

127194

**ELEKTRİK MOTORLARINDA DALGACIK ANALİZİ YAKLAŞIMI İLE
RULMAN ARIZA TANISI VE YAPAY ZEKA TABANLI BİR
DURUM İZLEME SİSTEMİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Emine AYAZ
Enstitü No: 504972003**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Mayıs 2002**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Serhat ŞEKER
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. A. Faik MERGEN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Bülent SANKUR (B.Ü.)
Doç.Dr. Tamer ÖLMEZ (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Osman Nuri UÇAN (İ.Ü.)

MAYIS 2002

127194

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sırasında önderliğini esirgemeyen, çok yakın ilgi ve özverili yardımlarını gördüğüm değerli hocam sayın Doç. Dr. Serhat Şeker'e, *The University of Tennessee, Nuclear Engineering Department, Knoxville, U.S.A.*'daki deneysel çalışmalara katılma olanağını verdiği bursla sağlayan İstanbul Üniversitesi, TİNÇEL Kültür Vakfı'na, gerekli izni veren İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne, 1999-2000 senesinde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bu çalışmalarımda büyük yardımlarını gördüğüm ve deneysel verilerin bu tezde kullanılmasına izin veren sayın Prof. Dr. Belle R. Upadhyaya'ya, deney düzeneğinin kurulmasını sağlayan sayın Dr. Ali S. Erbay'a, işaret analizi konusundaki yorumlarıyla önemli katkılar sağlayan sayın Erdinç Türkcan'a, genetik algoritma konusunda yardım eden sayın Y.Müh. Burak Barutçu'ya ve doktora çalışmam boyunca manevi destek gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Aralık, 2001

Emine Ayaz

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. DALGACIK DÖNÜŞÜMLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ VE ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLERDE ARIZA TANISINA YÖNELİK UYGULAMALARI	6
3. ELEKTRİK MAKİNALARINDA GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM	11
3.1 Mekanik Gürültü	11
3.1.1 Dinamik Dengesizlik	11
3.1.2 Bilyeli Rulmanlar	12
3.1.3 Eksenel Kaymalı Yataklar (Sleeve Bearings)	12
3.1.4 Fanlar	12
3.1.5 Dişliler	13
3.2 Elektriksel Gürültü ve Titreşim	13
3.2.1 Doyma	13
3.2.2 Amper Sarımların Dağılımı	14
3.2.3 Hava Aralığı	14
3.2.4 Stator Dişlerinin Sayısı ve Rotor İletkenleri	14
3.2.5 Çıkık Kutup Etkisi	14
3.2.6 Stator Kutup Sayısı	15
3.2.7 Uygulanan Gerilimin Frekansı	15
3.2.8 Armatür veya Rotor Çekirdeğinin Eğriliği	15
3.2.9 Komutasyon ve Amper-Sarım Oranları	15
3.2.10 Armatür Olukları	16
3.3 Gürültü Kontrolü	16
3.3.1 Gürültünün Kaynağında Azaltılması	16
3.3.2 Havadan İletilen Gürültü Seviyesinin Azaltılması	17
4. MOTOR ARIZA TANISINDA DURUM İZLEME VE ARIZA KİPLERİNİN TANIMLANMASI	18
4.1 Titreşim İzleme ve Arıza Kipleri	18
4.2 Akım İzleme ve Arıza Kipleri	24
4.3 Stator Ani Gücünü İzleme	26
4.4 Çarpma Rezonansı	26
4.5 Isıl Analiz	27

4.6 Magnetik Akı Analizi	27
4.7 Akustik Salımı İzleme	28
4.8 Hız Dalgalanmalarını İzleme	28
5. ELEKTRİK MAKİNALARINDA YAPAY ARIZA OLUŞTURMA SÜREÇLERİ VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ	29
5.1 Rulman Bozukluğu	29
5.1.1 Rulman Bozukluğu Mekanizması	31
5.1.2 Rulman Akımı Problemine Çözümler	32
5.2 Motor Eskitme Deneyleri ve Yapay Rulman Bozukluğunun Oluşturulması	33
5.3 Motor Yük Performans Testi ve Veri Toplama Sistemi	40
5.4 Verilerin Sınıflandırılması ve Rulman Arızasına İlişkin Algılayıcı Bilgisinin Belirlenmesi	50
6. TİTREŞİM İŞARETLERİNE DAYALI ARIZA TANISI VE DURUM İZLEME ÇALIŞMASI	55
6.1 Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel Özelliklerinin Çıkartılması	55
6.1.1 Motor Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel Analizi	56
6.1.2 Rulman Bozulma Modeli ve Erken Arıza Tanısı	60
6.2 Titreşim İşaretlerinin Spektral Analizi	62
6.3 Arızanın Titreşim İşaretlerinden Dalgacık Analizi ile Belirlenmesi ve İstatistiksel Özellikler	64
7. MOTOR AKIM İŞARETLERİNİN ANALİZİ	70
7.1 Akım İşaretlerinin Spektral Analizi	70
7.2 Frekans Uyumluluğu Analizi ile Arıza Türü ve Yerinin Belirlenmesi	74
7.3 Dalgacık Analizinin Motor Akım İşaretlerine Uygulanması	78
8. TÜMLEŞİK BİR DURUM İZLEME SİSTEMİ VE YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI İLE ARIZA TANISI	83
8.1 Motor Akım ve Titreşim İşaretlerinin Yapay Sinir Ağı ile İzlenmesi	84
8.2 Genetik Algoritma Uygulaması	87
8.3 YYSA ve GA Tabanlı Motor Durum İzleme Sistemi	88
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	92
EKLER	99
ÖZGEÇMİŞ	121

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
ÇÇD	: Çok Çözünürlü Dalgacık Analizi
ÇGSY	: Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu
dB	: Desibel
DC	: Doğru Akım
EDM	: Elektrik Boşalması Oyulması (Electric Discharge Machining)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FIR	: Sonlu İmpuls Cevaplı Filtre
g	: Yeçekimi İvmesi
GA	: Genetik Algoritma
GSY	: Güç Spektrumu Yoğunluğu
HP	: Beygir Gücü (Horse Power)
Hz	: Hertz
KSS	: Kritik Standart Sapma
KZFD	: Kısa Zaman Fourier Dönüşümü
ÖGSY	: Öz Güç Spektral Yoğunluğu
PE	: Süreç Sonu
PR	: Tam olarak yeniden oluşturma (Perfect Reconstruction)
QMF	: Karesel Ayna Filtre (Quadrature Mirror Filter)
RMS	: Etkin Değer (Root Mean Square)
RPM	: Dakikadaki devir sayısı (Revolution Per Minute)
SE	: Motor Arkası
YSA	: Yapay Sinir Ağı
YYSA	: Yinelemeli Yapay Sinir Ağı (Recurrent Neural Network)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Motor arıza nedenleri	2
Tablo 5.1. Test motorlarının plaka bilgisi	34
Tablo 5.2. 184T gövde numarası için motor boyutları	34
Tablo 5.3. Laboratuvar fırınlarının özellikleri	39
Tablo 5.4. Motor rulmanlarının 1000 devir/dak.'daki arıza frekansları	39
Tablo 5.5. Yük hücresinin özellikleri	41
Tablo 5.6. Momentölçerin seçilmiş özellikleri	41
Tablo 5.7. Takometrenin özellikleri	41
Tablo 5.8. Gerilim dönüştürücülerinin özellikleri	46
Tablo 5.9. Akım dönüştürücülerinin özellikleri	47
Tablo 5.10. Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin özellikleri	48
Tablo 6.1. Eskitme süreçleri için hesaplanmış istatistiksel büyüklükler	57
Tablo 6.2. Titreşim işaretinin frekans alt bantları	64
Tablo 6.3. Alt bantlar için istatistiksel büyüklükler	69

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 4.1 : Bir rulmanın yapısı.....	20
Şekil 4.2 : Rotor dengesizliği	23
Şekil 4.3 : Açısal hizalama kusuru	23
Şekil 4.4 : Paralel hizalama kusuru	23
Şekil 5.1 : Rulmandan geçen akım nedeniyle oluşan, rulman bileziği yüzeyindeki pürüzlülük	29
Şekil 5.2 : Rulman akım akışı.....	31
Şekil 5.3 : 5 HP'lik elektrik motorlarının boyutları.....	35
Şekil 5.4 : Motor performans test düzeneğinin şeması.....	37
Şekil 5.5 : Motor performans test düzeneğinin fotoğrafı.....	38
Şekil 5.6 : Mile dışardan gerilim ve akım uygulayarak rulmanın eskitilmesi için düzenek.....	38
Şekil 5.7 : Motor termal eskitme düzeneği.....	39
Şekil 5.8 : Taşınabilir algılayıcılar, işaret iyileştirme donanımı ve işaret dağıtım panosu.....	43
Şekil 5.9 : Algılayıcılar ve güç kaynaklarının motor performans test düzeneğine bağlantılarının bir şekli.....	44
Şekil 5.10 : Üniuersal işaret dağıtım panosunun fotoğrafı	45
Şekil 5.11 : Yüksek bant genişlikli ivmeölçer	49
Şekil 5.12 : Rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 2:00 saat konumlu ivmeölçer trendleri	52
Şekil 5.13 : Rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 10:00 saat konumlu ivmeölçer trendleri	53
Şekil 5.14 : Motor #11 rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 2:00 saat konumlu ivmeölçer spektrumu.....	54
Şekil 5.15 : Motor #11 rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 10:00 saat konumlu ivmeölçer spektrumu.....	54
Şekil 6.1 : Titreşim işaretleri. a) Sağlam, b) Bozuk durum	58
Şekil 6.2 : Olasılık dağılım fonksiyonları. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum	59
Şekil 6.3 : Standard sapmanın değişimi üzerine dayalı üstel model ve arıza uyarı seviyesi	61
Şekil 6.4 : Motor rulmanının eskitme aşamalarına göre sağlamlık yüzdeleri	62
Şekil 6.5 : Titreşim işaretlerinin KZFD'leri. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum ...	63
Şekil 6.6 : Başlangıç durumu için titreşim (s0) verisinin ÇÇD analizi a) Yaklaşımlar, b) Detaylar	65
Şekil 6.7 : Yedinci eskitme aşamasında titreşim (s7) verisinin ÇÇD analizi a) Yaklaşımlar, b) Detaylar	66
Şekil 6.8 : Titreşim işaretinin kendisi ve d1, d2 detaylarının tüm süreçler için RMS değişimi.....	67
Şekil 6.9 : d1 detaylarına ilişkin KZFD analizi a) Sağlam durum, b) Bozuk durum	68
Şekil 7.1 : Akım işaretleri. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum	71
Şekil 7.2 : Akım işaretlerinin spektrumları. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.....	72

Şekil 7.3 : Şebeke frekansı etrafındaki yan-bant etkileri	
a) Sağlam durum, b)Bozuk durum	73
Şekil 7.4 : Stator akımı ve titreşim işareti arasındaki frekans uyumluluğu	
a)Sağlam durum, b)Bozuk durum	76
Şekil 7.5 : Başlangıç durumu için akım (s0) verisinin ÇÇD analizi	
a) Yaklaşımlar, b) Detaylar	80
Şekil 7.6 : Yedinci eskitme aşamasında akım (s7) verisinin ÇÇD analizi	
a) Yaklaşımlar, b) Detaylar	81
Şekil 7.7 : Bozuk durumdaki stator akımının spektral analizi.....	82
Şekil 7.8 : Bozuk durumdaki stator akımının spektral analizi	
(0-200 Hz aralığı için)	82
Şekil 8.1 : Elman YYS A mimarisi	84
Şekil 8.2 : YYS A'nın frekans uyumluluğu işaretlerine cevapları	
a) Sağlam durum, b) Bozuk durum	86
Şekil 8.3 : GA uygulamasının sonuçları.....	87
Şekil 8.4 : YYS A ve GA tabanlı bir Akıllı Motor Durum İzleme Sistemi.....	88
Şekil A.1 : Morlet dalgacığının reel kısmının farklı ölçek ve öteleme	
parametrelerindeki değişimi ve enerjisi	101
Şekil A.2 : Alt ve üst örnekleme işlemcileri.....	109
Şekil A.3 : İki aşama için çok çözünürlü analiz	110
Şekil A.4 : Çok çözünürlü analizde işaretin yeniden oluşturulması.....	111
Şekil E.1 : Elman YYS A mimarisi	115
Şekil F.1 : Standart genetik algoritma akış diyagramı	120

SEMBOL LİSTESİ

Ω	: Sürekli zaman işaretinin frekans değişkeni
ω	: Ayrık zaman işaretinin frekans değişkeni
$\oplus$	: Direk toplam
δ	: İmpuls fonksiyonu
$\psi(t)$	: Ana dalgacık fonksiyonu
$\phi(t)$	: Ölçekleme fonksiyonu
$\psi_{a,b}(t)$	: Dalgacık ailesi
a	: Ölçek veya yayılma değişkeni
b	: Öteleme değişkeni
BD	: Bilye Çapı
$c_{m,n}$	: Ölçekleme katsayıları
$d_{m,n}$	: Dalgacık katsayıları
E	: Yaklaşım hatası
f_b	: Bilye dönme frekansı
f_e	: Şebeke frekansı
$f_{e_{bng}}$	: Rulman hatalarının oluşturduğu frekansı
f_{ecc}	: Eksenel bozukluk frekansları
f_i	: Bilyenin iç bilezik üzerindeki hatalı bir noktayı geçme frekansı
f_o	: Bilyenin dış bilezik üzerindeki hatalı bir noktayı geçme frekansı
f_r	: Dönme frekansı
FTF	: Temel Kafes Frekansı
$f_{v_{bng}}$	: Karakteristik rulman titreşim frekansları
$h_0(n)$	: Alçak geçiren filtrenin impuls cevabı
$h_1(n)$	: Yüksek geçiren filtrenin impuls cevabı
$L^2(R)$	: Karesel integre edilebilir fonksiyonlar kümesi
n	: Bilye sayısı
N	: Dizi uzunluğu
p	: Çift kutup sayısı
PD	: Dış açıklık çapı
P_m	: $L^2(R)$ 'den V_m uzayına izdüşüm operatörü
P_{mf}	: V_m uzayında işaretin alçak geçiren kısmı
Q_m	: $L^2(R)$ 'den W_m uzayına izdüşüm operatörü
Q_{mf}	: V_m uzayında işaretin yüksek frekans detayı veya fark
s	: Kayma
$s(t), f(t)$	: Sonlu enerjili işaretler
V_m	: Yaklaşım uzayları
$W(a,b)$	: Sürekli dalgacık dönüşümü
w_1	: Giriş tabakası ile gizli tabaka arasındaki ağırlık katsayıları
w_2	: Gizli tabaka ile çıkış tabakası arasındaki ağırlık katsayıları
w_3	: Yinelemeli tabakadaki ağırlık katsayıları
W_m	: Detay uzayları

ELEKTRİK MOTORLARINDA DALGACIK ANALİZİ YAKLAŞIMI İLE RULMAN ARIZA TANISI VE YAPAY ZEKA TABANLI BİR DURUM İZLEME SİSTEMİ

ÖZET

Asenkron motorlar hemen hemen her çeşit endüstriyel süreçte sıkça kullanılan elemanlardan biridir. Bu motorlarda sistem arızasına neden olabilecek hataların önceden belirlenmesi sürecin güvenilir ve ekonomik bir işletimi için son derece önemlidir. Bu nedenle öngörülü bakım amaçlı durum izleme çalışmaları yapılır. Durum izleme ile elde edilen bulgularla gereken bakım aktiviteleri en uygun zamanda gerçekleştirilerek süreçteki ani ve beklenmeyen kesintiler önlenir. Asenkron motorlardaki arıza dağılımları üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalara göre, motor arızalarının %41'i rulman hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu tez çalışmasıyla asenkron motordaki rulman hatalarının özellikleri ortaya çıkartılarak yapay zeka tabanlı bir durum izleme sistemi geliştirilmiştir.

Tezde kullanılan veriler *The University of Tennessee, Knoxville (UTK)*'de *Maintenace & Reliability Center (MRC)* bünyesinde bazı Amerikan sanayi kuruluşları (*General Motors, Lockheed –Martin , Duke Power, Nissan, Mitsubishi, USEM, CSI, Fisher-Rosemount, Honey-Well,..*) tarafından 1997 yılında kurulan laboratuardaki deneylerden elde edilmiştir. Asenkron motor arızaları için bir veri tabanı elde etmek amacıyla yapılan bu deneylerde 5 HP'lik, üç fazlı dört kutuplu asenkron motorlar termal, kimyasal ve elektriksel etkiyle yapay olarak eskitilmiştir. Özel olarak rulman eskitilmesi için ayrı bir düzenek tasarlanarak rulman bozukluğu elektriksel yolla yapay olarak oluşturulmuştur. Toplam olarak yedi adet hızlandırılmış eskitme süreci gerçekleştirilmiş ve motor yük performans testleri yapılarak titreşim, akım, gerilim, hız, moment, sıcaklık gibi veriler *National Instruments (NI)* veri toplama sistemiyle alınmıştır.

Mil gerilimleri nedeniyle oluşan rulman bozukluğunun özelliklerini çıkartmak amacıyla, yapay eskitme süreçleri oluşturularak eskitilen motorlardan alınan ve motorun performansını yansıtan bu veriler geleneksel ve ileri işaret işleme teknikleriyle analiz edilmiştir. Bu çerçevede, motorun rulmana yakın bölgesinden alınan titreşim verilerinin zaman, frekans, zaman-frekans ve zaman-ölçek tanım bölgelerindeki bilgileri, istatistiksel analiz, frekans analizi, Kısa-zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Çok Çözünürlü Dalgacık (ÇÇD) analizi kullanılarak elde edilmiştir. Her eskitme süreci için motor titreşim işaretlerinin istatistiksel analizi yoluyla rulman bozukluğunu yansıtan en önemli istatistiksel parametrenin standard sapma olduğu belirlenerek bu parametreye ilişkin kritik bir değer ve üstel bir model kurulduktan sonra motor rulmanlarının güvenilirlik seviyesi sağlam ve herhangi bir eskitme sürecindeki standard sapma değerleri kullanılarak saptanmıştır. Daha sonra titreşim işaretlerinin Kısa-zaman Fourier dönüşümleri yapılarak rulman bozukluğunu

gösteren frekans aralığı belirlenmiş ve çok çözünürlü dalgacık analizinin yapılmasıyla da en baskın frekans bantları detay işaretlerinin her eskitme sürecindeki *RMS* değişiminin bulunmasıyla saptanmıştır.

Motorun performansını yansıtan en önemli parametre olarak gözönüne alınan titreşim verisi dışında, motorun çektiği akım işaretleri de motor hatalarının teşhisi ve hata yerinin tespiti amacıyla kullanılmıştır. Özellikle rulmandaki herhangi bir hata, rotor ve stator arasındaki hava aralığı dağılımının düzgün olmamasına ve rulman titreşimi ile stator akımı arasında bir ilişkinin doğmasına neden olur. Bu ilişkiyi gözlemleyebilmek ya da daha açıkçası mekanik karakterli olan rulman hatalarını elektriksel büyüklüklerden belirleyebilmek amacıyla literatürde ilk kez kullanılan bir yaklaşım olan motor titreşimi ve stator akımı arasındaki frekans tanım bölgesindeki uyumluluk (koherens) analizi bu tezde ortaya çıkartılmıştır. Bu yeni yaklaşımla, motor rulmanlarındaki elektriksel boşalma etkisiyle oluşan rotor eksenel bozukluğu nedeniyle motor akım ve titreşim işaretlerinin birbiriyle ilişkili olduğu saptanmış ve bu hatanın rulmanın hangi kısmında olduğu bulunarak detaylı bir hata tespiti yapılmıştır.

Motor arıza tanısında yapay zeka uygulamasını gerçekleştirmek amacıyla, rulman hatasını belirlemeyi sağlayan frekans tanım bölgesindeki uyumluluk işaretleri oto-asosiyatif bir Elman Yinelemeli Yapay Sinir Ağına (YYSA) öğretilerek YYSA çıkışında oluşan hata değişimi yoluyla rulman bozukluğu belirlenmiştir. Ayrıca YYSA çıkışında elde edilen hata değişimindeki en etkin tepe noktasının standart Genetik Algoritma (GA) tekniği kullanılarak bulunmuş ve bu tümleşik yapıyla akıllı bir motor durum izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu anlamda tez kapsamında yapılan çalışmaların uygun donanımda birleştirilmesiyle gerçek zamandaki uygulamaları yapılabilir.

BEARING FAULT DIAGNOSIS WITH THE APPROACH OF WAVELET ANALYSIS AND A CONDITION MONITORING SYSTEM BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ELECTRIC MOTORS

SUMMARY

Induction motors are the most frequently used components in almost every type of industrial processes. Early detection and isolation of faults that cause catastrophic system failure is crucial for a reliable and economic operation. For this reason condition monitoring studies are performed for predictive maintenance purposes. With the information gathered from condition monitoring studies, instantaneous and unscheduled downtimes are prevented by performing the correct maintenance activities just right on time. According to the statistical studies on induction motor failure distribution, 41% of all induction motor failures are caused by bearing faults. In this thesis, bearing fault features in induction motors was extracted and a condition monitoring system based on artificial intelligence was developed.

The data used in this thesis were taken from the experiments in the laboratory where is at *The University of Tennessee, Knoxville* (UTK). This motor diagnostics laboratory was established with the support of U.S.A.'s most famous industrial companies (*General Motors, Lockheed –Martin , Duke Power, Nissan, Mitsubishi, USEM, CSI, Fisher-Rosemount, Honey-Well,..*) at *Maintenance and Reliability Center* (MRC) of the UTK in 1997. In order to get a database for induction motor failures in these experiments, the 5HP, three phases, four poles induction motors were aged artificially as thermal, chemical and electrical. The total number of performed accelerated aging processes is seven and some data such as vibration, current, voltage, speed and torque, temperature etc. were acquired during motor's load performance tests using National Instruments (NI) data acquisition systems.

In order to extract the features of bearing degradation due to shaft voltages, data which was taken from aged motors by accelerated aging processes and reflects motor's performance was analyzed using conventional and advanced signal processing techniques. In this perspective, time, frequency, time-frequency and time-scale domain information of the vibration signals which is taken from close to bearings was found by statistical analysis, frequency analysis, Short-time Fourier Transform (STFT) analysis and Multiresolution Wavelet Transform analysis. By statistical analysis of motor vibration signals for each aging cycle, the most important statistical parameter that shows bearing damage was determined as standard deviation. Because of this, a critical value and an exponential model for this parameter was found and motor's bearing reliability level was determined using the standard deviations of healthy and any aged cycles. After that, the frequency ranges that show bearing damage was determined by short-time Fourier transform of

vibration signals and by performing multi resolution wavelet analysis the most dominant frequency bands were determined by finding the RMS change of detail coefficients for each aging cycle.

Motor stator current signature, except from vibration signals that reflect motor's performance as well, is also used for motor fault detection and isolation schemes. Especially, any defect on bearing cause non-uniform air-gap between rotor and stator and a correlation between bearing vibration and stator current occurs. To observe this relation or in order to determine this mechanical fault from electrical parameters, coherence analysis between motor vibration and stator current was done in this thesis as first in related literature. With this new approach it was shown that motor vibrations and current are correlated because of damage on bearings due to electrical discharge. And also a specific detection was done by isolating of this fault where is in which bearing components.

In order to use the artificial intelligence in motor fault diagnostics, coherence signals that provides determining of bearing fault were used for training of Elman's recurrent Neural Network (RNN). Bearing fault diagnosis was performed by the error variation of RNN outputs. Moreover standard Genetic Algorithm (GA) technique was used to identify the peaks in error variation of RNN outputs. Thus, an intelligent condition monitoring system was developed in this thesis. In this sense the studies done in this thesis contents can be used real-time application with proper instrumentation.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Endüstriyel süreçlerde kullanılan elektrik motorlarının elektriksel ve mekanik kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi, süreç güvenilirliği ve ekonomikliğı açısından son derece önemlidir. Bu nedenle, öngörölü bakım (Predictive Maintenance) amaçlı durum izleme (condition monitoring) çalışmaları, makina durum bilgisinin ortaya çıkartılmasının temelini oluşturur [1-13].

Ayrıca bakım teknolojisinin gelişim sıralaması ise düzeltici bakım, periyodik ya da zaman tabanlı bakım ve öngörölü ya da durum tabanlı bakım şeklinde verilebilir [6,7].

Düzeltilci bakım ya da arıza sonrası bakım, eleman arızalandığında yapılan bakımdır. Bir otomobilde kırık fan kayışının değıştirilmesi, bir su sızıntısı olduktan sonra çatının tamir edilmesi, bir basınç algılayıcısının hatalı okumalar gösterdiğinde değıştirilmesi ya da yeniden kalibrasyonu örnek olarak verilebilir.

Periyodik veya zaman tabanlı bakım bir eleman üzerinde önceden belirlenmiş aralıklarda ya da işletme şartları tasarımında önceden belirlenmiş kriterleri sağlamak amacıyla yapılan bakımdır ve önleyici bakım olarak da bilinir. Bir aletin periyodik olarak yapılan kalibrasyonu, filtrelerin periyodik olarak yerleştirilmesi, yapımcı firma tarafından belirlendiğı üzere bir otomobildeki motor yağının değıştirilmesi örnek olarak verilebilir. Hepsinde de elemanın durumuna bakılmaksızın ve gerekli olmadıkça bile yapılır.

Öngörölü veya durum tabanlı bakım bir elemanın performans parametrelerinin sürekli yada periyodik olarak izlenmesi ve bunların daha önceden belirlenmiş limitlerle (uyarı ve alarm limitleri) karşılaştırılması esasına dayanır. Bu yolla, sürecin çalışmasını devam ettirebilmek için ne çeşit bir önlem alınacağı saptanır. Bu, bakımın gerektiğı zaman gerçekleştirilmesi olup, durum tabanlı bakım zamana bağı değildir. Bir elemanın davranışındaki başlamakta olan değışiklikleri tespit etmek ve zamanında problemi düzeltmek ise bu tür bakımın stratejisini oluşturur. Dönen makinalarda durum izleme, alet kalibrasyonu bulguları, sıcaklık, basınç, akış gibi

süreç değişkenlerini izleme örnek olarak verilebilir. Bu tür bakımın gerçekleştirilebilmesi amacıyla endüstriyel sistemdeki elemanlar için durum izleme çalışmaları yapılır ve elemanların arıza başlamadan önce hangi karakteristik özellikler gösterdiği belirlenir. Gelişmekte olan bir arızayı gösteren bu karakteristik özelliklerden yararlanarak sistemdeki elemanlar gerektiği zaman devreden çıkartılır ve bakıma alınır. Böylece sistemdeki ani kesintiler önlenerek sistemin daha güvenilir ve ekonomik bir şekilde işletimi söz konusu olur.

Bu anlamda öngörülü ve durum tabanlı bakım teknolojileri son 20 yıldır üçüncü kuşak olarak isimlendirilen teknoloji grubu içerisinde yer alır. Bu teknoloji grubundaki yaklaşımlarda en fazla kullanılan yöntemlerden biri ise spektral analiz yöntemi olup bu yolla makina durum bilgisi frekans tanım bölgesinde kolayca ifade edilebilir. Ayrıca durum bilgisi, zaman serisi şeklindeki verilerin istatistiksel analizi yoluyla da elde edilebilir. Ancak daha güvenilir ve duyarlı izleme çalışmaları için yeni tekniklere gereksinim duyulduğundan bu amaçla son senelerde birçok mühendislik alanında başarıyla uygulanmış olan dalgacık dönüşümleri, makina durum izleme alanında da kullanılmıştır [14-17]. Literatürde ise, endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında kullanılmış birçok durum izleme çalışması gerçekleştirilmiştir [18-22]. Bu çalışmalardan ortaya çıkartılan sonuçlara göre arızaların ortalama dağılımı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Tablo1.1 Motor arıza nedenleri.

Rulman kaynaklı	%41
Stator kaynaklı	%37
Rotor kaynaklı	%10
Diğer	%12

Arızaya neden olan hata mekanizmaları; aşırı ısınma, yalıtımda bozulmalar, mekanik arızalar ve motor sargılarındaki hatalardır. Bazı durumlarda motordaki normal dışı durumların nedeni güç kaynağındaki harmonikler de olabilir. Tablo 1.1 rulman bozukluğu, mil dengesizliği, rotor ve iş makinası milinin doğru hizalanmaması gibi mekaniksel nedenlerden kaynaklanan motor arızalarının oranının %50 den fazla olduğunu gösterir [19,22].

- Rulman arızaları: Dönme elemanları, iç ve dış bilezik ve dönme elemanlarını tutan kafeste olabilecek arızalardır.
- Stator arızaları: Stator gövdesi, stator çekirdeği ve stator sargılarında meydana gelebilecek arızalardır.

- Rotor arızaları: Rotor çubukları, mil ve rotor gövdesinde olabilecek arızalardır.
- Diğer arızalar: Faz empedanslarındaki dengesizlikler nedeniyle gerilim dengesizliğinin oluşması gibi elektriksel hatalar, aşırı yükleme, kötü kavramalar ve motorun iyi yataklanmaması gibi hatalardır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde elektrik motorlarındaki arıza tanısı bakımından yapılan çalışmaların daha çok motor akımlarının spektral analizi ile rotor kafes çubuklarının durumu ve stator sargıları üzerine yoğunlaştığı görülmüştür [23-28]. Ancak rulman arızası, rotor dengesizliği, mil hizalama kusuru (misalignment) gibi mekanik bozukluklarda motor titreşim işaretlerinin spektral analizlerinden arıza belirlemeleri gerçekleştirilmiştir [29-37]. Burada daha çok titreşim spektrumlarından arıza kiplerini (modlarını) belirlemek mümkün olmuştur. Ayrıca elektriksel ve mekanik titreşim yanında akustik veriler ile de, özellikle mekanik kökenli arızalar analiz edilmiştir. Ancak, son senelerde bilgisayar teknolojisinin gelişimi ve buna paralel olarak ileri işaret işleme yöntemlerinin ortaya çıkması ile konu farklı yaklaşımlarla ele alınabilmektedir. Bu anlamda güncel uygulamalar arasında sayılabilecek çalışmalar, daha çok dalgacık analizi, yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi bilgi işleme (information processing) konusunu kullanacak şekilde ortaya çıkmıştır. Bu anlamda yukarıdaki sözü geçen bilgi işleme teknikleri özellikle son bir kaç yıldır kullanılmaya başlanmıştır. Son senelerde bu konuların uygulamaları şeklinde yapılan bazı çalışmalarda *Yapay Sinir Ağları* ve onun *Genetik Algoritma* ya da *Dalgacık Analizi* teknikleri ile birleşimlerinin kullanıldığı görülmüştür [38-51].

Literatürdeki çalışmalar göstermiştir ki son senelerde endüstriyel süreçlerde sıkça kullanılan güç elektroniği sürücü devrelerinin oluşturduğu milden geçen akımlar, rulman arızalarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur [52-70]. Bu anlamda etkin ve spesifik bir rulman arıza belirlemesine ilişkin çalışma yapılması, uygulamada süreç güvenilirlikleri de göz önünde bulundurulduğunda son derece önem kazanmıştır. Bu tezde ise endüstriyel sistemlerde çokça kullanılan elemanlardan biri olan asenkron motorların rulman arıza karakteristiklerini belirleme çalışmaları yapılarak, bilinen bilgi işleme tekniklerinin birleşimleri üzerine dayalı daha duyarlı arıza belirleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu amaçla laboratuvar ortamında yapay eskitme süreçleri ile oluşturulmuş rulman arıza verileri kullanılmıştır [15,19,71]. Makinanın rulman bölgesine yakın noktasındaki titreşim işaretinin, dalgacık dönüşümü temelli çok-çözünürlüklü analizi yapılarak rulman arızasına ilişkin özellik belirlemesi gerçekleştirilmiş ve çeşitli spektral ve istatistiksel teknikler vasıtasıyla rulman arızasına ilişkin detaylı tespitler yapılmıştır. Ayrıca motor akım ve titreşim

verilerinin birlikte kullanımı ile rulman arızasını yeri de saptanmış olup, konuya yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi yapay zeka tekniklerinin de ilavesiyle tümleşik bir durum izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu anlamda bu tez, literatürde de yer almayan bir çok katkıyı beraberinde getirmiştir. Bunlardan biri, rulman eskitme süreçlerine dayalı olarak arıza özelliğinin zaman-frekans tekniklerinin yanı sıra zaman-ölçek tekniği (dalgacık analizi) de kullanılarak çıkartılmasıdır. Diğer ise, arızaya ilişkin özelliğin bu şekilde belirlenmesinden sonra elektromekanik bir sistem olan elektrik motrunun şebekeden çektiği akım ve mekanik titreşimi arasındaki ilişkiden yola çıkarak, bazı özel arıza frekanslarının fiziksel anlamları bakımından tanımlanmasıdır. Bir başka yenilik de ise, elektriksel ve mekanik işaretler arasındaki ilişkinin geri beslemeli bir Yapay Sinir Ağına (YSA) öğretilmesi ile gerçek zamanda arıza belirlemesine yönelik yeni bir uygulama gündeme getirilmiştir. YSA uygulamasında işaretin en büyük genliklerinin genetik algoritma tekniği ile belirlenmesi ile de, fiziksel anlamları belirlenmiş, arızayı temsil eden bu özel frekans değerlerinin saptanması, akıllı bir sistem yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Bunlardan başka eskitme süreçlerinin istatistiksel incelemesi de yapılarak arızanın olduğu süreç bir erken uyarı seviyesi olarak belirlenmiştir. Böylece diğer bir yeni yaklaşım olarak rulman arızasının istatistiksel bir modeli de verilmiştir. Ancak bu tezde yapılan en önemli katkı, rulman arızasının yerinin saptanması ile birlikte arızanın motor akım işaretlerinden dalgacık analizi tekniği ile belirlenmesidir. Çünkü bu yolla, mekanik bir özellik elektriksel bir büyüklük içerisinde gözlenebilmiştir. Bütün bu yaklaşımlar, literatürde ilk kez ele alınan yaklaşımlar olup, dönen makinalara ilişkin arıza tanısında önemli katkılar sağlamıştır.

Sekiz bölümden oluşan bu tez aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Giriş bölümünde endüstriyel süreçlerde bakım teknolojileri hakkında bilgi verildikten sonra asenkron motor arıza dağılımı incelenmiştir. Daha sonra motor arıza tanısında literatürde verilen tekniklerden söz edilerek bu tezin önemi vurgulanmıştır.

İkinci bölümde, işaret analizinde yeni bir teknik olarak ortaya çıkan dalgacık dönüşümünün, güç sistemi ve elektro-mekanik sistemlerde arıza tanısına yönelik uygulamaları gözden geçirilmiştir.

Üçüncü bölümde elektrik makinalarında gürültü ve titreşim kaynakları incelenmiştir.

Dördüncü bölümde motor arıza tanısında kullanılan teknikler ve bu tekniklerle hangi arızaların, hangi karakteristik özelliklerinden belirlenebileceği incelenmiştir.

Beşinci bölümde rulman bozukluğunun nasıl oluştuğu anlatıldıktan sonra hızlandırılmış eskitme süreçleriyle yapay rulman bozukluğunun oluşturulması ve verilerin toplandığı deney düzeneği hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca toplanan veriler arasında en uygun verinin seçimi yapılmıştır.

Altıncı bölümde rulman arıza tanısı için en uygun veri olarak belirlenen titreşim işaretine ilişkin istatistiksel analiz, frekans analizi ve dalgacık analizi gerçekleştirilerek rulman arızasının özelliği çıkartılmıştır.

Yedinci bölümde motor akım işaretlerinin spektrum analizinin yanı sıra rulman arızasının motorun çektiği akıma etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu işaretler arasındaki frekans uyumluluğu (koherens-coherence) analizi yapılarak rulman arıza tanısı spesifik olarak gerçekleştirilmiştir. Bunun dışında akım işaretlerinin dalgacık analizi yapılması sonucunda motor dengesizlik frekanslarını belirlemede dalgacık analizinin üstünlüğü gösterilmiştir.

