüşümü sonucu elde edilen verilerin bir periyotluk boyutu  $1 \times 320$  satır matris şeklindedir. Eğitim amacıyla oluşturulan veri ise  $5 \times 320$  sağlam ve  $5 \times 320$  arızalı durum için olmak üzere  $10 \times 320$  boyutundadır. Yine eğitilen YSA' yı test etmek amacıyla  $10 \times 320$  boyutunda test verisi oluşturulmuştur. Eğitim ve test verileri farklı zamanlarda aynı çalışma koşulları için alınmıştır.

#### **5.1.2.a. Alfa Beta-RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi**

Oluşturulan RTFA' da saklı katmanda 9, çıkış katmanında ise 2 adet nöron bulunmaktadır. Hedef  $1e^{-10}$  hata değeridir. Bu durum için oluşturulan RTFA'nın toplam karesel hata-iterasyon değişim eğrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. 3. Eksenden kaçıklık RTFA-Alfa Beta hata- iterasyon değişimi

Oluşturulan RTFA'nın test verisi ile test edilmesi sonucu şu sonuçlara ulaşılmıştır. Boş çalışmada sağlam durumu %97.6, arızalı durumu ise %99.6 ile teşhis etmiştir. Yüklü çalışmada ise bu oranlar sağlam durum için % 100, arızalı durum içinse %94.4' dür. Görüldüğü üzere boş çalışmada arızalı durumu daha yüksek oranla teşhis etmektedir. Tablo 5.6' da elde edilen test verileri görülmektedir.

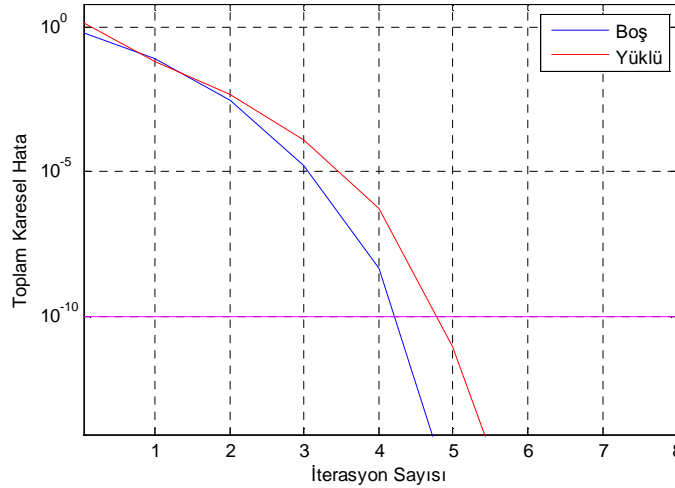
Tablo 5. 6. Alfa Beta-RTFA eksenden kaçıklık test sonuçları

	Hedef		Çalışma Şekli			
	Q2	Q1	Boş		Yüklü	
RTFA	0	1	0.05	0.95	0.00	1.00
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.03	0.97	0.00	1.00
	0	1	0.01	0.99	0.00	1.00
	0	1	0.03	0.97	0.00	1.00
	1	0	1.00	0.00	0.93	0.07
	1	0	0.99	0.01	1.00	0.00
	1	0	0.99	0.01	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.93	0.07
	1	0	1.00	0.00	0.86	0.14

### 5.1.2.b. Alfa Beta-ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Alfa-Beta dönüşümü ile elde edilen eğitim verisi ÇKİBA' yı eğitmekte kullanılmıştır. Oluşturulan ağı giriş katmanında 320 düğüm sayısı, saklı katmanında

10, çıkış katmanında ise 2 adet düğüm sayısı bulunmaktadır. ÇKİBA’ da eğitim fonksiyonu olarak “TRAINLM”, adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak “LEARNGDM”, aktivasyon fonksiyonu olarakta “TANSIG” kullanılmıştır. Eğitim sonucu elde edilen boş ve yüklü çalışma için toplam karesel hata-iterasyon değişimi Şekil 5.4’ deki gibidir.



Şekil 5. 4. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-Alfa Beta hata- iterasyon değişimi

Hem boş hemde yüklü çalışma için hedeflenen hata değerine yaklaşık 5 iterasyon civarında ulaşılmıştır. Test sonuçları ise Tablo 5.7’ deki gibidir.

Tablo 5. 7. Alfa Beta-ÇKİBA eksenden kaçıklık test sonuçları

	Hedef		Çalışma Şekli			
	Q2	Q1	Boş		Yüklü	
ÇKİBA	0	1	0.14	0.86	0.02	0.98
	0	1	0.08	0.92	0.00	1.00
	0	1	0.07	0.93	0.00	1.00
	0	1	0.28	0.72	0.00	1.00
	0	1	0.17	0.83	0.00	1.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	0.87	0.13	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	0.99	0.01
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00

Test sonuçlarına göre ÇKİBA sağlam durumu boş çalışmada %85.2, yüklü çalışmada %99.6 performans ile ayırt etmiştir. Arızalı durumu ise boş çalışmada %97.4, yüklü çalışmada %99.6 ile sınıflandırmıştır. Elde edilen sonuçların daha rahat yorumlanabilmesi için 2 farklı YSA yapısından elde edilen test sonuçları Tablo 5.8' de sunulmuştur.

Tablo 5. 8. Eksenden kaçıklık için Alfa Beta-YSA karşılaştırması

Ağ Yapısı	Teşhis doğruluğu (%)			
	Sağlam		Arızalı	
	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü
RTFA	97.6	100	99.6	94.4
ÇKİBA	85.2	99.6	97.4	99.6

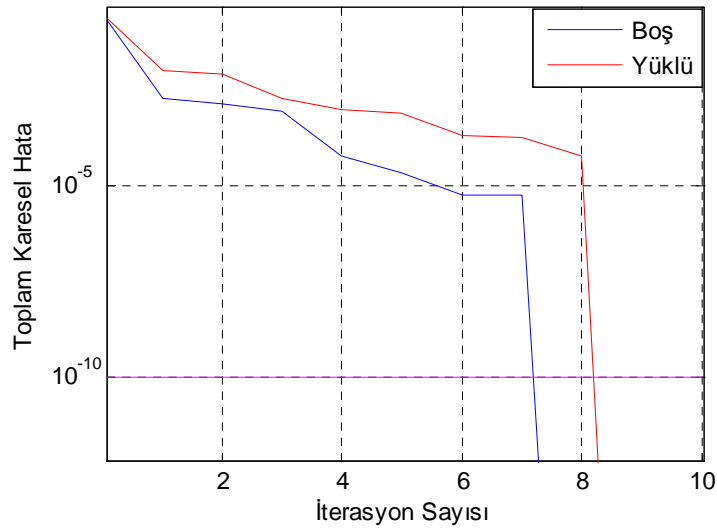
Tablo 5.8' den de görülebileceği gibi RTFA sağlam durumu %98.8, arızalı durumu %97 ortalama ile teşhis ederken ÇKİBA sağlam durumu %92.4, arızalı durumu %98.1 ortalama ile teşhis etmiştir. ÇKİBA' nın sağlam durumu % 6' lık bir oranla daha düşük yüzdeyle teşhis etmesi eğitim ve test verisi için elde edilen desenlerin çok küçük sapmalarla birbirinden ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlara göre eksenden kaçıklık arızasının teşhisinde Alfa-Beta sonuçlarının RTFA ile birlikte kullanılması daha başarılı sonuç vermektedir.

### 5.1.3. Ani akım-hızın izlenmesi verileri ile eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Motor üç faz akımıyla birlikte izlenilebilecek bir diğer parametrede motor hızıdır. Motor da oluşacak herhangi bir arıza motor hızını da etkileyeceğinden bu parametrenin kullanılması arıza teşhisi yapmayı kolaylaştıracaktır. Motor üç faz akımıyla birlikte motor devir bilgisi de 8 kHz örnekleme hızıyla kayıt altına alınmıştır. Bu yöntemde YSA' nın eğitilmesi ve test edilmesi için oluşturulan veri boyutu bir peryot için 1x640 boyutundadır. Eğitim ve test verisi için sinyal alma işlemi 5' er kez yapılmıştır. Yani test ve eğitim veri boyutumuz 10x640 boyutundadır. Yine teşhis amacıyla oluşturulan YSA' lar 2 çıkışlı olup Q1 çıkışı sağlam çalışmayı, Q2 çıkışı ise arızalı çalışmayı gösterir.

### 5.1.3.a. Ani akım-hız RTFA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Oluşturulan RTFA' da giriş katmanında 640, saklı katmanda 10, çıkış katmanında ise 2 adet nöron bulunmaktadır. Hedef  $1e^{-10}$  hata değeridir. Bu durum için oluşturulan RTFA'nın toplam karesel hata-iterasyon değişim eğrisi Şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5. 5. Eksenden kaçıklık RTFA-Ani akım-hız hata- iterasyon değişimi

Boş çalışmada istenilen hata değerine yüklü çalışmaya göre daha erken ulaşıldığı Şekil 5.5' de görülmektedir. Test verisi uygulanınca elde edilen çıkış değerleri Tablo 5.9' da verilmiştir.

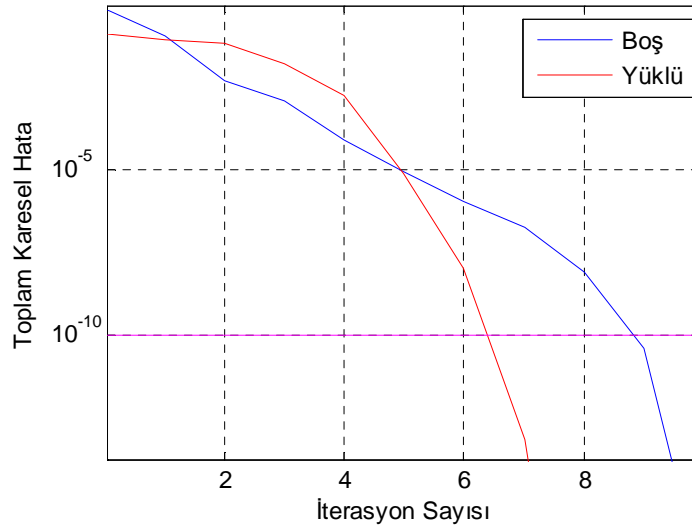
Tablo 5. 9. Ani akım-hız RTFA eksenden kaçıklık test sonuçları

	Hedef		Çalışma Şekli			
	Q2	Q1	Boş		Yüklü	
<b>RTFA</b>	0	1	0.05	0.95	0.00	1.00
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.02	0.98	0.00	1.00
	0	1	0.01	0.99	0.00	1.00
	0	1	0.03	0.97	0.00	1.00
	1	0	1.00	0.00	0.93	0.07
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	0.99	0.01	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.93	0.07
	1	0	1.00	0.00	0.86	0.14

Eğitilen RTFA' ya test verisi uygulanınca; sağlam durumu boş çalışmada %97.8, yüklü çalışmada %100 performansla teşhis ederken, arızalı durumu ise boş çalışmada %99.8, yüklü çalışmada ise %94.4 ile teşhis etmiştir. Yani sağlam çalışmayı ortalama %98.9 ile teşhis ederken arızalı çalışmayı %97.1 ile oldukça başarılı bir şekilde teşhis etmiştir. Tablo 5.9' dan da anlaşılacağı üzere bu yöntemde eksenden kaçıklık arızası çok rahat teşhis edilebilir.