Sekizinci bölümde frekans uyumluluğu işaretleri geri beslemeli bir yapay sinir ağına (YSA) öğretildikten sonra rulman arızasını yansıtan en baskın frekanslar YSA'nın çıkışındaki yanılgi miktarından saptanmıştır. Ayrıca bu yanılgi değışiminden genetik algoritma ile en büyük genlikli arıza frekansı da belirlenmiştir. Bu yolla YSA ve GA tabanlı tümleşik bir durum izleme sistemi oluşturulmuştur.

Sonuçlar ve öneriler kısmında ise işaret analizi tekniklerinin çok farklı uygulamaları şeklinde ele alınan bu tez çalışmasında, incelenen literatürle karşılaştırmalı olarak yapılan katkılar vurgulanmış ve gelecekteki çalışmalar bakımından da önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

DALGACIK DÖNÜŞÜMLERİNİN GÜÇ SİSTEMİ VE ELEKTRO-MEKANİK SİSTEMLERDE ARIZA TANISINA YÖNELİK UYGULAMALARI

Son yıllarda işaret işlemede yeni bir yöntem olarak dalgacık dönüşümü yer almıştır. 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 birarada elde etmeyi sağlayan dalgacık analizi, bir çok mühendislik alanında kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümünün çoklu çözünürlük özelliği, çeşitli hatalar nedeniyle sistemde oluşan geçici durumların analizi için uygundur. Bu bölümde, matematiksel ifadeleri EK A'da verilmiş olan çok çözünürlü dalgacık analizinin Elektrik Mühendisliği'ndeki bazı uygulamalarından söz edilerek, özellikle arıza tanısına ilişkin çalışmalar ele alınacaktır.

Dalgacık dönüşümü elektrik güç sistemlerinde oluşan yüksek frekanslı geçici durumların analizi için kullanılmıştır. Güç sistemlerindeki uygulamalarda öncelikle çok çözünürlü dalgacık analizi ile geçici durumlar içeren işaretlerin daha az sayıda dalgacık katsayısıyla yeniden oluşturulması örnekleri verilerek güç sistemlerinde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda ise güç kalitesini bozucu olayları sınıflamak için bu katsayılar özellik çıkarımı amacıyla kullanılmıştır. Bu uygulamalarla ilgili olarak yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Güç sistemindeki geçici olayların analizinde dalgacıkların kullanılma potansiyeli Galli [72] tarafından verilmiş olup güç sistemi iletim hattında açma-kapama olayları sırasındaki gerilim dalga şeklini ve tek faz-toprak hatası durumundaki gerilim dalga

şeklini dalgacık analiziyle açımlayarak geçici durumların belirlenmesi ise Robertson [73] tarafından yapılmıştır. Bir başka uygulama olarak Wilkinson ve Cox [74] ark fırını akımına ayırık dalgacık dönüşümünü uygulayarak bu işareti 11 seviyede dalgacık bileşenlerine ayıştırdıktan sonra 2'den 6'ya kadar olan 5 dalgacık seviyesinin, işaretin yeniden oluşturulmasında yeterli olduğunu göstermiştir. Ayrıca türbin titreşimine de dalgacık analizini uyguladıktan sonra Fourier analiziyle karşılaştırarak üstünlüğünü göstermiştir.

Güç sistemlerindeki kısa dönemli olayları modellemede de dalgacık analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu kısa dönemli olaylar; anahtarlama sırasındaki geçici durumlar ve gerilimdeki değişimlerdir. Bu konudaki çalışmada da [75] daha az sayıda dalgacık katsayısıyla bu geçici işaretlerin yeniden oluşturulması yapılarak durağan olmayan güç sistemi bozucularını, tam olarak yeniden oluşturmada dalgacıkların nasıl kullanıldığı gösterilmiştir.

Güç sistemlerindeki bozucu olayları sınıflamak amacıyla dalgacık tabanlı yapay sinir ağı (YSA) uygulamaları da yapılmıştır [76]. Burada dalgacıklar yapay sinir ağından önce bir ön işlemci olarak kullanılmıştır. Güç kalitesine yönelik olarak sınıflandırılan işaretler; yüksek frekanslı kapasitör anahtarlama, alçak frekanslı kapasitör anahtarlama, hatasız dalga şekli, itme şeklinde geçici durum, gerilimin yükselmesi ve düşmesi ve gerilimin aniden sıfıra düşmesi durumundaki işaretlerdir. Bu durumlara ilişkin dalga şekilleri dalgacık dönüşümüyle 5 seviyede frekans alt bantına ayıştırıldıktan sonra bu seviyeler yapay sinir ağının eğitiminde kullanılmıştır. Çok sayıda YSA kullanılarak dalgacık tanım bölgesinde dalga şekli tanınması yapılmıştır. Bozucunun tipi hakkındaki karar YSA ların çıkışlarını birleştirerek bir karar verme algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca gerilimdeki değişik durumları çok çözünürlü dalgacık analiziyle alt bantlara ayırarak farklı seviyelerin enerjisinin değişimi yoluyla da hata sınıflandırılması yapılmıştır [77].

Güç sistemi bozucularını analiz etmede dalgacık analizi ve YSA kullanımını içeren önemli bir çalışma Borrás [78] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bozucular otomatik olarak tespit edilmiş, işaretler sıkıştırılmış ve sınıflandırılmıştır. Güç sistemindeki bozucunun konumu ve uzunluğu hakkındaki bilgi, detay katsayılarından elde edilmiştir. Daha sonra giriş işaretini sıkıştıran ve bozucuyu (ani gerilim kesilmesi ve değişik karakterdeki gerilim değişimleri olmak üzere toplam 8 tip geçici durum) sınıflayan bir paralel işleme, dalgacık ayırıştırmasıyla yapılmıştır.

Çok çözünürlü dalgacık analizi nükleer güç santrali işaretlerine de uygulanmıştır. Bu uygulamaları ayrıntılı bir biçimde verip frekans uyumluluğu (koherens) ile birleştiren bir çalışma Şeker, Türkcan ve diğerleri [79] tarafından yapılmıştır.

Çok çözünürlü dalgacık analizinin elektrik motorları arıza tanısında kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalar ise aşağıdaki gibi özetlenebilir. Burada motor arızaları elektriksel (akım işaretleri) ve mekanik olarak (rulmanlar, dişliler v.s.) iki ayrı tipte ele alınmıştır.

Dowling [80], 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 ayırd edilebilme özelliği ise Burnett ve diğerleri [81] tarafından verilmiştir. Ayrıca Burnett ve Watson [82] kalkıştaki akımın analizinin motor sağlığı hakkında bilgi verdiğini ve rotor hatalarını motoru tam yükte işletme gereği olmadan da tanımlayabileceğini göstermiştir. Kalkış sırasında motor hızlandığı için kayma değeri sabit değildir. Bu yüzden hata frekansı bileşenleri durağan değildir. Kırık rotor çubuklarının ürettiği hata frekans bileşenleri şebeke frekansı etrafındaki alt yan bantlardır. Şebeke frekansı etrafında soldaki yan bant frekanslarını izlemenin hata tanılama amacı için yeterli bilgiyi verdiği gösterilmiştir. Rotor kafesinde 10 adet kırık rotor çubuğu bulunan boşta çalışan motorun kalkıştaki akım işaretinin zaman-frekans gösterimi dalgacık ayrıştırması tekniği ile elde edilmiştir. Motor sürekli durumdaki hızına erişirken durağan olmayan hata bileşenleri izlenerek başlamakta olan kırık rotor çubuğu tespit edilmiştir.

Daha ayrıntılı bir çalışma olarak, stator sargı hatalarını belirlemek amacıyla, dalgacık dönüşümü hata indisini hesaplamak için kullanılmıştır [83]. Bu indis belirli bir seviyedeki işarete bulunan enerji miktarı olarak ifade edilebilir. Hata indisini kullanarak vektör kontrollü asenkron motorun ölçülen işaretlerinin (akım ve gerilim) enerji dağılımı yolu ile motorun sağlığı belirlenmiştir. Bu çalışmada vektör kontrollü asenkron motorun modeli üzerinde bilgisayar simülasyonu ile çeşitli stator hataları bir fazdaki stator endüktansının farklı oranlarda değiştirilmesiyle oluşturulmuştur.

Wang ve diğerleri [84] ise darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilen asenkron motorda yalıtım hatasını tespit etmek için dalgacık dönüşümünü uygulamıştır. Darbe genişlik modülasyonlu sürücüler yüksek frekans bileşenli dalga şekilleri üretir. Bu anlamda yüksek frekans bileşenleri, yalıtım sağlığını yansıtan ani değişiklikleri izlemede kullanılmıştır.

Asenkron motorda mekanik hataları simülasyonla oluşturarak stator akımından hata özelliğinin çıkartılması Ye ve Wu [85] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kırık rotor çubuklu üç fazlı asenkron motor modelleri sargı fonksiyonu yöntemiyle geliştirilmiştir. Normal ve bozuk durumdaki asenkron motorun kalkıştaki stator akımının dalgacık paket ayrıştırmasına dayanan özellik çıkarımı için yeni özellik katsayıları önerilmiştir ve farklı yüklerde farklı hata durumları için bu yeni özellik katsayılarının normal durumdakinden belirli genişlik ve düğümlerde belirgin farklılıkları yansıttığı gösterilmiştir. Bu çalışma asenkron motorda mekanik hataları çevrim-içi tanılamak amacıyla dalgacık paket ayrıştırması ve YSA kullanımıyla da genişletilmiştir [86]. Burada özellik katsayıları, detay katsayılarının etkin değeri kullanılarak tanımlanmıştır. Hava aralığı eksenel bozukluğu için de özellik katsayıları vektörü oluşturulmuştur.

Motor korumasına yönelik olarak da rotor çubuklarındaki kırılmaları tanılayabilmek amacıyla stator akımının, Gauss dalgacığı kullanılarak dalgacık analizi yapılmış ve spektrumdaki yan bantlar ile kırık rotor çubukları belirlenmiştir [87].

Ayrıca üç fazlı asenkron motorda kırık rotor çubuklarına ilişkin hata tanısı akımın türevine çok çözünürlü dalgacık analizi uygulanarak da yapılmıştır [88]. Bu yöntemle farklı sayıda (1, 2 ve 3) kırık rotor çubuğu ve normal durum için dalgacık analizi yapılarak dalgacık katsayıları hesaplanmış ve en yüksek frekans alt bantında kırık rotor çubuğu sayısına göre bir artış gözlenmiştir. Abbaszadeh ve arkadaşları [89] ise kırık rotor çubuğu hata tespitini, stator akım işaretlerini dalgacık katsayılarına ayrıştırarak yapmıştır. Deneysel sonuçlar sağlam, rotorunda 2, 3, 4, 5 adet kırık rotor çubuğu olan makinalar için verilmiştir. Hatalı durumda sağlam durumdaki dalgacık katsayılarındaki sapma rotor kafesindeki kırık çubukların sayısını gösterir. Burada işaret alt bantlara ayrıldıktan sonra farklı seviyelerdeki enerjinin değişimi yoluyla kırık rotor çubuğu hata tanısı yapılmıştır.

Elektrik motorlarındaki mekanik hatalara yönelik arıza çalışmaları ise özellikle rulman arızaları üzerine yoğunlaşmıştır. Bilyeli rulmanlarda yorulmadan dolayı oluşan temas yüzeyindeki çatlamları belirlemek için ayrık dalgacık dönüşümü titreşim işaretlerine uygulanarak, çok çözünürlü dalgacık analiziyle ayrıştırılan titreşim işaretlerinin dalgacık katsayılarındaki değişim ile hata tanısı Mori [17] tarafından verilmiştir.

Li ve Ma [90] ise rulman bilyelerinin rulmandaki bir hatayı geçişi sırasında oluşturduğu tekrarlı periyodik itmelerin analizi için dalgacık dönüşümünü kullanmıştır. Sağlam rulman, dış bileziği hatalı rulman ve bilye hatalı rulmanı olan doğru akım motorunun titreşim işaretlerinin dalgacık analizi yapılarak bu hataların

tanısı yapılmış ve dalgacık dönüşümünün yararı Kısa zaman Fourier dönüşümüyle karşılaştırılmıştır.

Staszewski [91], dış bileziği hatalı olan bilyeli rulman titreşim verisine dalgacık analizini uygulamış ve düşük frekans bölgesindeki spektrum ile Fourier analizinden elde edilen spektrumu karşılaştırmıştır. Sonuçta dalgacık tabanlı spektrumun yalnızca dış bilezik hatasını göstermesi değil ayrıca mil dengesizlik hatasını da gösterdiği belirlenmiştir. Rulman hataları için farklı seviyelerde dalgacık katsayılarının varyansının değişimi gösterilmiştir. Ayrıca dişli titreşiminin dalgacık ayrıştırması yapılmıştır. Dalgacık tabanlı sıkıştırma hatalı örüntüyü tanılama amacıyla kullanılmıştır.

Paya ve arkadaşları da [92] elektrik motorlarında dişli ve rulman hata tanısında dalgacık analizini kullanmıştır. Bu hataların önce tek tek analizi, sonra birden fazla hatanın bir arada olması durumundaki analizi yapılmıştır. Burada zaman tanım bölgesindeki titreşim işaretleri dalgacık dönüşümüyle ön işleminden geçirildikten sonra YSA'na hata tespiti ve hatanın tipini tanılamak amacıyla uygulanmıştır. Başka bir çalışmada ise dişlilerdeki hata tanısı dalgacık dönüşümü ve YSA tabanlı bir algoritma ile yapılmıştır [93]. Bu çalışmada dişlilerdeki hataları sınıflandırmak için titreşim işaretine çok çözünürlü dalgacık analizi uygulanarak en iyi dalgacık seviyesi dalgacık katsayılarının etkin değerini hesaplayarak belirlenmiştir. Farklı seviyelerin hangi tip dişli hatalarını belirlemede uygun olduğu, hatasız işarete bakılarak belirlenmiştir. Açısal olarak dişli dönüşü, dalgacık seviyesi ve etkin değer olarak dalgacık genlikleri üç boyutlu olarak çizilmiştir. Bu, YSA ile birleştirilerek özellik çıkarımı amaçlı kullanılmıştır.

Eren ve Devaney [94] ise asenkron motorun kalkıştaki akımını dalgacık dönüşümü yoluyla analiz ederek rulman hatalarını belirlemiştir. Burada, rulmandaki hata öncesi ve hata sonrası koşullarındaki frekans alt bantları, motor çalışmaya başlarken rulman/makina rezonans frekanslarının etkisini tanımlamak için karşılaştırılmıştır. Rulman hatası dış bilezik üzerine delik açılarak oluşturulmuştur. Verinin eşit uzunluktaki farklı bölümleri için dalgacık seviyelerine ayrıştırılan işaretlerin etkin değerleri heaplanarak başlamakta olan rulman hatası belirlenmiştir.

Bu tezde ise çok çözünürlü dalgacık analizi, asenkron motor arıza tanısında rulman arızasının özelliğini çıkartmak amacıyla kullanılmıştır. Bu analiz sonucu rulman arızasını gösteren en baskın frekans bantları belirlenmiştir. Ayrıca dalgacık analizinin motor akım işaretlerine uygulanmasıyla motor dengesizliği durumundaki arıza frekansını belirlemede dalgacık analizinin kuvvetlendirme yaptığı belirlenmiştir.

BÖLÜM 3

ELEKTRİK MAKİNALARINDA GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİM

Gürültü genel anlamda istenmeyen bir ses çeşididir. İnsan kulağı ise sesin iki ayrı özelliği olan ses şiddeti ve frekansına göre yanıt vermektedir. Motor çalışmasında daha çok düşük şiddette olsa bile gürültü, frekansı insan kulağına rahatsızlık verecek bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır. Titreşim ve gürültü, iletim şekliyle ayırdedilirler. Titreşim motor yapısı tarafından çevredeki parçalara iletilirken, gürültü, ortamı çevreleyen hava ile iletilir. Motor gürültüsü ve titreşiminin sebepleri iki genel gruba ayrılabilirler; bunlar sırasıyla mekanik ve elektriksel nedenlerdir.

3.1 Mekanik Gürültü

Mekanik gürültü genellikle rulman, fan ve dişli elemanların bir sonucudur. Bazı sesler doğaldır ve azaltılabilir fakat tamamıyla yok edilemez. Diğer bir gürültü kaynağı da dengesiz dönme sonucu oluşur. Birçok motor üreticisi, üretim sırasında dahili dönen parçaların dengesi için önlemler alır. Dengesiz dönme, gürültünün yanında, motor ömrünü kısaltan rulman ve milin zamanından önce aşınmasına da neden olur.

3.1.1 Dinamik Dengesizlik

Dinamik dengesizlik, kütleyle bağlı olarak simetrisiz dönen elemandan kaynaklanmaktadır. Sargı iletkenleri arasında düzgün olmayan boşlukların olması, rotor malzemesinin her yerinde aynı özelliği taşınamaması, fan montajının iyi yapılmaması veya mildeki kayıklık fark edilebilir dengesizliğe neden olabilir. Standart denge sınırları motor tipine, dönen elemanın ağırlığına ve hızına bağlı olarak üretici tarafından belirlenir. Diğer gürültü ve titreşim üreten faktörler yeterince kontrol edilip düzeltildikten sonra dengeleme nadiren zorunlu olur.

Bazı motorlarda dinamik dengesizliği kontrol etmenin kolay yolu motoru hızlandırmak ve sonra gücü kesmektir. Eğer titreşim yavaşlama esnasında hala devam ediyorsa, problemin mekanik dinamik dengesizlik olduğu anlaşılır.

3.1.2 Bilyeli Rulmanlar

Rulman gürültüsü, rulman hızı ve ön yüklemeyle çok yakından ilişkilidir. Ön yükleme, yüklenmemiş bilyelerdeki sesi önlemek için bilyeli rulmana uygulanan eksenel kuvvettir. Gürültünün önemli olduğu uygulamalarda rulmanın dış yoluna iletilen aksiyel kuvvetin (ön yükün) ayarlanması için bir ayar vidası kullanılabilir. Dikkatle yapılmış ve elektronik olarak incelenmiş bilyeli rulmanlarda bile 40 dB'in altındaki gürültü seviyelerine ulaşmak zordur ve 60 dB'e ulaşan gürültüler de az değildir. Bilyeli rulman üretimindeki çok küçük değişimler gürültü seviyesinde önemli etkiler oluşturur. Bu yüzden aynı görünümlü motorların gürültü seviyeleri (10 dB veya daha fazla) farklı değerler alabilir.

3.1.3 Eksenel Kaymalı Yataklar (Sleeve Bearings)

Eğer yük ve çalışma sınırları sağlanıyorsa, daha düşük gürültü seviyelerine sahip eksenel kaymalı yataklar tercih edilir. Bunlarda en sık görülen problem saplama pulu gürültüsünün kontrolüdür. Saplama pulundan gelen aralıklı sıyrma sesinin kontrolü zordur ve minimum gürültü istenen yerlerde genellikle bilye/saplama düzeneği kullanılmaktadır. Silindirik rulmanların düzgün çalışması için boşluk gerektiğinden, elektromagnetik doyuma yakın veya erişmiş olarak çalışan veya yüksek derecede dinamik dengesizlikle çalışan güçlü motorlarda görülen, radyal titreşime karşı bu tip rulmanlar oldukça duyarlıdır. Bu koşullar altında ve özellikle eğer yüksek ısılar rulman yağ tabakasını inceltirse, rulmanda vuruntular ve çarpmalar oluşacaktır. Bu durum oluşmaya başladığında motor üreticisi mil rulman boşluk toleransını normalden daha yakın biçimde kontrol etmelidir.

3.1.4 Fanlar

Fanlar düşük hızlı motorlarda bile gürültünün ana kaynağı olabilirler. Hava hareketinden oluşan gürültü, genellikle insan kulağının daha az duyarlı olduğu çok düşük bir frekans noktasındadır. Ancak çıkış kaynağından geçen havanın

oluşturduğu ses çok rahatsız edici olabilir. Yüksek hızlı fan tasarımı, siren etkisinden korunmak için özel dikkat gerektirir ve fan pervaneleri sabit bir yüzeye çok yakın olmamalıdır (yanlış gürültü seviyesi ölçümü yapılmaması için gürültü ölçüm aygıtları, doğrudan hava akışı hattı üzerine yerleştirilmemelidir).

3.1.5 Dişliler

Dişliler, mekanizmanın tipine ve imalatın doğruluğuna bağlı olarak, aşırı gürültülere neden olabilir veya olmayabilir. Sonsuz vida dişli, kayan temas hareketi ile normalde gürültüsüz sayılır. Eğik dişliler de sessizdir, çünkü dişlerin üst üste binmesi yükün diştten dişe yumuşak bir iletimi şeklinde olur. Özellikle eğer dişlinin durumuna göre maksimum oran kullanıldıysa düz dişli, gürültü kontrolü en zor olan dişlidir. Bu koşullar altında herhangi bir zamanda ne kadar az sayıda diş temas halinde ise, o kadar sert yük iletimine ve bunun sonucunda gürültüye neden olur. Yük altında bu gürültü daha da kötüleşir ve genellikle yük arttıkça yeğlinliği de artar. Tüm dişlilerdeki önemli bir faktör de çok hafif yüklerde oluşan diş boşluğu sesidir. Hafif yüklerde, en küçük tolerans sapması bile dişlide çok küçük ani hız değişimlerine ve böylece gürültü oluşmasına neden olacaktır. Dişlileri daha ağır yüklemek gürültüyü azaltabilir. Çok az yüklenmiş dişlilerde diş boşluğu gürültüsü, özellikle sayısal olarak düşük oranlarda normal olarak düşünülür (Birçok durumda uygulanan yük, diş boşluğu gürültü noktasını aşmaya yeter).

3.2 Elektriksel Gürültü ve Titreşim

Gürültü ve titreşimin elektriksel kaynakları, mekaniksel olanlardan daha belirsiz olmasına rağmen rahatsız edici olabilir. Birçok elektriksel gürültü kaynağı uygulamadan çok, motorun yapım ve tasarımı ile ilişkili olduğundan üretim safhasında minimize edilmelidir. Elektriksel gürültü ve titreşim kaynakları aşağıdaki gibi verilebilir.

3.2.1 Doyma

Magnetik devrelerin aşırı doyması, aşırı elektriksel gürültü ve titreşimin en sık görülen sebeplerinden biridir. Her motorun magnetik kısmı, magnetik zorlanmaya uğramadan ancak belli bir miktarda akıyı taşıyabilir. Eğer akı çok artarsa, kaçak akı

oluşur. Ayrıca akı yolunda kesit alanının en küçük olduğu yerlerde (genellikle stator dişleri) aşırı titreşim oluşturan zorlanmalar, elektriksel gürültü ve sesin oluşmasına neden olur.

3.2.2 Amper Sarımların Dağılımı

Motorun sessiz çalışması, akı gücünden başka akının hava aralığında nasıl dağıldığına da bağlıdır. Asenkron motorlarda ideal olan akı şeklinin sinüzoidal olmasıdır. Daha fazla oluk daha sinüzoidal bir dağılım şekli üretir.

3.2.3 Hava Aralığı

Asenkron motorlardaki hava aralığının radyal uzunluğu motor gürültüsünde etkilidir. Bazı motorlarda gürültüyü azaltmak için hava aralığı arttırılabilir. Genel olarak, geniş hava aralıklarının, motor veriminde ters bir etkisi olduğundan tercih edilmez. “Fırçalı” motorlarda kutup uçlarında hava aralığını yükselterek, daha sessiz çalışma elde edilebilir.

3.2.4 Stator Dişlerinin Sayısı ve Rotor İletkenleri

Sessiz motor çalışması sadece belli oranlar veya stator dişlileri ve rotor iletkenleri kombinasyonları ile üretilebilir. Ancak optimum sessizlik için üretilen kombinasyon, motor veriminden veya çıkış momentinden fedakarlık anlamına gelmektedir. Bu yüzden (gürültü en önemli faktör olmadığı sürece) motor tasarımı, istenen motor gürültüsü, gerekli çıkış ve verim arasında uzlaşa içinde olmalıdır.

3.2.5 Çıkık Kutup Etkisi

Rotor dış çapında bulunan ferromagnetik malzemenin bulunduğu alanlar çıkık kutuplar olarak adlandırılır. Motor çalışırken bu kutuplarda magnetik kuvvetin şiddeti artar. Çıkık kutuplardaki yoğunlaşan magnetik kuvvet, rotorların magnetik dengesizliğe karşı daha hassaslaşmasına neden olur.

3.2.6 Stator Kutup Sayısı

İstenen çalışma hızından bağımsız olarak verilen küçük güçlü motor yapısındaki tüm sargı tipleri için bir temel stator çekirdek dizimi tasarımı uygulanmaktadır. Stator tabaka geometrisi tüm sargı tipleri için magnetik yolu oluşturur ve çoğunlukla en genel çalışma hızı için optimize edilir. Dört kutuplu çalışma en genel haldir. Verilen bir güç çıkışı için bir tabakalama (laminasyon) uygulandığında, magnetik gürültü iki kutuplu sargıda genellikle daha düşük olur. Altı kutuplu çalışma yerine dört kutuplu kullanılırsa hava aralığındaki akı yoğunluğu yükseleceğinden daha yüksek magnetik gürültü üretimine neden olur.

3.2.7 Uygulanan Gerilimin Frekansı

Asenkron motorlar şebeke frekansının yüksek harmoniklerini üretirler ve bunlar saç dizimi tasarımında göz önüne alınır. Doymaya yakın durumlar veya aşırı doyma, harmonikleri büyütür ve istenmeyen elektriksel gürültü üretir. Genelde şebeke frekansı ne kadar yüksekse harmoniklerden kaynaklanan elektriksel gürültü de o kadar rahatsız edici olur. 25 Hz'in altında harmoniklerin sebep olduğu titreşimi önlemek için esnek montaj yapmak gereklidir.

3.2.8 Armatür veya Rotor Çekirdeğinin Eğriliği

Eğer kafes çubukları mile paralel değil de belli bir açıyla konursa daha sessiz bir çalışma elde edilebilir. Bu, rotor iletkenlerinin ve rotor sargısının magnetik alana belli bir açıyla girerek devre relüktansının ani değişimini azaltır ve böylece stator ve rotor dişleri arasındaki titreşimi minimize eder. Ancak rotor ve sargı montajında karşılaşılan zorluklardan dolayı, kullanılabilecek çarpıklık açısının da pratik sınırları vardır. Ayrıca hız düzenini ve motorun verimin düşüreceği de dikkate alınmalıdır.

3.2.9 Komutasyon ve Amper-Sarım Oranları

Fırçalı motorların sessiz çalışması iyi komutasyona bağlıdır. Rotoru sargılı motorlarda iyi komutasyon elde etmek için, alan amper-sarımları ile sargı amper-sarımları arasında mükemmel bir oran olmalıdır. Motor fırçaları yumuşak ve sessiz çalışacak biçimde tasarlanmalı ve kıvılcım oluşumu minimum düzeyde olmalıdır. İyi

komutasyon, ayrıca fırça malzemesinin doğru seviyelenmesiyle de ilişkilidir. Böylece kollektör üzerinde düz bir film oluşur ve sonucunda kıvılcımlar azalır.

3.2.10 Armatür Olukları

Fırçalı tip motorlarda oluk sayısı motorun gürültü seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek ve çift oluk sayısı daha yumuşak ve sessiz çalışma için daha çok tercih edilmektedir [95,96].

3.3 Gürültü Kontrolü

Motorların minimum gürültü ve titreşim seviyesinde çalışmasını sağlamak için üreticinin aldığı ölçümlere ek olarak, motor kullanıcısının takip edeceği birçok gürültü azaltıcı yöntem mevcuttur. Gürültü azaltma için genel yaklaşım, gürültünün kaynağında azaltılması ve havadan nakledilen gürültü seviyesinin azaltılması şeklinde verilebilir. Motor gürültü ve titreşimi konusundaki çalışmalar, motor tasarımına ek olarak, kullanımı, uygulamasının montajı, motor yanında ses emici veya yansıtıcı yüzeylerin varlığı (veya yokluğu) motor çalışırken üretilen çeşitli frekanslardaki ölçülebilir ses seviyesini etkilediğini göstermektedir.

3.3.1 Gürültünün Kaynağında Azaltılması

Gürültüyü kaynağında azaltmaya girişmeden önce, frekans ve gürültü veya titreşim arasındaki ilişki iyice anlaşılmalıdır. Bu gürültü azaltma çalışmalarında en çok gözden kaçırılan safhadır.

Alçak frekanslı gürültü kaynakları: Alçak frekanslı gürültülerin nedeni motorun dönme frekansında oluşan rotor veya armatür dengesizlikleridir. 60 Hz, 1800 devir/dak.'lık bir motorun senkron dönme frekansı 30 Hz'dir. Bu frekans aslında normal duyma sınırları dışındadır. Ancak bu frekansta oluşan titreşimler eğer motorda önleyici ölçümler yapılmazsa diğer parçalarda duyulabilen rezonans frekanslarının oluşmasına neden olurlar. Alçak frekanslı gürültülerin etkilerini minimuma indirmek için en etkin yaklaşım, esnek montaj ve bağlamadır. Kauçuk, keçe, mantar veya yay gibi esnek malzemeler motor ayaklarının altına veya taban ve yapı arasına yerleştirilebilirler. İdeal montaj, motorun ve destek sisteminin doğal

frekansının minimum rahatsız edici frekanstan daha düşük olmasına olanak sağlayacak şekilde yumuşak olmasıdır. Diğer faktörler (yük altında yapılan montajın dönmesi gibi) nedeniyle ideal montaj durumu her zaman sağlanamaz. Genel olarak olabilecek en esnek montajı kullanmak en iyisidir. Esnek montajlamadan sonra bile titreşim sorun oluştuyorsa motor montajına ağırlık eklemek titreşimi etkili biçimde azaltacaktır. Örneğin, motor montaj ağırlığını iki misline çıkarınca titreşim genliği yarıya düşer. Genelde taşınabilen aygıtlarda bulunan diğer bir sorun da gövde çeperinin ince olmasıdır. İnce duvarlı yapılar bir diyafram gibi işler ve ses üretir. Genellikle 60 Hz'lik asenkron motorda elektromekanik kaynaklı bozucu etkiler 120 Hz'de daha güçlüdür ve çoğunlukla 500 Hz'in üstünde ihmal edilebilir [96].

Yüksek frekanslı gürültü kaynakları: Yüksek frekanslı gürültünün (500 Hz'in üzerinde) en temel kaynakları bilyeli rulmanlar ve soğutma fanlarıdır. Fırçalı motorlarda fırça gürültüsü de bir faktör olabilir. Bilyeli rulman gürültüsü genellikle asenkron motorlarda en kötü gürültü durumudur ve 1000 ile 4000 Hz arasında meydana gelir. Eğer yük şartlarını karşılıyorsa silindirik rulmanlı motorları seçmek bu sorunları çözecektir. Fırça malzemelerini değiştirmek fırça gürültüsünü azaltmaya yardımcı olacaktır. Bu frekans düzeyinde havadan nakledilen gürültü, akustik soğurucu malzemeler kullanılarak etkin biçimde azaltılır.

3.3.2 Havadan İletilen Gürültü Seviyesinin Azaltılması

Gürültü kaynağı ile dinleyici arasındaki mesafenin artması veya sadece kaynağın dinleyiciye göre yerinin değiştirilmesi gürültü seviyesinin düşmesini sağlayabilir. Gürültü seviyesini düşürmek ve kontrol etmek için akustik soğurucu malzemeler kullanıldığında motor havalandırmasının engellenmemesine dikkat etmek gerekir. Tam kapalı bir ortam veya çok sayıda odacık kombinasyonu ile de sesin istenen düzeyde azalması sağlanabilir. Odacıklar kadar etkin olmasa da yüksek frekans sesini kalkanlamak için bariyerler de kullanılabilir. Genellikle odacıkların vantilasyon anlamında motor ısınmasına etkiyebileceğine dikkat etmek gerekir. Akustik malzemelerle belirlenen dikkatle tasarlanmış vantilasyon kanalları, motor ısısı dışarı atılırken gürültü seviyesinin azalmasına olanak tanıyacaktır [95-96].

BÖLÜM 4

MOTOR ARIZA TANISINDA DURUM İZLEME VE ARIZA KİPLERİNİN TANIMLANMASI

Motor arıza tanısında durum izleme, sürekli ya da periyodik olarak motorun durumunu yansıtan parametrelerin ve büyüklüklerinin izlenmesi anlamındadır. İzlenen parametrelerdeki ani ya da beklenmeyen değişiklikler motorun durumundaki anlamlı değişimleri gösterir. Bu anlamda durum izleme, daha iyi planlanmış bakım olanağını sunar ve dolayısıyla kesintiler ve onarım, en uygun zamanda yapılabilir [20].

Arıza tanısında kullanılan çevrim-içi (on-line) metodlar ve tanılanacak arıza türleri bu bölümde verilmiştir.

4.1 Titreşim İzleme ve Arıza Kipleri

Titreşim, bir cismin referans konumu etrafındaki hareketi olarak tanımlanır. Magnetik, mekanik ve/veya aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle titreşim oluşur [10,20,26]. Ölçülen parametreler konum, hız ve ivme olabilir. Titreşimler radyal veya eksenel gibi yönsel olarak ölçülürler ve algılayıcılar genellikle mekanik hataları teşhis etmek için rulmanların üzerine yerleştirilir. İşaretlerin etkin değeri (*RMS*) bulunarak hata tespiti yapılabilmesine rağmen bu yolla hatanın yerini belirleme olanağı yoktur. Bu nedenle frekans analizi yapılarak ölçülmüş ya da kaydedilmiş sonuçlar, tüm spektrum veya belirli frekans bileşenleri, makina yeni iken (ya da bilinen bir durumda iken) kaydedilmiş ölçümlerle karşılaştırılır. Bu metodun duyarlılığı oldukça yüksektir.

Motordaki hareket motorun titreşimine neden olur. Motorun görevi dış sisteme moment sağlamaktır. Motorun gözlenebilir hareketli kısmı motor milidir. Motor mili,

üzerinde monte edilmiş rotora sahiptir. Rotor ve mil, motor içinde birlikte döner. Rulmanlar kullanılarak rotor-mil aksamının motor içinde dönmesine izin verilir. Motor sisteminin titreşimine neden olan iki ana kaynak vardır. Biri motor içindedir ve milin hareketine bağlıdır, diğeri motor ile iş makinası arasındaki bağlantıya bağlıdır.

Bir elektrik motorunun titreşim spektrumundaki baskın frekanslarla o frekansı üreten hatalar arasında ilişki vardır. Dönen makinalarda titreşimle ilişkili olan çeşitli hatalar mil dönme frekansının çarpanları olan frekanslarla izlenebilir. Motor sisteminin temel frekansını belirlemek için dönme hızı kullanılır. Frekans birimi Hertz (devir sayısı / saniye) olarak seçildiğinde, asenkron motorun dönme frekansı (f_r) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$f_r = \text{Motor hızı (devir/dak.)} / 60 \quad (4.1)$$

Bu frekans, titreşim spektrumunda çeşitli problemlerden kaynaklanan frekans bileşenlerini belirlemek için titreşim analizinde kullanılır. Titreşim analizi yoluyla makinalarda rulman hataları, dengesizlik (imbalance), hizalama hatası (misalignment), gevşeklik (looseness), yağ girdabı (oil whirl) gibi mekanik hatalar kestirilebilir [10, 20, 26].

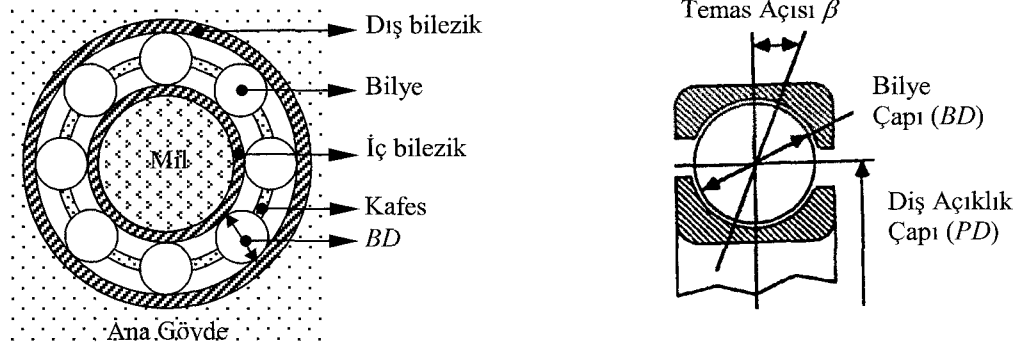
• Rulman Hataları

Rulmanlar diğeri motor bileşenlerinden bağımsız olarak motor içinde rotorun dönmesine izin verir. Rulmanlar dört temel elemanın birleşiminden oluşurlar; kapaklar, bilyeler (dönme elemanları), iç ve dış bilezikler ve kafes. Rulmanın yapısı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Yatak fiziksel bir bileşen değildir, daha çok motorun iki rulmanı arasındaki geometrik ilişkidir.

Rulman kapakları iki önemli işlev görür, ilki, kapak rulman içine yabancı maddelerin girmesine izin vermez, ikincisi, içteki yağlamanın motorun içine ya da çevreye sızmasını önler.

Kafesin fonksiyonu, rulmanın içindeki dönme elemanları arasında uygun boşluk bırakmaktır. Bu bileşendeki her problem, motor dönme frekansı ile ve rulman

yapısıyla bağıntılı olan bir titreşime neden olacaktır. Bu titreşim frekansları Temel Kafes Frekansı (Fundamental Train Frequency-*FTF*) olarak işaret edilir.



Şekil 4.1 Bir rulmanın yapısı.

İç ve dış bilezikler dönme elemanlarının değdiği yüzeylerdir. İç bilezik rotor miliyle temas halindedir ve dış bilezik motorun iç bileşenlerini (rotor, stator...) yataklayan motor gövdesiyle temas halindedir. Hem iç hem de dış bilezik genellikle güvenilir olarak oturtulur. Eğer herhangi bir nedenle bu elemanlarda bir hata varsa, bu hata rulmanın kendi titreşiminde belirli bir frekansta görülecektir. Bu titreşim frekansı Bilyenin İç veya Dış Bileziği Geçme Frekansı (Ball Pass Frequency of the Inner (f_i) or Outer Race (f_o)) olarak isimlendirilir. Bu frekans dönme elemanlarının iç ve dış bilezik üzerindeki bozuk bir bölgeyi geçmesi sonucu üretilir.

Dönme elemanları iç ve dış bilezikler arasındaki kuvveti iletir. Eğer herhangi bir sebeple bu elemanda bir hata varsa, bu hata rulmanın kendi titreşiminde belirli bir frekansta görülecektir. Bu titreşim frekansı Bilye Dönme Frekansı (Ball Spin Frequency, f_b) olarak adlandırılmış olup bilyenin, mil etrafında dönmesi sırasında kendi dönme frekansıdır.

Döner elemanlı rulmanda bir kusur oluşmaya başladığı zaman titreşimde bir artış olacaktır. Döner bir eleman bir süreksizlikle karşılaştığı zaman, bu durum rulman geometrisiyle belirlenen frekanslarda titreşim darbeleriyle sonuçlanır. Çok yüksek frekanslı titreşimler de olabilecektir. Yukarıda tanımlanmış olan rulman hatalarından kaynaklanan karakteristik rulman frekansları aşağıdaki ifadelerde verilmiştir [28,33,51].

$$\text{Kafesteki hata için: } FTF = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right) \quad (4.2)$$

$$\text{Dış bilezikteki bir hata için: } f_o = \frac{n}{2} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (4.3)$$

$$\text{İç bilezikteki bir hata için: } f_i = \frac{n}{2} f_r \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (4.4)$$

$$\text{Bilye hatası için: } f_b = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cos^2(\beta) \right] \quad (4.5)$$

$$f_{rulman} = M * (\text{alt-harmonik yada tam katı karakteristik rulman frekansları}) \quad (4.6)$$

Burada:

$M = 1, 2, 3, \dots$

$PD = \text{Dış Açıklık Çapı}$

$BD = \text{Bilye Çapı}$

$n = \text{Bilye sayısı}$

$f_r = \text{Motorun dönme frekansı}$

Bunlar, ölçülmüş titreşim spektrumunun bir örneğinde görülmesi gereken bazı titreşim frekanslarıdır. Bu karakteristik rulman frekansları her bileşene eşlik eden tam sayı harmoniklere de sahiptir.

Diğer rulman problemleri yağ girdabı (oil whirl) ve rulman hizalama hatasıdır (misalignment). Yağ girdabı temel dönme frekansının %38-49'unun tam katlarında oluşur [20,28].

$$f_{yağgirdabı} = K * M * f_r \quad 0.38 \leq K \leq 0.49 \quad M = 1, 2, 3... \quad (4.7)$$

İyi yataklama rulman eksenlerinin birbirleriyle, rotor ve stator eksenleriyle çakışık olmasıyla sağlanır. Her hizalama hatası rulmanların ve motor sisteminin de

titreşimine neden olur. Rulmanın hatalı hizalanması, rulmanda yüksek eksenel yüklere neden olur ve aşağıdaki eşitlikle verilen frekansta titreşim üretir [20,28].

$$f_{hizalama} = N * f_r \quad N = 1 \text{ ve } 2 \quad (4.8)$$

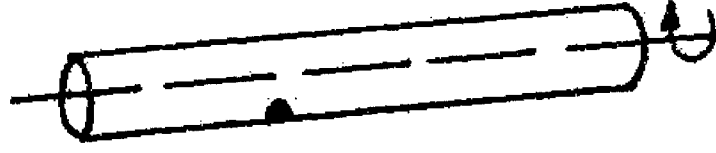
Pratik uygulamalarda, genellikle rulman frekansları titreşim spektrumunun yüksek frekanslarında ortaya çıkarlar. Yüksek frekansların anlamı temel frekansın 5-50 katı demektir [28].

Bu tezde olduğu gibi, mil üzerinde oluşan potansiyel farklar ve bunların sebep olduğu akımların yol açtığı rulman hataları, yüksek çözünürlüklü titreşim spektrumunda yüksek frekanslarda görülebilir. Bu çeşit hata 2000-4000 Hz yüksek frekans aralığında yüksek frekanslı modüle edilmiş enerji içerir. Elektriksel boşalmanın sebep olduğu frekanslar, tüm spektrum içersinde kolayca belirlenemez. Bu yüzden, yukarıda bahsedilen frekanslar için bir bant-geçiren filtre kullanarak veya dalgacıklar yoluyla çok-çözünürlüklü analizi kullanarak, genel etkin değer (*RMS*) trendleri ölçülen titreşim işaretleri için hesaplanabilir.

Rulman izlemede titreşim analizi için işaret işleme metodlarına bir alternatif ivme ölçerle ölçülen verilerin istatistiksel olarak incelenmesidir. Normal olarak çalışan bir rulmanda frekans bileşenleri Gauss dağılımlıdır. Rulmandaki bozulma bu dağılımın şeklini bozar. Bu metod orijinal durumu bilmeden de rulman durumunu belirlemede yardımcı olur [20].

- **Dengesiz Rotor**

Rotor-mil sisteminin kütle merkezi, dönme eksenini boyunca ortalanmadığı zaman dengesizlik (imbalance) oluşur. Bunun nedenleri; rotorun uygun bir şekilde dengelenmemesi, milin düzgün olmaması, parçaların uygun olmayan şekilde birleştirilmesi, fan ve savurucu pervanelerinde malzeme olması, makina yorulması, kırık veya kopmuş rotor parçaları olabilir. Şekil 4.2’de rotor dengesizliği gösterilmiştir. Dengesizlik aşağıdaki ifade ile belirlenen frekanstaki yüksek spektral yoğunluklu tepe değeri (peak) ve hızla genliğin artması ile karakterize edilebilir.



Şekil 4.2 Rotor dengesizliği

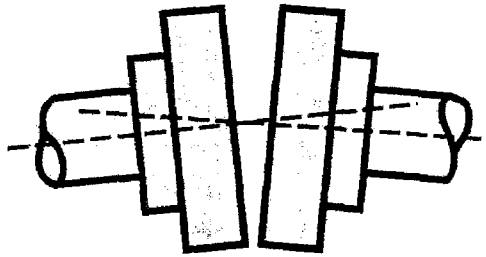
Dengesizlik, ($f_{\text{dengesizlik}}$) frekanslı titreşimlerle karakterize edilir.

$$f_{\text{dengesizlik}} = 1 * f_r \quad (4.9)$$

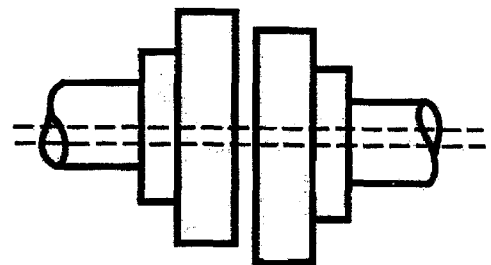
- **Hizalama Kusuru**

Birbirlerine kavraması yapılmış dönme sistemleriyle ilgili iki önemli problem, genellikle dengesizlik ve hizalama kusurudur (misalignment). Mil kütle merkezi, dönme eksenini boyunca dönmeyen bir sistemle kavrama yapıldığında bu yapının dengesizliği oluşur.

Hizalama hatası, iki milin merkezlerarası eksenlerinin birbirine paralel olmaması veya bir açıyla karşılaşması olmak üzere iki türdür. Şekil 4.3'de açısal hizalama kusuru (angular misalignment) gösterilmiştir. Bu durum $1 * f_r$ frekansında güçlü bir eksenel tepe değeri oluşmasına yol açar. Paralel hizalama kusuru (Offset misalignment) Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu, $2 * f_r$ frekansında güçlü bir radyal bileşen üretir. Mil eğilmesi açısal hizalama kusuruna benzerdir.



Şekil 4.3. Açısal hizalama kusuru



Şekil 4.4. Paralel hizalama kusuru

- **Gevşeklik**

Gevşeklik (looseness), motorun uygun bir şekilde tespit edilmemesi, ve motor temelinin ve/veya oturtulan tabanın uygun bir şekilde beraber oturmaması durumunda oluşur.

Gevşeklik frekansları ($f_{\text{gevşeklik}}$), temel frekans cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$f_{\text{gevşeklik}} = N * f_r \quad N = 1, 2, 3... \quad (4.10)$$

4.2 Akım İzleme ve Arıza Kipleri

Motor durumundaki büyük değişimler motorun çektiği akıma da yansır. Titreşim verisinde görünmeyen bazı problemler motor akım analizi yoluyla teşhis edilebilir. Bu problemler kırık rotor çubukları, çatlak kısa devre bilezikleri, yüksek dirençli kafes bağlantıları, statik ve dinamik hava-aralığı düzensizlikleri, dengesiz magnetik çekme ve motor rulman bozukluğudur [21]. Bu yüzden, ek bilgi akım işareti içinde içerildiği için, akım ve titreşim arasında tam bir uyuşma olmalıdır.

- **Hava Aralığı Eksenel Kaçıklığı**

Makina eksenel kaçıklığı, rotor ve stator arasında düzgün olmayan hava aralığının var olması durumudur [28,43]. Eksenel kaçıklık büyüdüğü zaman, sonuçtaki dengesiz radyal kuvvetler (dengesiz magnetik çekme olarak da bilinir) rotorun statora sürtünmesine neden olabilir, ve bu da stator ve rotorda hasara yol açar. İki tür hava aralığı eksenel kaçıklığı vardır: statik hava aralığı eksenel kaçıklığı ve dinamik hava aralığı eksenel kaçıklığı. Statik hava aralığı eksenel kaçıklığı durumunda, minimal radyal hava aralığı uzunluğunun konumu uzayda sabittir. Statik eksenel kaçıklığın nedeni, stator çekirdeğinin ovaliği veya rotor ya da statorun uygun olmayan yerleşimi olabilir.

Dinamik eksenel kaçıklık durumunda, rotorun merkezi, dönme merkezinde değildir ve minimum hava aralığı konumu rotorla döner. Bu hizalama hatasının, eğri rotor mili, rulman yorulması veya rulmanın hatalı hizalanması, kritik hızdaki mekanik rezonans gibi çeşitli nedenleri olabilir. Gerçekte, hem statik hem de dinamik eksenel

kaçıklık birlikte var olma eğilimlidir. Hatta yeni imal edilmiş makinalarda imalat ve birleştirme metodlarından dolayı kalıntı seviyede statik eksenel kaçıklık vardır. Bu, bir yönde sürekli dengesiz magnetik çekmeye neden olur. Kullanımla bu durum, rotor milinin eğilmesi, rulman yorulması ve yırtılması gibi etkilere yol açabilir. Bu, bazı derecelerde dinamik eksenel kaçıklıkla sonuçlanabilir. Erken teşhis edilmezse, bu etkiler önemli bir makina arızasına yol açacak şekilde rotor göbeğinden stator içine doğru büyüyebilir [28,43].

Statik ve dinamik eksenel kaçıklığın başlangıcı motor akım analizi kullanılarak teşhis edilebilir. Bununla ilgili frekans bileşeni, kaynak frekansı etrafındaki temel yan bantlarla verilir [33].

$$f_{eec} = f_e * [1 \pm m (1-s)/p] \quad (4.11)$$

Burada:

f_e = Şebeke frekansı
 p = Çift kutup sayısı
 n = Motorun Hızı [devir/dak.]
 n_s = Senkron Hız = f_e / p [devir/dak.]
 s = Kayma = $(n_s - n) / n_s$
 $m = 1, 2, 3, \dots$

Örneğin 91.5 cm çaplı bir rotoru olan asenkron motorda hava aralığı tipik olarak 1.27 mm'dir. Tasarımla, bu hava aralığı eş eksenli olmalıdır. Bununla birlikte, normal imalat toleranslarıyla bile bunu korumak mümkün değildir. Örneğin, yüksek hızlı bir asenkron motoru (2-kutuplu), %20 eksenel bozukluk ile çalıştırmak kabul edilebilirdir. Hava aralığı yaklaşık olarak %60 daraldığı zaman bu kuvvetler, sürtünme olarak isimlendirilen rotorun statorla temasına neden olur [43].

• Kırık Rotor Çubukları

Bir rotor çubuğu kırıldığı veya çatladığı zaman rotorda indüklenen akımın normal akışı değişir. Akım diğer rotor çubukları üzerinde dağılacaktır. Akımın bu yeniden dağılımı, rotor ve stator arasındaki hava aralığı akı alanında lokal (kırılma etrafı) bir anomaliye neden olur. Akı alanındaki her anomali, stator akımında küçük ve hat akımı ölçümünden teşhis edilebilen benzer bir bozucuya neden olur.

Rotor çubuklarındaki hatalar, şebeke frekansının 2 katında yüksek bir titreşim ve ayrıca şebeke frekansı etrafında kutup geçme frekansı ile belirlenen yan bantlar meydana getirir.

$$\text{Kutup geçme frekansı} = \text{Kutup sayısı} * \text{Kayma frekansı}$$

Rotor çubuklarında ve kısa devre bileziğinde kırılma veya çatlama oluştuğunda eğer vinç motoru gibi sık kalkışı gerektiren yükler varsa bozulma hızlanır ve bunun sonucunda oluşan merkezkaç kuvvetlere bağlı olarak, çubuğun kırılmış parçaları sargılarda zarara yol açacak şekilde statora doğru fırlayabilir.

- **Rulman Bozukluğu**

Dönme elemanlı rulmandaki bir hata motordaki hava aralığının değişmesine neden olur ve stator akımında kaynak frekansı ve daha önce tanımlanan karakteristik rulman frekansları ile ilişkili olan aşağıdaki bağıntıyla verilen frekansları üretir [33]:

$$f_{e_{bng}} = |f_e \pm m * f_{v_{bng}}| \quad (4.12)$$

$$m = 1, 2, 3...$$

$$f_e = \text{şebeke frekansı}$$

$$f_{v_{bng}} = \text{karakteristik titreşim frekansları}$$

4.3 Stator Ani Gücünü İzleme

Ani güç, herhangi iki faz arasındaki gerilimle her iki fazdan çekilen akımın ani değerlerinin çarpımı olarak tanımlanır. Güç izleme tekniği, tek başına akımı izlemeye göre daha duyarlıdır. Güçteki karakteristik spektral bileşen, motorun senkron hızından bağımsızdır ve bozukluk frekansı ile ilişkilidir. Bu teknik, yük ve kaynaktaki değişimlere duyarlı değildir. [20, 28].

4.4 Çarpma Rezonansı

Çarpma rezonansı (impact resonance); motor, şok dalgası dürtüsü üretecek kadar siddette vurulduğu zaman üretilen titreşim spektrasının bir analizini içerir.

4.5 Isıl Analiz

Aşırı ve uzun süreli ısı motor ömrünü azaltan en önemli etkidir. Aşırı ısıdan en çok etkilenen bileşenler; yalıtım sistemi ve rulmanlardır. Yüksek sıcaklık, rulmandaki yağ veya gresin viskozitesini azaltır. Bu yüzden rulmanlar, uygun olmayan yağlama nedeniyle erken bozulurlar.

Termal ölçümler, motor sürekli durumda çalışırken motora yerleştirilen sıcaklık ölçerler kullanılarak yapılır. Sıcaklık verilerinin trendini bulmak motorun aşırı ısınma durumunun belirlenmesi için basit ve hızlı bir yöntemdir. En fazla görülen aşırı ısınma nedenleri; aşırı yükleme, rulman yapışması ve hizalama kusurudur. Bununla birlikte, havalandırma, iki faza kalma, yüksek ortam sıcaklığı, aşırı çalışma ve güç kaynağındaki değişimler (yüksek, düşük veya dengesiz gerilim) de aşırı ısınmaya katkıda bulunan diğer etkenlerdir. Motor sıcaklığı yükselmesi; rulman sürtünmesi, hava etkisi, çekirdek kayıpları ve bakır kayıplarının (I^2R kayıpları olarak gösterilen) bir fonksiyonudur [10].

Termal analiz için gerekli ölçümler genellikle iki metodla gerçekleştirilir; doğrudan temasla (direct contact) ölçüm veya termal görüntüleme (thermal imaging) yoluyla. Doğrudan temas, konumla ilgilenildiği sürece daha hassas bir okuma verir. Algılayıcı alet, motorun içinde ve dışında hemen hemen her yere yerleştirilebilir. Termal görüntüleme motorun dışındaki sıcaklıkla görünümünü verir. Fakat her ikisi değerli sonuçlar verebilir.

4.6 Magnetik Akı Analizi

Motorun elektrik ya da magnetik devresindeki herhangi bir küçük dengesizlik, akıya yansır. Bu işaretlerin algılanması için basit bir algılayıcı, akı bobinidir. Frekansların çoğu motor hızına bağlıdır. Rotor çubuğu hatalarını, elektriksel hataları, dengesiz gerilimi, stator hatalarını, mil akımlarını ve diğerlerinin bir ön göstergesini akı ölçümünün sağlayabileceği de gözükmemektedir [10]. Bobin, milin gövdeden çıktığı yere yerleştirilmelidir. Magnetik akının, akım analizinin yapabildiği benzer problemlerin çoğunu teşhis edeceği düşünülür. Akı bobini spektrumundaki tepe değerlerinin çoğunun, motor hızı ile bağlantılı olan frekanslarda ortaya çıkması nedeniyle bu yolla motorun hızı ve yükü de saptanabilir.

4.7 Akustik Salımı İzleme

Hatalı ve hatalı olmayan dönme elemanları arasındaki temas, makinanın içinde ses hızıyla yayılan dalgalar üretir. Enerjisi küçük olan bu dalgaların yüksek frekansları piezoelektrik veya kapasitif algılayıcılarla belirlenebilir [20].

4.8 Hız Dalgalanmalarını İzleme

Hız dalgalanmaları, motorun dönme periyodundaki dalgalanmaların ölçülmesi yoluyla izlenir. Bu metod yoluyla rotor hataları, hava-aralığı eksenel bozukluğu, rotor asimetrikliği, rulman bozukluğu ve kavrama hataları belirlenebilir [28].



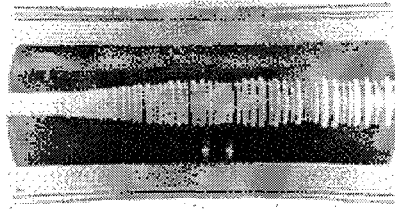
BÖLÜM 5

ELEKTRİK MAKİNALARINDA YAPAY ARIZA OLUŞTURMA SÜREÇLERİ VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ

Bu bölümde, elektrik motorlarında rulmanların bozulma nedenleri ve uygulanan önlemler incelendikten sonra hızlandırılmış motor eskitme deneylerinin yapılışı ve yapay rulman bozukluğunun oluşturulması anlatılmıştır. Daha sonra motor performans testleri ve veri toplama sistemi hakkında bilgi verilmiş ve rulman arızasını belirlemeyi sağlayacak en uygun veriyi bulabilmek için veriler sınıflandırılarak mevcutlar arasından en uygun algılayıcı seçimi yapılmıştır.

5.1 Rulman Bozukluğu

Erken rulman arızasının bir nedeni rulman üzerinden akım boşalması nedeniyle rulman bileşenlerinden geçen yüksek hata akımı yoluyla malzeme koparılmasıdır ve bu olay Elektrik Boşalması Oyuğu (*Electrical Discharge Machining-EDM*) olarak bilinir [64]. Bu yolla oluşan bir rulman bozukluğu Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Rulmandan geçen akım nedeniyle oluşan, rulman bileziği yüzeyindeki pürüzlülük [61].

Elektrik akımının akması için gerekli iki koşuldan biri gerilim potansiyelinin olması ve diğeri de toprağa doğru bir yolun olmasıdır [64]. Akım en az dirençli yolu seçer ve çoğu durumlarda bu motor rulmanları içindendir.

Elektrik makinalarında rulmanı etkileyen mil gerilimleri ve akımlarının varlığı teknik olarak 1907 yılından beri bilinmektedir [65,69]. Fakat son yıllarda güç elektroniği devrelerinin elektrik makinalarıyla birlikte kullanımındaki artış rulman bozukluğunda da artışı getirmiştir [56]. Rulman akımları ve rulman arızalarına neden olan mil gerilimleri ve akımları, mile potansiyel uygulanması; elektrostatik yükler; mil mıknatıslanma etkisi; magnetik devredeki simetrik olmayan etkiler ve ortak uç gerilimleri yoluyla üretilirler [65,69]. Bunlar sırasıyla aşağıdaki gibi verilmiştir.

Mile gerilim uygulanması: Herhangi bir nedenle mile gerilim uygulandığında rulman bozukluğuna yol açabilecek şekilde mil ve toprak arasında akım yolu oluşur. Bu akım mil ile sistemin elektrikselsel bağlantılı olduğu motor gövdesi ve yataklama elemanları gibi çeşitli parçaların arasında kaynak noktalarının oluşmasına sebep olur.

Elektrostatik yükler: Özellikle düşük nem oranlı yerlerde mile monte edilen fanlar, buhar türbini, sulu gaz kompresörleri, kayış sürürlü elemanlar ve yağlarda yüklü iyonların birikmesi nedeniyle mil akımları oluşur ve mil gerilimi, bu akım rulmanlar içinden boşalana kadar oluşmaya devam eder.

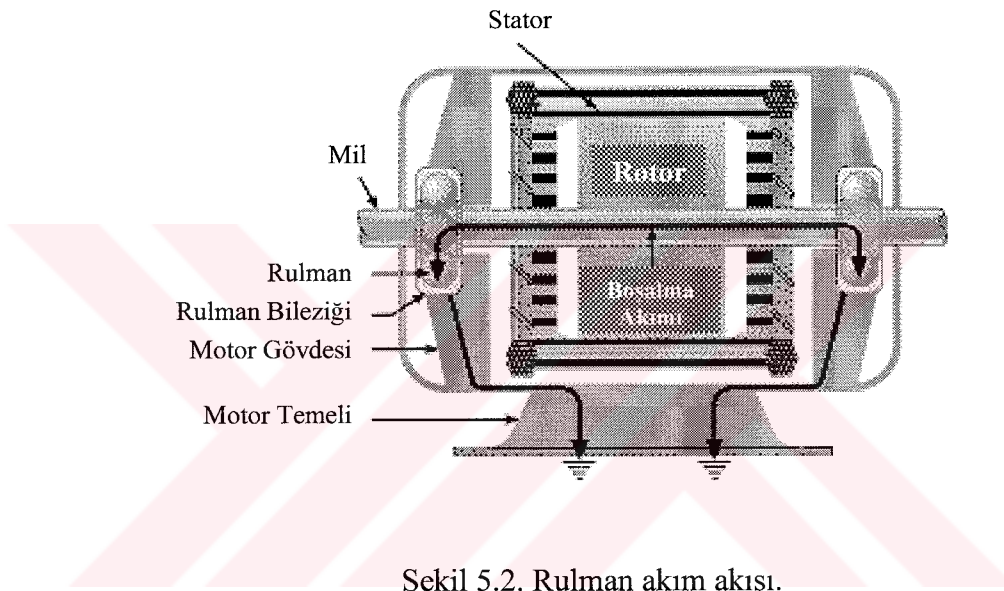
Mil mıknatıslanma etkisi: Mili çevreleyen dengesiz amper-sarımlar, milde mıknatıslanma etkisi oluşturur ve mil boyunca eksenel, rulman, motor gövdesi ve diğer rulman üzerinden dolaşan akı oluşturur. Bu eşkutuplu akı, yüksek hızlardaki büyük rulmanlarda akımlar meydana getirir.

Magnetik devredeki simetrik olmayan etkiler: Motor içinde dengesiz magnetik yol olduğu zaman simetrisizlik meydana gelir. Dengesiz yolların bazı nedenleri stator saç dizimi tasarımı ve stator sargılarında hata nedeniyle oluşan simetri bozukluğu olabilir. Ayrıca rotor eksenel bozukluğu, sarım-sarım kısa devreleri, açık ya da kırık rotor çubukları gibi düzgün olmayan magnetik akıyı üreten her çeşit hata yoluyla oluşurlar ve bu akımlar mil, rulman, motor gövdesi ve rulman arasında akar.

Ortak uç gerilimleri: Son zamanlarda yüksek frekanslı darbe genişlik modülasyonlu eviricilerle beslenen asenkron makinalarında eviricilerin yüksek anahtarlama frekansları, yüksek ani gerilim değişimleri (büyük dv/dt değerleri) ve anahtarlama sırası nedeniyle bu eviriciler ortak referans noktası olarak genellikle toprak ya da negatif doğru akım barası olabilen bir referansa göre gerilim potansiyeli üretirler ve

bu gerilimlere ortak uç gerilimleri adı verilir [59, 69]. Lipo, motor stator sargıları-stator gövdesi, stator sargıları-rotor, ve hava aralığı kapasitif kuplajları nedeniyle eviriciden kaynaklanan ortak uç gerilimlerinin bu kuplajlarda birikmesi ve sonra da bir anahtar konumundaki rulman üzerinden boşalmasıyla ilgili çalışmalar yapmıştır [58,67]. Motor güvenilirlik istatistiklerine göre toplam motor arızalarının %40'ını rulman arızaları, ve hemen hemen rulman arızalarının %25'inin de yüksek frekanslı anahtarlama ve yüksek dv/dt den dolayı olduğu belirtilmektedir [59].

Kapasitif olarak rulman akım akışı Şekil 5.2'de verilmiştir [66].



Şekil 5.2. Rulman akım akışı.

5.1.1 Rulman Bozukluğu Mekanizması

Farklı işletme koşullarında, bir rulman raslantısal olarak iyi iletkenlik, sıfır iletkenlik yada herhangi bir değerde iletkenlik sergileyebilir. Rulman akımlarının iletim kipi (modu) rulman akımı ve boşalma kipi rulman akımı olarak isimlendirilen iki tipi vardır [66].

İletim kipi rulman akımı belirli bir zaman periyodu sırasında sürekli olarak iyi iletkenlik sergileyen rulmanlardaki akım akışıdır. Düşük hızlarda rulman empedansı düşüktür ve yağ tabakası çok ince hale gelerek rulman bilyeleri bilezik ile daha iyi temas eder ve bu durumda rulman içinde sürekli bir akım oluşur, ancak bu akım erken bir arızaya sebebiyet vermez. Boşalma kipinde rulmandan akım geçişi ise şöyledir: Motor hızı genel olarak anma hızının %10'una çıktığı zaman rulman

empedansı $M\Omega$ aralığında (kapasitif) değerler alır. Hız arttığında bilezik ve toprak arasında bir sınır oluşturan 0.2-2 μm yağ filmi üzerine rulman bilyeleri binerler. Bu yağ filmi, rotor gerilimiyle dolan bir kapasitör olarak görev görür. Bu gerilim filmin bastırabileceği gerilimi aştığı zaman ya da küçük bir temas yüzeyinde rulman bilyesi bileziklerle sert nokta temasına girdiği zaman film kapasitörünü tahrip edici yüksek boşalma akımı rulmanda yüzeysel bozulmalar oluşturacak düzeyde meydana gelir.

5.1.2 Rulman Akımı Problemine Çözümler

Rulman akımı; rulman yalıtımı, mili topraklama, iletken gres kullanma, Faraday kalkanı, filtreleme ve özel eviriciler kullanılarak önlenabilir [52,54,59,65]. Fakat literatürde, bu yöntemlerle sadece rulman akımlarının etkisini azaltmak veya bu akımları başka yöne saptırmak suretiyle rulmana akım akışının engellendiği belirtilmekte ve tam bir çözümün olmadığı belirtilmektedir.

Yalıtılmış Rulmanlar: Mil-rulman veya rulman-motor gövdesi arasına yalıtıcı bir malzeme yerleştirmek suretiyle mil yalıtımı sağlanır. Boşalma akımlarına bağlı rulman bozukluğu akımın akacağı herhangi bir yol olmadığı için bu yolla önlenabilir. Bu çözüm vantilatör gibi direk olarak sürülen yüklerde iyidir, fakat dişli kutusu gibi iç bileziği topraklanmış rulmanlı olan yükleri sürüşte uygun değildir.

Milin Topraklanması: Küçük bir direnç yolu vererek akımı ters çevirmek bazı formlardaki fırça veya bileziklerle mili topraklayarak gerçekleştirilebilir. Mili topraklamanın dezavantajı simetrisizlikten dolayı dolaşan akımlar için istenilmeyen bir yolun oluşmasıdır. Bu dolaşan akımlar mil topraklama cihazının içinden veya mil topraklama cihazının ters ucundaki yük rulmanlarından akabilirler.

İletken Gres: Rulmandaki iletken gres, akım için sürekli bir yol sağlar. Bilyelerin bileziğe kesikli nokta teması olduğu sürece rotorun sargı kapasitansına dolması önlenecektir. İletken gres mil topraklama aleti kullanmayla etki olarak aynıdır.

Faraday kalkanı: Topraklanmış bir malzeme rotor ve stator arasına yerleştirilir, bu yöntem stator ve rotor arasında yalıtımı sağlar ve rulman içine akım akmasını önler.

Filtreleme: Ortak uç gerilimlerini motora ulaşmadan önce filtrelemek ortak uç tıkaçı ve kapasitörlerinin kombinasyonu ile gerçekleştirilir.

Özel Evirici Tasarımı: Problemi kaynağında çözmeyi amaçlayan bu metotta eviriciler ortak uç gerilimlerini üretmeyecek şekilde tasarlanır [59].

5.2 Motor Eskitme Deneyleri ve Yapay Rulman Bozukluğunun Oluşturulması

Eskitme deneylerinin amacı elektrik motorlarını yinelemeli çevrimlerle ısınmaya, mekanik zorlanmaya, neme ve elektriksel zorlanmaya maruz bırakmaktır. Yinelemeli çevrimler, hızlandırılmış esasta sistemin gittikçe artan bozulma etkisini gösterir.

Test düzeneklerini hazırlamada “*IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation Materials for Random-wound AC Electric Machinery*” ve “*Standard for Systems of Insulating Materials*” temel alınarak hızlandırılmış eskitme süreçleri gerçekleştirilmiştir [19,71].

Bu deneysel çalışma, elektrik motorlarında akım geçişine bağlı rulman arızası kipi üzerine odaklanmıştır:

Motor eskitme testlerinde istatistiksel dağılımı elde etmek amacıyla üç tane 5-HP’lik motor rulman bozulması arıza modu için test edildi. 5-HP, 4-kutuplu motorların hepsi *Emerson Electric Company* tarafından sağlanmıştır. Motorlar üçgen bağlı olup plaka değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

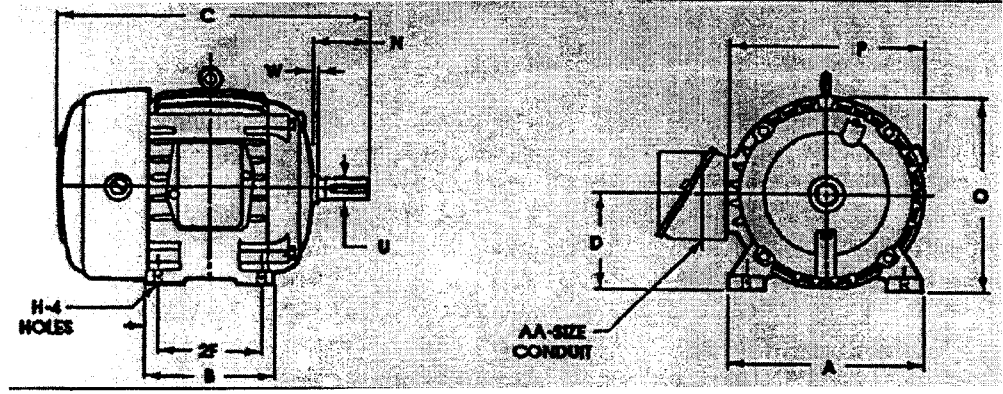
Üç-fazlı, dökme demirden yapılan bu motorların boyutları Tablo 5.2’de verilmiştir, boyutlar için Şekil 5.3 referans olarak verilmiştir.

Tablo 5.1. Test motorlarının plaka bilgisi

Motor Tipi	Premium Efficiency Motor
Yapımcı	US Electrical Motors Division of Emerson electric Co. St. Louis, MO
Model Numarası	7965B
HP	5
Motor hızı (devir/dakika)	1750
Faz	3
Gövde Numarası	184T
Gövde Tipi	TCE
Volt	230 / 460
Amper	13.0 / 6.5
Servis Faktörü	1.15
Hertz	60
NEMA Tasarımı	B
Yalıtım Sınıfı	F
Kapatma	TE
Maksimum Ortam Sıcaklığı	40 °C
LR KVA Kodu	J
Çalışma periyodu	Sürekli
Güç Faktörü	82.5
Verim	90.2
Maksimum KVA	1.4
Yüke Bağlı Olmayan Taraftaki Rulman Tipi	6206-2Z-J/C3
Yüke Bağlı Taraftaki Rulman Tipi	6205-2Z-J/C3
ID #	Z08Z177R190F /

Tablo 5.2. 184T gövde numarası için motor boyutları

Boyut	Değer (cm)
A	18.1
B	17.2
C	40.2
D	11.43
2F	14
H	1.03
Maksimum N	2.7
Maksimum O	21.3
Maksimum P	24
U	2.2
Maksimum AA	1.9
SQ Key	0.6



Şekil 5.3. 5 HP'lik elektrik motorlarının boyutları.