### 5.1.3.b. Ani akım-hız ÇKİBA kullanarak eksenden kaçıklık arıza teşhisi

Ani akım-hızın izlenmesi yönteminde herhangi bir dönüşüm kullanılmadan oluşturulan eğitim verisi ÇKİBA' yı eğitmekte kullanılmıştır. Oluşturulan ağın 640 adet giriş düğümü, 10 saklı düğüm sayısı ve 2 çıkış düğüm sayısı bulunmaktadır. Oluşturulan ağ yapısında eğitim fonksiyonu olarak "TRAINLM", adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak "LEARNGDM", aktivasyon fonksiyonu olarak "TANSIG" kullanılmıştır. Eğitim sonucu elde edilen boş ve yüklü çalışma için toplam karesel hata-iterasyon değişimi Şekil 5.6' daki gibidir.



Şekil 5. 6. Eksenden kaçıklık ÇKİBA-Ani akım-hız hata- iterasyon değişimi

Ani Akım-Hız bilgilerinin kullanılması ile eğitilen ağ test edildiğinde sağlam durumu boş çalışmada %99.6, yüklü çalışmada %98.4 doğrulukla teşhis etmiştir. Aynı ağ yapısı arızalı çalışmayı ise boş çalışmada %100, yüklü çalışmada %94 performansla teşhis etmiştir. Test sonuçları Tablo 5.10' da verilmiştir.

Tablo 5. 10. Ani akım-hız ÇKİBA eksenden kaçıklık test sonuçları

	Hedef		Çalışma Şekli			
	Q2	Q1	Boş		Yüklü	
ÇKİBA	0	1	0.01	0.99	0.08	0.92
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	0	1	0.01	0.99	0.00	1.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	0.70	0.30
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	0	1.00	0.00	1.00	0.00

Ani Akım-Hız verilerinin kullanılması ile yapılan teşhis sonuçlarına göre RTFA ve ÇKİBA performanslarının daha net görülebilmesi için Tablo 5.11 oluşturulmuştur.

Tablo 5. 11. Eksenden kaçıklık için Ani akım-hız YSA karşılaştırması

Ağ Yapısı	Teşhis doğruluğu (%)			
	Sağlam		Arızalı	
	Boş	Yüklü	Boş	Yüklü
RTFA	97.8	100	99.8	94.4
ÇKİBA	99.6	98.4	100	94

Tablo 5.11 sonuçlarına göre RTFA sağlam durumu %98.9, arızalı durumu %96.6 ortalama ile teşhis ederken bu oranlar ÇKİBA için sırasıyla %99 ve %97' dir. Eksenden kaçıklık için yapılan teşhis çalışmalarında kullanılan iki farklı ağ yapısında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca tespit yöntemleri ile teşhis yöntemlerinin de birbirleri ile performansı incelenerek değişik alternatifler oluşturulmuştur. Teşhis çalışmasında elde edilen sonuçların % olarak yüksek çıkmasının bir diğer sebebi de eksenden kaçıklık arızasının izlenen sinyallerde kendisini çok net ortaya koymasından kaynaklanmaktadır.



## 5.2. Rulman Arızasının Teşhisi

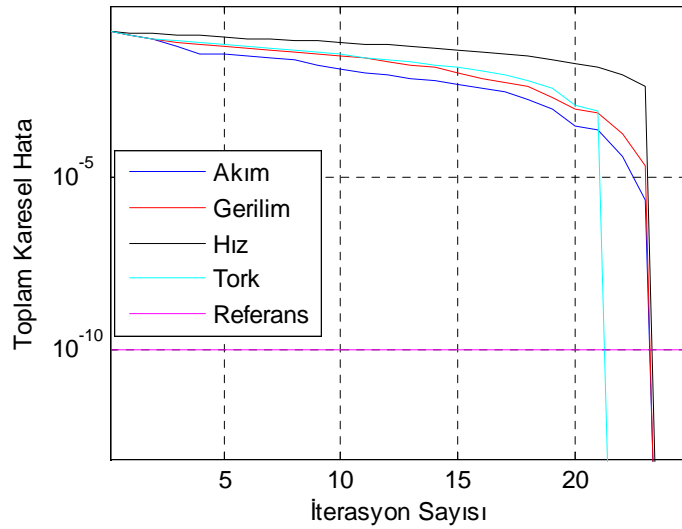
Motorda meydana gelen yataklanma arızalarının ve özellikle bu arızanın rulmanın hangi kısmında oluştuğunun bilinmesi veya tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Yine bu kısımda da rulman arızaları HFD, Alfa-Beta dönüşüm sonuçları ve Ani Akım-hızın izlenmesi sonucu elde edilen verilerin oluşturulan RTFA ve ÇKİBA' nın eğitiminde ve testinde kullanılmasıyla teşhis gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan YSA yapılarında Q1,...,Q5 olmak üzere 5 adet çıkış kullanılmıştır. Q1 çıkışı sağlam çalışmayı, Q2 çıkışı dış bilezik arızasını, Q3 iç bilezik arızasını, Q4 kafes arızasını ve Q5' de bilya arızasını temsil etmektedir. Bu bölümde de eksenden kaçıklık arızasında olduğu gibi eğitim ve test verilerinin oluşturulmasında 5' er kez veri toplanmış ve kayıt altına alınmıştır. Arızalar hakkında daha net bilgiler verdiği için 750 d/d (50 Hz) çalışma hızında boş ve tam yükte çalışma bilgileri kullanılmıştır.

### 5.2.1. HFD verileri ile rulman arızası teşhisi

Rulman arızası tespit çalışmasında 750 d/d (50 Hz) hızda meydana gelen arızaların akım, gerilim, hız ve tork spektrumları üzerine etkisi araştırılmış ve Tablo 4.6' da arızaların spektrum grafiklerinde hangi frekanslarda ortaya çıkacağı gösterilmiştir. Tablo 4.6' dan da görüleceği gibi en büyük frekans değeri olan iç bilezik arızasının dördüncü harmoniği 304 Hz' de görülmektedir. O halde 0-310 Hz aralığı arızaların teşhis edilmesi için rahatlıkla kullanılabilir. 2 kHz örnekleme frekansı ile kayıt altına alınıp 2048 noktalı HFD işlemine tabi tutulan zaman boyutundaki sinyal frekans boyutunda 0-1000 Hz arasında olmaktadır. 0-310 Hz arası teşhis amaçlı kullanılacağına göre YSA' nın girişinde kullanılacak düğüm sayısı 319' dur. Sağlam ve arızalı durum için 5' er tekrar yapılacağına göre 25x319 boyutunda eğitim ve 25x319 boyutunda da test verisi oluşturulmuştur. Bölüm 4' de değinildiği gibi rulman arızasına ait karakteristik genlik değişimleri boş çalışma spektrumlarında görülmüştür. Bu yüzden boş çalışma için eğitim ve test çalışması rulmanın durumu hakkında daha net bilgi verecektir. YSA' nın eğitilmesinde hata değeri olarak  $1e^{-10}$  değeri referans olarak seçilmiştir.

### 5.2.1.a. HFD-RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Rulman arızasının teşhisi amacıyla oluşturulan RTFA yapısında giriş katmanında 319 düğüm, saklı katmanda 24 düğüm ve çıkış katmanında ise 5 düğüm vardır. Rulman arızasının sınıflandırılması ve teşhisi için oluşturulan RTFA' nın akım, gerilim, hız ve tork sinyalleri ile eğitilmesi sonucu elde edilen toplam karesel hatanın iterasyon sayısı ile değişimi Şekil 5.7' de görülmektedir.



Şekil 5. 7. Rulman arızası RTFA-HFD hata- iterasyon değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi referans olarak seçilen hata değerine en erken ulaşan tork verisi ile eğitilen ağın çıkış değeridir. Tork iterasyon sayısı 21.5 iken diğerleri yaklaşık 23.5 değerindedir.

Eğitilen ağın akım test verisi ile test edilmesi sonucunda şu bilgilere ulaşılmıştır. RTFA sağlam durumu arızalı durumlardan %100 başarıyla ayırt etmiştir. Dış bilezik ve iç bilezik arızalarında oldukça iyi performans gösteren ağın başarısı sırasıyla %99.8 ve %100' dür. Ancak kafes arızasında bu oran %64' dür. RTFA bu arıza türünü iç bilezik arızasından ayırt etmekte zorlanmıştır. Sınıflandırma yaparken %64 kafes arızasını gösterirken %36 iç bilezik arızası şeklinde sınıflandırmıştır. Bilya arızasında ise; %72 bilya arızası şeklinde sınıflandırırken %28 iç bilezik arızası şeklinde sınıflandırmıştır. Tablo 5.12' de akım için elde edilen test sonuçları daha net bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5. 12. RTFA-HFD rulman arızası test sonuçları

	Hedef					Çıktılar					
	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	
Akım Test Verisi Sonuçları	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	0.99	0.1	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.99	0.01	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.96	0.04	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.95	0.05	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.23	0.77	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.07	0.93	0	0	
	1	0	0	0	0	0	0.7	0	0.3	0	0
	1	0	0	0	0	0	0.66	0	0.34	0	0
1	0	0	0	0	0	0.68	0	0.32	0	0	
1	0	0	0	0	0	0.83	0	0.17	0	0	
1	0	0	0	0	0	0.73	0	0.27	0	0	

Eğitilen RTFA gerilim, hız ve tork spektrumlarının kullanılmasıyla oluşturulan test verileri ile test edildiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir; Gerilimde sağlam çalışma durumunu %48 ile teşhis etmiştir. Sağlam durum ile kafes arızasını ayırt edememiştir. Dış bilezik arızasındaki performansı %63.4' tür. RTFA' nın bu arıza türünde de düşük performans vermesinin sebebi kafes arızasıyla karıştırmasıdır. Ağın iç bilezik arıza performansı ise %83 iken burada da %17' lik hata RTFA'nın arıza türünü kafes arızasıyla karıştırmasından kaynaklanmaktadır. Kafes arızasını %100 doğrulukla teşhis etmiştir. Bilya arızasında da durum diğer arıza türlerinden pek

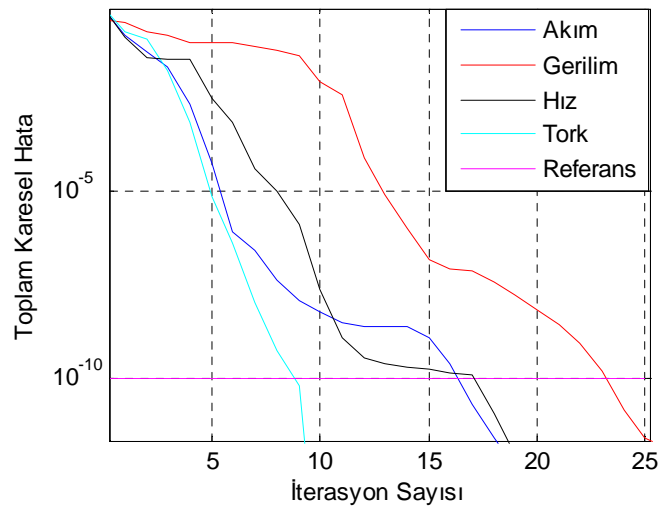
farklı değildir. RTFA bilya arızasını %87 ile teşhis ederken %13’ de kafes arızası olarak teşhis etmiştir.