Motorların performans testleri, 3 kW, 1800 devir/dak. dinamometre (LSC 132 MC 7 Tipinde) ve üniversal kavraması olan ayarlanabilir bir test platformunda yapılmıştır. Dinamometre 0-2 A ve 0-200 V ile uyarılmış ve 21.63 Ohm'luk (oda sıcaklığında) açık bir dirençle yüklenmiştir.

Test düzeneği Şekil 5.4'de, fotoğrafı da Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Motor, elle kumanda edilen bir anahtarla dinamometre uyarma akımı ve gerilimi değiştirilerek yüklenmiştir. Motor yük ölçümleri için bir moment algılayıcısı ve bir takometre kullanılmıştır.

Rulman bozukluğu elektriksel kıvılcım nedeniyle rulman yüzeyinde, ve/veya rulmanın iç ve dış bileziklerinde ve bilyelerde bozulmalar sonucu meydana gelir. Bu yüzey bozukluğu rulmanın titreşim seviyesinin artmasına ve sonuçta arızasına neden olur.

Milden rulmana olan bu elektriksel boşalmanın benzetimi için tasarlanan özel bir test düzeneği Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Dışarıdan 30 Volt, 27 Amper AC mile uygulanır ve motor yüksüz olarak 30 dakika çalıştırılır.

Yaşlanma sürecini arttırmak ve hızlandırmak amacıyla mile gerilim vererek rulmanı eskitme dışında motora termal ve kimyasal eskitmeler uygulanmıştır. Bu düzeneğin amacı hızlandırılmış test çevrimiyle elektrik motorunu termal ve kimyasal olarak eskitmektir.

Termal eskitme testi basit olarak, 140 °C'lik sabit bir sıcaklıkta motoru ısıtarak yapılır. Motorlar aşağıdaki Tablo 5.3'de özellikleri verilen bir laboratuvar fırınının içine yerleştirilmiştir. Isı doğal taşınım ile alttan üste doğru fırın odacığının içine transfer edilir. Fırının altındaki ayarlanabilir taze-hava giriş kapağı fırına giren taze hava miktarının kontrolünü sağlar. Sıcaklık dalgalanmalarını az tutmak amacıyla giriş ve çıkış hava kapakları kapalıdır. Bimetal bir kontrol termostat istenilen fırın sıcaklığını muhafaza eder ve termal kesme, maksimum fırın sıcaklığını sınırlar.

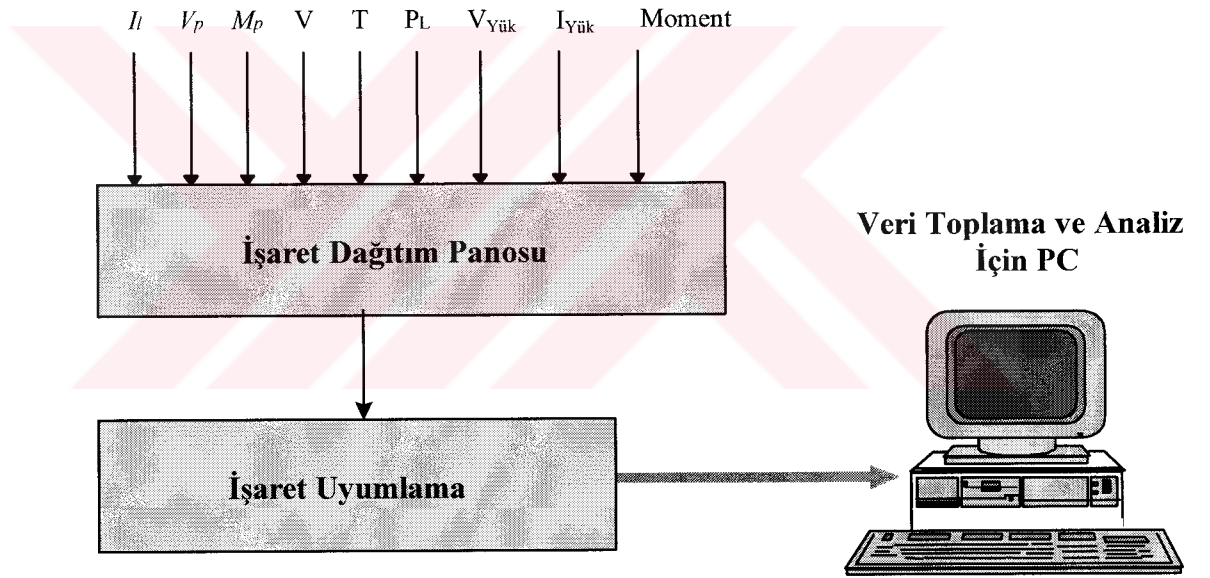
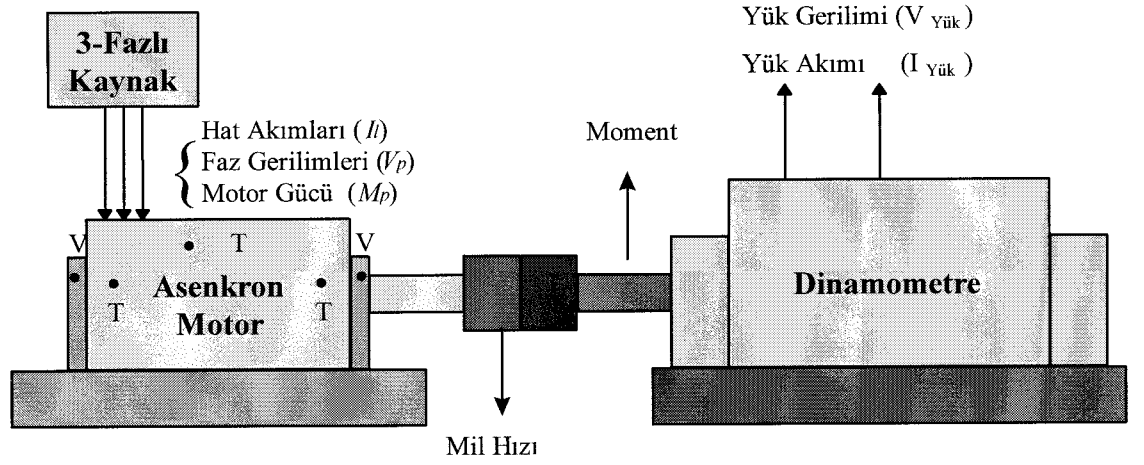
Motor termal eskitme düzeneği Şekil 5.7'de verilmiştir.

Bir eskitme süreci (aşaması) aşağıdaki gibi tanımlanır:

1. 5-HP motor rulman bozulması test düzeneğinde 30 dakika çalıştırılmıştır.
2. Daha sonra, 5-HP'lik motor sıcaklığı 140 °C olan fırına yerleştirilir.
3. Motor bu sıcaklıkta 72 saat ısıtılır. Sonra fırından çıkarılır ve 6 saat soğutulur.
4. Motor 15 dakika suyun içine konulur ve sonra çıkarılır, diğer bir 72 saatlik ısıtma için hemen fırına yerleştirilir. Bu, motor parçalarında paslanmaya (corrosion) neden olur.
5. Motor 72 saat sonra fırından çıkarılır ve 6 saat soğutulur.
6. Yük performans test düzeneğinde motor test edilir.

SKF USA Inc.'nin 1000 devir/dak. hızında motor rulmanları arıza (defect) frekansları Tablo 5.4'de verilmiştir. Gerçek frekansı hesaplamak için aşağıdaki bağıntı kullanılır:

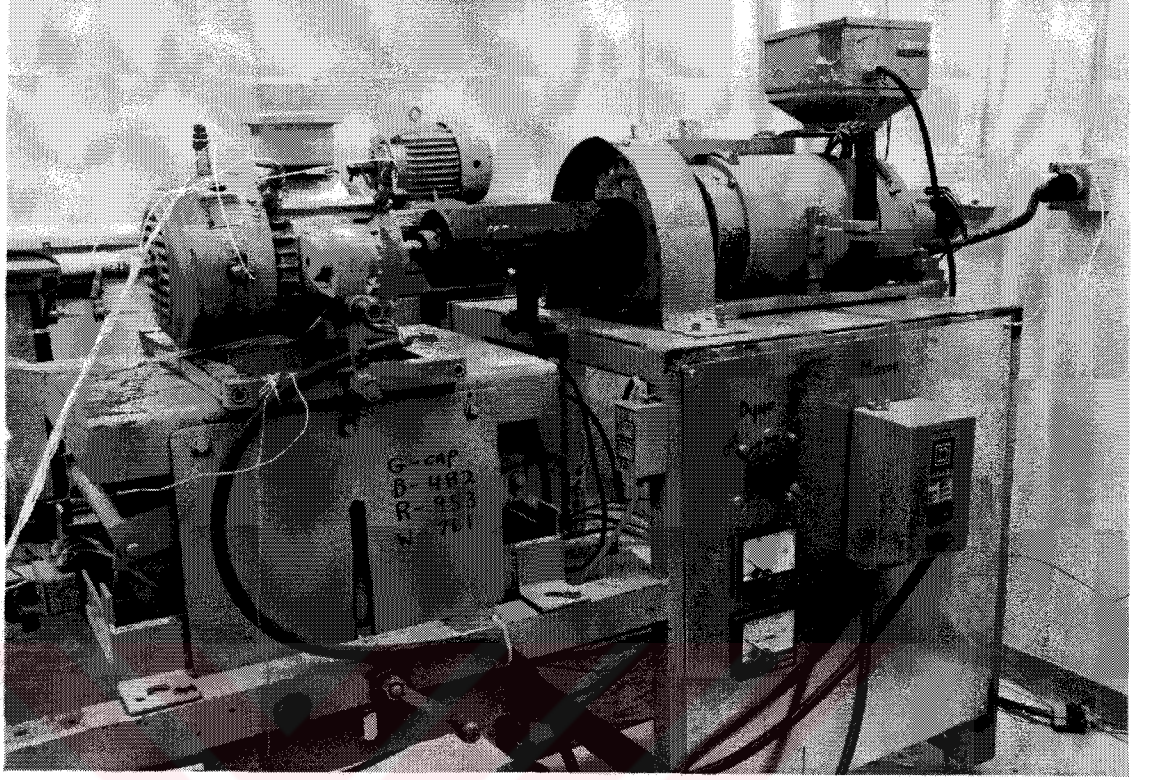
$$\text{Gerçek Frekans (Hz)} = 0.001 * (\text{RPM}) * (\text{Hesaplanmış Frekans Değeri}) \quad (5.1)$$



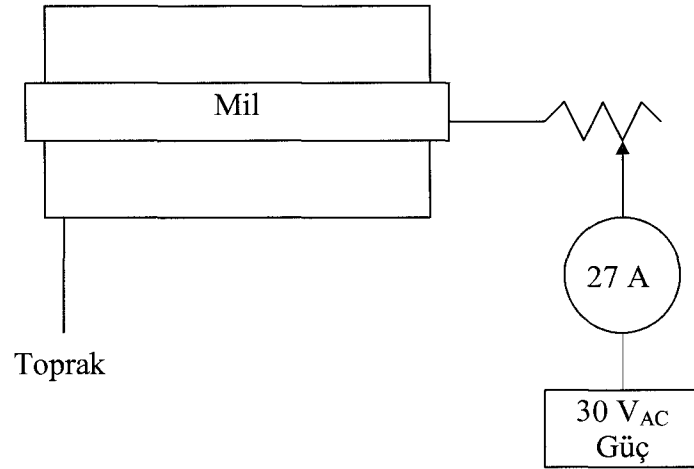
T: Sıcaklık (Toplamı 12)

V: Titreşim (Toplamı 6)

Şekil 5.4. Motor performans test düzeneğinin şeması.



Şekil 5.5. Motor performans test düzeneğinin fotoğrafı.



Şekil 5.6. Mile dışardan gerilim ve akım uygulayarak rulmanın eskitilmesi için düzenek.

Tablo 5.3. Laboratuvar fırınlarının özellikleri

Yapımcı	The Grieve Corporation 500 Hart Road Round Lake, Illinois 60073-9989
Model #	LW-201C
İç Boyutları	45.7 cm Genişlik, 30.5 cm Derinlik, 40.6 cm Yükseklik
Kapladığı Hacim	0.0566337 m ³
Dış Boyutları	50.8 cm Genişlik, 35.5 cm Derinlik, 63.5 cm Yükseklik
Maksimum Sıcaklık	200 °C
Raf Sayısı	2
Yalıtım	2.54 cm
Güç (W)	1600
Yaklaşık Taşıma Ağırlığı	30 kg

Tablo 5.4. Motor rulmanlarının 1000 devir/dak.'daki arıza frekansları [97]

Rulman Tasarımı	Bilye Sayısı	İç Bilezik Hatası (Hz)	Dış Bilezik Hatası (Hz)	Kafes Frekansı (Hz)	Bilye Hata Frekansı (Hz)	Bilye Çapı (mm)	Dış Açıklık Çapı (mm)	Temas Açısı (derece)
6205	9	90.250	59.750	6.639	78.58	7.938	39.040	0
6206	8	81.425	51.904	6.488	71.575	10.310	46.600	0



Şekil 5.7. Motor termal eskitme düzeneği.

5.3 Motor Yük Performans Testi ve Veri Toplama Sistemi

Her eskitme aşamasının sonunda motor performansı, sıfırdan tam yükün %115'ine kadar değişen çeşitli yükler altında test edilir. Bu testler mekaniksel, elektriksel ve termal parametrelerin izlenmesiyle motorun durumu hakkında bilgi de verir. Aşağıdaki lmler veri toplama sistemiyle kaydedilir.

- Motorun 12 farklı yerinden alınan sıcaklıklar,
- 3 faz motor gerilimi,
- 3 faz motor akımı,
- Dinamometre yük akımı,
- Dinamometre yük gerilimi,
- Motor hızı,
- Yük momenti,
- Piezoelektrik ivmeölçerleri kullanarak motor üzerinde 6 farklı yerdeki ivmelenmeler.

Verilerin toplanması sırasında işaret kuvvetlendirme, filtreleme ve toplama işlemleri *National Instruments* (NI) donanım ve yazılımıyla gerçekleştirildi.

Motor performans test düzeneği 3 kW dinamometre, ayarlanabilir motor platformu, niversel kavrama, takometre ve moment algılayıcısı içerir.

Dinamometrenin merkezinden bir kol vasıtasıyla 25.4 cm uzaklıktaki moment lerin yk hücresi Tablo 5.5'de gösterilen özelliklere sahiptir. Veri toplama panosu için analog çıkış üreten momentler ünitesinin detayları Tablo 5.6'da verilmiştir. Bu, yük hücresi ve çıkışlara g sağlar ve moment değerini gösterir.

Takometre geri-yansıtıcılı bir algılayıcı ve analog çıkış modüllü bir panel takometre içerir. Geri-yansıtıcılı algılayıcı motor milinde yansıyan her ışın demeti için bir kare darbe üretmek suretiyle motorun mil hızını ler. Takometre panelinin zellikleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Yük hücresinin zellikleri

Tip	Super-Mini Load Cell
Yapımcı	Interface, Inc. 7401 E. Butherus Dr. Scottsdale, Arizona 85260
Model	SM-100
Seri #	D09912
Kapasite	445 N
Çıkış, Gerilme	3.005 mV/V
Giriş Direnci	350 + 40 / -3.5 Ohm
Çıkış Direnci	350 ± 3.5 Ohm
Non-Lineerlik	< ± %0.03 Nominal Çıkış
Histerezis	< ± %0.02 Nominal Çıkış
Kompanze edilen sıcaklık aralığı	-17.8 °C - 66 °C
Sıfırdaki sıcaklık etkisi	± %0.15 Nominal Çıkış / 38 °C
Sıfır denge	< ± %1 Nominal Çıkış

Tablo 5.6. Momentlerin seçilmiş zellikleri

Tip	INFCS INFINITY C Strain Gage Meter
Yapımcı	Newport Electronics, Inc. 2229 South Yale St. Santa Ana, CA 92704-4426
Model #	9210-001
Seri #	6141673
Analog / Dijital İ Çözünürlüğü	15 bit
25 °C daki doğruluk	Okuma ± %0.03, 1–2s Birim Basamak Cevabı
Analog Çıkış Lineerliği	%0.2
Analog Çıkış Birim Basamak Cevap Zamanı	Son değerin %99 una 2 – 3 s de

Momentler, 0–133 Nm’ye 0–10 V’luk bir analog çıkış üretmesi için kalibre edildi.

Tablo 5.7. Takometrenin zellikleri

Tip	Panel Tachometer
Model	DT-5TG, DOP-FV, ve RS220H algılayıcı
Doğruluk	± %0.5 F.S.
Cevap Zamanı	20 ms > 50 Hz
Örnekleme Zamanı	10 ms
Max. Dalgalanma	50 mV p-p
İşletim Sıcaklığı	0 °C – 45 °C

Takometre, 0 – 2000 devir/dak.’da 0 – 10 V’luk bir çıkış üretmesi için kalibre edildi.

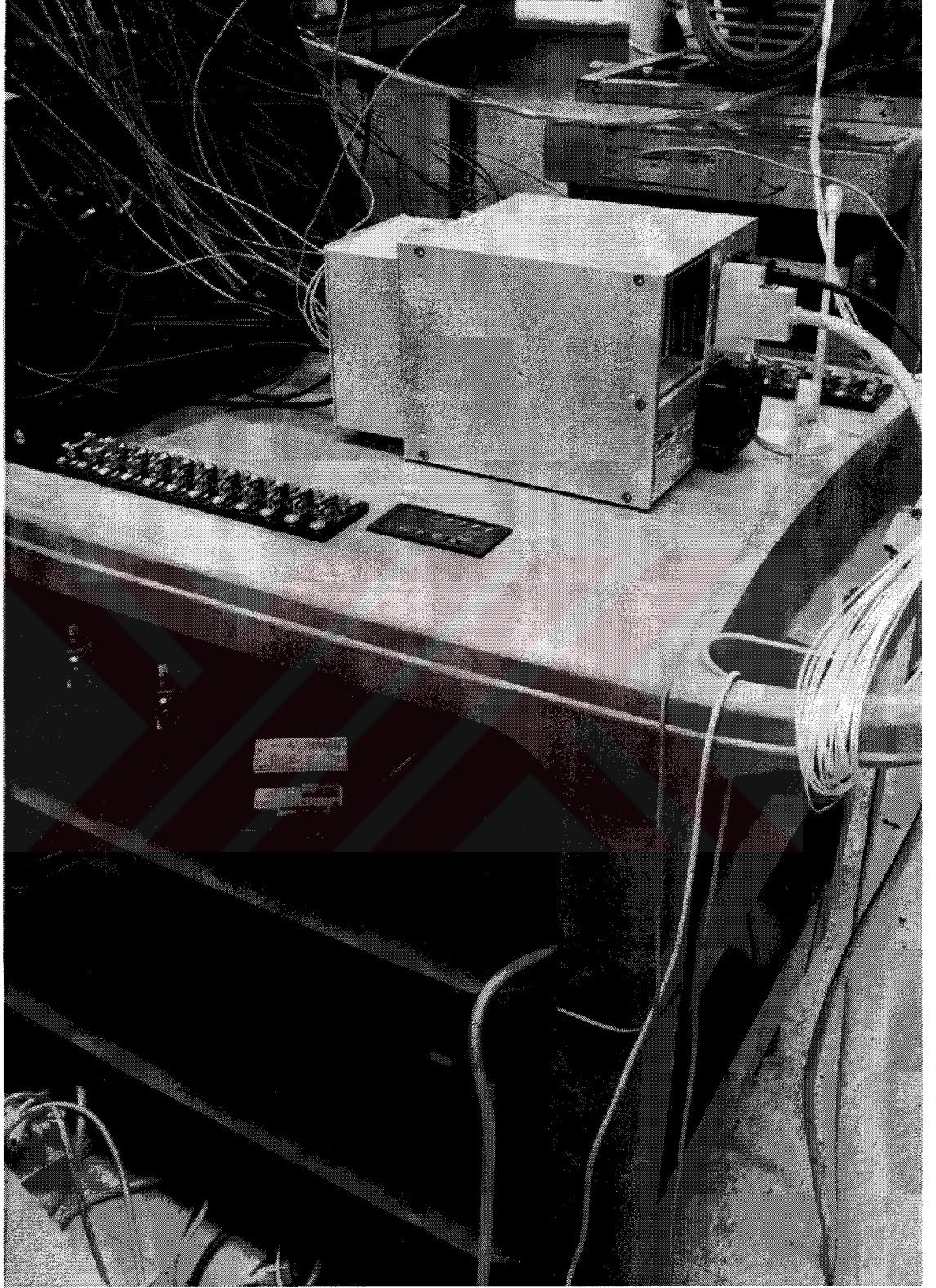
Şekil 5.8’de gösterildiği gibi, taşınabilir bir platform üzerine ek dönüştürücüler (transducer) ve işaret iyileştirme (conditioning) donanımı yerleştirilmiştir. Bu platformda aşağıdaki donanım vardır:

- Takometre paneli
- Momentölçer
- İvmeölçerler için 2 güç kaynağı
- 4 gerilim dönüştürücüsü (transducer)
- 4 Hall-etkili akım algılayıcısı
- Akım algılayıcıları için 2 güç kaynağı
- National Instruments SCXI işaret koşullandırma birimleri
- Algılayıcı çıkış integrasyonunu kolaylıkla sağlamak için Üniversal İşaret Dağıtım Panosu
- 110 Volt AC dalga koruyucusu.

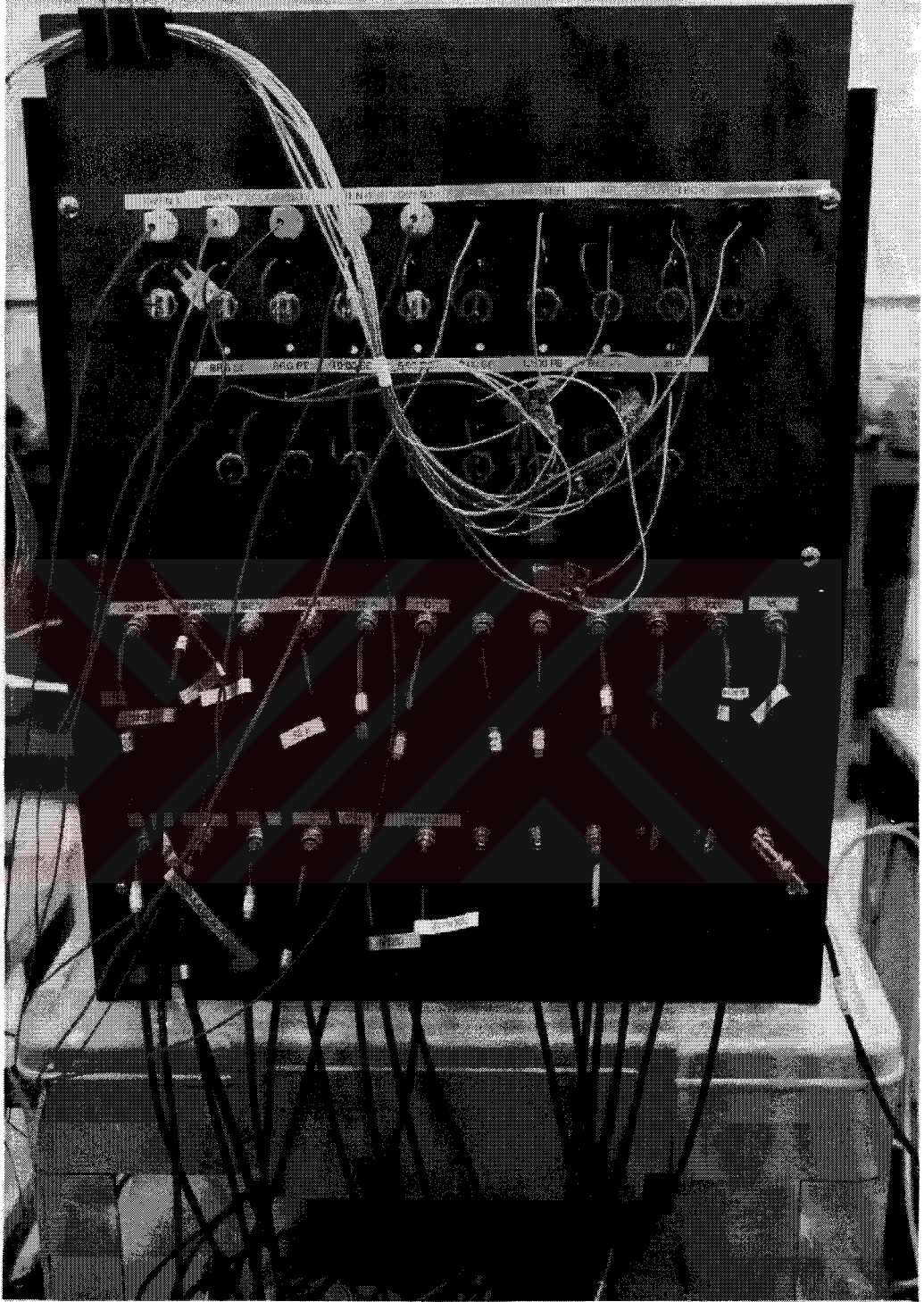
Platform üzerinde bu ünitelerin bağlantısı Şekil 5.9’da gösterilmiştir.

Veri toplama ve donanımına arayüz olarak görev yapan işaret dağıtım panosu Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

Her fazdaki gerilimi ve dinamometre yük gerilimini ölçmek için kullanılan gerilim dönüştürücülerinin detaylı tanımı Tablo 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Taşınabilir algılayıcılar, işaret iyileştirme donanımı ve işaret dağıtım panosu.



Şekil 5.10. Üniversal işaret dağıtım panosunun fotoğrafı

Tablo 5.8. Gerilim dönüştürücülerinin özellikleri

Algılayıcı Tipi	DC voltage Transducer
Yapımcı	Ohio Semitronics, Inc. 4242 Reynolds Dr. Hilliard, Ohio 43026-1264
Model #	VT7-009D
Frekans Aralığı	DC - 10000 Hertz
DC Gerilim	0 - 500 Volt
Çıkış	$\pm 10 V_{DC}$
Aşırı Yük	Tam ölçek oranının 2 katı
Dielektrik Test (Giriş / Çıkış / Kasa)	1500 V_{AC}
Aşırı yük	100000 Ohm dan büyük
Cevap zamanı	50 mikrosaniye
Ayarlanabilir alan hesabı	$\pm \%10$
Doğruluk	$\pm \%0.25$ F.S. @ dc. Lineerlik ve tekrarlanabilirlik etkisi dahil
Sıcaklık Etkisi	-10 °C to 60 °C: $\pm \%1.0$ RDG.
Çıkış Yükleme	2000 Ohm minimum
Alet gücü	110 V_{AC} , 60 Hz, 5 VA

Eğer iletken bir malzeme akım akışına dik olacak şekilde bir magnetik alana yerleştirilirse, hem başlangıç akım yönü ve hem de magnetik alanına dik olan yöndeki malzeme uçlarında gerilim oluşur. Bu gerilim Hall gerilimi olarak bilinir ve bu etkiyi 1879'da ilk gözlemleyen E. H. Hall'dir. Magnetik alan uygulanması sonucu çapraz elektrik alanı oluşturarak hareketli yük taşıyıcılarının normal yollarından sapmasıyla Hall gerilimi yükselir. Motor faz akımlarını ve dinamometre yük akımını ölçmek için kullanılan Hall etkili akım algılayıcılarının özellikleri Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Akım dönüştürücülerinin özellikleri

Algılayıcı Tipi	Hall Effect Current Sensor
Yapımcı	Ohio Semitronics, Inc. 4242 Reynolds Dr. Hilliard, Ohio 43026-1264
Model #	CTF-501T
Giriş Akımı	500 A _{AC} , 700 A _{DC}
Çıkış @ 500 A	100 mA
Sıcaklık Etkisi	- 40 °C - 80 °C: ± %0.5 FS
Doğruluk	± %0.3 FS Lineerlik, set noktası 25 °C deki offset etkisi dahil
Lineerlik	± %0.1 FS
Aşırı akım	800 A 3 Dak./Saat
DC yerleşme kaybı	Yok
Cevap Zamanı	1 mikrosaniye
di/dt	50 A/μs
Bant genişliği	150 kHz
Yalıtım (Giriş / Çıkış)	2500 V _{AC}
Yük	250 Ohm
Kaynak Gerilimi	± 15 V ± 1 V _{DC}
Uyarma Akımı	< ± 135 mA
Durgun Akım	< 35 mA + I _N

Gerilim dönüştürücüsü ve akım algılayıcısının gerilim çıkışı, giriş dalga şekliyle doğru orantılıdır. Bununla birlikte, akım algılayıcısında, veri toplamanın başında ölçülen ve sonradan ayarlanan bir dengeleme noktası vardır.

Bu deneyde kullanılan bir başka algılayıcı tipi; yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerdir. Bu ivmeölçerlerler motor üzerine aşağıda belirtilen yerlere yerleştirilmiştir.

- Süreç sonu (*Process End*) 2:00 saat konumu
- Süreç sonu (*Process End*) 10:00 saat konumu
- Motor arkası (*Short end*) dikey
- Motor arkası (*Short end*) yatay
- Motor arkası (*Short end*) eksenel
- Gövde (*Cover box*)

Bu ivme ölçerlerin özellikleri Tablo 5.10'da verilmiş ve Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

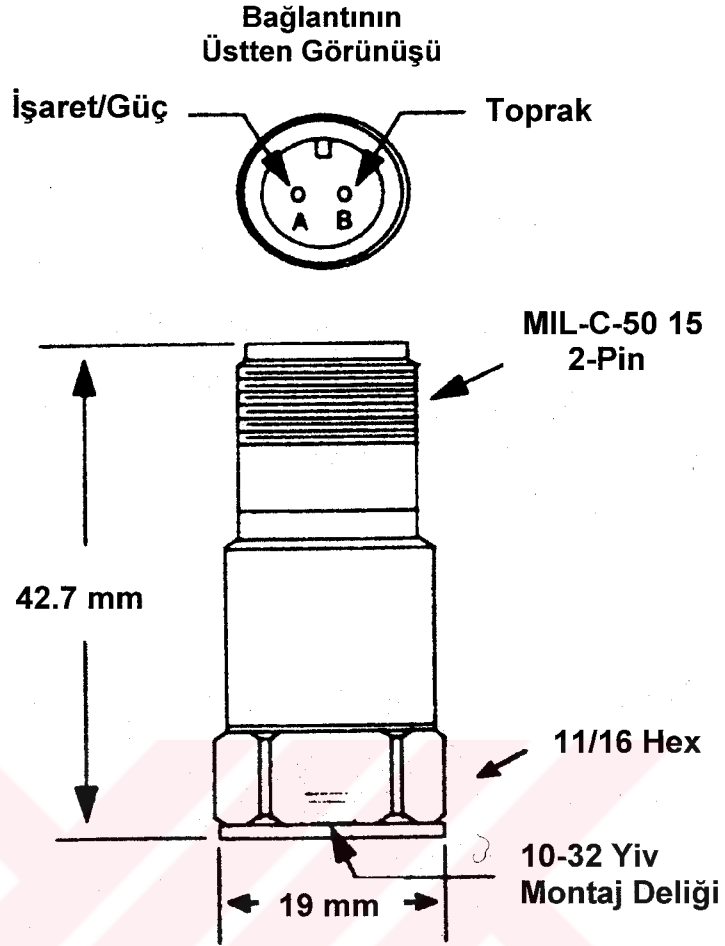
Motorlar 12 adet *J-tipi* sıcaklık algılayıcısı (thermocouple) ile donatılmıştır. Her algılayıcının sıcaklık aralığı 0 - 760 °C'dir ve oksitlenmiş, indirgen, durgun veya vakumlu ortamlarda kullanılabilir. Bu sıcaklık algılayıcıları *demir* ve *constantan* birleşiminden yapılmıştır.

Diğer taraftan, elektrik motoru rulmanlarının termal olarak eskitildiği fırınlarda bu tür hassas ölçümlere gerek yoktur. Bu yüzden fırın sıcaklığını izlemede *K-tipi* sıcaklık algılayıcıları kullanıldı. Bu algılayıcılar -200'den 1260 °C'a kadar olan sıcaklık aralığında çalışır ve *ChromegaTM* ve *AlomegaTM* birleşiminden oluşur.

Bütün algılayıcı çıkışları işaret dağıtım panosunda sonlandırıldı. İşaretler, *National Instruments* tarafından sağlanan işaret iyileştirme donanımı ile ön işleminden geçirilmiştir. Veri toplama için ± 10 V, 12 bit'lik analog-dijital çevirici kullanılmıştır.

Tablo 5.10. Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin özellikleri

Algılayıcı Tipi	High Frequency Industrial Acceloremeter
Yapımcı	Industrial Monitoring Instrumentation 3425 Walden Av. Depew, New York
Model #	323B01
Duyarlık	100 mV/g $\pm$ %5
Ölçme Aralığı	± 50 g
Çözünürlük	0.0002 g
Frekans Aralığı	144 – 480000 cpm $\pm$ %5 102 – 600000 cpm $\pm$ %10 48 – 9000000 cpm $\pm$ 3 dB
Bastırılan Rezonans Frekansı	40 kHz
Genlik Lineerliği	$\pm$ %1
Enine Duyarlılığı	$\leq$ %5
Şok Limiti	5000 g
Sıcaklık Aralığı	-54 - 121 °C
Çıkışın $\pm$ %1 ine Yerleşme Zamanı	5 saniye
Boşalma Zaman Sabiti	≥ 0.2 saniye
Spektral Gürültü	4.0 μ g/ $\sqrt$ Hz (10 Hz) 1.2 μ g/ $\sqrt$ Hz (100 Hz) 0.4 μ g/ $\sqrt$ Hz (1 kHz)
Kasa Yalıtım Koruması	RFI / ESD
Yayılan Elektriksel Gürültü	200 μ g (1 – 10 kHz)
Algılayıcı Eleman Yapısı	Seramik
Güç Kaynağı	Model 482A05 I.C.P. Güç Kaynağı



Şekil 5.11. Yüksek bant genişlikli ivmeölçer.

Kaydedilen Veri Formatı

12000 Hz de örneklenmiş yüksek frekanslı veri, kanal başına 10 s için toplandı. Sürekli hal işletim kriteri şöyle tanımlandı: Eğer motor sıcaklığı 3 dakika içinde 0.2°C'den fazla değişmiyorsa o zaman motorun sürekli hal işlemeye vardığı söylenir.

Yüksek frekans verisi aşağıdaki sırada kaydedilmiştir:

1. V_{xy} (Volt)
2. I_x (Amper)
3. V_{yz} (Volt)
4. I_y (Amper)
5. V_{zx} (Volt)
6. I_z (Amper)

7. $V_{Yük}$ (Volt)
8. $I_{Yük}$ (Amper)
9. Hız (Dakikadaki devir sayısı- RPM)
10. Moment (Nm)
11. Gövde Titreşimi (g)
12. Motor Arkası (*Short End*) Eksenel Titreşimi (g)
13. Motor Arkası (*Short End*) Yatay Titreşimi (g)
14. Motor Arkası (*Short End*) Dikey Titreşimi (g)
15. Süreç Sonu (*Pulley End*) 10:00 saat konumlu Titreşim (g)
16. Süreç Sonu (*Pulley End*) 2:00 saat konumlu Titreşim (g)

Bu veri dosyalarının sırası aşağıdaki gibidir:

1. %0 kalkış (dinamometre bağlı değil)
2. %0 sürekli hal (dinamometre bağlı değil)
3. %0 durdurma (dinamometre bağlı değil)
4. %0 kalkış
5. %10 yük
6. %25 yük
7. %50 yük
8. %75 yük
9. %100 yük
10. %115 yük
11. %115 durdurma

5.4 Verilerin Sınıflandırılması ve Rulman Arızasına İlişkin Algılayıcı Bilgisinin Belirlenmesi

Bu ön çalışma kaydedilen titreşim ölçümlerinin *RMS* değerlerinin hesaplanmasını ve titreşim işaretlerinin spektral analizi kapsar. Bu yolla analizde kullanılacak olan en uygun algılayıcı seçimi yapılmıştır.

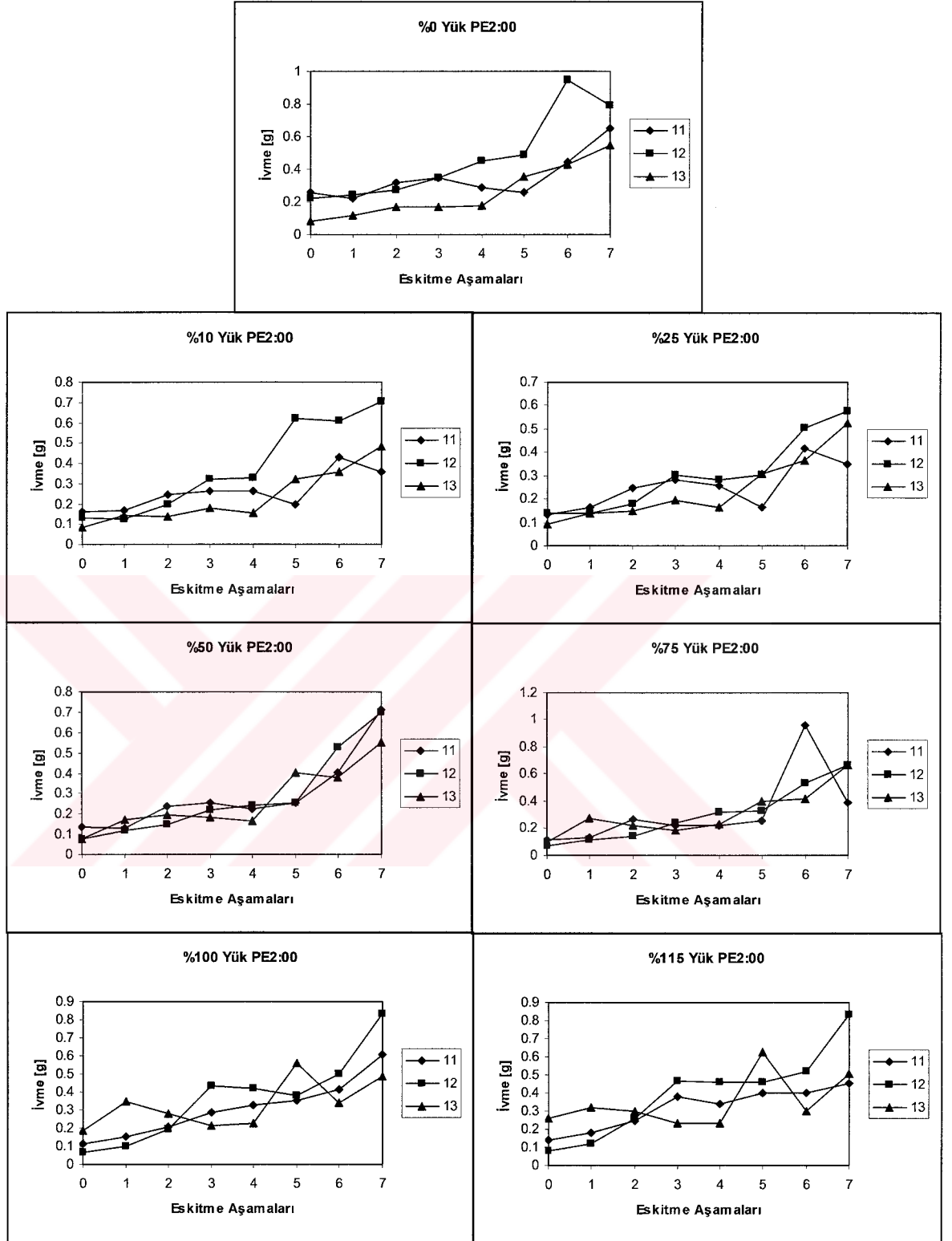
Motor eskitilmesi üç adet 5-HP üç-fazlı, 4-kutuplu asenkron motorlarda gerçekleştirilmiştir. Üç motor, akım geçişine bağlı rulman bozukluğunun

özelliklerini çıkartmak amacıyla eskitilmiştir. Bütün motorlarda 7 çevrim tamamlanmıştır.

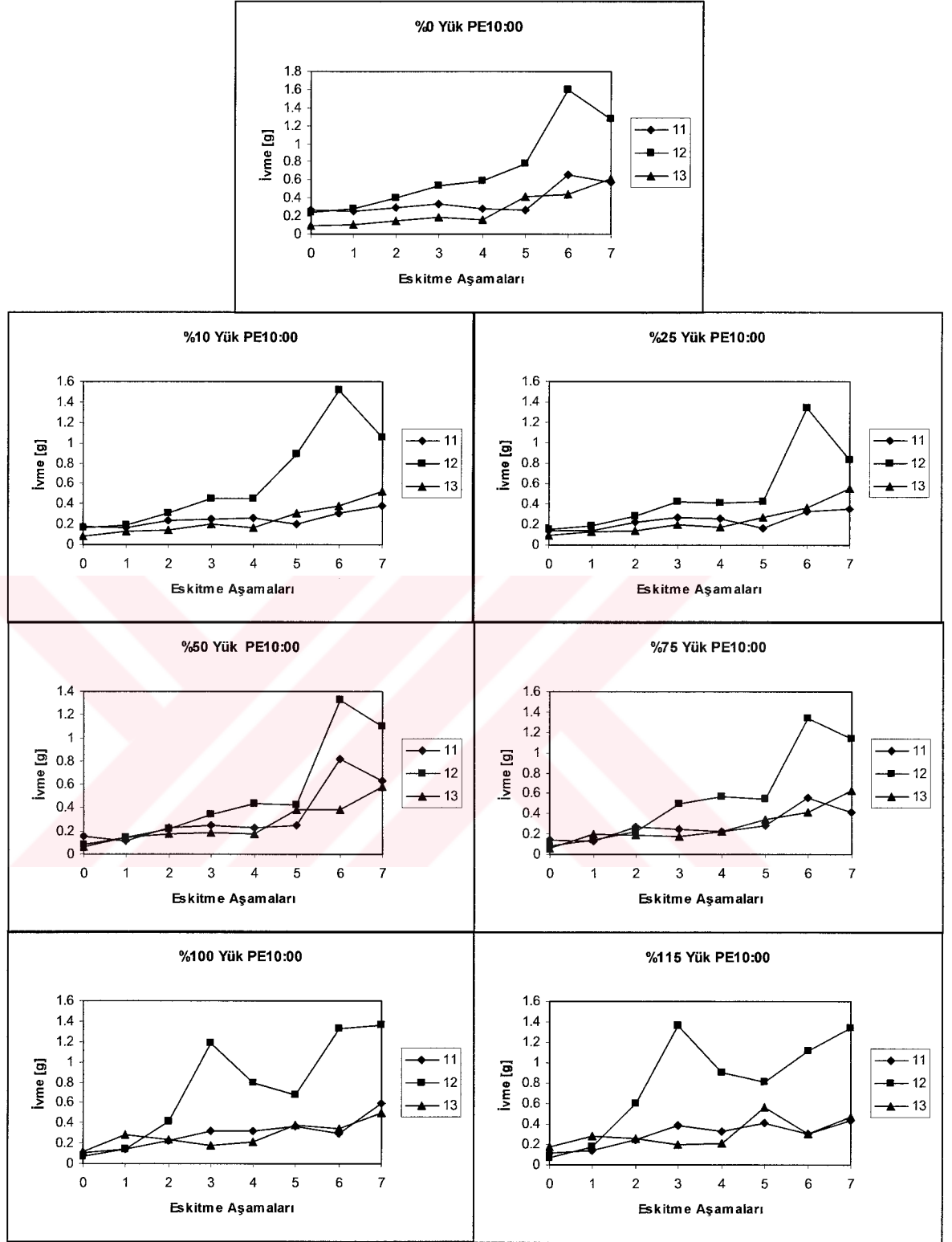
Deneyler sonunda motor #11, #12, #13 arızalandı. Akım geçişine bağlı rulman eskimesi, rulmanlarda en şiddetli hasara neden oldu ve titreşim seviyesi arttı. Hatta bu arıza gürültünün işitilmesiyle bile tanınabilir. Rulmanın termal eskitilmesi ve rulman içinden akım geçişi, motorun yüklendiği zaman rotorun sıkışmasına neden olur.

Şekil 5.12 ve 5.13 rulmanın akım geçişi yoluyla eskitilmesindeki süreç-sonu 2:00 ve 10:00 saat konumlu ivmeölçer işaretlerinin *RMS* değerlerini gösterir. Bunlar eskitmenin ilk 7 çevrimi ve bütün yük noktaları için çizilmiştir. Yükler %0, %0.1, %25, %50, %75, %100 ve %115 dir. Bu şekillerden rulman bozukluğu arızası durumunda süreç sonu 2:00 saat konumlu ivmeölçer verisinden %100 yük durumu için motor #11 de sürekli artan düzenli bir *RMS* trendi gözlendi. Bu nedenle analiz için kullanılacak en uygun titreşim verisi olarak %100 yükte 11 nolu motorun süreç sonu 2:00 saat konumundaki titreşim algılayıcısından alınan veri incelenecektir.

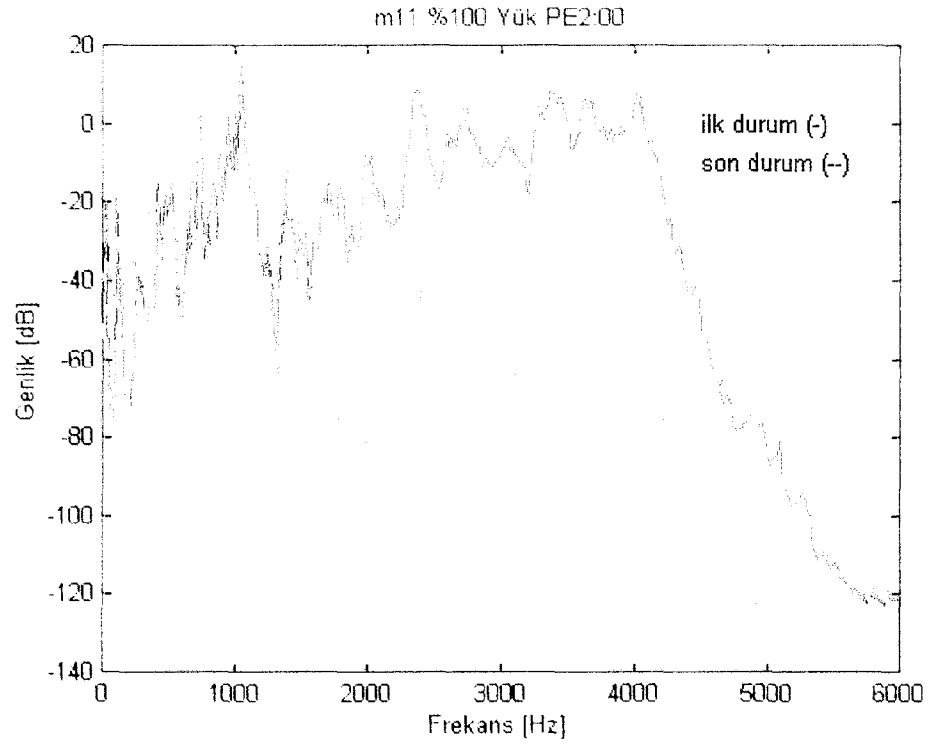
Süreç sonu 2:00 ve 10:00 saat konumlu ivmeölçer işaretlerinin spektrumları %100 yük durumu için Şekil 5.14 ve 5.15’de gösterilmiştir. Bu spektrumlara bakıldığında yüksek frekanslarda artış olduğu görülmektedir. Spektrumlar örtüşmesiz bir *Hanning* penceresi 120000 nokta üzerinde 1024 noktalı *FFT* olarak hesaplandı. Güç spektrumu yoğunluğunun hesaplanmasıyla ilgili bağıntılar EK B’de verilmiştir.



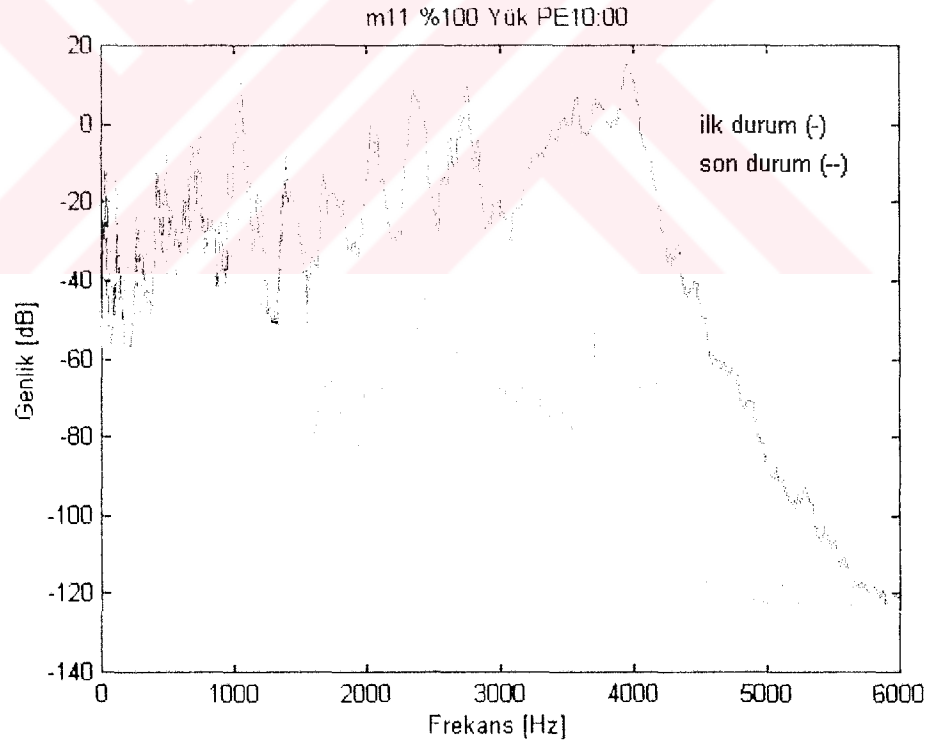
Şekil 5.12. Rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 2:00 saat konumlu ivmeölçer trendleri.



Şekil 5.13. Rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 10:00 saat konumlu ivmeölçer trendleri.



Şekil 5.14. Motor #11 rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 2:00 saat konumlu ivmeölçer spektrumu.



Şekil 5.15. Motor #11 rulman bozukluğu arızası durumu için süreç sonu 10:00 saat konumlu ivmeölçer spektrumu.

BÖLÜM 6

TİTREŞİM İŞARETLERİNE DAYALI ARIZA TANISI VE DURUM İZLEME ÇALIŞMASI

Bu bölümde, rulman arızasının özelliğini ortaya çıkarmak amacıyla motor hızlandırılmış eskitme deneylerinde toplanan veriler arasında bir önceki bölümde en uygun titreşim verisi olarak belirlenmiş olan %100 yükte 11 nolu motorun süreç sonu 2:00 saat konumundaki titreşim algılayıcısından alınan verilere ilişkin analizler yapılmıştır. Bu analizler; titreşim verilerinin istatistiksel özelliklerinin çıkartılarak yaşlanmayı gösteren parametrenin modellenmesini, erken uyarı ve motor rulmanlarının güvenilirlik seviyesinin öngörülmesini ve rulman arızasının dalgacık analiziyle de belirlendikten sonra arızaya ilişkin istatistiksel parametrelerin hesaplanmasını kapsar [14,98-101].

6.1 Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel Özelliklerinin Çıkartılması

Genel anlamda gözönüne alınan bir sistemden alınan işaretleri istatistiksel olarak inceleyerek sistem durumuna ilişkin bilgi çıkartmak stokastik tabanlı durum izleme çalışmasının temel yapısını oluşturur. Bu anlamda sistemden alınan süreç işaretlerine $\{x_i\}$ ilişkin bazı istatistiksel parametrelerin değişimlerinin gözlemlenmesi zaman içinde sistemin genel eğilimini belirler. Söz konusu bu istatistiksel parametrelerden bazıları sırasıyla, ortalama (μ), standart sapma (σ), çarpıklık (c) ve basıklık (k) dır [102,103].

Ortalama değer (birinci moment), işaretin genliklerinin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanıp aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.1)$$

Benzer şekilde, standart sapma da ($\sigma^2 = \text{varyans-ikinci moment}$)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (6.2)$$

biçimindedir. $\{x_i\}$ dizisinin dağılımının simetrikli durumdan sapmasının ölçüsünü veren çarpıklık (skewness-üçüncü moment) ise

$$c = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (6.3)$$

olup, dağılımın dikliğinin ölçüsünü gösteren basıklık (kurtosis-dördüncü moment) da aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$k = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (6.4)$$

Hesaplanan bu parametrelerin normal-simetrik bir dağılım durumunda $c = 0$ ve $k = 3$ değerlerini alması beklenir.

Bu istatistiksel parametreler bir işaretin istatistiksel davranışındaki değişikliklerin hızlı bir kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla kullanılabilir.

6.1.1 Motor Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel Analizi

Asenkron motor arızaları içerisinde daha sık görülen rulman arızalarının erken teşhisi amacıyla kullanılan standart yaklaşım, titreşim izleme tekniği olup bu yolla makina durumu hakkında kolaylıkla bilgi edinilebilir.

Rulman eskitme süreçleri sonrasında toplanan titreşim algılayıcı bilgisine ilişkin veri analizi gerçekleştirilerek, birinci momentten dördüncü momente kadar olan

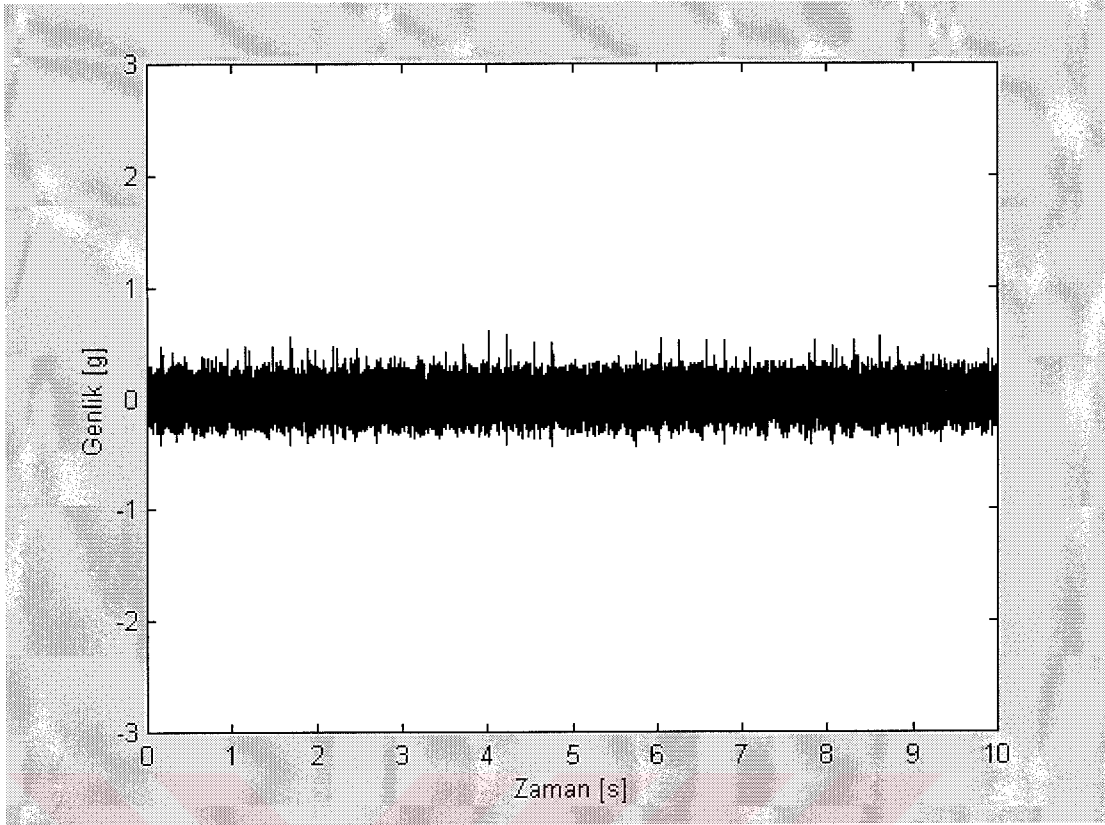
istatistiksel parametreler tüm eskitme (yaşlanma) süreçleri için Tablo 6.1'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. Eskitme süreçleri için hesaplanmış istatistiksel büyüklükler.

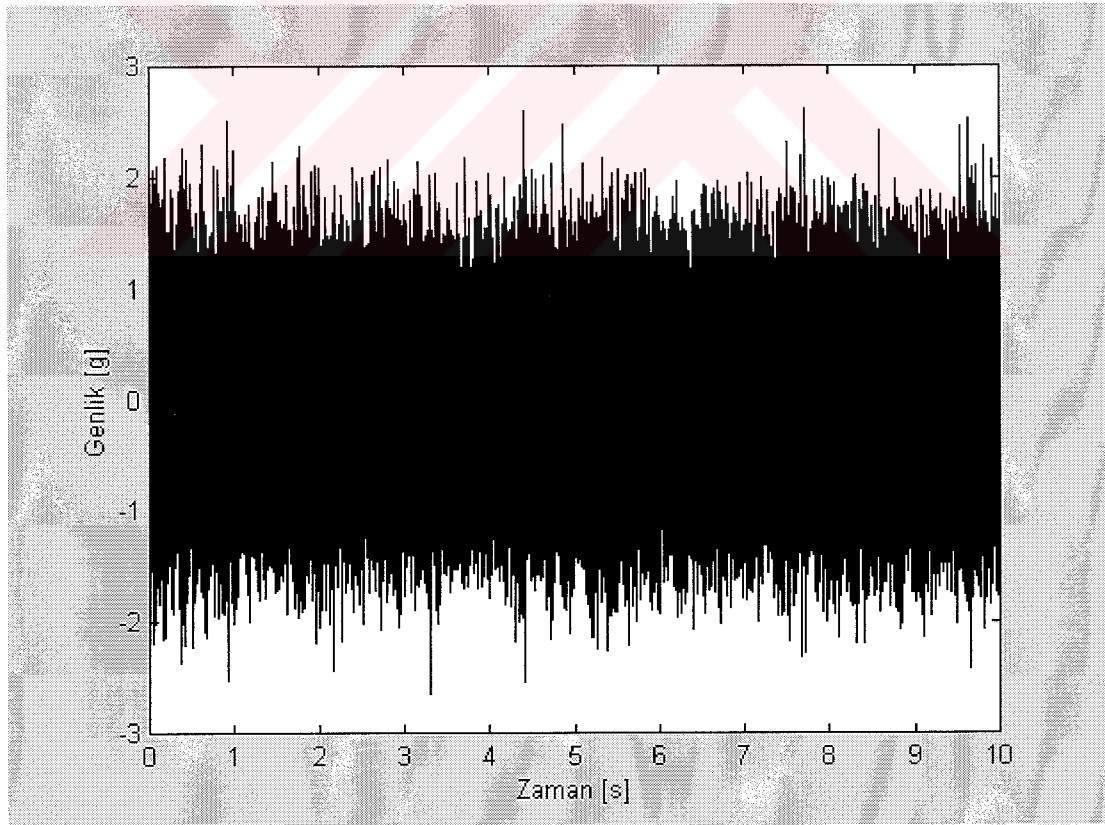
Eskitme Aşamaları	Aritmetik Ortalama (μ)	Standart Sapma (σ)	Çarpıklık (c)	Basıklık (k)
0	0.0016	0.1135	0.0591	2.9266
1	0.0014	0.1553	-0.0107	3.2875
2	0.0012	0.2082	0.0178	3.0367
3	0.0013	0.2894	0.0162	2.9985
4	8.7596e-004	0.3275	-0.0031	3.0409
5	0.0010	0.3548	-0.0019	2.9832
6	4.5360e-004	0.4147	-0.0103	2.9871
7	0.0030	0.6040	-0.0060	3.0093

Hesaplanan bu büyüklükler vasıtasıyla makina durum farklılıklarının istatistiksel parametrelerden sadece standart sapma değerlerindeki değişikliklere bağlı olduğu kolaylıkla gösterilebilir. Çünkü Tablo 6.1'e göre her bir durum için ortalama değer yaklaşık olarak sıfırdır. Titreşim verisinin tümü için hesaplanan standart sapma, elektriksel boşalma nedeniyle oluşan eskimeye bağlı rulman bozukluğu nedeniyle, son durumda ilk durumdakine göre 6 kat artmıştır. Ayrıca, çarpıklık ve basıklık parametrelerinin bütün durumlar için yaklaşık olarak $c = 0$ ve $k = 3$ değerlerini almasından dolayı olasılık yoğunluk fonksiyonlarının da normal dağılımlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Motor titreşim işaretlerinin sağlam ve yedinci eskitme aşaması sonundaki değişimleri eskitme aşamalarına bağlı olarak Şekil 6.1 ile, bunların olasılıksal dağılım fonksiyonları ise Şekil 6.2 ile aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

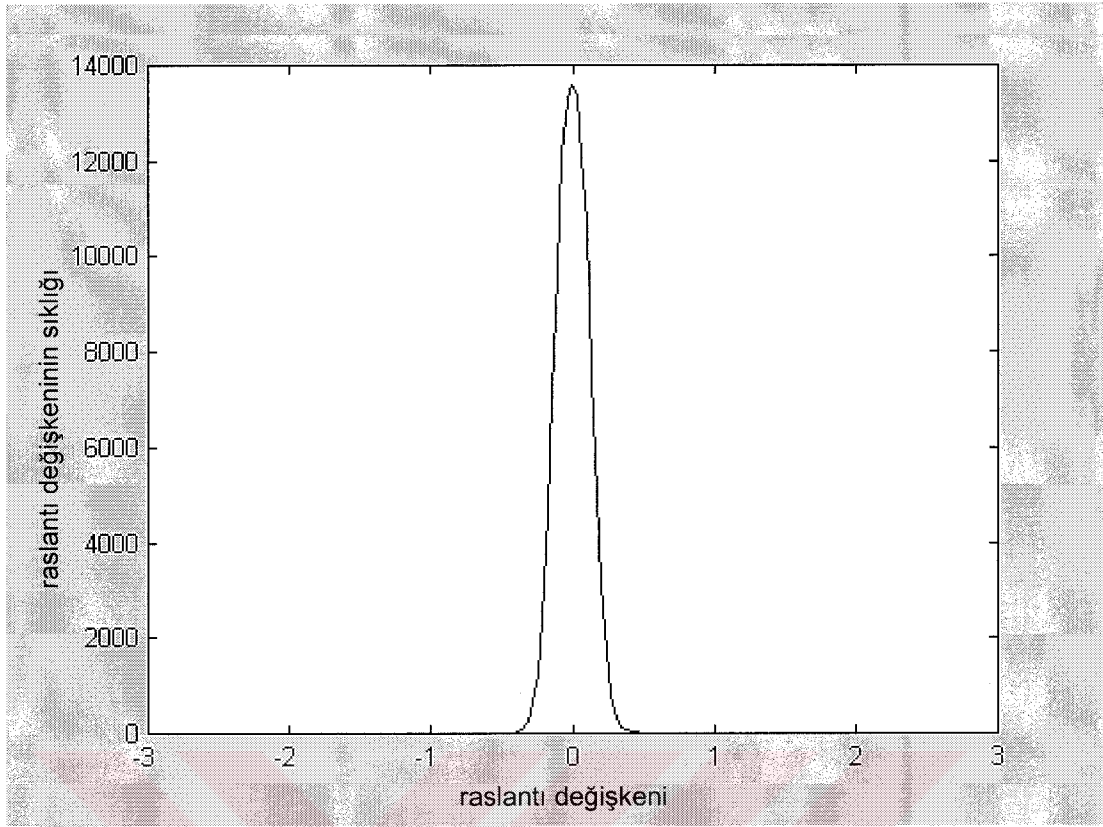


a)



b)

Şekil 6.1. Titreşim işaretleri. a) Sağlam, b) Bozuk durum.



a)



b)

Şekil 6.2. Olasılık dağılım fonksiyonları. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.

6.1.2 Rulman Bozulma Modeli ve Erken Arıza Tanısı

Rulman arızasının ortaya çıktığı süreç, istatistiksel bir arıza belirleme seviyesi ile saptanmıştır. Buradaki arıza belirleme seviyesi özellikle normal dağılımlı işaretlerde genlik değerlerinin 3σ seviyesini aşma kriterine göre belirlenmiş olup, istatistiksel parametreler bakımından da en baskın parametrenin standart sapma değeri olduğu gösterilmiştir. Bu anlamda başlangıç durumundaki $3\sigma_0$ değeri temel alınarak $\pm 3\sigma_0$ aralığında %99.7 olasılıkla, gözlenen durumunun sağlam olduğu kabul edilebilir ve bunu aşan standart sapma değerleri ise bozuk duruma karşı gelen değerler olarak tanımlanabilir. Bu amaçla tanımlanan *Kritik Standart Sapma (KSS)* değeri

$$KSS = \mu_0 + 3\sigma_0 \quad (6.5)$$

olarak verilebilir. Buradan motorun sağlam durumuna ilişkin titreşim işaretinin ortalama ve standart sapma değerlerinden (bkz. Tablo 6.1) $KSS = 0.0016 + 3 \times 0.1135 = 0.3421$ olarak hesaplanır. Bu değer doğruluğu %99.8 güven aralığında, ki-kare testi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Tablo 6.1’ de verilen standart sapma değişiminin ortalaması 0.3084 ve varyansı $s^2 = 0.0247$ olarak hesaplanır. Serbestlik derecesi $\nu = 8-1 = 7$ ve $\alpha = 0.02$ için %99.8 güven aralığı da, ki-kare değerleri $\chi_{0.99}^2 = 1.239$ ve $\chi_{0.01}^2 = 18.48$ olarak ki-kare tablosundan [104] bulunabilir. Bu durumda kritik standart sapmanın %99.8 güven aralığı için

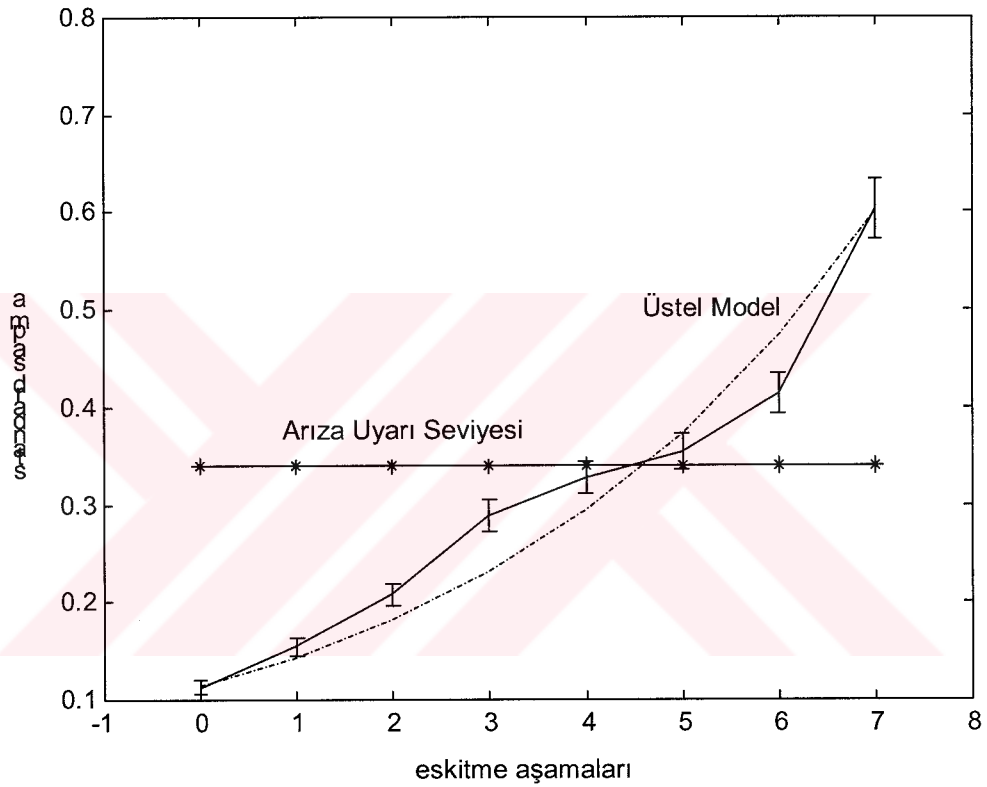
$$\sqrt{\frac{\nu \times s^2}{\chi_{\alpha/2}^2}} < KSS < \sqrt{\frac{\nu \times s^2}{\chi_{1-\alpha/2}^2}}$$

ifadesi kullanılarak, $0.0967 < KSS < 0.3736$ olarak hesaplanır ve (6.5) denkleminde 0.3421 olarak hesaplanan KSS değerinin bu aralıktaki kaldığı gösterilmiş olur. Ayrıca titreşim verisindeki standart sapmanın değişimi üzerine kurulan bir modelle de eskime sürecinin üstel bir modeli aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\sigma_n = \sigma_0 \exp \left[\frac{n}{4.2} \right] \quad (6.6)$$

Burada n , herhangi bir eskime sürecini temsil eden tam sayı olup, σ_0 ve σ_n sırasıyla sağlam ve herhangi bir bozuk durum için standart sapma değerleridir. Bu tür bir model ömür tahmini uygulamalarında kullanılabilir.

Her eskitme süreci için 12 kHz'de örneklenen 10 s'lik veri 1000 noktalı 120 parçaya ayrılmış ve bu parçaların ortalama değerleri ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Şekil 6.3'de eskimeyi yansıtan en baskın parametre olan standart sapmanın ortalama değeri etrafındaki standart sapma değişimi, $KSS = 0.3421$ olarak hesaplanan arıza uyarı seviyesi ve standart sapma değişiminin üstel modeli olarak (6.6) bağıntısı ile hesaplanan değerlerin değişimi gösterilmiştir. Buna göre arıza uyarı seviyesi gözönüne alınarak 4. eskitme aşaması fark edilebilir rulman bozukluğunun oluşmaya başladığı aşama olarak belirlenir.



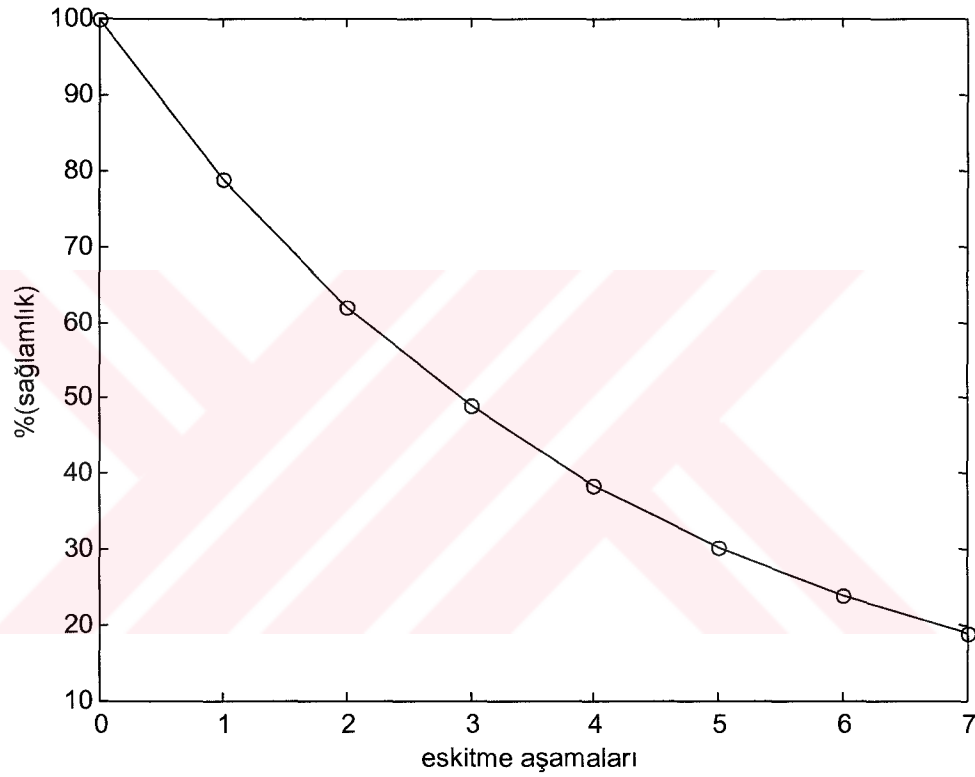
Şekil 6.3. Standart sapmanın değişimi üzerine dayalı üstel model ve arıza uyarı seviyesi.