Hız verileri ile oluşturulan test verisi RTFA’ ya uygulanınca sağlam durumu %79.4, dış bilezik arızasını %100, iç bilezik arızasını %74.6, kafes arızasını %87.8 ve bilya arızasını %88.8 başarı oranı ile teşhis etmiştir.

Tork verilerinde ise durum sırasıyla %97.2, %96, %100, %96 ve %93.8’ dir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda arıza türlerini teşhis edip sınıflandırmakta kullanılan verilerden akım %74, gerilim %76, hız %86 ve tork %97 ortalama performans göstermiştir.

### 5.2.1.b. HFD- ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Rulman arızasının teşhisi ve sınıflandırılmasında kullanılan bir diğer YSA türünde ÇKİBA’ dır. Oluşturulan ağıın giriş katmanında 319 düğüm sayısı, saklı katmanında 10, çıkış katmanında ise 5 adet düğüm bulunmaktadır. ÇKİBA’ da eğitim fonksiyonu olarak “TRAINLM”, adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak “LEARNGDM”, aktivasyon fonksiyonu olarakta “TANSIG” kullanılmıştır. Eğitilen ağıın toplam karesel hata ile iterasyon değişimi Şekil 5.8’ de verilmiştir.



Şekil 5. 8. Rulman arızası ÇKİBA-HFD hata-iterasyon değişimi

Şekilden de görüldüğü üzere istenilen hata değerine eğitim sonucunda en erken ulaşan tork verisidir. Tork 8.5 iterasyon, akım 16, hız 17 ve gerilim 23 iterasyonda

referans hataya ulaşmıştır. Eğitilen ağın akım verisi ile test edilmesi sonucu ulaşılan değerler ise Tablo 5.13' de verilmiştir.

Tablo 5. 13. ÇKİBA-HFD rulman arızası test sonuçları

	Hedef					Çıkışlar					
	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	
Akım Test Verisi Sonuçları	0	0	0	0	1	0.04	0	0	0	0.96	
	0	0	0	0	1	0.04	0	0	0	0.96	
	0	0	0	0	1	0.04	0	0	0	0.96	
	0	0	0	0	1	0.02	0	0	0	0.98	
	0	0	0	0	1	0.03	0	0	0	0.97	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
	0	0	1	0	0	0	0	0.97	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	0.98	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	0.99	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
	0	1	0	0	0	0	0.07	0.93	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0.1	0.90	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	1	0.1	0	0	0	
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	

Tablo incelendiğinde ÇKİBA'nın rulman arızalarını sınıflandırmakta akım verilerini kullandığında oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Sağlam durumu %96.6, dış bilezik arızasını %100, iç bilezik arızasını %98.8, kafes arızasını %96.6 ve bilya arızasını da %98 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Aynı ağ gerilim, hız ve tork verileri ile oluşturulan test verileri ile de test edildiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır;

Gerilim verileri ile test edildiğinde sağlam durumu %97.4, dış bilezik arızasını %92, iç bilezik arızasını %100, kafes arızasını %96.2 ve bilya arızasını da %84.8 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Bilya arızasında performansın düşük çıkmasının sebebi ağır bu arızayı iç bilezik arızasından ayırt etmekte zorlanmasından kaynaklanmaktadır.

Hız verileri ile yapılan testte sağlam durumu %87.8, dış bilezik arızasını %99, iç bilezik arızasını %97.4, kafes arızasını %91.4 ve bilya arızasını da %92.8 ile teşhis etmiştir.

Tork için de sırasıyla %99.2, %92.6, %99, %68.4 ve %100 değerlerine ulaşılmıştır. Kafes arızası için oranın düşük çıkmasının sebebi ağır arıza türünü %31 ile bilya arızası olarak teşhis etmesidir.

Rulman arızasının teşhisi ve sınıflandırılması için HFD verilerinin YSA ile eğitim ve test edilmesi sonucunda ulaşılan değerlerin daha net yorumlanabilmesi için Tablo 5.14 oluşturulmuştur.

Tablo 5. 14. Rulman arızası için HFD-YSA karşılaştırması

Arıza Tipi	Teşhis doğruluğu (%)							
	Akım		Gerilim		Hız		Tork	
	RTFA	ÇKİBA	RTFA	ÇKİBA	RTFA	ÇKİBA	RTFA	ÇKİBA
<b>Sağlam</b>	100	96.6	48	97.4	79.4	87.8	97.2	99.2
<b>Dış Bilezik Arızası</b>	99.8	100	63.4	92	100	99	96	92.6
<b>İç Bilezik Arızası</b>	100	98.8	83	100	74.6	97.4	100	99
<b>Kafes Arızası</b>	64	96.6	100	96.2	87.8	91.4	96	68.4
<b>Bilya Arızası</b>	72	98	87	84.8	88.8	92.8	93.8	100

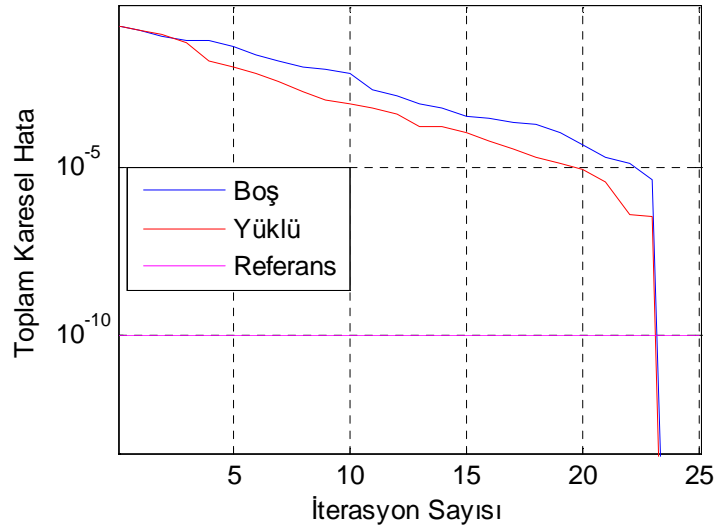
Tablo 5.14' deki değerler yorumlandığında HFD verileri ile rulman arızasının teşhisinde en başarılı sonuç veren yöntemin %98 ortalama ile akım sinyalinin ÇKİBA ile teşhisi olduğu sonucuna varılmıştır.

### 5.2.2. Alfa Beta verileri ile rulman arızası teşhisi

Motor 3 faz akımı 8 kHz örnekleme hızıyla kaydedilmiştir. Daha sonra bu akımların Alfa- Beta dönüşümleri yapılarak sağlam, dış bilezik arızası, iç bilezik arızası, kafes arızası ve bilya arızası mevcut duruma ait desenler oluşturulmuştur. Bu kısımda 750 d/d (50 Hz) çalışma hızında boş ve tam yük değerleri sonucu elde edilen veriler YSA eğitiminde ve testinde kullanılarak arıza teşhis edilmiştir. Motor üç faz akımlara Alfa-Beta dönüşümü uygulandığında 160 adet Alfa, 160 adet Beta birleşeni elde edilir. Bu değerler oluşturulan YSA için giriş teşkil etmektedir. YSA 5 çıkışlı olup Q1 çıkışı sağlam çalışmayı, Q2 çıkışı dış bilezik arızasını, Q3 iç bilezik arızasını, Q4 kafes arızasını ve Q5' de bilya arızasını temsil eder. Alfa –Beta dönüşümü sonucu elde edilen verilerin bir periyotluk boyutu 1x320 satır matris şeklindedir. Eğitim amacıyla oluşturulan veri ise 5x320 sağlam ve 20x320 arızalı durum için olmak üzere 25x320 boyutundadır. Yine eğitilen YSA' yı test etmek amacıyla 5x320 boyutunda sağlam, 20x320 boyutunda arızalı olmak üzere 25x320 boyutunda test verisi oluşturulmuştur.

#### 5.2.2.a. Alfa Beta-RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Rulman arızasının teşhisi amacıyla oluşturulan RTFA yapısında giriş katmanında 320 düğüm, saklı katmanda 24 düğüm ve çıkış katmanında ise 5 düğüm vardır. Rulman arızasının sınıflandırılması ve teşhisi için oluşturulan RTFA' nın boş ve yüklü eğitim verisi ile eğitilmesi sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.9' da sunulmuştur. Boş ve yüklü çalışmada eğrilerin eğimleri farklı olsa da referans hata değeri olan  $1e^{-10}$  değerine aynı iterasyon sayısında ulaşmışlardır. Eğitilen ağ boş ve yüklü çalışma şartları için oluşturulan test verileri ile test edildiğinde şu sonuçlar elde edilmiştir;



Şekil 5. 9. Rulman arızası Alfa Beta-RTFA hata-iterasyon değişimi

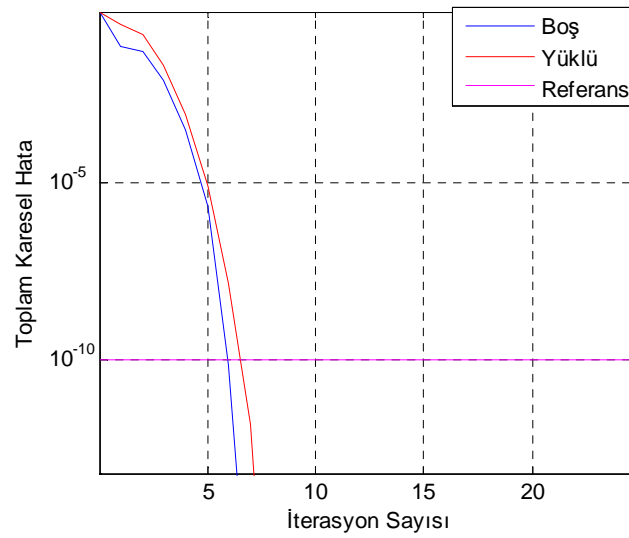
Boş çalışmada RTFA; sağlam durumu %96.6, dış bilezik arızasını %94.8, iç bilezik arızasını %95.2, kafes arızasını %73.2 ve bilya arızasını da %78 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır.