Bu modelden hareketle, her bir aşamada motor rulmanlarının sağlamlığına ilişkin bir güvenilirlik seviyesi aşağıdaki tanım yardımıyla verilebilir.

Tanım: Gözönüne alınan normal dağılımlı, ardışık yaşlanma süreçleri arasında en baskın parametre standart sapma olarak saptanmışsa, yaşlanma süreci boyunca sağlam kalma derecesini veren büyüklük, sağlam ve herhangi bir bozulma seviyesindeki standart sapma değerleri arasındaki oran ile verilebilir.

$$r_n \triangleq \frac{\sigma_0}{\sigma_n} \quad (6.7)$$

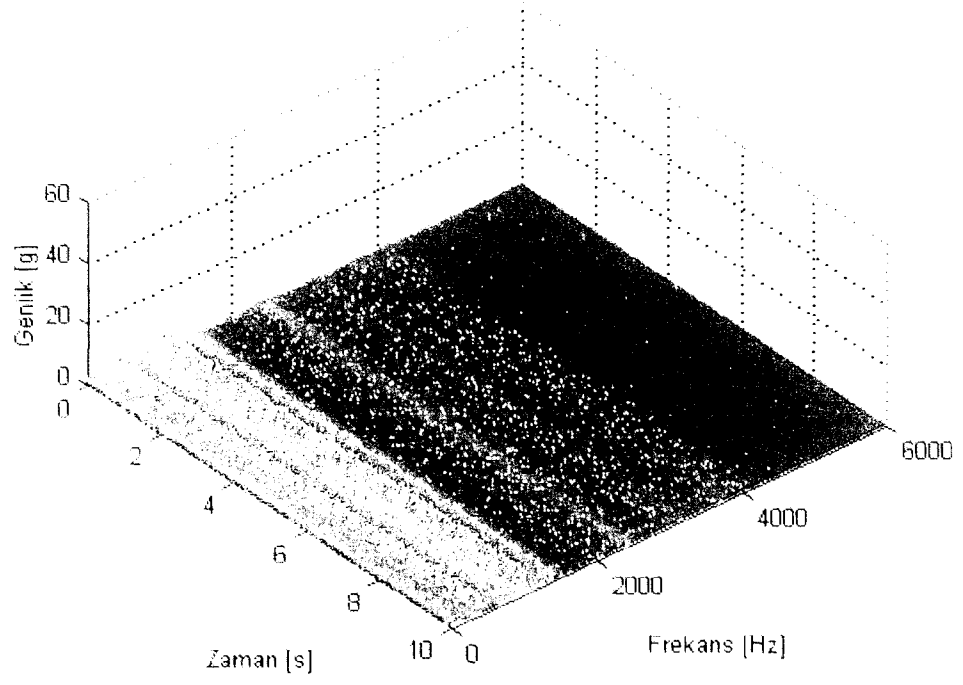
Denklem (6.7) vasıtasıyla $n = 0$ 'dan $n = 7$ 'ye kadar olan bütün aşamalarda rulman sağlamlığının yüzde cinsinden derecesi kolayca gösterilebilir. Ayrıca bu oran, Denklem (6.6) yardımıyla güvenilirlik oranı olarak da yorumlanabilir. Denklem (6.7) ile her bir aşamadaki sağlamlığın yüzde olarak ($\%R_n$) derecesi $R_n = r_n \times 100$ olarak tanımlanmış ve buna ilişkin değişim ise aşağıdaki şekille gösterilmiştir. Buna göre dördüncü aşama öncesinde sağlamlık oranı yaklaşık olarak % 40 mertebesinde dir.



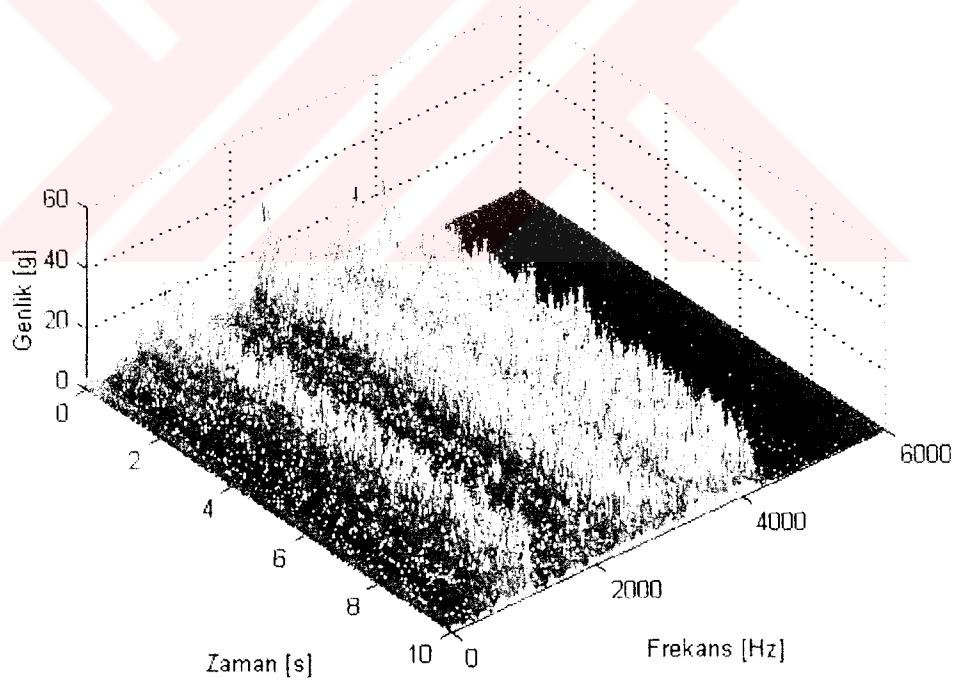
Şekil 6.4. Motor rulmanının eskitleme aşamalarına göre sağlamlık yüzdeleri.

6.2 Titreşim İşaretlerinin Spektral Analizi

Arıza tanısında sıkça kullanılan diğer önemli bir teknik frekans izleme tekniğidir. Bu yolla büyük genlikli baskın frekanslar belirlenerek makinanın durumu hakkında bilgi elde edilebilir. Bu amaçla titreşim işaretlerinin Kısa-zaman Fourier dönüşümleri yapılarak baskın frekanslar belirlenmiştir. Matematiksel tanımı EK C'de verilmiş olan Kısa-zaman Fourier dönüşümü işarettaki frekans bileşenlerinin hangi zamanlarda oluştuğu hakkında da bilgi verir. Şekil 6.5'de titreşim işaretlerinin ilk ve son durum için Kısa-zaman Fourier dönüşümleri gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 6.5. Titreşim işaretlerinin KZFD'leri. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.

Şekillerde görüldüğü gibi son durumda 1 kHz ve daha yüksek frekanslı işaretler gözlenmektedir. Bu yüksek frekanslar rulman arızası kaynaklı titreşimin sonucunda oluşmuştur. Ayrıca, titreşim işaretleri için frekans aralığının 0-6 kHz arasında tanımlı olmasına rağmen, bu şekillerde 4 kHz'e kadar olan değişimin gözlenmesinin nedeni, bu frekans değeri sonrası için filtreleme yapılmış olmasıdır.

6.3 Arızanın Titreşim İşaretlerinden Dalgacık Analizi ile Belirlenmesi ve İstatistiksel Özellikler

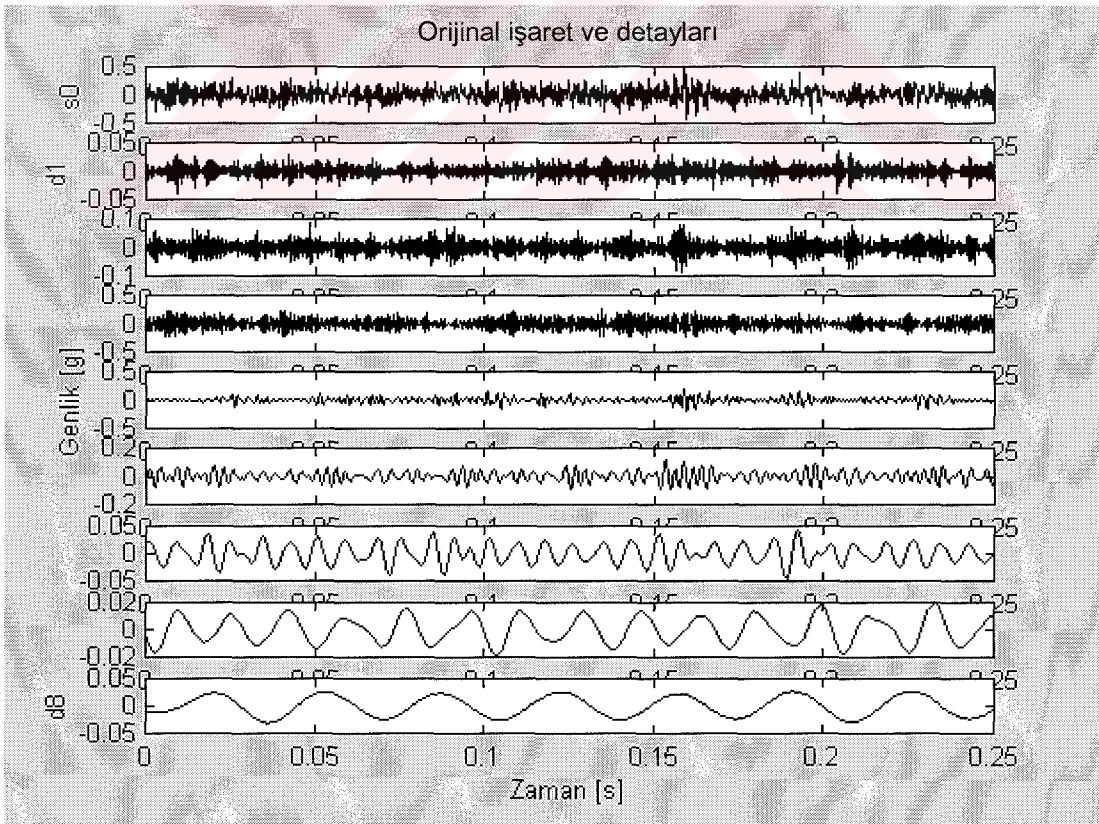
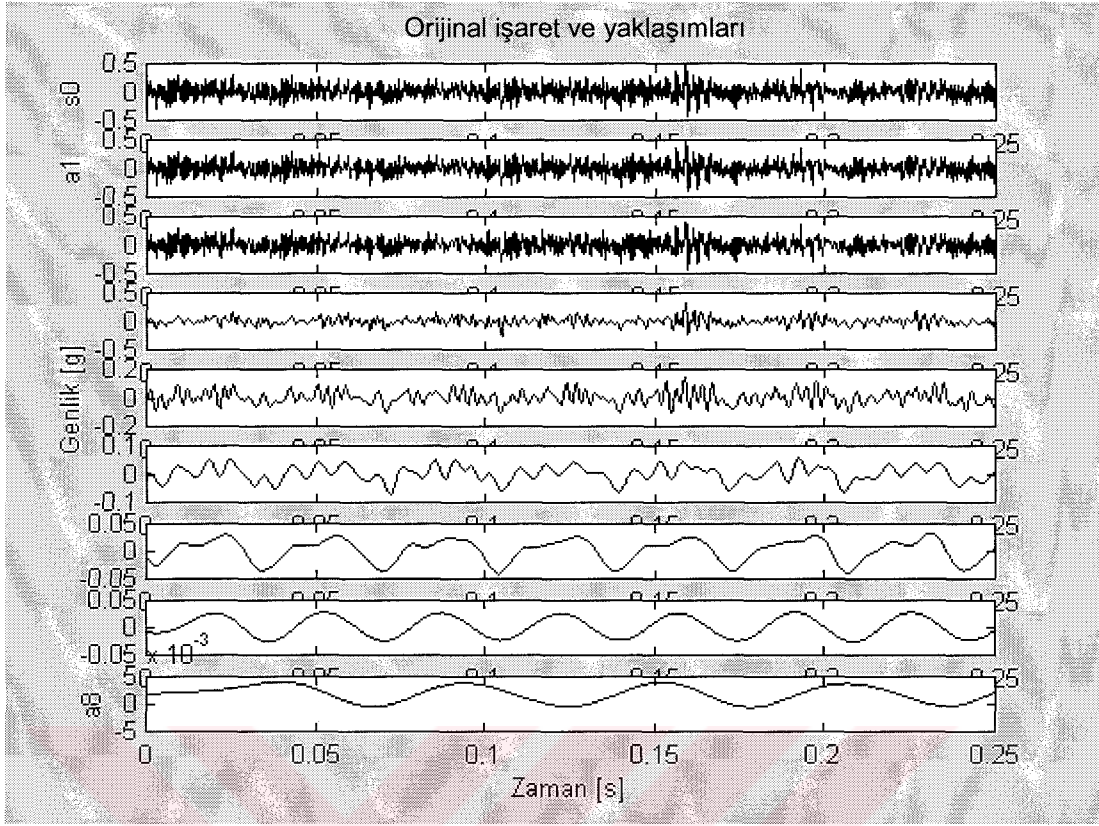
Titreşim işaretlerinin spektral analizinin yapılması sonucunda 1 kHz ve daha yüksek frekansların rulman arızasını gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bu frekansların daha detaylı bir analizi amacıyla dalgacık dönüşümü titreşim işaretlerine uygulanmıştır.

Şekil 6.1'de verilen titreşim işaretlerine ilişkin çok çözünürlüklü dalgacık analizi yapılmıştır. Bu amaçla işaretler Tablo 6.2'de verildiği gibi 8 ayrı seviyede frekans alt bantlarına ayrıştırılmıştır.

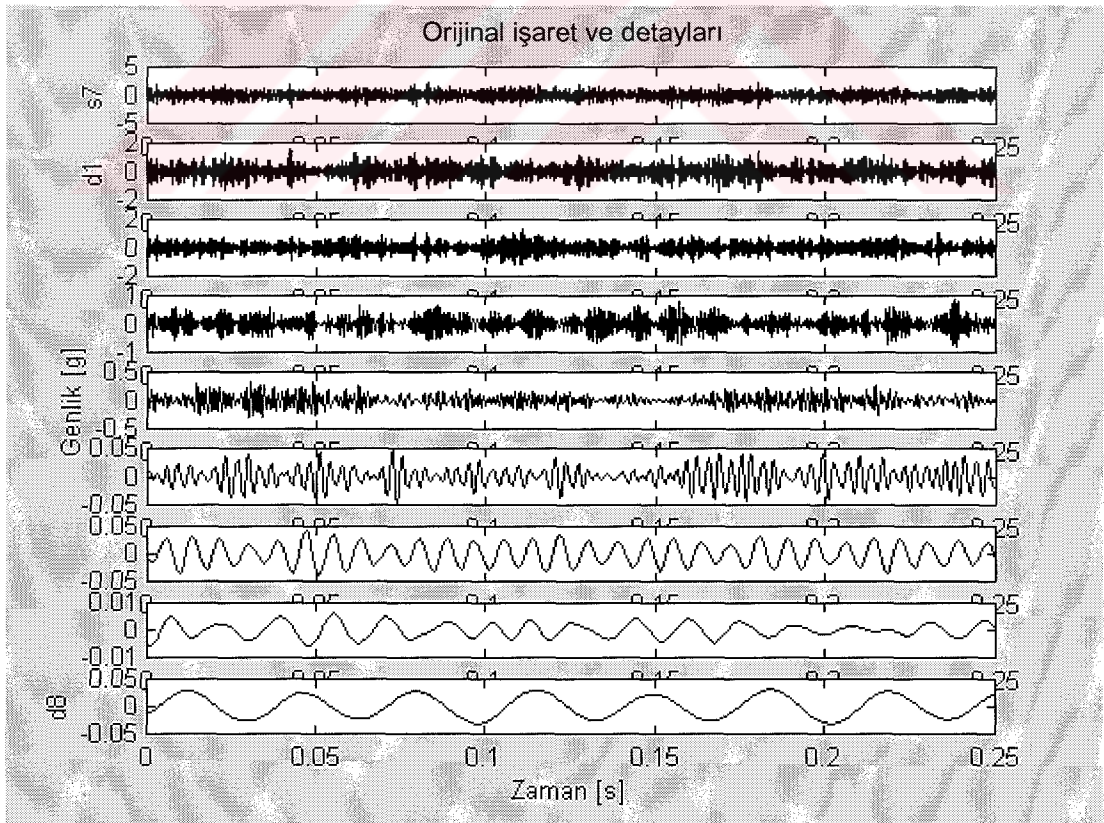
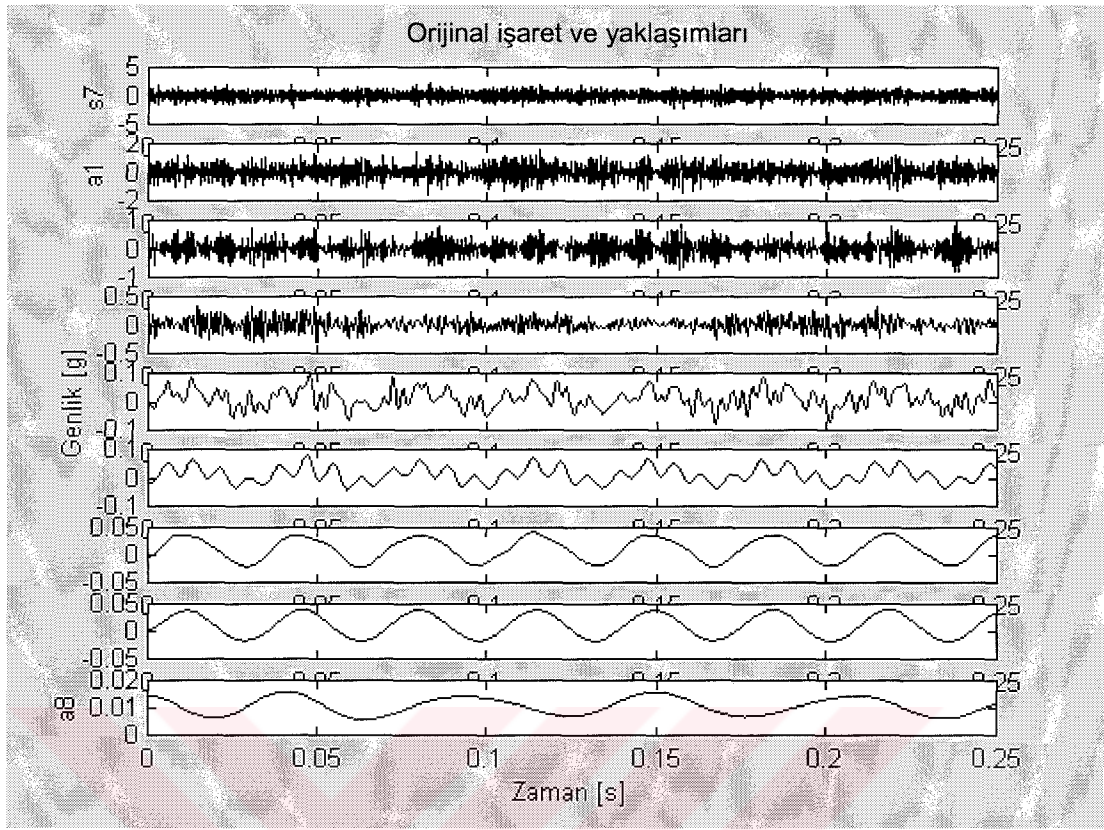
Çok Çözünürlü Dalgacık (ÇÇD) Analizinin makinanın başlangıç (sağlam) ve son eskitme (arızalı) aşamasına ilişkin verilere uygulanması sonucunda Şekil 6.6 ve Şekil 6.7 ile gösterildiği gibi, yaklaşım ve detay katsayılarının değişimleri elde edilmiştir.

Tablo 6.2. Titreşim işaretinin frekans alt bantları

Yaklaşımlar (a)	Alt bantlar (a) (Hz)	Detaylar (d)	Alt bantlar (d) (Hz)
a1	0 – 3000	d1	3000 – 6000
a2	0 – 1500	d2	1500 – 3000
a3	0 – 750	d3	750 – 1500
a4	0 – 375	d4	375 – 750
a5	0 – 187.5	d5	187.5 – 375
a6	0 – 93.75	d6	93.75 – 187.5
a7	0 – 46.88	d7	46.88 – 93.75
a8	0 – 23.44	d8	23.44 – 46.88



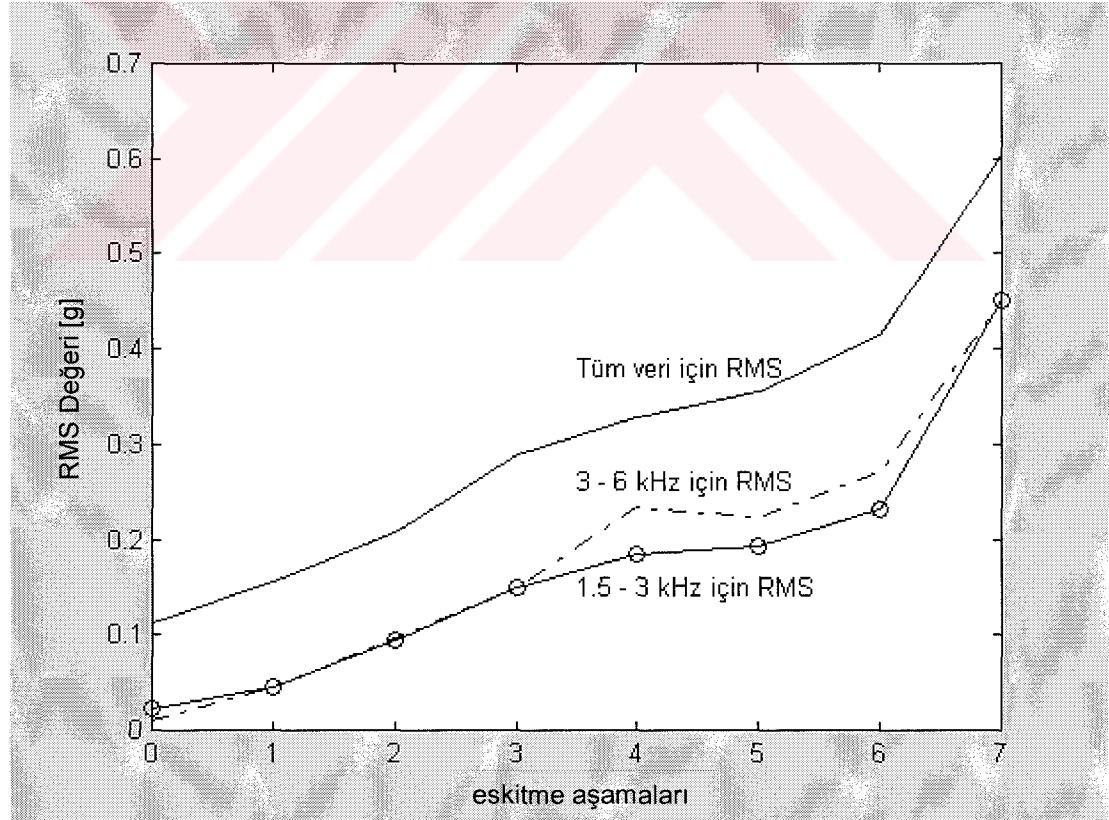
Şekil 6.6. Başlangıç durumu için titreşim (s0) verisinin ÇÇD analizi.
a) Yaklaşımlar, b) Detaylar.



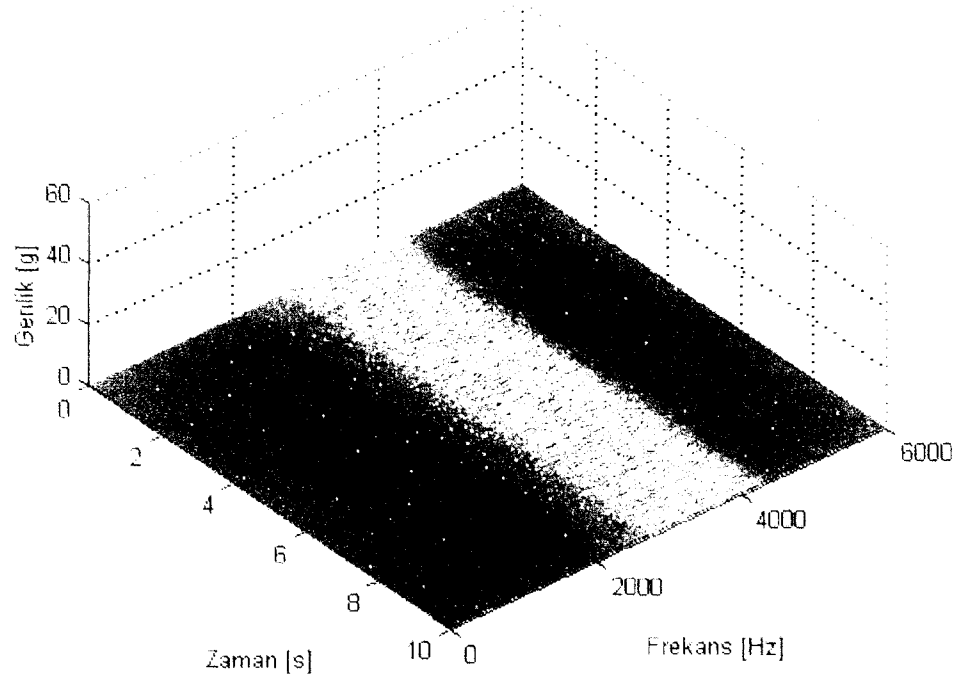
Şekil 6.7. Yedinci eskitme aşamasında titreşim (s7) verisinin ÇÇD analizi.
a) Yaklaşımlar, b) Detaylar.

Analizde kullanılan dalgacık tipleri Shannon entropi fonksiyonu şeklinde tanımlanmış enerji fonksiyonunun minimize edilmesiyle saptanmış olup, sağlam durumda s0 verisi için Daubechies-20, yedinci eskitme aşaması sonucunda elde edilen s7 verisi için ise Daubechies-15 dalgacık tipleri kullanılmıştır. Buna göre titreşim işaretlerinin her bir aşama için hesaplanan bazı alt bantlarındaki RMS değerleri elektriksel boşalma yoluyla oluşan rulman arızasına bağlı olarak belirli bir eğilim göstermiştir. 0-7 arasındaki tüm süreçlerin d1 detay değişimlerine ve işaretin kendisine ait RMS değerlerinin hesaplanması sonucunda, en iyi iki eğilimin 1.5-3 kHz ve 3-6 kHz'lik alt bantlarda olduğu gözlenmiştir. Bu durum Şekil 6.8'den de görülebilmektedir. Böylece bu iki frekans aralığı rulman arızasına ilişkin özelliği de tanımlanmış olur.

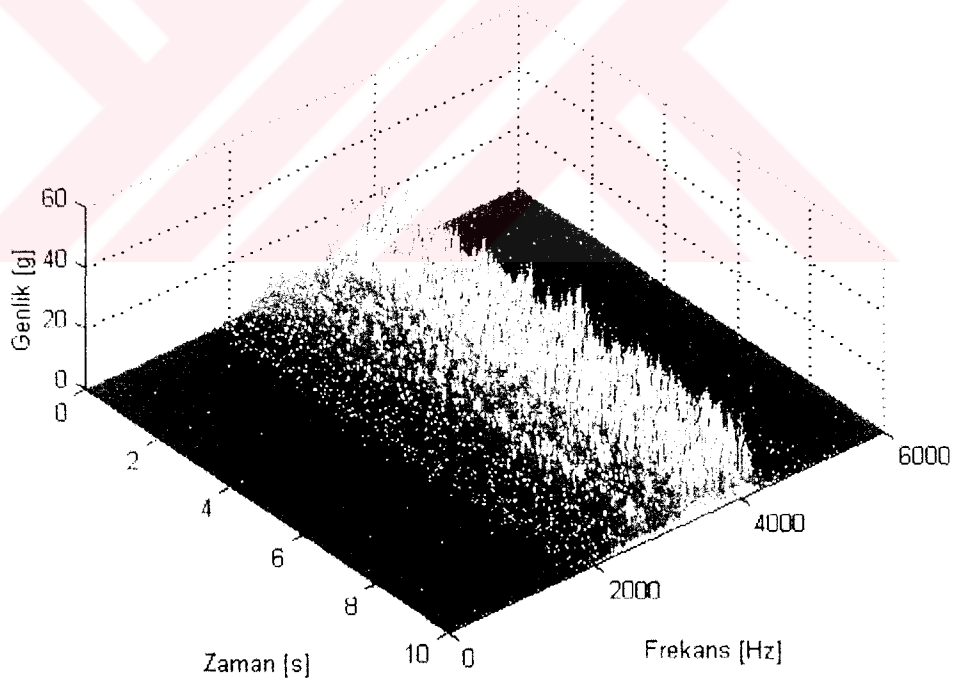
Bu durumda 3-6 kHz alt bantlarına ilişkin (d1) işaretlerinin Kısa-Zaman Fourier Dönüşümünün (KZFD) alınmasıyla da, sözkonusu bu özelliğin Şekil 6.9 b)'deki gibi 2-4 kHz arasında oluştuğu gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Titreşim işaretinin kendisi ve d1, d2 detaylarının tüm süreçler için RMS değişimi.



a)



b)

Şekil 6.9. d1 detaylarına ilişkin KZFD analizi. a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.

Sağlam durum ve bozuk durumdaki işaretler dalgacık analiziyle 8 seviyede frekans alt bantlarına ayrıştırılmış ve en baskın frekans bantları olan d1 ve d2 bantı için de ayrıca istatistiksel parametreler hesaplanmış ve bunlar Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. Alt bantlar için istatistiksel büyüklükler.

Eskitme Aşamaları	Alt Bantlar	Aritmetik Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık
0	d1	7.9184e-008	0.0096	-0.0027	4.6074
	d2	1.0862e-007	0.0215	-3.3848e-004	3.6335
7	d1	4.2245e-006	0.4514	-0.0022	3.0244
	d2	-1.6194e-006	0.3276	-4.9954e-004	2.9972

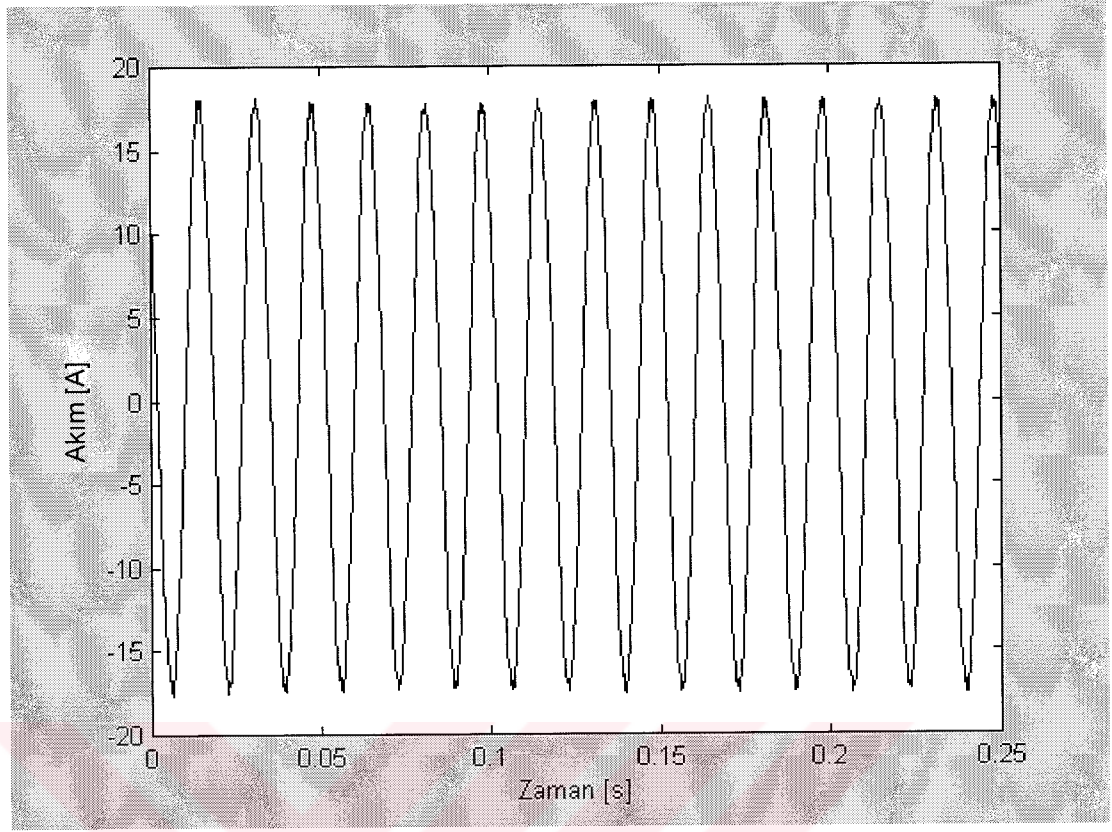
BÖLÜM 7

MOTOR AKIM İŞARETLERİNİN ANALİZİ

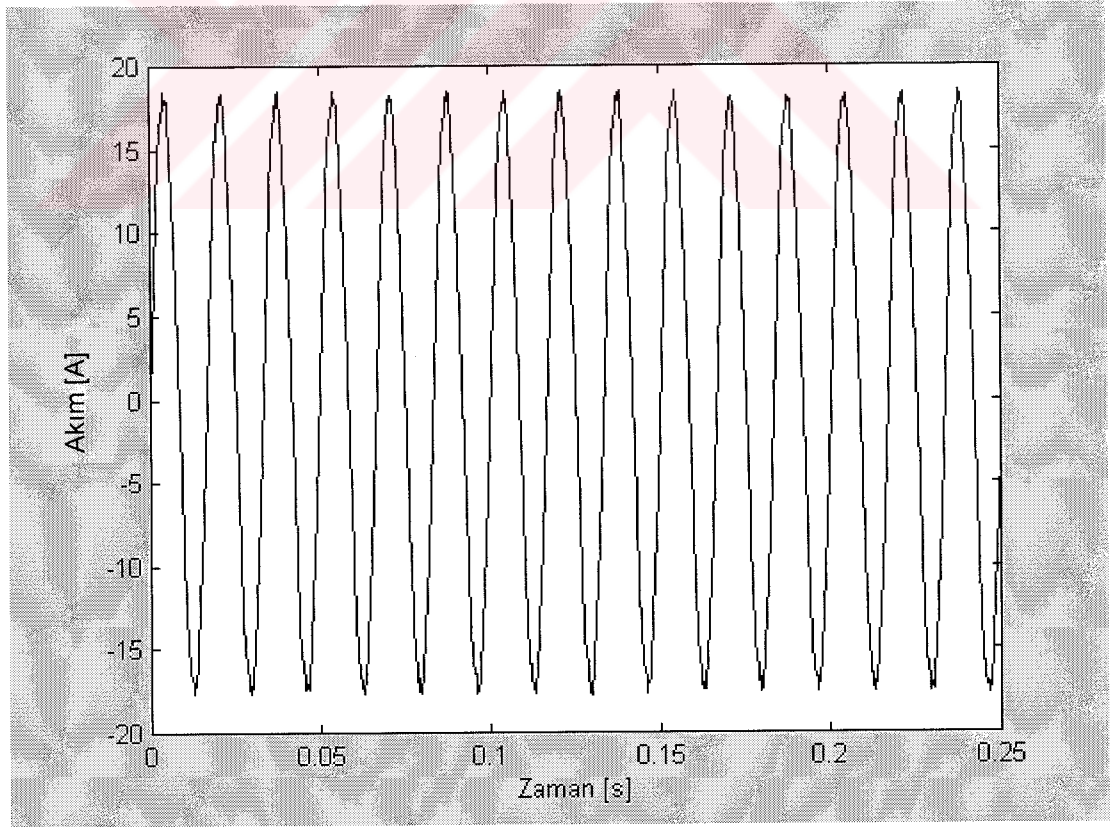
Rulman bozukluğunun rotor-stator arasındaki hava aralığının değişmesine neden olacağı ve buradaki magnetik akı değişiminin motorun çektiği akıma etkiyeceği düşüncesinden hareketle stator akımının izlenmesi, rulman bozukluğunu belirlemede kullanılabilmektedir [33]. Bu bölümde motor akım işaretinin frekans tanım bölgesindeki analizi yapılmıştır. Ayrıca daha hassas bir arıza tanısı gerçekleştirmek amacıyla motor arızasına neden olan rulman hatasının rulmanın hangi kısmında olduğu, titreşim ve akım verileri arasındaki frekans uyumluluğu (coherence-coherens) analiziyle saptanmıştır [105,106]. Bundan başka motorun şebekeden çektiği akımın dalgacık analizinin yapılması sonucunda, dalgacık analizinin rotor dengesizliği durumunu belirlemedeki üstünlüğü de gösterilmiştir.