Yüklü çalışmada RTFA; sağlam durumu %91.8, dış bilezik arızasını %96.6, iç bilezik arızasını %82, kafes arızasını %80.8 ve bilya arızasını da %100 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Boş ve yüklü çalışma sonuçları değerlendirildiğinde boş çalışmada RTFA %87' lik performans ortalaması sergilerken, yüklü çalışmada ise bu oran %90' dır.

### 5.2.2.b. Alfa Beta-ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Alfa-Beta dönüşümü ile elde edilen eğitim verisi ÇKİBA'yı eğitmekte kullanılmıştır. Oluşturulan ağın giriş katmanında 320 düğüm sayısı, saklı katmanında 10 düğüm, çıkış katmanında ise 5 adet düğüm bulunmaktadır. ÇKİBA' da eğitim fonksiyonu olarak "TRAINLM", adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak "LEARNGDM", aktivasyon fonksiyonu olarak "TANSIG" kullanılmıştır. Eğitim sonucu elde edilen boş ve yüklü çalışma için toplam karesel hata-iterasyon değişimi Şekil 5.10' daki gibidir.





Şekil 5. 10. Rulman arızası Alfa Beta-ÇKİBA hata-iterasyon değişimi

Eğitim sonucunda ÇKİBA referans hataya boş çalışmada 6.5 iterasyonda ulaşırken yüklü çalışmada 7.5 iterasyonda ulaşmıştır. Ağ test edildiğinde ise şu sonuçlara ulaşılmıştır; Boş çalışmada ÇKİBA; sağlam durumu %96.2, dış bilezik arızasını %93.4, iç bilezik arızasını %99.8, kafes arızasını %61.2 ve bilya arızasını da %46.4 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Boş çalışmada kafes ve bilya arızasının performansının düşük çıkmasının sebebi ağın dış bilezik arızasıyla ayırt edememesinden kaynaklanmaktadır. Yüklü çalışmada ÇKİBA; sağlam durumu %100, dış bilezik arızasını %99.2, iç bilezik arızasını %100, kafes arızasını %100 ve bilya arızasını da %98.4 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Alfa-Beta sonuçları ile yapılan teşhis çalışmasında 2 farklı ağ yapısı kullanılmış, boş ve yüklü çalışma durumları için teşhis yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar daha net görülebilmesi için Tablo 5. 15' de verilmiştir.

Tablo 5. 15. Rulman arızası için Alfa Beta-YSA karşılaştırması

Arıza Tipi	Teşhis doğruluğu (%)			
	Boş		Yüklü	
	RTFA	ÇKİBA	RTFA	ÇKİBA
<b>Sağlam</b>	96.6	96.2	91.8	100
<b>Dış Bilezik Arızası</b>	94.8	93.4	96.6	99.2
<b>İç Bilezik Arızası</b>	95.2	99.8	82	100
<b>Kafes Arızası</b>	73.2	61.2	80.8	100
<b>Bilya Arızası</b>	78	46.4	100	98.4

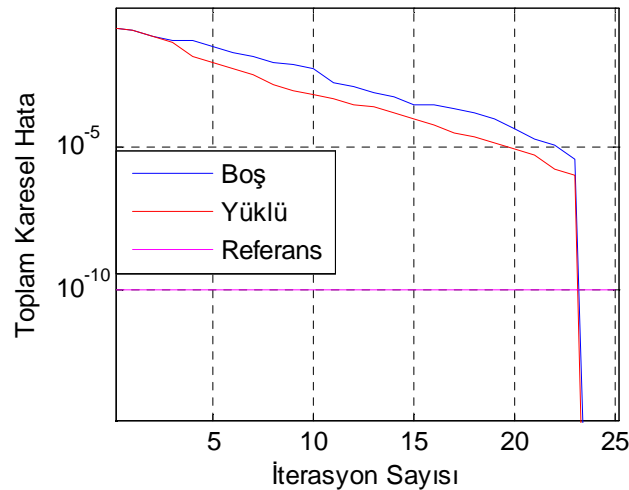
Tablodan da anlaşılacağı üzere Alfa-Beta verileri ile yapılan çalışmada en başarılı sonuç yüklü çalışmada ÇKİBA için %99.5 ortalama ile elde edilmiştir.

### 5.2.3. Ani akım-hız izlenmesi verileri ile rulman arızasının teşhisi

Bu yöntemde YSA' nın eğitilmesi ve test edilmesi için oluşturulan veri boyutu bir peryot için 1x640 boyutundadır. Bu çalışmada da eğitim ve test verisi oluşturmak için akım ve hız sinyalleri her bir durum için 5' er kez kayıt altına alınmıştır. Test ve eğitim veri boyutumuz 25x640 boyutundadır. Yine teşhis amacıyla oluşturulan YSA' lar 5 çıkışlı olup Q1 çıkışı sağlam çalışmayı, Q2 çıkışı dış bilezik arızasını, Q3 iç bilezik arızasını, Q4 kafes arızasını ve Q5' de bilya arızasını temsil eder.

#### 5.2.3.a. Ani akım-hız RTFA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Ani akım ve hızın izlenmesi sonucu elde edilen verilerle rulman arızasının teşhisi amacıyla oluşturulan RTFA yapısında giriş katmanında 640 düğüm, saklı katmanda 24 düğüm ve çıkış katmanında ise 5 düğüm vardır. Rulman arızasının sınıflandırılması ve teşhisi için oluşturulan RTFA' nın boş ve yüklü eğitim verisi ile eğitilmesi sonucunda elde edilen toplam karesel hatanın iterasyonla değişimi Şekil 5.11' de görülmektedir.



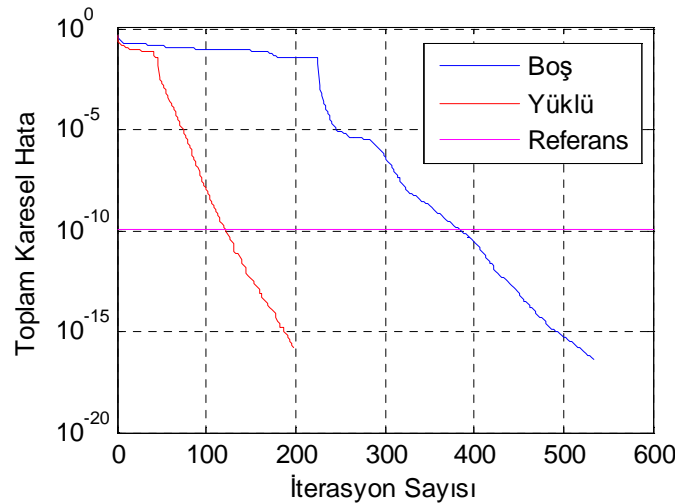
Şekil 5. 11. Rulman arızası Ani akım-hız RTFA hata-iterasyon değişimi

Şekildende görüleceği üzere istenilen hataya ulaşma iterasyon sayıları aynıdır. Eğitilen RTFA' ya test verisi uygulanınca şu sonuçlara ulaşılmıştır; Boş çalışmada

RTFA; sağlam durumu %95.4, dış bilezik arızasını %93, iç bilezik arızasını %98.8, kafes arızasını %72.6 ve bilya arızasını da %86.2 ile teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır. Yüklü çalışmada ise RTFA; sağlam durumu %87, dış bilezik arızasını %95.2, iç bilezik arızasını %75.6, kafes arızasını %100 ve bilya arızasını da %94.4 başarı ile teşhis ederek sınıflandırmıştır. Ağın tüm hatalardaki ortalama performansına bakıldığında ise boş çalışmada %89.2 ve yüklü çalışmada %90.4' dür.

### 5.2.3.b. Ani akım-hız ÇKİBA kullanarak rulman arızasının teşhisi

Ani akım ve hızın izlenmesi sonucu elde edilen 25x640 boyutundaki eğitim verisi oluşturulan ÇKİBA' ya uygulanmıştır. Oluşturulan ağda giriş katmanında 640 düğüm, saklı katmanda 10 düğüm ve çıkış katmanında ise 5 düğüm noktası bulunmaktadır. Diğer verilerle arıza teşhisinde olduğu gibi bu teşhisde de oluşturulan ağ yapısında eğitim fonksiyonu olarak "TRAINLM", adaptasyon öğrenme fonksiyonu olarak "LEARNGDM", aktivasyon fonksiyonu olarak "TANSIG" kullanılmıştır. Eğitilen ağın toplam karesel hata ile iterasyon sayısı değişimi Şekil 5.12' de verilmiştir. Ağ boş çalışma verileri ile eğitildiğinde istenilen referans hata değerine 386 iterasyonda ulaşırken, yüklü çalışmada bu değer 111' dir.



Şekil 5. 12. Rulman arızası Ani akım-hız ÇKİBA hata-iterasyon değişimi

Eğitim sonucu elde edilen hata değeri  $1e^{-10}$  değerine ulaşmıştır. Bu durumda elde edilen sonuçlar ise; boş çalışmada sağlam durumu %100, dış bilezik arızasını %100, iç bilezik arızasını %100, kafes arızasını %81.6 ve bilya arızasını da %20 ile teşhis etmiştir. ÇKİBA bilya arızasını kafes arızasından ayırt edememiştir.

Yüklü çalışmada ise sağlam durumu %100, dış bilezik arızasını %99.6, iç bilezik arızasını %100, kafes arızasını %79.8 ve bilya arızasını da %100 ile teşhis etmiştir. Ani Akım-hız yöntemi ile yapılan teşhis çalışmasında elde edilen sonuçlar her iki ağ yapısı için de karşılaştırmalı olarak Tablo 5.16' da görülmektedir.

Tablo 5. 16. Rulman arızası için Ani akım-hız YSA karşılaştırması

Arıza Tipi	Teşhis doğruluğu (%)			
	Boş		Yüklü	
	RTFA	ÇKİBA	RTFA	ÇKİBA
<b>Sağlam</b>	95.4	100	87	100
<b>Dış Bilezik Arızası</b>	93	100	95.2	99.6
<b>İç Bilezik Arızası</b>	98.8	100	75.6	100
<b>Kafes Arızası</b>	72.6	81.6	100	79.8
<b>Bilya Arızası</b>	86.2	20	94.4	100

Tablo 5.16 incelendiğinde yüklü çalışmada ÇKİBA ile yapılan teşhisin %95.8' lik bir ortalama performansla teşhis ve sınıflandırma yaptığı görülmüştür. Bu oran RTFA için de %90.4' dür.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında SMSM’ de eksenden kaçıklık ve rulman arızasının tespiti ve teşhisi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tespit çalışmasında HFD, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Teşhis çalışmasında ise RTFA ve ÇKİBA olmak üzere iki farklı YSA yapısı kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

### 6.1. HFD Yöntemi Sonuçları

Eksenden kaçıklık arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Bu yöntemde eksenden kaçıklık arızası için motor akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri 150d/d (10 Hz), 450d/d (30 Hz), 750d/d (50 Hz) hızda ve %0, %25, %50, %75 ve %100 yük altında izlenmiştir.
- İzlenen sinyallerin HFD sonucu elde edilen spektrumları incelendiğinde eksenden kaçıklık arızasının izlenen sinyallerin spektrum grafiklerinde besleme frekansının sağında ve solunda yanbandlar oluşturduğu görülmüştür.
- Oluşan bu yanband harmoniklerinin yeri Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.
- Oluşan yanband harmoniklerinin hıza bağımlı olarak incelemesi yapıldığında 150 d/d (10 Hz) çalışma hızında akım ve gerilim spektrumlarında arızaya ait çok belirgin ipuçlarına rastlanmamıştır. Ancak tüm çalışma hızlarında olduğu gibi bu hızda da “ $f_s-2f_r$ ” ve “ $f_s+2f_r$ ” frekanslarında sağlam çalışma durumundaki genlik değerleri arızalı durumdan büyük çıkmıştır. Tork ve hız spektrumlarında ise “ $f_s-3f_r$ ” frekasında belirgin genlik değişimi gözlemlenmiştir.
- 450 d/d (30 Hz) hızda eksenden kaçıklık için incelenen spektrumlara bakıldığında 150 d/d (10 Hz) hızındaki bulgulardan farklı olarak temel frekansın sağında “ $f_s+f_r$ ” ve solunda “ $f_s-f_r$ ” frekanslarında arızalı duruma ait yanband harmoniklerine ulaşılmıştır.

- Eksenden kaçıklık arızasıyla ilgili spektrum değerlerinde en büyük genlik artışlarına 750 d/d (50 Hz) hızında ulaşılmıştır. Diğer çalışma hızlarındaki tüm bulgular daha büyük genlikli olarak görülmüştür.
- Eksenden kaçıklık arızası izlenen sinyaller ve yük durumu cinsinden değerlendirildiğinde; akım ve gerilim sinyalleri birbirine benzer özellikler gösterirken akım sinyalinin izlenmesi arıza hakkında daha net sonuçlar vermiştir. Hız ve tork sinyalleri de benzer sonuçlar vermiştir. SMSM' de tork akıma bağlı olarak üretildiğinden tork sinyali hız sinyaline göre daha belirgin bulgular sunmaktadır. Yük açısından baktığımız da ise tüm çalışma hızlarında arıza bulgularına ulaşılmış ancak en yüksek genlik değişimine tam yükte ki çalışmada rastlanmıştır.
- Sonuç olarak eksenden kaçıklık arızasının tespitinde motor akımının tam yükte izlenmesi, akımın HFD dönüşümü başarılı şekilde kullanılmakta ve arıza hakkında kesin bilgi vermektedir.
- HFD verileri ile yapılan eksenden kaçıklık arızasının teşhisinde ise; RTFA sağlam durumu akımla %97.7, gerilimle %85.6, hızla %90.1 ve torkla %87.9 oranlarında başarı ortalamasıyla teşhis ederken bu oranlar arızalı durum için sırasıyla %96.3, %99.2, %97.5 ve %98.9' da gerçekleşmiştir.
- ÇKİBA ise sağlam durumu akımla %92.8, gerilimle %99.8, hızla %98.2 ve torkla %98.9 başarı ortalamasıyla teşhis etmiştir. Arızalı durum için bu değerler sırasıyla %99.9, %97.9, %95.1 ve %99.5 oranında gerçekleşmiştir.
- Bu değerlere göre ÇKİBA HFD verileri ile oldukça başarılı bir hata teşhisi gerçekleştirmiştir.

Rulman arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Rulmanlarda herhangi bir arıza oluşması durumunda motorda titreşim meydana gelir. Arızanın yerine bağlı olarak bu titreşimler motor akım, gerilim, hız ve tork spektrumlarında yeri Eşitlik 1.2-1.5 ile hesaplanan bazı karakteristik harmonikler oluştururlar.
- Bu karakteristik harmonikler incelendiğinde rulman arızalarına ait bulguların 750 d/d (50 Hz) hızda, boş çalışma spektrumlarında düşük genlikli olarak ortaya çıktığı görülmüştür. Yüklü çalışmada bu arıza frekanslarına rastlanmamıştır.

- Dış bilezik arızası için akım spektrumunda karakteristik genlik değişimleri küçük olmasına karşın rulman yüzeyinde meydana gelen bozulma akım spektrumunda eksenden kaçıklık pikleri oluşturmuştur. Bu ise ayırt edici bir durumdur. İç bilezik arızası içinse  $m=-3$  için genlik değeri  $-73$  dB'den  $-66$  dB 'ye,  $m=3$  için  $-76$  dB'den  $-66$  dB'ye yükselmiştir. Kafes arızasına ait grafiklerde ise  $m=\pm 1$  değerlerinde  $-62$  dB' den  $-40$  dB'ye bir yükselme dikkat çekmektedir. Bilya arızasında ise  $m=\pm 1$  değerlerinde  $-47$  dB' den  $-41$  dB'ye bir yükselme görülürken,  $m=\pm 3$  değerinde bu artış  $5$  dB civarındadır. Gerilim spektrumunda ise; iç bilezik arızasında  $m=-1$  için  $-55$  dB' den  $-50$  dB'ye,  $m=1$  için  $-53$  dB' den  $-40$  dB'ye artış olmuştur. Kafes arızasında ise bu değişim sırasıyla  $m=-1$  için  $-39$  dB' den  $-27$  dB'ye,  $m=1$  için  $-38$  dB' den  $-28$  dB' ye artış şeklindedir. Hız spektrumunda ise; bilya ve kafes arızası için bazı genlik değişimleri görülsede bunların değeri yaklaşık  $5$  dB civarındadır. Tork spektrumunda ise sadece  $m=2$  için iç bilezik arızasının harmoniği görülmüştür ve genlik değişimi  $-79$  dB' den  $-56$  dB'ye artış göstermiştir.
- Rulman arızasının HFD verileri ile yapılan teşhis çalışmasında RTFA akımla %74, gerilimle %76, hızla %86 ve torkla da %97 ortalama performans göstermiştir.
- ÇKİBA ise; akım verileri kullandığında %98, gerilim verileri ile %94, hız verileri ile %93,6 ve tork verileri ile de %91.8 ortalama ile arızaları teşhis etmiş ve sınıflandırmıştır.
- Rulman arızasının teşhisinde de ÇKİBA' nın akım HFD verileri ile birlikte kullanılması çok başarılı sonuç vermiştir.

Sonuç olarak HFD yöntemi için su kanaate varılmıştır:

- Yöntem asenkron motorlarda değişik arıza tipleri için yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.
- Yöntemin kullanımı kolay ve maliyeti ucuzdur.
- Eksenden kaçıklık arızasının tespitinde oldukça başarılıdır. Ancak SMSM gibi değişik hızlarda çalışan motorlarda arızanın yerinin belirlenmesi için tekrar hesaplama yapılması gerektiğinden kullanımı zahmetlidir.
- Rulman arızasına ait çok belirgin bulgulara rastlanamamıştır. Sadece boş çalışma spektrumunda düşük genlikli olarak rastlansa da yüklü çalışma spektrumlarında o da görülememiştir. Eksenden kaçıklık arızasında olduğu gibi rulman arızasında da

hız değiştiğinde arıza frekans değerlerinin yerlerinin tekrar hesaplanması gerekmektedir.

- Bu yöntem saf sinüsoidal kaynaktan beslenen motorlarda daha başarılı sonuçlar verebilir ancak SMSM gibi inverterle sürülen motorlarda motora uygulanan sinyalin saf sinüsoidal olmaması sebebiyle spektrumlara ilave harmonikler girmektedir. Bu harmoniklerin rulman arıza harmonikleri ile çakıştığında arızanın tespiti oldukça zordur.
- Tespit çalışmasında HFD ile elde edilen veriler kısıtlı olsa da YSA' nın bu tür karmaşık problemleri çözmekteki başarısından dolayı arızaların sınıflandırılmasında yüksek yüzdeli sonuçlar elde edilmiştir.

## 6.2. Alfa-Beta Yöntemi Sonuçları

Eksenden kaçıklık arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Motor üç değişik hızda ve beş değişik yükte çalıştırılarak 8 kHz örnekleme hızında kaydedilen faz akımlarına Alfa-Beta dönüşümü uygulanmıştır.
- Dönüşüm sonucu geometrik olarak çembere yakın çıkması gereken şekiller kutuplardan basılmış gibi eliptik yapıya kaymıştır.
- Üç çalışma hızında da sağlam durumdan sapmalar çok net görülmektedir. Özellikle boş çalışmada sapmalar daha nettir. Ancak 750 d/d hızda arızaya ait daha fazla bilgi mevcuttur.
- Alfa-Beta dönüşümü sonuçları ile yapılan teşhis çalışmasında RTFA sağlam durumu %98.8, arızalı durumu %97 ortalama ile teşhis ederken ÇKİBA sağlam durumu %92.4, arızalı durumu %98.1 ortalama ile teşhis etmiştir.
- Teşhis sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır ancak ÇKİBA' nın eğitim süresine göre RTFA çok daha kısa sürede eğitildiği için ÇKİBA arızalı durumu %1.1 daha iyi teşhis etse de bu yöntemde RTFA seçilmesi daha faydalı olacaktır.

Rulman arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Bu yöntem rulman arızasında başarılı sonuçlar vermiştir.
- Elde edilen şekiller incelendiğinde arızalı durumun sağlam durumdan ve birbirlerinden ayırt edilebildiği görülmüştür.



- Bu fark düşük hızlarda da yüksek hızda da belirgin olarak görülmüştür. Ancak 750 d/d hızda ve boş çalışma grafiklerinde gözle dahi ayırt edilebilmektedir.
- Ancak grafiklerin sağlam ve arızalı durumlarda çoğu noktada çakışık çıkması normaldir. Çünkü rulman arızası, stator sargı arızaları gibi direkt değil motor akımını dolaylı yoldan etkilemektedir. Doğal olarak arızanın akımda küçük etkiler yapması şekillerde de küçük değişimler yapmıştır.
- Teşhis çalışmasında ; boş ve yüklü çalışma sonuçları değerlendirdiğinde boş çalışmada RTFA %87' lik performans ortalaması sergilerken, yüklü çalışmada ise bu oran %90' dır.
- ÇKİBA ise boş çalışma verileri ile %79.4 ve yüklü çalışma verileri ile de %99.5 ortalama ile arızalı durumu sınıflandırmıştır.