7.1 Akım İşaretlerinin Spektral Analizi

5 HP lik asenkron motorda rulmanın yapay olarak eskilmesi sırasında bu mekanik arızanın motorun çektiği akıma etkisinin olup olmadığının, bir başka deyişle stator akımı dalgalanmaları üzerinde rulman titreşiminin etkisini saptamak amacıyla, akım işaretlerinin spektral analizi yapılmıştır. Şekil 7.1’de motorun şebekeden çektiği akımın bir faz için dalga şekli gösterilmiştir. Bu şekillerden ilk ve son durumda motorun çektiği akım dalga şeklinde arızayı yansıtabilecek belirgin bir fark olmadığı görülmektedir. Bu iki durumu ayırt etmek için, Şekil 7.2’de ilk ve son durum için motorun çektiği akımın spektral güç yoğunlukları dB olarak gösterilmiştir. Spektrumlar örtüşmesiz bir *Hanning* penceresi 120000 nokta üzerinde 120000 noktalı *FFT* olarak hesaplanmıştır. Güç spektrumu üzerinde detaylı bilgi çıkartmak için bu çizimlere daha yakın bir bakış gereklidir. Bu nedenle akım spektrumlarının şebeke frekansı 60 Hz merkezde olacak şekilde 40-80 Hz’lik parçası gözönüne alınarak Şekil 7.3 (a) ve (b)’de gösterildiği gibi yan-bant etkileri ortaya çıkartılır. Bu

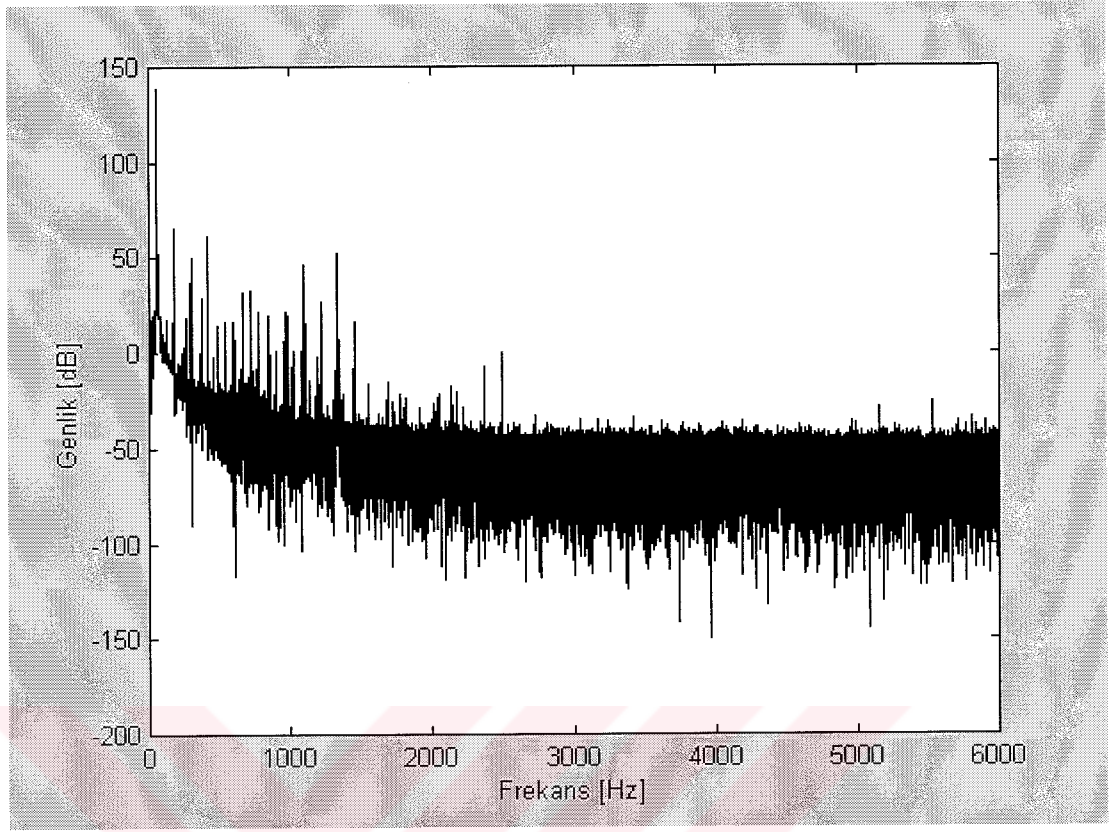


a)

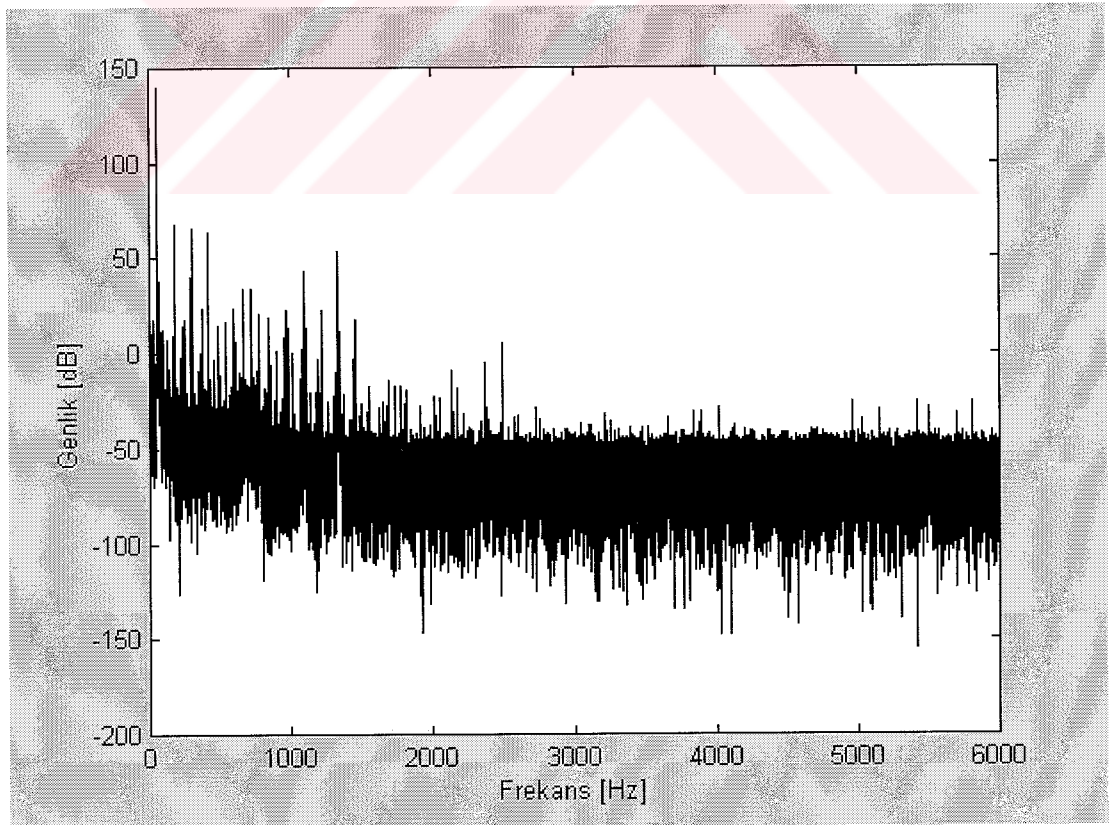


b)

Şekil 7.1. Akım işaretleri. a) Sağlam durum. b) Bozuk durum.

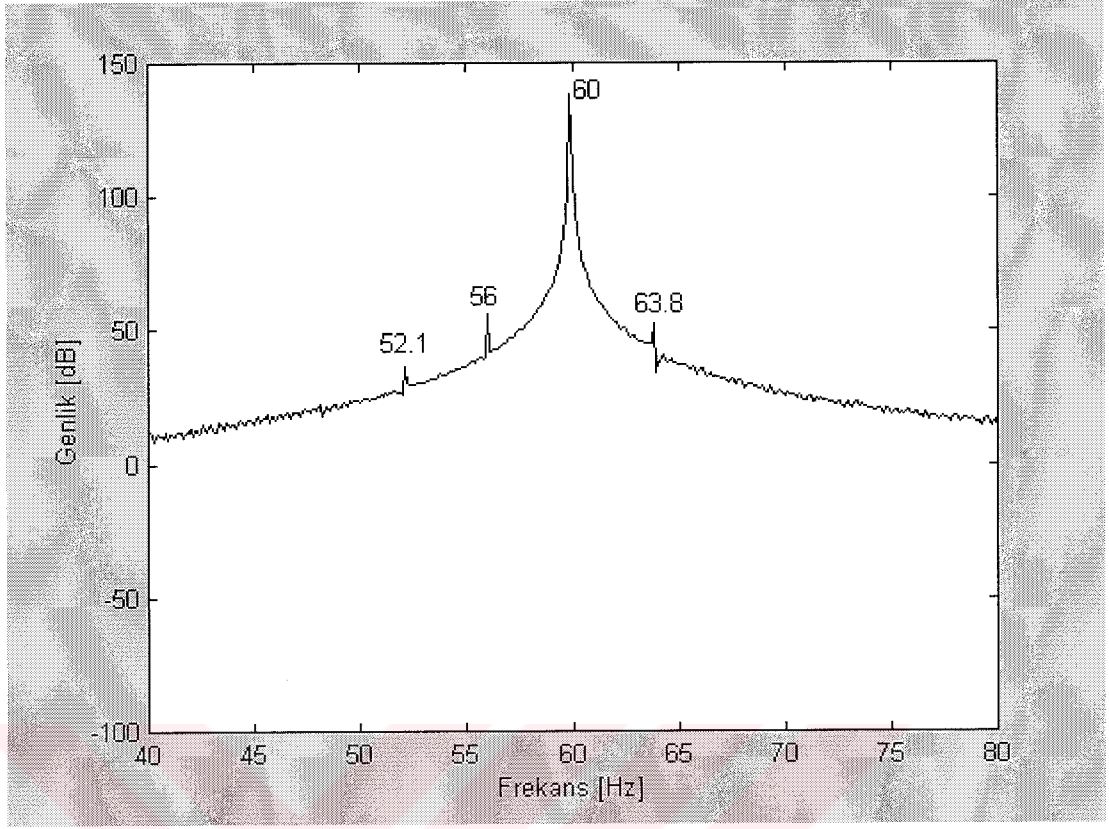


a)

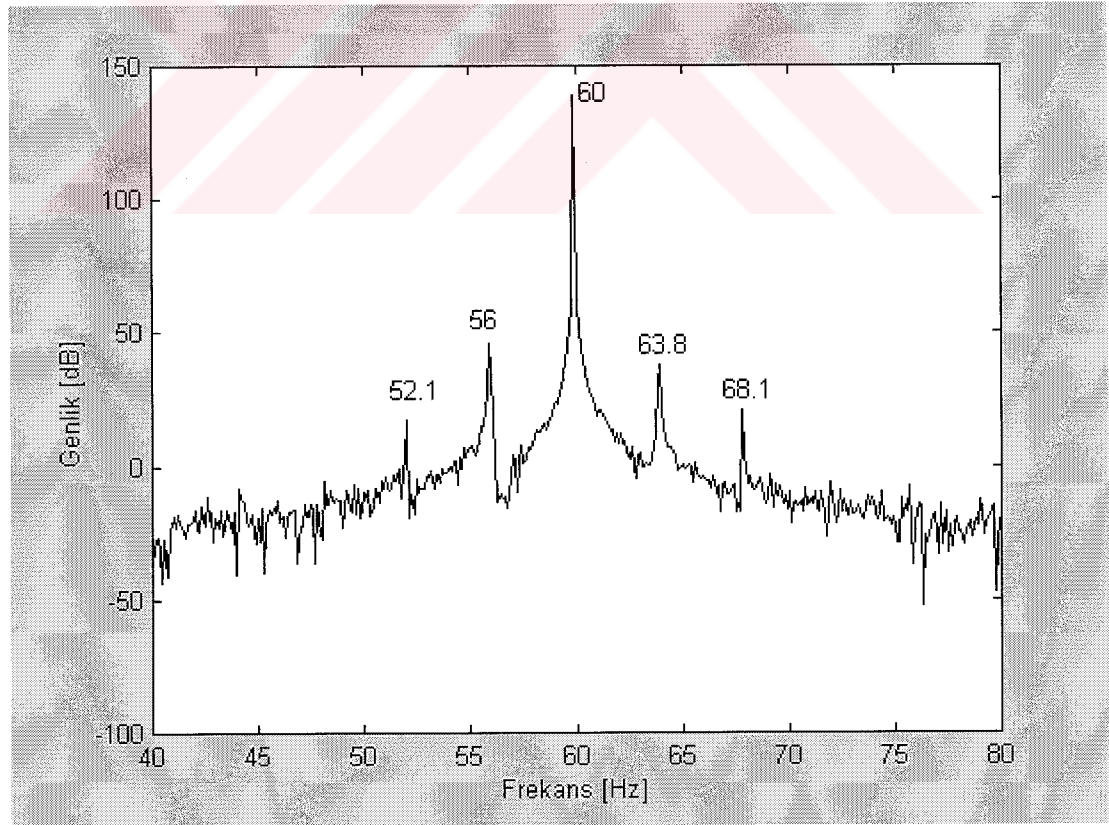


b)

Şekil 7.2. Akım işaretlerinin spektrumları. a) Sağlam durum. b) Bozuk durum.



a)



b)

Şekil 7.3: Şebeke frekansı etrafındaki yan-bant etkileri.
a) Sağlam durum. b) Bozuk durum.

şekillerden de görülebileceği gibi yan-bant genlikleri artmış ve ayrıca 68.1 Hz'de dördüncü simetrik yan-bant da gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar arızalı rulman durumunda hava aralığının simetrik olmayan geometrisi nedeniyle, bozulmuş magnetik alanın bir sonucu olarak stator akımlarında gözlemlenen değişikliklerdir. Ancak bu gözlem sonuçları yine de tam bir belirleme olarak kabul edilemez. Daha etkin bir belirleme için akım ve titreşim işaretleri arasındaki frekans tanım bölgesindeki uyumluluk fonksiyonu araştırılır.

7.2 Frekans Uyumluluğu Analizi ile Arıza Türü ve Yerinin Belirlenmesi

Elektrik makinalarında, rotor-stator arasındaki ilişki bu iki parça arasındaki hava aralığından geçen magnetik akı ile sağlanır. Eğer hava aralığı rotorun 360 derecelik çevresi boyunca simetrik olarak dağılmamışsa, o zaman motor içinde düzgün olmayan magnetik alanlar oluşur. Bu magnetik dengesizlikler stator sargılarının hareketine sebep olan kuvvetleri oluşturur ve sonuç olarak sargılarda tahribata sebebiyet verir ve titreşimler oluşturur. Rotor ve stator arasındaki bu tip bir arıza durumu çoğu zaman rotor eksenel kaçıklığı (bozukluğu) olarak nitelendirilir. Benzer şekilde, hava aralığı içindeki magnetik akı yoğunluğundaki bozulmaları üreten bu eksenel kaçıklıklar, rulman kaynaklı titreşimlerle stator akımları arasındaki spektral ilişki ile de belirlenebilir. Çünkü söz konusu bu eksenel bozukluk magnetik akıda değişimlere sebep olur ve motor endüktansları üzerindeki etkisi ile stator akımlarında harmonikler üretir.

Eksenel bozukluk, motorun çektiği akım spektrumunda şebeke frekansı etrafında yan bantlar olarak ortaya çıkar. Değişken hava aralığı nedeniyle oluşan yand bant frekansları denklem (4.11)'de verildiği gibi f_e şebeke frekansı, s kayma, p çift kutup sayısı ve f_r rotorun dönme frekansı olmak üzere

$$f_{ecc} = f_e \left[1 \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] = |f_e \pm kf_r|, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (7.1)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Her rulman bozukluğu asenkron motorun rotoru ve statoru arasında radyal bir

hareket üretecektir. Buna bağılı olarak, hava aralığı eksenel bozukluğunun meydana getirdiğı değışimler rulman geometrisine bağılı olarak denklem (4.2)-(4.5) ile verilen karakteristik rulman frekanslarıyla ilişkili olarak stator akımları üretir. Rulman karakteristik frekansları, bilye sayısı 6-12 arasında olan rulmanlar için

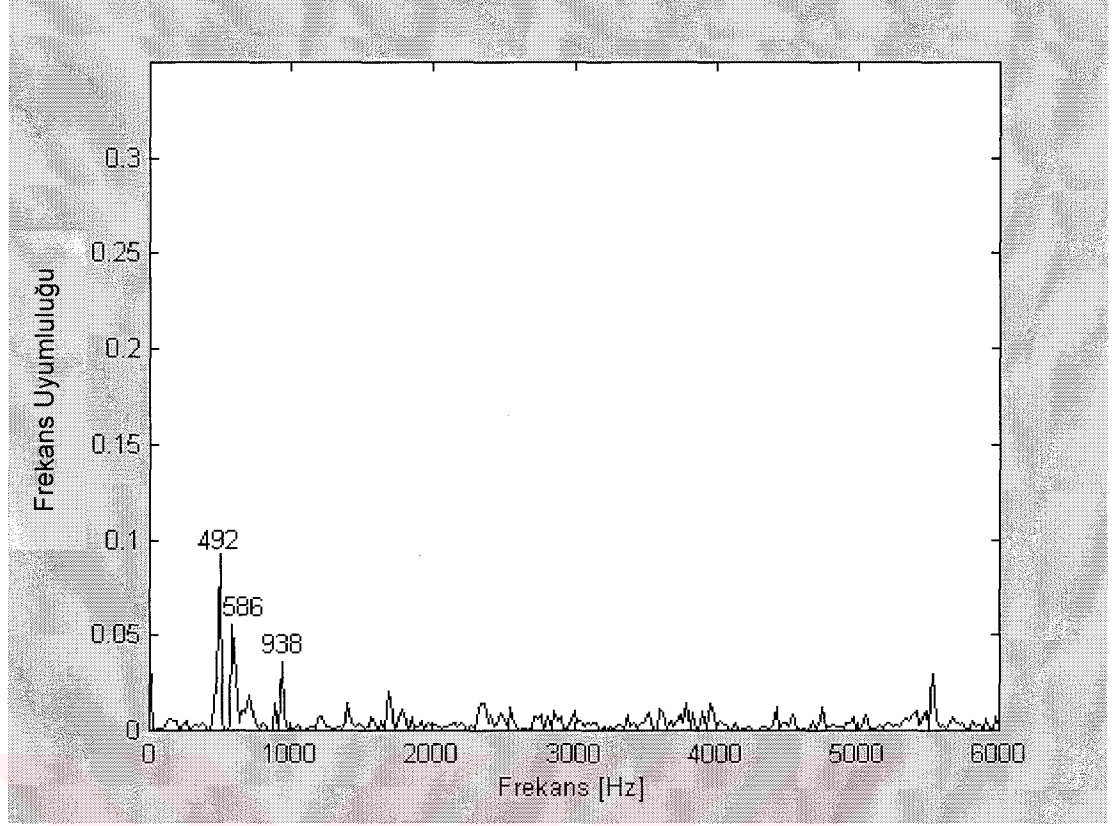
$$f_o = 0.4 n f_r \quad (7.2)$$

ve

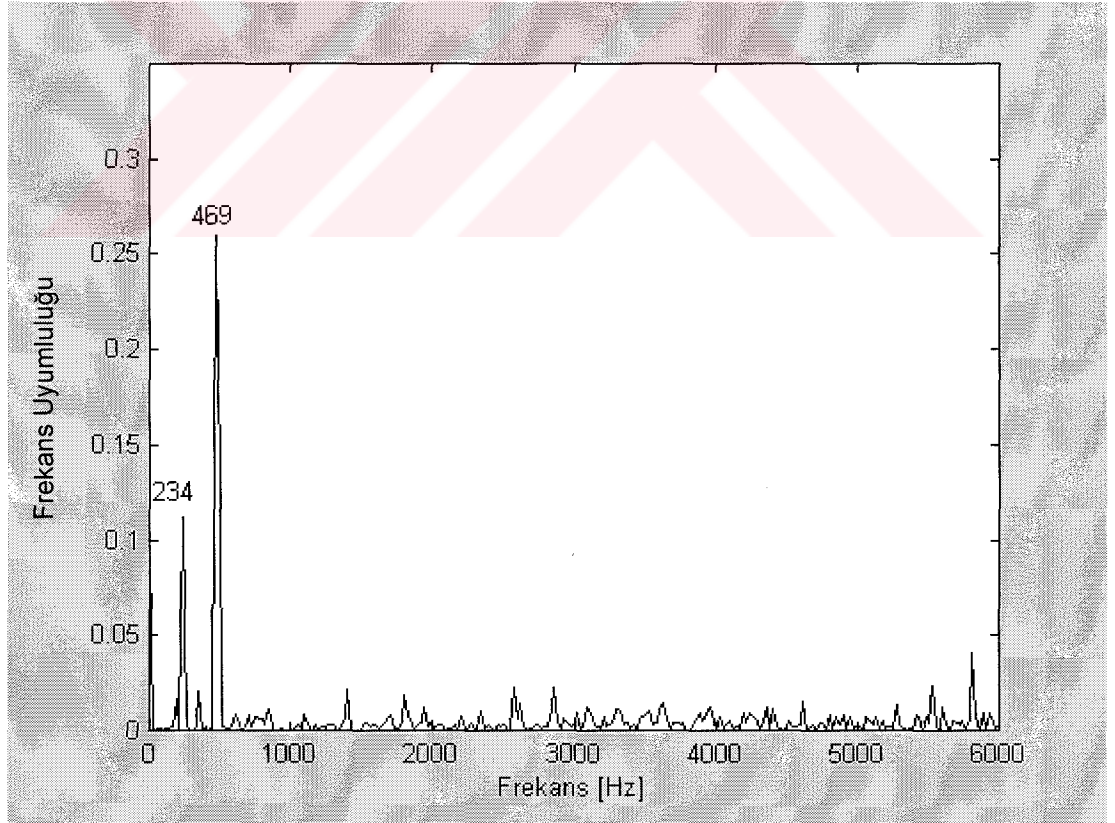
$$f_i = 0.6 n f_r \quad (7.3)$$

olarak hesaplanır. Burada f_o ve f_i , sırasıyla dış ve iç bilezikteki bir hata için frekansları, n rulmandaki bilye sayısını ve f_r de rotorun dönme frekansını göstermektedir. Bu genelleştirilmiş formüller rulman geometrisini bilmeden de frekans bantlarının kolay bir tanımını sağlar. Bu yöntem stator akımının uygun bir şekilde izlenmesi yoluyla rulman bozukluğu tanısı için kullanılacaktır.

Motor akımını kullanarak rulman bozukluğunu saptayabilmek amacıyla, motor akımı ve titreşimi arasındaki frekans uyumluluğı fonksiyonu hesaplanmış ve Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Frekans uyumluluğı fonksiyonunun hesabı ile ilgili bağıntılar EK D’de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 7.4. Stator akımı ve titreşim işareti arasındaki frekans uyumluluğu.
a)Sağlam durum. b)Bozuk durum.

Şekil 7.4(b)'de çizilen frekans tanım bölgesindeki uyumluluk fonksiyonu (frekans uyumluluğu), motor akım ve titreşim işaretlerinin ilişkili olduğu en baskın frekans değerlerinin 234 Hz ve 469 Hz'de oluştuğunu gösterir. Motor hızını

$$f_r = 1742 \text{ devir/dak}$$

veya Hz birimiyle

$$f_r = 1742/60 = 29.03 \text{ Hz}$$

şeklinde gözönüne alınarak ve rulmandaki bilye sayısı $n = 9$ olmak üzere, rulman bilyelerinin dış bilezik üzerindeki hatalı bir noktayı geçme frekansı;

$$f_o = 0.4 n f_r = 0.4 \times 9 \times 29.03 = 104.5 \text{ Hz}$$

ve rulman bilyelerinin iç bilezik üzerindeki hatalı bir noktayı geçme frekansı da;

$$f_i = 0.6 n f_r = 0.6 \times 9 \times 29.03 = 156.7 \text{ Hz}$$

olarak hesaplanır. Motor rulmanlarının 1000 devir/dak'daki arıza frekansları olarak Tablo 5.4'de verilen bilye hata frekansı, 1742 devir/dak.'lık dönme hızı için orantı hesabıyla

$$f_b = 78.58 (1742/1000) = 136.9 \text{ Hz}$$

olarak bulunur.

(7.1) denkleminde $k = 6$ alınırsa ve $f_e = 60 \text{ Hz}$ 'lik şebeke frekansı için dinamik eksenel bozukluk nedeniyle oluşan yan bant frekansları Denklem (7.1) vasıtasıyla

$$f_{eec} = 60 + 6 (29.03) = 234.18 \text{ Hz}$$

olarak hesaplanır. Tersine (4.12) denkleminde rulman hatası nedeniyle akımda meydana gelen rulman bozukluğu frekansı, $m = 3$ ve $f_{v_{bng}} = f_b$ alınarak,

$$f_{e_{bng}} = 60 + 3 (136.9) = 470.7 \text{ Hz}$$

olarak hesaplanır. Bu yeni analiz, motor rulmanındaki elektriksel boşalma nedeniyle stator akımı ve titreşiminin korelasyonlu olduğunu göstermiştir. Çünkü yukarıda hesaplanan frekanslarda motor akımı ve ivmeölçer işaretleri arasındaki frekans uyumluluğu fonksiyonu ilk aşamadan son aşamaya artmıştır. Motor akım ve titreşim işaretleri arasında frekans tanım bölgesindeki bu yüksek uyumluluk değeri ise motor milindeki eksenel bozukluğun ve rulman hatalarının ortaya çıktığı frekansları göstermiştir.

Böylece Şekil 7.4(b)'de gösterilen frekans ile hesaplanan değerler arasında tam bir uyum sağlanır ve ~234Hz eksenel bozulmayı, dolayısıyla da magnetik alandaki bozulmayı gösteren frekans anlamı kazanır. Ayrıca yine Şekil 7.4(b)'de gözlemlenen ve f_{ec} 'nin ikinci harmoniği olan 469 Hz'in de rulmandaki bilye hatasından kaynaklandığı görülmüştür. Sonuç olarak stator, akımı ve titreşimi arasındaki frekans uyumluluğunun 200-500 Hz'lik frekans bölgesinde 2.5 kat arttığı gözlenmiştir ve bunun da rulmandaki dönen eleman bozukluğunun bir göstergesi olduğu ortaya çıkartılmıştır.

7.3 Dalgacık Analizinin Motor Akım İşaretlerine Uygulanması

Şekil 7.1'de verilen akım işaretlerinin de dalgacık analizi yapılmıştır. Bu yolla akım işaretleri Tablo 6.2'deki gibi 8 ayrı seviyede frekans alt bantlarına ayrıştırılmıştır. İlk ve son durum için yapılan dalgacık analizleri Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Şekil 7.5b ve Şekil 7.6b'nin karşılaştırılması sonucunda bozuk durum için akımın detay alt bantlarında bazı yüksek frekanslı bileşenlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca alt bantlardan işareti yeniden oluşturma da yapılmıştır.

Bu anlamda motor akım işaretlerinin dalgacık analizi vasıtasıyla yeniden kazanılması aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

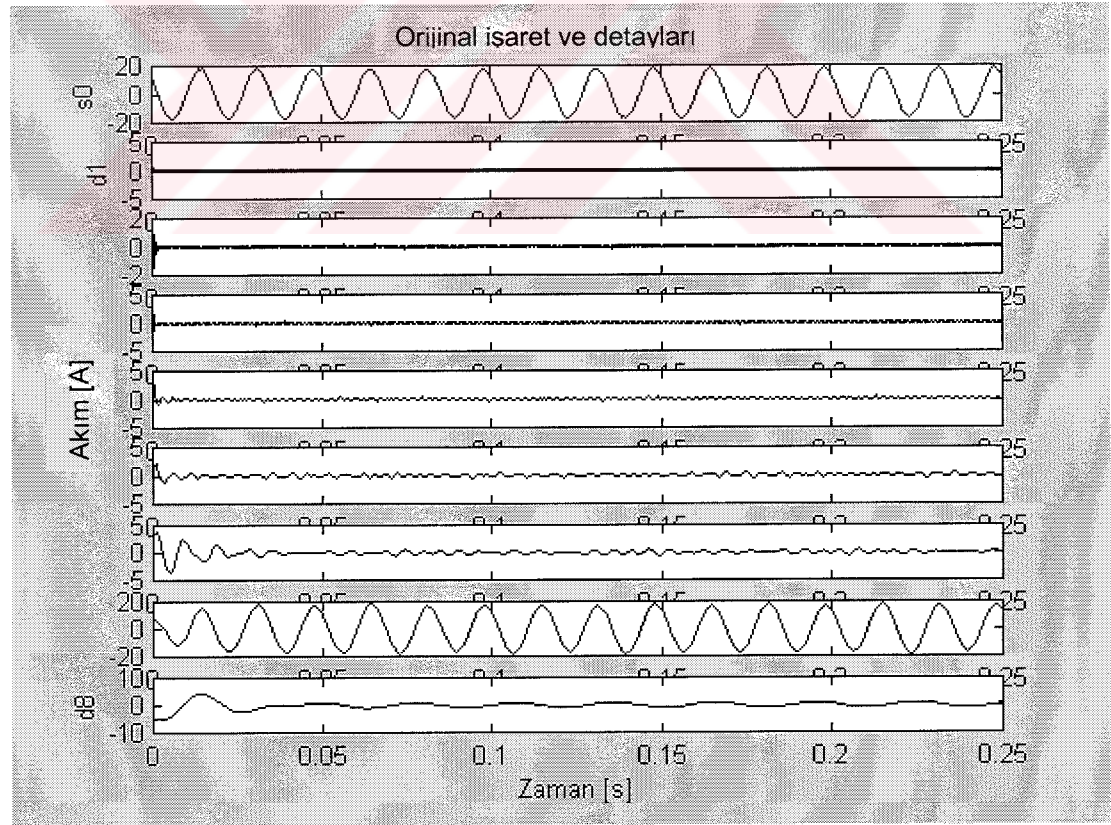
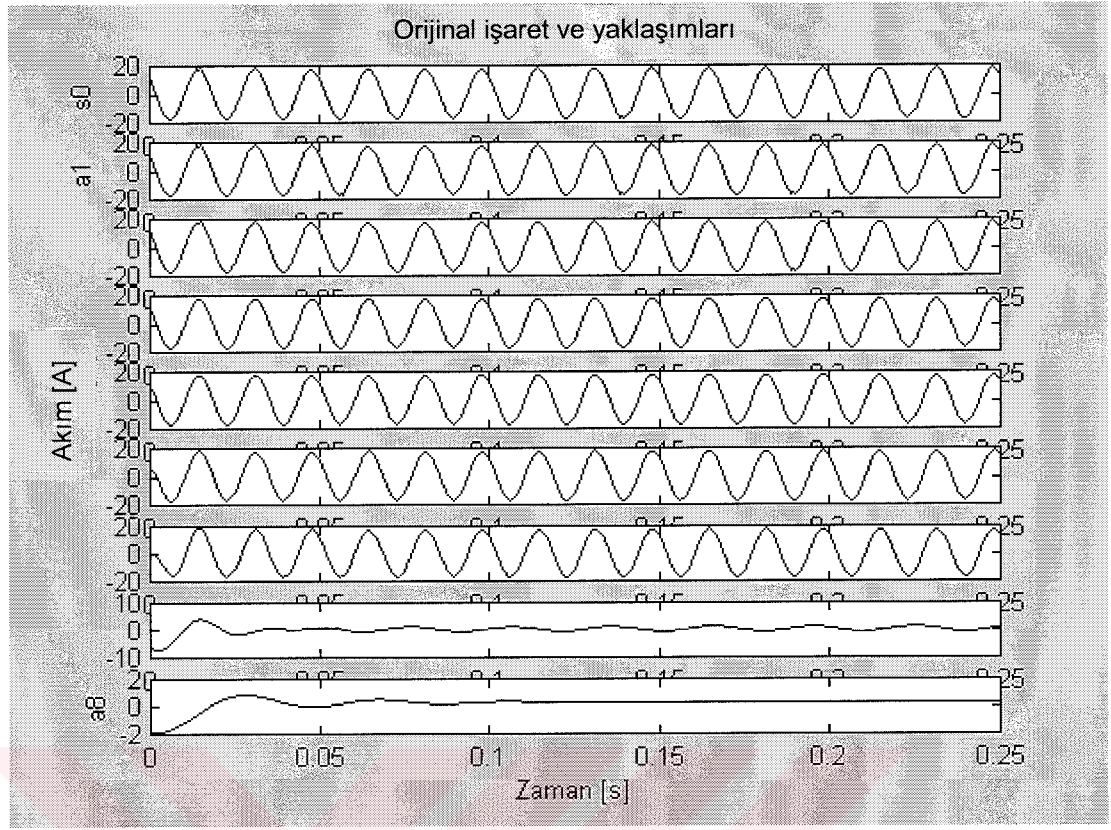
$$y = a_n + \sum_{i=1}^n d_i, \quad n=8 \text{ (Bu uygulamada)}. \quad (7.4)$$

Benzer şekilde, yeniden kazanılmış bu işaretin her bir bileşenine ait *Güç Spektrumu Yoğunlukları*'nın da (GSY) hesaplanması ile, GSY'lerden oluşan bu yeni birleşim, işaretin spektral değişimi anlamında aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$GSY\{y\} = GSY\{a_n\} + \sum_{i=1}^n GSY\{d_i\} \quad (7.5)$$

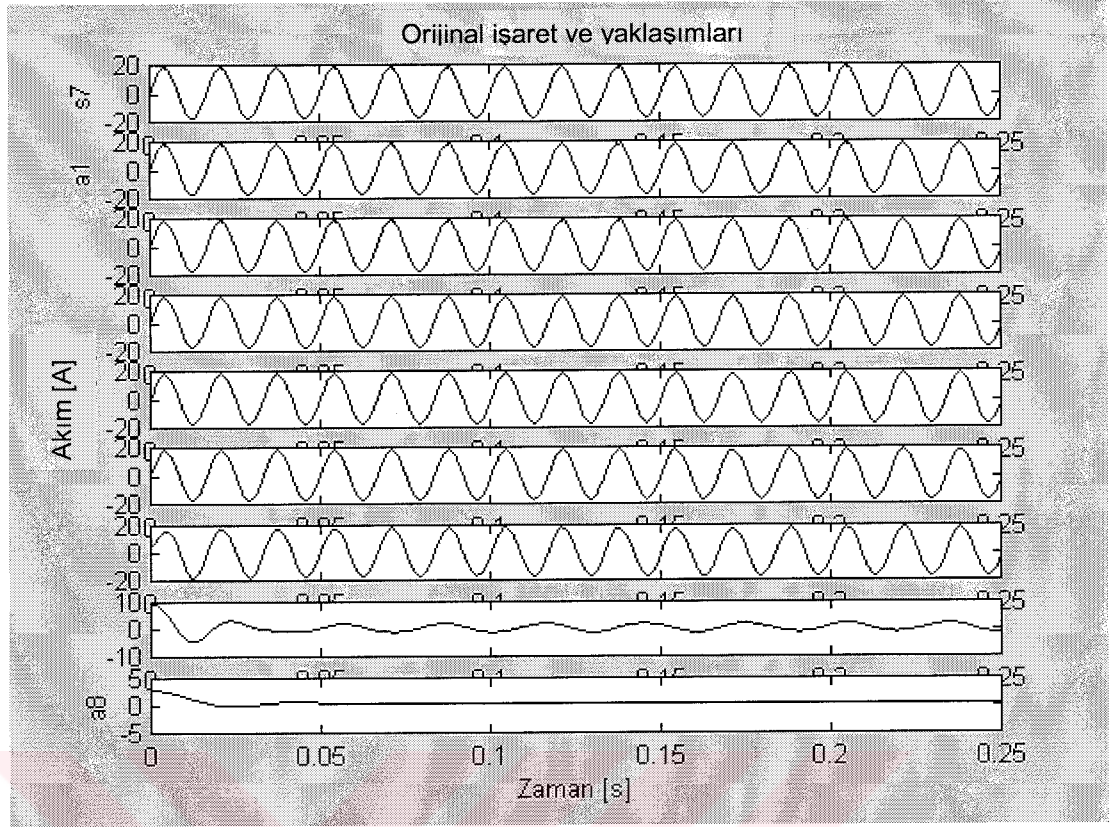
Bu şekilde elde edilmiş yeni spektral değişim ile Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'e göre, orijinal işaret ve geri kazanılmış işaretler arasındaki karşılaştırma, kolaylıkla yapılabilir. Böylece yapılan bu karşılaştırma sonucunda, özellikle motor dönme frekansındaki genlikde, önemli bir kuvvetlendirmenin ortaya çıktığı saptanmıştır. Bu ise rotor dengesizliğini belirlemede dalgacık analizinin ortaya çıkarttığı önemli bir özelliktir.