Sonuç olarak Alfa-Beta dönüşüm yöntemi için şunlar söylenebilir:

- Yöntem asenkron motorlarda rulman ve özellikle sargı yalıtım arızalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
- Yöntemin kullanılabilmesi için motorun 3 faz akımı izlenmeli veya 2 faz akımı izlenerek üçüncü faz akımı hesaplanmalıdır. Bu ise asenkron motorlarda ilave sensör gerektirmesi ve yüksek hızda veri toplanacağı için ekstra donanım ve maliyet getirmektedir. Ancak deneysel çalışmada kullanılan SMSM gibi motorlar için bu dezavantaj olmaktan çıkmıştır. Çünkü bu motorlar sayısal işlemci tabanlı özel sürücüler tarafından kontrol edildiğinden bu sürücülerin motor akımlarını izleyen sensörleri ve yüksek hızlı işlemcileri mevcut olduğundan ekstra bir donanım ve maliyet gerektirmez.
- Yöntemin kullanılması için hız bilgisi gerekli değildir. Hıza göre arızanın yerinin tekrar hesaplanmasına gerek yoktur.
- Sağlam durum arızalı durumdan hem rulman hem de eksenden kaçıklık arızası için rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.
- Eksenden kaçıklık arızasının teşhisinde iki farklı ağ yaklaşık %98 başarı ile teşhis yapmıştır.
- Elde edilen Alfa-Beta yüklü çalışma verilerinin ÇKİBA ile kullanılması rulman arızalarını sınıflandırma açısından değişik oranlar verse de rulmanın sağlam veya arızalı olması hakkında %100' e yakın bir sonuç vermiştir.

### 6.3. Ani akım-Hızın İzlenmesi Yöntemi Sonuçları

Eksenden kaçıklık arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Bu yöntemde de motor üç faz akımı ve ilave olarak motor hızı 8 kHz örnekleme hızıyla kayıt altına alınmıştır.
- Deneysel çalışmada rms değerleri aynı tutulan sağlam ve arızalı durumlar için motor akımlarının birbirinden belirli bölgelerde ayrıldığı görülmüştür. Bu farklılık motor hızında daha belirgindir.
- Yüklü çalışma içinde verilen grafiklerde akımlar aynı gibi görülsede verilen grafiklerin bir faz akımının bir petyotluk değişimi verildiği unutulmamalıdır. İzlenen tüm sinyallere bakıldığında akımda da farklılıklar görülmektedir.
- Bu yöntem eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılabilir.
- Ani akım-hızın izlenmesi tespit sonuçlarına göre RTFA sağlam durumu %98.9, arızalı durumu %96.6 ortalama ile teşhis ederken bu oranlar ÇKİBA için sırasıyla %99 ve %97' dir.

Rulman arızası için ulaşılan sonuçlar:

- Yöntem rulmanda meydana gelen arızaların ayırt edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
- Boş ve yüklü çalışmada akım özellikle hız arızalı durumda sağlam durumdan ayrılmaktadır. Bu ayrılma tüm hızlarda boş ve yüklü çalışmada görülmüştür.
- Rulman arızası için yapılan teşhis çalışmasında da RTFA boş çalışma verileri ile %89.2 doğrulukla yüklü çalışma verileri ile de %90.4 ortalama başarı ile teşhis yapmıştır. ÇKİBA için bu değerler sırasıyla %80.3 ve %95.8' dir.

Ani akım-Hızın izlenmesi yöntemi içinse şunlar söylenebilir.

- Yöntem Alfa-Beta dönüşümüne ilaveten hız bilgisine de gerek duymaktadır. Bu diğer motorlar için dezavantaj olsada SMSM için avantajdır. Çünkü bu motorlar rotor konumuna göre sürülmektedir. Yani bu motorların sürücülerinde hız ve konum bilgilerini veren donanım zaten mevcuttur.
- HFD ve Alfa-Beta yönteminde olduğu gibi herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duymaz.

- Eksenden kaçıklık için yapılan teşhis çalışmalarında kullanılan iki farklı ağ yapısında oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca tespit yöntemleri ile teşhis yöntemlerinin de birbirleri ile performansı incelenerek değişik alternatifler oluşturulmuştur. Teşhis çalışmasında elde edilen sonuçların % olarak yüksek çıkmasının bir diğer sebebi de eksenden kaçıklık arızasının izlenen sinyallerde kendisini çok net ortaya koymasından kaynaklanmaktadır.
- Rulman arızasının teşhis çalışmasında ise RTFA' nın ortalamada ÇKİBA' ya göre %89.8 ortalama ile daha başarılı olduğu görülmüştür.

Kullanılan tespit ve teşhis yöntemleri kendi arasında kıyaslandığında şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- HFD, Alfa-Beta ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemlerinin tamamı motor akım bilgisini kullanmaktadır. HFD yönteminin kullanılabilmesi için bir faz akımının bilinmesi yeterlidir. Diğer iki yöntemde ise 3 faz akımın bilinmesi gereklidir. Bu haliyle HFD yönteminin maliyeti daha ucuzdur.
- Harmonik analiziyle arızaların tespiti yapıldığında arızalara ait karakteristik yanbandların hangi frekansta çıkacağı hesaplanmalıdır. Bu ise SMSM gibi değişik hızlarda çalışan motorlar için bir dezavantajdır. Çünkü frekans spektrumunda çalışma frekansına göre arızalara ait yanbandların yeri de değişir. Alfa- Beta ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemlerinde ise böyle bir hesaplama gereklidir.
- Alfa-Beta ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri sırasıyla motor üç faz akım ve üç faz akım-hız bilgilerini kullanarak tespit çalışması yapmaktadır. Arıza tespitinde motorla ilgili ne kadar çok değişken izlenirse arıza hakkında daha net sonuçlara ulaşılabilir. Bu iki yöntem HFD yönteminden bir adım öne çıkmaktadır.
- Teşhis çalışmasında RTFA ve ÇKİBA olmak üzere 2 farklı YSA yapısı kullanılmıştır. Geleneksel yöntemlerde arızaya ait bulguların yorumlanabilmesi için uzman kişiye ihtiyaç vardır. Bu ise kişiye bağımlı olunması sebebiyle zaman kaybını artırmaktadır. YSA ise insanlara özgü öğrenme ve yorum yapabilme özelliklerini insanlardan daha hızlı yerine getirebildiğinden bu tür problemlerin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.
- Kullanılan YSA yapılarına tespit yöntemleri ile elde edilen öznitelik vektörleri öğretilmiş ve değişik arıza durumlarına ait bilgiler YSA yapısında test edilerek YSA' nın teşhis doğruluğu ölçülmüştür. Her iki ağ yapısı oldukça başarılı

sonuçlar vermiştir. KİBA RTFA' ya göre daha yüksek teşhis yüzdesi ile başarı gösterirken RTFA ise daha kısa öğrenme ve teşhis süresi ile KİBA' ya göre başarılı olmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında temel olarak yapılan katkılar özetlenirse:

- Eksenden kaçıklık ve rulman arızaları diğerk motorlar için çalışılmasına karşın SMSM için çok fazla çalışmaya rastlanmamıştır. Sadece SMSM' de eksenden kaçıklık arızasının motor akımının HFD yöntemiyle tespiti yapılmıştır. Yapılan tez çalışmasında ise motor akım, gerilim, hız ve elektromanyetik sinyallerinin değişik çalışma hızlarında ve yüklerinde harmonik analizi yapılarak eksenden kaçıklık ve rulman arızası incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde eksenden kaçıklık arızasının spektrum grafiklerinde rotor frekansının katları şeklinde, rulman arızasının ise spektrum grafiklerinde Eşitlik 1.2-1.5' le hesaplanan frekanslarda boş çalışmada grldğu tespit edilmiştir. Yapılan tez çalışması bu yönüyle SMSM için mekaniksel arızaların değişik sinyaller izlenerek harmonik analiziyle tespitine yönelik ilk çalışmadır.
- Diğerk tespit yöntemi ise Alfa-Beta dönüşüm yöntemidir. Bu yöntemde ise motor üç faz akımı izlenmiş ve üç faz sabit eksenden iki faz sabit eksene Eşitlik 3.11 kullanılarak taşınmıştır. Elde edilen desenler sağlam, eksenden kaçıklık ve rulman arızası için birbirinden belirli bölgelerde ayrılmaktadır. Bu ise arızaların tespitine ve sınıflandırılmasına imkân vermektedir. Bu yöntem asenkron motorlarda sargı ve rulman arızası için kullanılmasına karşın SMSM' de eksenden kaçıklık ve rulman arızası için ilk defa bu tez çalışmasında kullanılmıştır.
- Kullanılan bir diğerk tespit yöntemi ise motor üç faz ani akımının ve hızının izlenmesi yöntemidir. Bu yöntemde motor üç faz akımına ilaveten hız bilgiside izlenmiştir. Arızalara ait bulgular hız bilgisinde de net bir şekilde görülmüştür. Bu yöntemin herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duymaması avantajdır. Her ne kadar motor üç faz akımını ve hızını izleyen algılayıcılara ihtiyaç duyması dezavantaj gibi gözükse de SMSM gibi sayısal işaret işlemci tabanlı sürücülerle kontrol edilen motorlarda bu donanım mevcuttur.
- Tez çalışmasında yapılan bir diğerk işlemde tespit yöntemleriyle açığa çıkarılan öznetelik vektörlerini kullanarak yapay zekâ yöntemleriyle hata teşhisidir. Bu yönüyle de yapılan tez alışması SMSM için bir ilk olma niteliği taşımaktadır.

Yapılan teşhis çalışması yaklaşık %90 teşhis doğruluğu ile başarılı sonuçlar vermiştir.

- Son olarak yapılan çalışma yukarıda bahsedilen özellikleri ile bilimsel katkı sağlarken elde edilen verilerin herhangi bir donanıma ihtiyaç duymadan SMSM sürücülerine yazılımsal olarak eklenmesi ile bir yandan motor kontrolü yapılırken bir yandan da motor durumu izlenerek endüstriyel katkı sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında SMSM' de eksenden kaçıklık ve rulman arızası deneysel olarak incelenmiş, üç farklı tespit ve iki farklı teşhis yöntemi kullanılmıştır. Motor arızalarının yaklaşık %50' si mekaniksel arızalardan kaynaklanmaktadır. Bu arızaların ileri boyutlara ulaşmadan tespit ve teşhis edilmesi oldukça önemlidir. Literatürde arıza tespiti ve teşhisi için birçok yöntem başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Yapılan tez çalışmasında da zaman ve frekans boyutunda sinyal analiz yöntemleri kullanılarak arıza tespiti yapılmıştır. Eksenden kaçıklık için frekans boyutunda kullanılan HFD yöntemi çok net sonuçlar verirken rulman arızasında çok başarılı değildir. Bu aşamada Dalgacık Dönüşümü gibi zaman- frekans bilgisi içeren yöntemlerin rulman arızasının tespitinde kullanılması daha başarılı sonuçlar verebilir.

Ayrıca SMSM gibi inverterle sürülen motorlarda motor uçlarına uygulanan gerilimin ve motor akımının saf sinüsoidal yapıda olmaması, frekans spektrumuna ilave harmonikler eklemekte bu ise arıza tespitini zorlaştırmaktadır. Rulman arızası gibi arızaların tespitinde akım, gerilim, hız ve tork sinyallerine ek olarak titreşimin izlenmesi daha faydalı olacaktır.

SMSM' de akı sabit mıknatıslar tarafından üretildiğinden rotorda bulunan sabit mıknatıslarda bir bozulma olduğunda akı ve dolayısıyla da motor akımı ve elektromagnetik tork etkilenecektir. Literatürde bu yönde fazla bir çalışma yoktur. Araştırmacıların bu yönde yoğunlaşması mıknatıs arızasının elektriksel ve mekaniksel parametreler üzerine etkisinin ortaya konulması faydalı olacaktır.

## **KAYNAKLAR**

ABD ALLA, A.N., Three Phase Induction Motor Faults Detection by Using Radial Basis Function, Journal of Applied Sciences, 6, 13, 2817-2820, 2006.

ADAM, A., Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve gürültünün Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 13, Ankara, 2007.

AFSHARI, N., LOPARO, K.A., A Model Based Technique for the Fault Detection of Rolling Element Bearings Using Filter Design and Sliding Mode Techniques, Proceedings of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision & Control, 2593-2596, 1998.

AKAR, M., Bulanık Mantık Yöntemiyle Bir Servo Motorun Kontrolü ve Geleneksel Yöntemlerle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, 11, İstanbul, 2005.

AKAR, M., ÇANKAYA, İ., Dc Servo Motor İçin Labview Tabanlı Gerçek Zamanlı Pid Kontrolör Tasarımı, İATS'09, Ulusal Teknik Eğitim Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu UMES'07, 176-179, Kocaeli, 2007.

AKAR, M., ÇANKAYA, İ., Evirici ile Sürülen Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Tespiti, İATS'09, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 2009.

AKAR, M., ÇANKAYA, İ., Diagnosis of Static Eccentricity Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor by On-Line Monitoring of Motor Current and Voltage, İstanbul University-Journal of Electrical and Electronics Engineering (IU-JEEE), 9, 2, 959-967, 2009.

AKTÜRK, N., UNEEB, M. Application of Vibration Monitoring to Rotating Machinery, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 3, 419-33, 1997.

ALFREDSON, R. J.:a, AUST, M. I. E., MATHEW, J., Time Domain Methods for Monitoring the Condition of Rolling Element Bearings, *Mechanical Engineering Transaction in Australia*, 10, 2, 102-107, 1985.

ALFREDSON, R. J.:B, AUST, M. I. E., MATHEW, J., Frequency Domain Methods for Monitoring the Condition of Rolling Element Bearings, *Mechanical Engineering Transactions in Australia*, 10, 2, 108-112, 1985.

ALGER, P.L., *Induction Machines*, Gordon and Breach, Science Publishers, 75-90, 1970, New York.

AL KAZAZ, SA'AD A. S., SINGH, G. K., Experimental Investigations on Induction Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using Digital Signal Processing Techniques, *Electric Power Systems Research*, 65, 197-221, 2003.

AL-NAJJAR, B., Accuracy, Effectiveness and Improvement of Vibration-Based Maintenance in Paper Mills: Case Studies, *Journal Sound and Vibration*, 229, 2, 389-410, 2000.

ALTINBAŞ, A., EMG Sinyallerinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümü Kullanarak Analiz Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2007.

ARABACI, H., BİLGİN, O., CEYLAN, M., CEYLAN, R., Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhisi, *ELECO'2004 Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 2004.

ARFAT, S., YADAVA, G., BHIM, S., A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20, 1, 106-114, 2005.

ARKAN, M., PEROVIC, D. K., UNSWORTH, P., Online Stator Fault Diagnosis in Induction Motors, *IEE Proceedings—Electric Power Applications*, 148, 6, 537-547, 2001.

ARSLAN, H., ASLAN, E., AKTÜRK, N., Bilyalı Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi Yöntemiyle İncelenmesi, Gazi University, Journal of Engineering and Architecture, 21, 3, 541-552, 2006.

AYAZ, E., ŞEKER, S., Elektrik Motorlarında Rulman Arızasının Gelişimi Üzerine İşaret Tabanlı İstatistiksel bir İnceleme, 3E Electrotech, 91, 46-49, 2001.

BAL, G, ÖZGENEL, M.C., DEMİRBAŞ, S., Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genisliği Modülasyonu ile Performans Analizi, Politeknik Dergisi, 10, 1, 07-13, 2007.

BAYINDIR, R., SEFA, İ., ÇOLAK, İ. AND BEKTAŞ A., Fault Detection and Protection of Induction Motors Using Sensors, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23, 3, 734-741, 2008.

BOWERS, S.V., PIETY, K.R., Proactive Motor Monitoring Through Temperature Shaft Current and Magnetic Flux Measurements, CSI 1993 Users Conference, September 20-24, 2-3, 1993.

BOZKURT, M.R., EMG İşaretlerinin Modern Yöntemlerle Önişlenmesi ve Sınıflandırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 59-60, Sakarya, 2007.

BRAUN, S., DATNER, B., Analysis of Roller/Ball Bearing Vibrations, Journal of Mechanical Design, 101, 119-125, 1979.

BURNETT, R.:a, WATSON, J.F., ELDER, S., The Application of Modern Signal Processing Techniques to Rotor Fault Detection and Location within Three Phase Induction Motors, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 426-431, 1995.

BURNETT, R.:B, WATSON, J.F., The Current Analysis Program - A Software Tool for Rotor Fault Detection in Three Phase Induction Motors, Electrical Machines and Drives, 11-13 September, Conference Publication, 412, 156-160, 1995.

CAMERON, J.R., THOMSON, W.T., DOW, A.B., Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors, IEE Proceedings, 133, B, 3, 155-163, 1986.



CARDOSO, A.J.M., SARAIVA, E.S., Computer-Aided Detection of Air-gap Eccentricity in Operating Three-phase Induction Motors by Park's Vector Approach, IEEE Transactions on Industry Applications, 29, 5, 897-901, 1993.

CENA, K. M., HOBBS, R. A., The Effect of Ball Quality, Radial Clearance and Grease Specification on the Noise and Vibration of an Electric Motor, Tribology Conv. I.Mech.E, London, 93-102, 1972.

CREVIER, D., The Tumultuous Search for Artificial Intelligence, NY: BasicBooks, 85, New York, 1993.

ÇALIŞ, H., ÇAKIR, A., Rotor Bar Fault Diagnosis in Three Phase Induction Motors by Monitoring Fluctuations of Motor Current Zero Crossing Instants, Electric Power System Research, 77 , 5-6, 385-392, 2006.

ÇANKAYA, İ., VATANSEVER, F., Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6, 3, 14-24, 2002.

ÇOLAK, İ., Senkron Makinalar, Seçkin Yayınevi, 17-18, Ankara, 2003.

DEMİRBAŞ, Ş., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 12-18, Ankara, 2001.

DOĞAN, E., IŞIK, S., Sapanca Gölü Günlük Buharlaştırma Miktarının Radyal Temelli Yapay Sinir Ağı Modeli Kullanarak Tahmin Edilmesi, Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu BMYS'2005, 807-814, 2005.

DORRELL, D. G., 1993, Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Machines, Ph.D. Dissertation, University of Cambridge , 20 , U.K, 1993.

DOWLING, M.J., Application of Nonstationary Analysis to Machinery Monitoring, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1, 59-62, 1993.

ELKASABGY, N. M., EASTHAM, A. R., DAWSON, G. E., Detection of Broken Bars in The Cage Rotor on an Induction Machine, IEEE Trans. Ind. Appl., 22, 6, 165-171, 1992.

ELMAS, Ç., Yapay Sinir Ağları Kuram, Mimari, Uygulama, Seçkin Yayıncılık, 27-28, Ankara, 2003.

ERDEM, O.A., UZUN, E., Yapay Sinir Ağları İle Türkçe Times New Roman, Arial ve El yazı Karakterleri Tanıma, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., 20, 1, 13-19, 2005.

ERICSSON, S., GRIP, N., JOHANSSON, E., PERSSON, L.E., SJOBERG, R., STROMBERG J., Towards Automatic Detection of Local Bearing Defects in Rotating Machines, Mech Syst. and Sign. Process., 19, 3, 509-535, 2005.

ESER, S., Yapay Sinir Ağları ile Yüz Sezimi ve Takibi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 54-57, İstanbul, 2006.

FANG, S., ZIJIE, W., Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet and RBF Neural Network, Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, Zhangjiajie, Hunan, China, 2007.

FILIPPETTI, F., FRANCESCHINI, G., TASSONI, C., VAS, P., AI techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect, in Proc. IEEE Industry Applications Soc. Annu. Meeting Conf., San Diego, CA, 6-10, 655-662, 1996.

GUSTAFSSON, O. G., TALLIAN, T. E., Research Report on Study of The Vibration Characteristics of Bearings, SKF Research Report: AL63IO23, 14, 422-435, 1963.

HAJI, M., TOLİYAT, H. A., Pattern recognition - A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection, IEEE Trans. Energy Convers., 16, 4, 312-317, 2001.

HEMMINGS, R. C., SMITH, J. D., Information from Bearing Vibration, Conference on Vibration in Rotating Machinery, University of Cambridge, London, 117-121, 1976.

<http://www.siemens.com.tr/web>

[http://www.boschrexroth.com/country\\_units/europe/turkey/tr/products/](http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/turkey/tr/products/)

<http://www.easa.com/indus/stators.html>

<http://www.maxonmotor.com>

IGARASHI, T. VE HAMADA, H., Studies on The Vibration and Sound of Defective Rolling Bearings (First Report), Bulletin of JSME, 25, 204, 994-1006, 1982.

JOUANNE, A. V., ENJETI, P., GRAY, W., Applications Issues for PWMadjustable AC Motor Drives, IEEE Ind. Applicat. Mag., 2, 11–18, 1996.

KLIMAN, G. B., PREMERLANI, W. J., KOEGL, R. A., HOEWELER, D., A New Approach to Online Fault Detection in Ac Motors, in Proc. IEEE Industry Applications Soc. Annual Meeting Conf., San Diego, CA, 687-693, 1996.

KOCA, Z., Üç Fazlı Asenkron Motorların Yapay Sinir Ağları ile Vektör Esaslı Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi,27, Kahramanmaraş ,2006.

LI, B., M.Y., TIPSUWAN, Y., HUNG, J.C., Neutral-network Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.5, pp.1060-1069, Oct 2000.

LIU, X.-Q., ZHANG, H.-Y., LIU, J., YANG, J., Fault Detection and Diagnosis of Permanent-magnet DC Motor Based on Parameter Estimation and Neural network, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47, 5,1021-1030, 2000.

MCCORMICK, A. C., NANDI, A. K., Bispectral and Trispectral Features for Machine Condition Diagnosis, IEEE Proceedings of Visual Image Signal Processing, 146, 5, 229–234, 1999.

MO,Y., TIPSUWAN, Y., HUNG, J.C., Neutral-network Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47, 5, 1060-1069, 2000.

NANDI, S., TOLİYAT, H.A., LI, X., Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines-A Review, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20, 4, 719-729, 2005.

OBAID, R. R., HABETLER, T. G., Effect of Load on Detecting Mechanical Faults in Small Induction Motors, 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives–SDEMPED '03, 24-26, 307–311, 2003.

OCAK, H., LOPARO, K. A., Estimation of the Running Speed and Bearing Defect Frequencies of an Induction Motor from Vibration Data, Mech Syst. and Sign. Process., 18, 515-533, 2004.

OCAK, H., Fault Detection , Diagnosis and Prognosis of Rolling Element Bearings: Frequency Domain Methods and Hidden Markov Modelling, Doctor of Philosophy Dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University, 2-13, U.S.A., 2004.

ORHAN, S., AKTÜRK,, N., ÇELİK, V., Vibration Monitoring for Defect Diagnosis of Rolling Element Bearings as a Predictive Maintenance Tool: Comprehensive Case Studies, NDT & E International, 39, 4, 293-298, 2006.

ÖNEL, İ., Üç Fazlı Asenkron Motorlarda Rulman Arızalarını Tespit Etmek Üzere X-Y Dönüşümü ve RTFA Yapay Sinir Ağı Algoritması İçeren Yeni Bir Yöntemin Tasarlanması ve Uygulanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, 45, İstanbul, 2006.

ÖNEL, İ.Y., BENBOUZID, M.E.H., Induction Motors Bearing Failures Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study, Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07, IEEE International, 2, 1073-1078, 2007.

ÖNEL, İ., AYCİCEK, E., ŞENOL., İ., An Experimental Study About Detection of Bearing Defects in Inverter Fed Small Induction Motors by Concordia Transform, Journal of Intelligent Manufacturing, 20, 2, 243-247, 2009.

ÖZTEMEL, E., Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, 36, İstanbul, 2003.

PENMAN, J., DEY, M. N., TAIT, A. J., BRYAN, W. E., Condition Monitoring of Electrical Drives, Proc. Inst. Elect. Eng. B, 133, 3, 142-148, 1986.

PENMAN, J., SEDDING, H. G., LLOYD, B. A., FINK, W. T., Detection and Location of Interturn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 9, 4, 652–658, 1994.

SAĞIROĞLU, Ş., Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları, *Ufuk Kitabevi*, 32, Kayseri, 2003.

SAYED TAG EL DIN, E., ABDEL AZIZ, M.M., IBRAHIM, D.K., GILANY, M., Fault Location Scheme for Combined Overhead Line with Underground Power Cable, *Electric Power Systems Research*, 76, 11, 928-935.

SCHOEN, R. R., HABETLER, T. G., Effects of Time-varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines, *Twentythird Annual IEEE IAS Conference*, 324-330, 1993.

SINGAL, R. K., WILLIAMS, K., VERMA, S. P., Vibration Behavior of Stators of Electrical Machines, PartII: Experimental study, *J. Sound Vib.*, 115, 13–23, 1987.

SOUSA MARTINS, L., MARTINS, J.F., FERNAO PIRES, V., ALEGRIA, C.M., The Application of Neural Networks and Clarke-Concordia Transformation in Fault Location on Distribution Power systems, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, 3, 2091-2095, Portugal, 2002.

SUBRAHMANYAM, M., SUJATHA, C., Using Neural Networks for the Diagnosis of Localized Defects in Ball Bearings, *Tribology International*, 30, 10, 739-752, 1997.

ŞEKER S., AYAZ E., A Reliability Model for Induction Motor Ball Bearing Degradation, *Electric Power Components & Systems*, 31, 7, 639-652, 2003.

TANDON, N., CHOUDHURY, A., A Review of Vibration and Acoustics Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings, *Tribology International*, 32, 469-480, 1999.

THOMSON, W. T., STEWART, I. D., On-line Current Monitoring for Fault Diagnosis in Inverter Fed Induction Motors, in *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 3rd Int. Conf. Power Electronics Drives, London, U.K., 432-435, 1988.

ÜSTÜN, O., Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motor Hızının Bulanık Sinirsel ve Kayma Kipli Denetleyicilerle Dönüştürümlü Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 9-26, Ankara, 2004.

VAS, P., Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford, 3-20, U.K.: Clarendon, 1993.

WALFORD, T. L. H., STONE, B. J., The Measurement of the Radial Stiffness of Rolling Element Bearings under Oscillating Conditions, Journal Mechanical Engineering Science IMechE., 22, 4, 175-181, 1980.

WILLIAMS, T., RIBADENEIRA, X., BILLINGTON S. VE KURFESS, T., Rolling Element Bearing Diagnostics in Run-to-Failure Lifetime Testing, Mechanical System and Signal Processing, 15, 5, 979-993, 2001.

WIEHAN, R., HARLEY, G., HABETLER, G., Detecting Rotor Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines, Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Atlanta, 198-194, 2003.

XIANGHUI, H., HABETLER, T.G., HARLEY, R.G., Detection of Rotor Eccentricity Faults in a Closed-Loop Drive-Connected Induction Motor Using an Artificial Neural Network, IEEE Transactions on Power Electronics, 22, 4, 1552-1559, 2007.

YAZICI, G., Genetik algoritmalar ile Radyal Temelli Fonksiyon Ağlarının optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 21-25, İstanbul, 2006.

YEH, C., A. SAYED-AHMED, R. POVINELLI, A Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Inter-Turn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines, 1413-1419, IEMDC'07.

ZHANG, Y. LI C., KURFESS, T. R., DANYLUK, S. VE LIANG S. Y., Diagnostics and Prognostics of a Single Surface Defect on Roller Bearings, Proc. Instn Mech. Engrs., 214-C, 1173-1185, 2000.

## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Tokat' ta doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Tokat' ta tamamladıktan sonra 1998 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünü kazandı. 17.06.2002 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni ünvanı olarak mezun oldu. Bir yıl özel bir şirkette çalıştıktan sonra 2003-2005 yılları arasında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi anabilim dalında doktora eğitimine başladı ve halen doktora çalışmalarını sürdürmektedir.

# **MECHANICAL FAULT DIAGNOSIS IN THE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES**

**Mehmet AKAR**

## **SUMMARY**

**Key Words:** Permanent magnet synchronous motor, fault diagnosis, artificial intelligence

Electric motors are one of the main power machines used in industry. Electric motor faults decrease production capacity while increasing cost. Therefore, monitoring electric motors and estimated maintenance on the subjects on which researchers focus on in recent times. Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), one of the motors used in textile, glass and military industries in addition to robotic applications, should be continuously monitored.

According to the studies, approximately 50% of the faults of electric motors are caused by mechanical faults (bearing faults, eccentricity, and mechanical rotor fault). The signals of current, vibrations, etc. are monitored to detect mechanical faults. Then, time, frequency, time-frequency domains are analyzed to decide the type of those faults. Attribute vectors obtained after determination step are used with artificial intelligence to prognosis and classify the faults. There are several studies on asynchronous motors. There are the fault determination based on Fast Fourier Transform; however, any study related to fault determination based on Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring has not been seen for PMSM in the literature. The fault determination based on artificial intelligence methods has been done in this study for the first time. This dissertation thesis is the first study in this area.

In this thesis, the eccentricity and bearing fault in PMSM were studied experimentally. The current, voltage, speed and electromagnetic torque signals were monitored under five different loads and three different speed values. The attribute vectors were obtained by using Fast Fourier Transform, Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring. These attribute vectors were used in training Radial Basis Function and Multi Layer Feed forward Neural Network and then the faults were detected by these neural network models.

As a result, pattern recognition methods were 90% successful in monitoring and detecting eccentricity and bearing faults. There different determination methods (Fast Fourier Transform, Clarke Concordia and Instantaneous current-speed monitoring) were separately used with two different prognosis methods (Radial Basis Function



and Multi Layer Fed forward Neutral Network). In the results Fast Fourier Transform and Clarke Concordia worked well with Multi Layer Fed forward Neutral Network while Instantaneous current-speed monitoring worked well with Radial Basis Function.

# SABİT MİKNATISLI SENKRON MOTORDA YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİ İLE MEKANİK HATALARIN TEŞHİSİ

**Mehmet AKAR**

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Sabit mıknatıslı senkron motor, hata teşhisi, yapay zekâ

Elektrik motorları endüstride en sık kullanılan tahrik elemanlarının başında gelmektedir. Elektrik motorlarının arızalanmaları hem üretim kapasitesini düşürür hem de maliyetleri yükseltir. Bu yüzden elektrik motorlarının izlenmesi ve öngörülü bakım son zamanlarda üzerinde durulan en önemli konulardan biri olmuştur. Bu motorlardan birisi olan ve cam sanayinden tekstile, savunma sanayinden robot uygulamalarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahip olan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların da sürekli izlenmesi oldukça önemlidir.

Yapılan çalışmalara göre elektrik motorlarının arızalarının yaklaşık %50' si mekaniksel arızalardan (Rulman arızası, eksenden kaçıklık, mekanik rotor arızası) kaynaklanmaktadır. Mekaniksel arızaların tespitinde motorlara ait akım, titreşim gibi sinyaller izlenmekte zaman, frekans, zaman-frekans boyutunda analizler yapılarak tespitler yapılmaktadır. Tespit çalışması ile açığa çıkarılan öznelik vektörlerini kullanarak arızaların teşhis ve sınıflandırılması yapay zekâ yöntemleri ile başarılı şekilde yapılmaktadır. Asenkron motorlar üzerine bu alanda birçok çalışma mevcuttur. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar için literatürde Hızlı Fourier Dönüşümü ile arıza tespitine yönelik çalışma olmasına karşın Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleri ile yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Aynı zamanda bu motorlar için yapay zekâ yöntemleri ile arıza teşhisi ilk olarak bu çalışmada yapılmıştır. Yapılan tez çalışması bu yönleri ile bir ilk olma niteliği taşımaktadır.

Bu çalışmada, Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda eksenden kaçıklık ve rulman arızası deneysel olarak çalışılmıştır. Motora ait akım, gerilim, hız ve elektromanyetik tork sinyalleri beş farklı yük ve üç farklı hız değerinde izlenmiştir. İzlenen sinyallerin Hızlı Fourier dönüşümü, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi yöntemleriyle öznelik vektörleri oluşturulmuştur. Elde edilen öznelik vektörleri ise Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ eğitiminde kullanılarak motor durumu izlenmiş ve arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak kullanılan örüntü tanıma yöntemlerinin eksenden kaçıklık ve rulman arızalarını izlemede ve teşhis etmekte %90' lar civarında bir başarı sergilediği

sonucuna varılmıştır. Üç farklı tespit yöntemi (Hızlı Fourier dönüşümü, Alfa-Beta dönüşümü ve Ani akım-hızın izlenmesi) iki farklı teşhis yöntemiyle (Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları ve Çok Katmanlı İleri Beslemeli Ağ) birlikte kullanılmıştır. Sonuçta; Hızlı Fourier Dönüşümü ve Alfa-Beta Dönüşümü sonuçlarının Çok Katmanlı İleri Beslemeli ağ yapısıyla, Ani akım-hızın izlenmesi yöntemiyle elde edilen sonuçların da Radyal Tabanlı Ağ yapısı ile başarılı olduğu bilgisi gözlemlenmiştir.