Akım işaretlerinin dalgacık analizi yapılarak alt bantlara ayrılması ve bu alt bantlardan işaretin yeniden oluşturulması sonucu Şekil 7.8b'deki gibi, dalgacık analizinin 29.03 Hz'deki motor dengesizlik frekansını kuvvetlendirdiği görülmüştür.

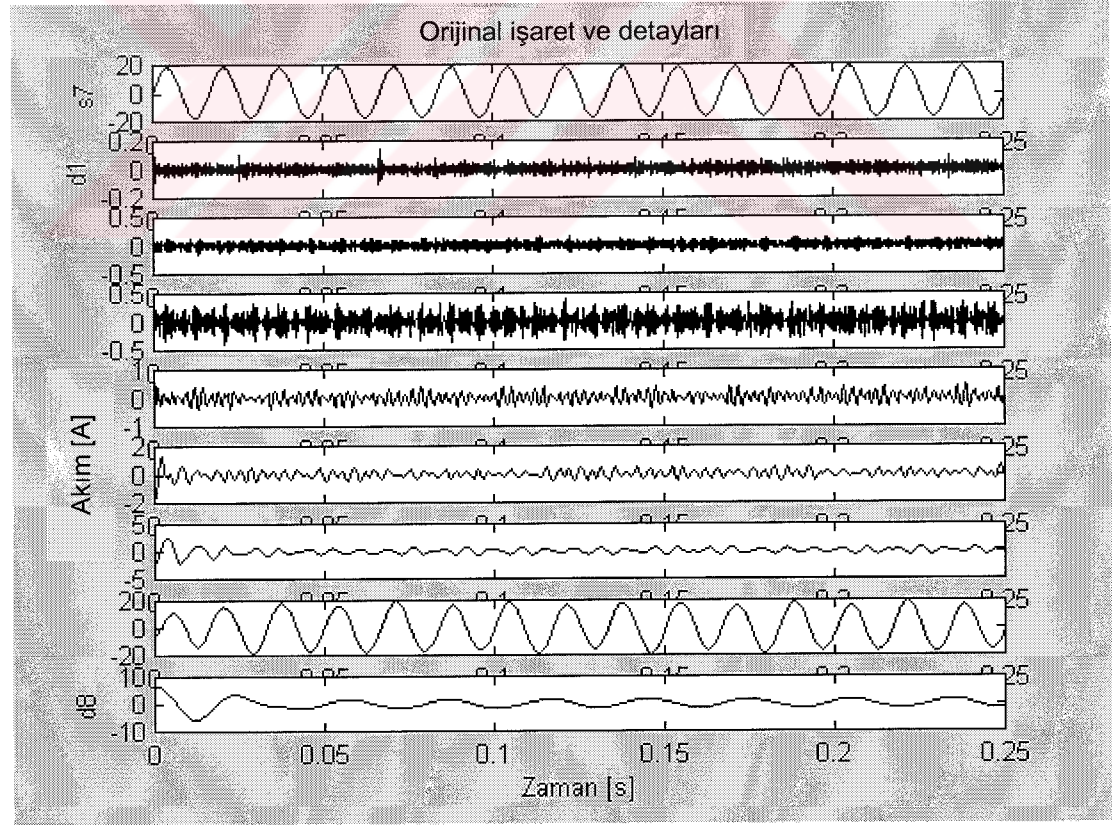


Şekil 7.5 Başlangıç durumu için akım (s0) verisinin ÇÇD analizi.

a) Yaklaşımlar, b) Detaylar.



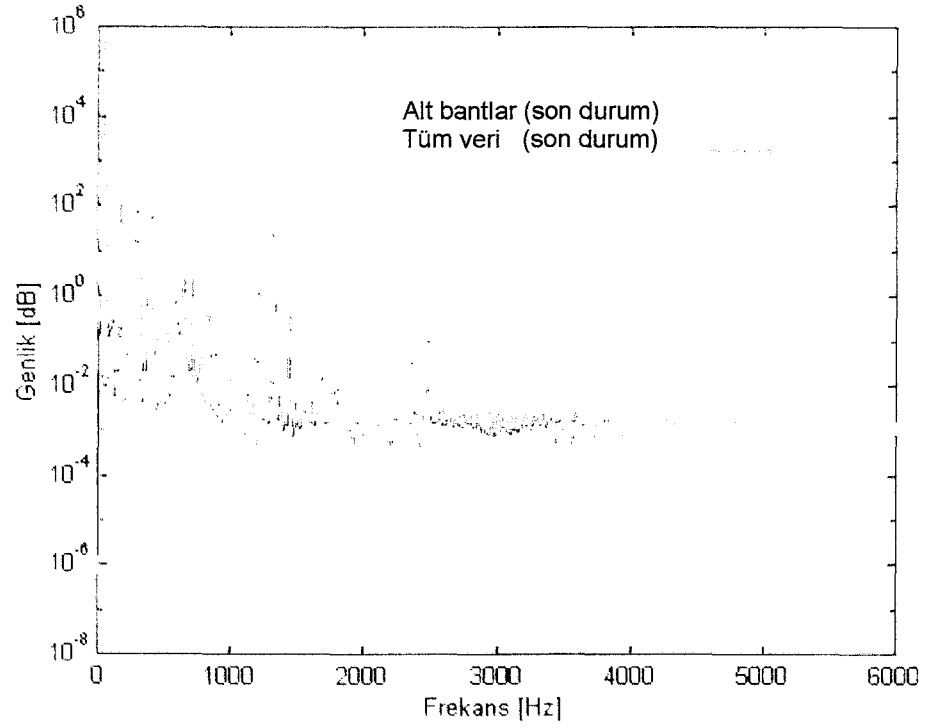
a)



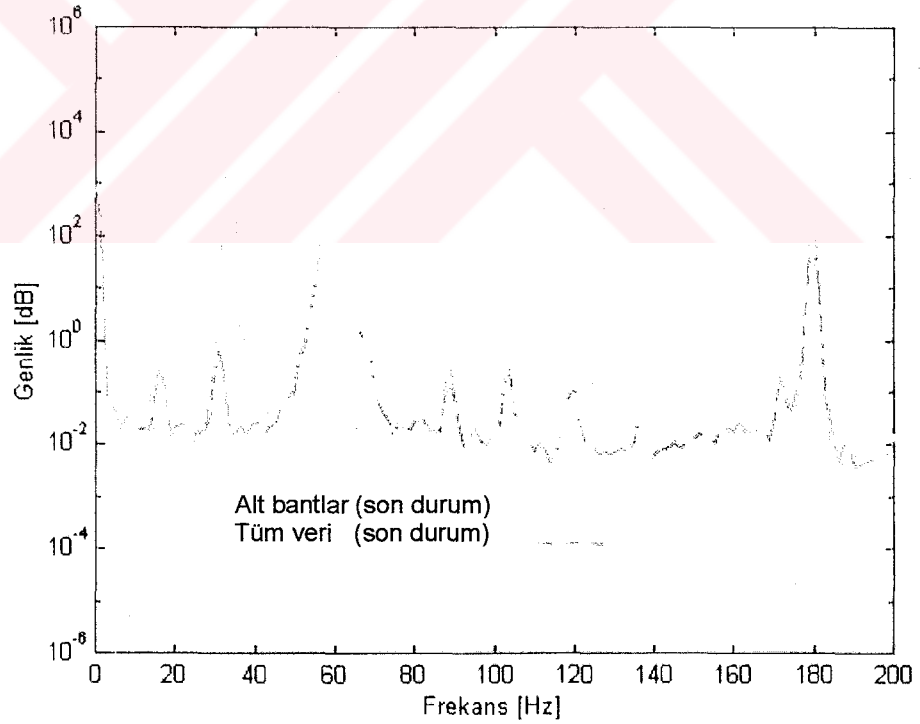
b)

Şekil 7.6. Yedinci eskitme aşamasında akım (s_7) verisinin ÇÇD analizi.

a) Yaklaşımlar, b) Detaylar.



Şekil 7.7. Bozuk durumdaki stator akımının spektral analizi.



Şekil 7.8. Bozuk durumdaki stator akımının spektral analizi (0-200 Hz aralığı için).

BÖLÜM 8

TÜMLEŞİK BİR DURUM İZLEME SİSTEMİ VE YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI İLE ARIZA TANISI

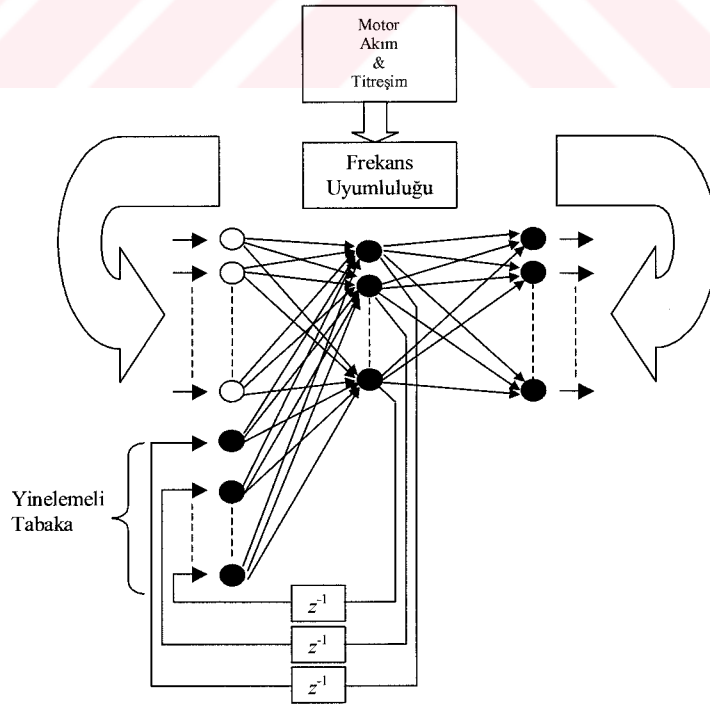
Titreşim spektrumu veya stator akım spektrumuna dayanan geleneksel hata tanılama teknikleri normal bir işletme durumunu anormal bir durumdan ayırt etmek için belli bir dereceye kadar uzman bilgisini gerektirir [44]. Çünkü izlenen spektral bileşenler normal işletme durumlarını da içeren birçok kaynaktan gelebilir. Eğer stator akım spektrumu analiz ediliyorsa bu ihtiyaç daha belirgindir, çünkü hem makina yapımı ve tasarımına hem de yükteki değişimlere bağlı olarak çok sayıda harmonik bir arada ortaya çıkabilir. Geleneksel olarak, bakım uzmanı, gelişmekte olan bir hatayı gösteren spektrumun sağlam durumdaki bir motorunkinden yeteri kadar farklı olup olmadığını belirleyebilmesi için izlenen motor verisini analiz etmek zorundadır. Bununla birlikte, tümleşik bir durum izleme ve tanı sistemi yapay zeka kullanılarak uygulanabilir. Son senelerde yapay zeka uygulamalarında en çok kullanılan iki yöntem, yapay sinir ağları (YSA) ve Genetik Algoritma (GA), bu çalışmada tümleşik bir durum izleme sisteminin ana unsurları olarak kullanılmıştır.

Bu bölümde motor titreşim ve akım işaretleri arasındaki ilişki, oto asosiyatif Yinelemeli bir Yapay Sinir Ağına (YYSA-Recurrent Neural Network) öğretilerek, arıza frekanslarının YYSA ile kolayca belirlenebildiği gösterilmiştir. Ayrıca, genetik algoritma tekniğini gözönüne alarak, motor akımı ve titreşimi arasındaki ilişkideki en etkin tepe noktaları da bulunmuştur. Böylelikle, motor arıza tanısında yapay sinir ağı ve genetik algoritmanın kullanıldığı, gerçek zaman uygulamalarında da kullanılabilecek, yapay zeka tabanlı akıllı bir durum izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu yolla, örneğin herhangi bir işletmedeki personel kolaylıkla arızayı belirleyebilecektir.

8.1 Motor Akım ve Titreşim İşaretlerinin Yapay Sinir Ağı ile İzlenmesi

Son yıllarda uzman sistem, Yapay Sinir Ağları (YSA), Bulanık Mantık (BM) ve Genetik Algoritma (GA) gibi yapay zeka teknikleri asenkron motor durum izlemesinde uygulanmıştır [11]. Yapay sinir ağının avantajı giriş ve çıkış arasındaki kompleks ilişkinin matematiksel model olmaksızın kurulabilmesidir.

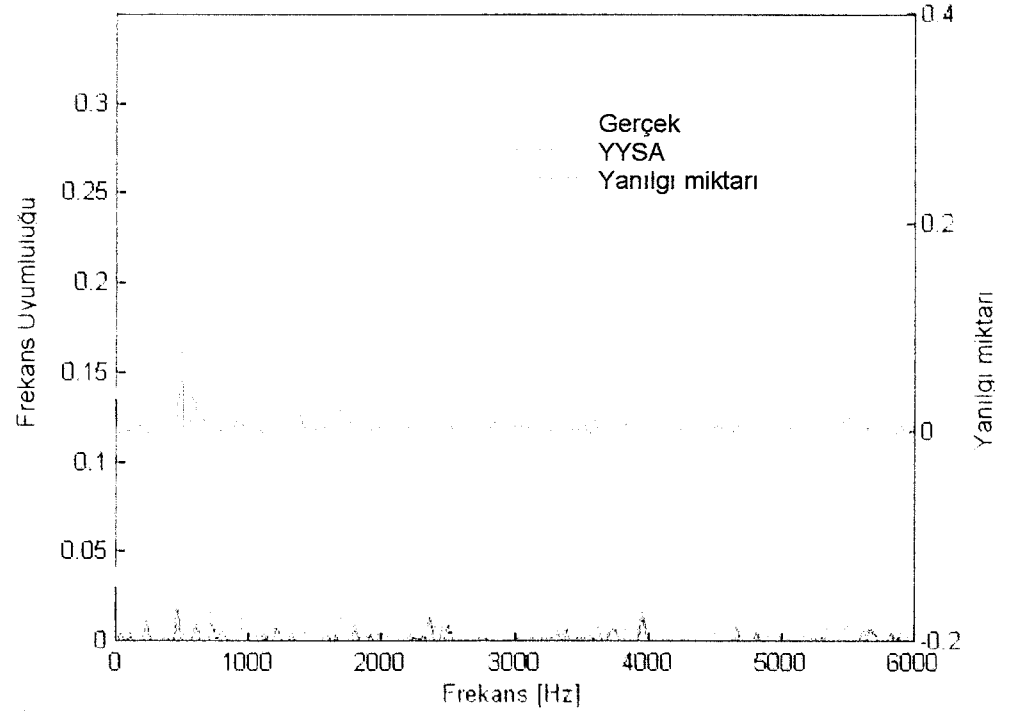
Burada Elman yinelemeli yapay sinir ağı kullanılmış olup, bu ağın özelliği gizli tabaka çıkışından giriş tabakasına geribeslemenin olmasıdır. Ağırlıkların güncellenmesinde standart geriye yayılım (back-propagation) algoritması kullanılır. Elman yinelemeli yapay sinir ağların ayrıntısı EK E'de verilmiştir. Şekil 8.1'de verilen YYSa mimarisi; giriş-çıkış büyüklükleri 0-6 kHz bant genişliğinde 256 frekans noktasındaki genliklerle tanımlanmış olan frekans tanım bölgesindeki ilişki değerleridir ve 100 elemandan oluşan tek ara katmanlı oto-asosiyatif bir topolojiye sahiptir (256x100x256). Arıza belirleme ise YYSa'nın üreteceği yanılğı (error) miktarının gözlemlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu anlamda yanılğının büyük genlik değerleri gösterdiği YYSa çıkışları, aynı zamanda arızanın ortaya çıktığı frekans değerlerini de işaret edebilmektedir.



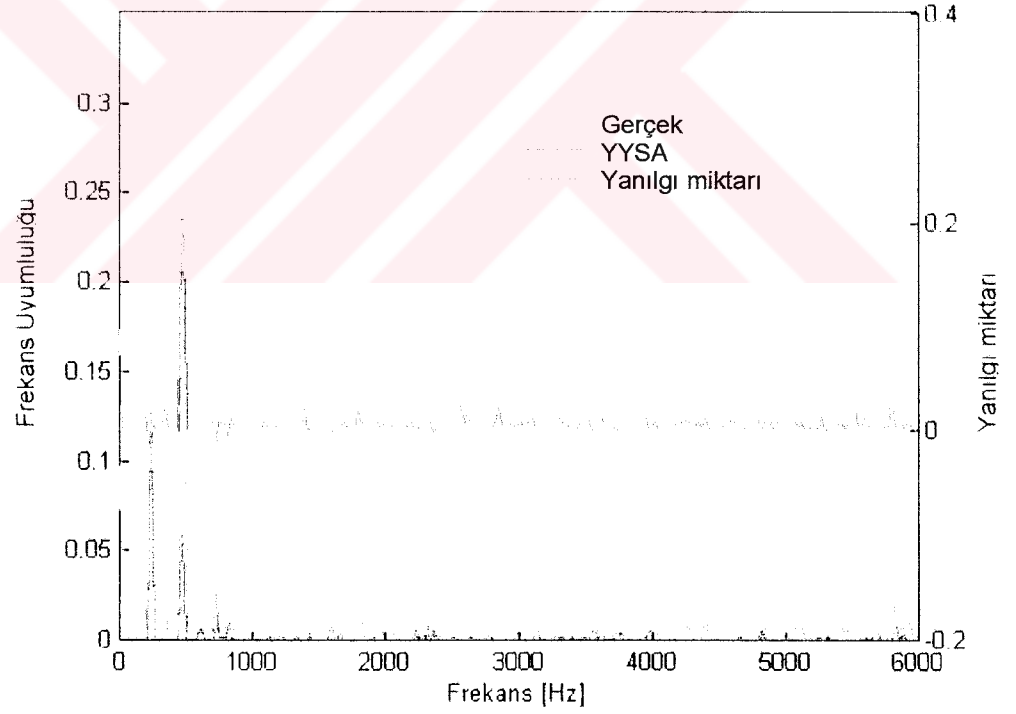
Şekil 8.1. Elman YYSa mimarisi.

Sağlam durum ve her eskitme sürecine ilişkin olarak motor akım ve titreşim işaretleri arasındaki frekans uyumluluğu hesaplamalarından elde edilen toplam sekiz veri setinin ilk beş tanesi $lr = 0.1$ lik öğrenme oranı ile öğrenme süreci için kullanılırken son üç veri kümesi de geri çağırma sürecinde kullanılmıştır. 256x100x256 lık YYSa yapısının sağlam ve bozuk durumlara ilişkin başarımı ise aşağıdaki şekillerden görüleceği gibi çıkışlarında ürettikleri yanılğı miktarları ile denenmiştir. Bu durumda 5000 iterasyon sonucunda YYSa nın eriştiği toplam karesel hata miktarı $TKH = 0.1197$ 'dir.

Bu durumda Şekil 8.2(b)'den görülebileceği gibi YSA, 234 ve 469'da oluşturduğu büyük yanılğılarla, motorda rulman bozukluğu nedeniyle ortaya çıkan rotor eksenel bozukluğunu ve rulmandaki bilye hatasını kolayca belirleyebilmiştir. Bu anlamda bu çalışmada ele alınan YSA uygulaması gerçek-zaman uygulamalarında da kullanılarak bazı kritik sistemlerin durum izlemelerinde önemli bir rol oynayacağı gösterilmiştir.



a)

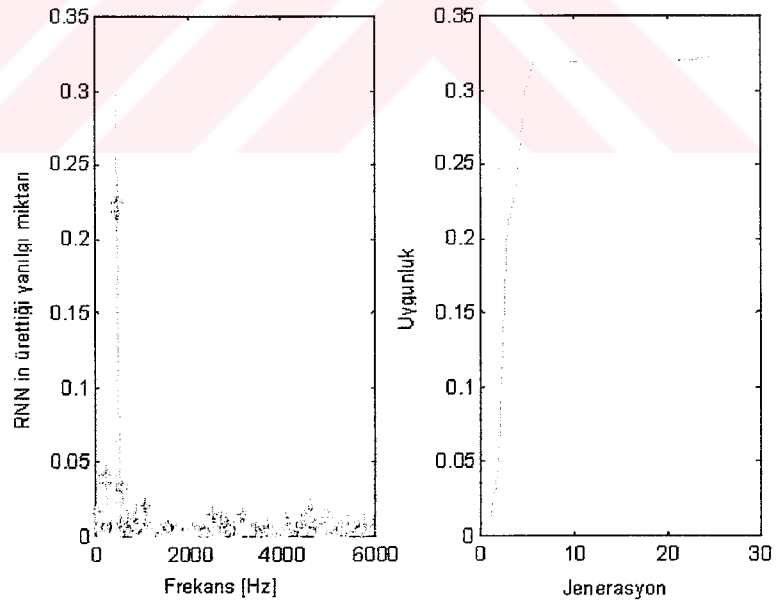


b)

Şekil 8.2. YYSA'nın frekans uyumluluğu işaretlerine cevapları.
a) Sağlam durum, b) Bozuk durum.

8.2 Genetik Algoritma Uygulaması

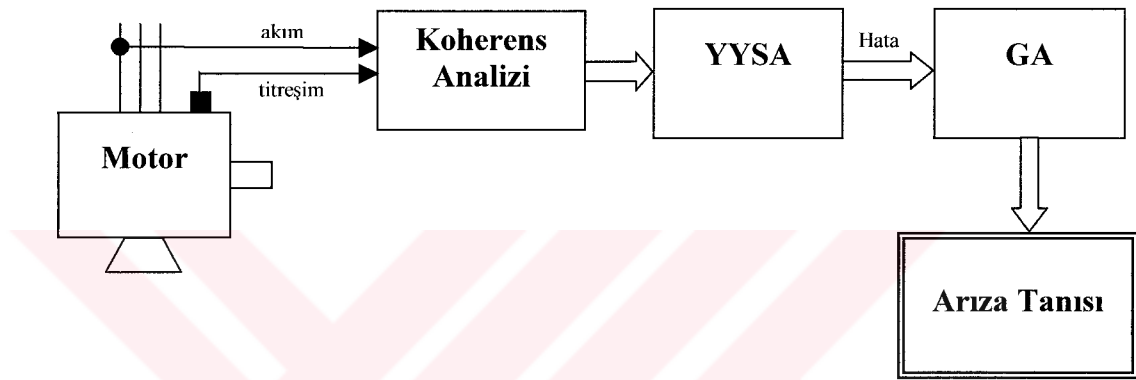
Her eskitme aşaması için, motor akımı ve titreşim işaretleri arasında hesaplanan frekans tanım bölgesindeki uyumluluk fonksiyonlarının oto asosyatif, yinelemeli bir YSA yapısına uygulanması sonucu bu YSA yapısı, rulman bozukluğunu tanımlamaya yardım eden bir hata işareti üretmiştir. Burada, hata işaretinin maksimum genlik veya tepe değeri ise, EK F’de verilen standart GA yaklaşımını kullanarak belirlenmiştir. Şekil 8.3’de hata değişiminin tepe değeri ve GA’ya ilişkin uygunluk fonksiyonu gösterilmiştir. Bu yüzden, GA, 469 Hz’deki maksimum noktayı kolaylıkla bulmuştur. Bu frekans motor rulmanlarındaki bilye hata frekansıdır. Şekil 8.3’de (*) sembolü ve (o) sembolü sırasıyla en iyi kromozomu ve başlangıç popülasyonundan seçilen kromozomları gösterir. Uygunluğun değişiminde, düz çizgi en iyi çözümü gösterirken kesikli çizgi popülasyonun ortalama uygunluğunu gösterir. Ayrıca bu uygulamada, 200 kromozom kullanılarak 25 jenerasyon sonunda bu çözüm bulunmuştur. Bu anlamda GA yaklaşımı otomatik “peak” –tepe değer bulma algoritması rolünü üstlenmiştir ve en belirgin arıza frekansları belirlenmiştir.



Şekil 8.3. GA uygulamasının sonuçları.

8.3 YYSa ve GA Tabanlı Motor Durum İzleme Sistemi

Bilgi işleme ve yapay zeka tekniklerine dayalı akıllı durum izleme sistemi kurmak için frekans tanım bölgesindeki uyumluluk analizinden sonra hem YYSa hem de GA birleştirilmiştir. Burada YYSa, frekans tanım bölgesinde hatalı durumu işaret eden büyük genlikte hata üretir. GA’da, hatalı rulman (veya motor) nedeniyle YYSa’nın ürettiği bu hata işaretindeki tepe değerini seçer ve bu özel frekans bir arıza modu olarak tanımlanabilir. Şekil 8.4’de tüm süreç gösterilmiştir.



Şekil 8.4. YYSa ve GA tabanlı bir Akıllı Motor Durum İzleme Sistemi.

Bu uygulamada, hem yinelemeli YSA hem de genetik algoritma, rulman bozukluk frekansını elde etmek için kullanılmıştır. Bu yüzden akıllı durum izleme ve hata tanılama sistemine dayanan tümleşik bir yapı olarak tanımlanmıştır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında endüstriyel süreçlerde en çok kullanılan motor tipi olan asenkron makina arıza tanısına ilişkin olarak rulman arıza tanısı ele alınmıştır. Literatürdeki incelemeler göstermiştir ki elektrik motor arızalarının büyük bir kısmını (%50'den fazla) mekanik nedenli arızalar oluşturmaktadır. Mekanik kökenli arızalar arasında da yine en fazla arıza sebebi rulmanlardır. Son senelerde güç elektroniği sürücü devrelerinin gelişimine paralel olarak ortaya çıkan rulman arızaları genel anlamda rotor mil akımları dolayısıyla oluşmaktadır. Bu nedenle endüstride oldukça fazla karşılaşılan bir arıza tipi olup, süreç güvenirliliği bakımından da son derece önemli bir yer kapsamaktadır.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında ise özellikle rulman arızaları bakımından çeşitli çalışmalar mevcut olup [29-37], her biri benzer teknikler kullanarak daha çok spektral analiz teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ise farklı bir yaklaşım izlenerek çalışma genelde bir uygulama çalışması şeklinde olmasına rağmen, deneysel ve uygulama kısımları birbirlerini destekleyecek şekilde ele alınmıştır. Deneysel çalışmaların tümü *The University of Tennessee-Knoxville* (UTK), Nükleer Mühendislik bölümü ve "*Maintenance & Reliability Center*" bünyesindeki laboratuarlarda gerçekleştirilerek, çalışma UTK ve İTÜ elemanları arasındaki koordineli bir çalışma şeklinde sürdürülmüştür. Arıza tanısında kullanılan orijinal çalışmalar bu tez kapsamında İTÜ'de gerçekleştirilmiştir.

Bu bağlamda öncelikle yapay rulman arızaları laboratuvar ortamında oluşturulmuş olup, toplanan verilerin ileri işaret işleme teknikleri ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hızlandırılmış eskitme (yaşlandırma) süreçlerine maruz bırakılmış motor rulmanları hakkındaki davranış bilgisi, her bir eskitme süreci sonrasında uygulanan motor performans testleri yardımıyla algılayıcı bilgileri olarak elde edilmiştir. Performans testlerinde bir çok algılayıcı kullanılmasına rağmen, bu çalışmada motor üzerinde yer alan toplam 6 ivmeölçer tipindeki titreşim algılayıcısı ve motor

akımlarını alan 3 akım algılayıcısı dikkate alınmıştır. Bu algılayıcıların da analizdeki etkinliklerinin değerlendirilmesi ile sadece bir titreşim bilgisi ve bir akım bilgisini yansıtacak şekilde algılayıcı sonuçları irdelenmiştir. Kullanılan veri toplama sistemi 12 kHz’de örnekleme yapan ve 4 kHz kesim frekansında alçak geçiren filtre karakteristiğine sahip bir sistem olup, toplam 10 saniyelik uzun veri yapıları hazırlanmıştır. Bu veri yapılarının incelenmeleri ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Titreşim verilerinin güç spektrumu yoğunluklarına bakılarak, sağlam ve bozuk süreçlerde görülen farklılıklar yardımıyla rulman arızası, frekans tanım bölgesi için belli bir aralıkta ifade edilebilmiştir. Bu arıza frekansı 2-4 kHz arasında saptanmıştır.
- Yukarıdaki klasik yaklaşımın yanı sıra zaman tanım bölgesindeki titreşim işaretlerinin dalgacık analizleri gerçekleştirilerek arızayı temsil eden özelliğin 1.5-4 kHz arasında yer aldığı, işaret alt bantlarının RMS değerlerine bakılarak çıkartılmış ve bu tip özelliğin motor arıza tanısında literatürde başka bir kaynakta görülmediği saptanmıştır.
- Ayrıca tüm eskitme süreçlerinin istatistiksel bakımından değişimi gözlemlenerek istatistiksel özellikleri çıkartılmış ve bu bağlamda titreşim işaretlerinden rulman eskimesini gösteren baskın parametrenin standart sapma değeri olduğu belirlenmiştir.
- Titreşim işaretlerindeki standart sapma değişimine ilişkin olarak üstel bir eskime modeli gerçekleştirilmiş olup, makina rulmanlarının güvenilirlik derecesini veren bir ölçüt tanımlanmıştır.
- Elektromekanik bir sistem olan elektrik motorunda rulman arızasının motorun şebekeden çektiği akımlara nasıl etkidiği incelenerek, motorun bir fazındaki (diğer fazlarda da aynı sonuçlar görüldü) frekans spektrumları incelenmiş ve 60 Hz’lik (A.B.D’de kullanılan temel frekans değeri) frekans civarındaki yan-bant etkilerine bakılarak rulman arızasının gelişimi motor akımlarından da gözlenmiştir.
- Duyarlı bir arıza tanısı için motor titreşim ve akım işaretleri arasındaki ilişki, rotor hava aralığındaki magnetik kuplajın bir sonucu olarak belirlenerek, işaretler arasındaki ilişki, frekans tanım bölgesi için (coherence) incelenerek arızanın göstergesi olan bazı özel frekanslar saptanmıştır. Bu frekanslar sırasıyla 234 Hz ve onun yaklaşık 2. harmoniği olan 469 Hz’dir.

- Literatürdeki teorik ifadelerden yararlanarak bu çalışma için saptanan 234 ve 469 Hz'lik arızaların sırasıyla rulman arızası nedeniyle oluşan rotor eksenel bozukluğuna ve rulmandaki bilye arızasına karşı geldiği gösterilmiştir. Bu tip bir yaklaşım literatürde ilk kez kullanılmıştır.
- Ayrıca dalgacık analizinin motor akımlarına da uygulanmasıyla, çok çözünürlü dalgacık analizi tekniğinin motor akımlarının analizi bakımından rotor dengesizlik frekansına (29.03 Hz) ilişkin genliği kuvvetlendirdiği saptanarak, bu alanda yeni bir olanak olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu yaklaşıma da daha önce literatürde rastlanmamıştır.
- Son olarak rulman arızasına “yapay zeka” uygulaması yapılarak motor titreşim ve akımları arasındaki ilişki verileri, frekans tanım bölgesindeki genlik değerleri olarak 256 nokta için 256x100x256 lık bir oto-asosiyatif Yinelemeli Yapay Sinir Ağı (YYSA) na öğretilerek, YYSA çıkışlarındaki yanılğı vasıtasıyla arıza frekansları, öğrenme yeteneğine sahip bir sistem vasıtasıyla saptanabilmiştir. Ayrıca bu sistem Genetik Algoritma (GA) tabanlı başka bir sistemle desteklenerek en büyük arıza frekansları kolayca tesbit edilebilmiştir. Bu tip uygulama da literatürde ilk kez gerçekleştirilmiştir.

Bu anlamda yukarıda bu tez çalışmasının sonuçları olarak tanımlanmış olan yenilikler, motor arıza tanısına ilişkin son derece önemli ve orijinal katkılar olup, konu elektriksel ya da mekanik diğer motor arıza tiplerine de kolayca uygulanabilir niteliktedir. Özellikle yapay sinir ağı (YYSA) ve GA tabanlı sistem tümleşik bir yapı olarak ele alındığında motor arıza tanısına yapay zeka tabanlı yeni bir durum izleme sistemini de tanımlamış olacaktır. Böylece endüstriyel süreçlerde yer alan öngörülü bakım (predictive maintenance) teknolojisine yeni bir olanak olarak sunulmuş olacaktır.

Bu nedenle bu tez çalışması uygulamada getirdiği yeni ve kullanışlı olanakların yanısıra endüstriyel süreçlerdeki bakım teknolojilerinin gelişimi bakımından da yeni olanaklar yaratacaktır. Böylece endüstriyel süreçlerde kesintinin önlenmesiyle ekonomiklik sağlanırken, bazı kritik teknolojiler (Askeri, Havacılık ve uzay teknolojileri gibi) bakımından da yüksek güvenilirlik sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Thomson, W.T., and Fenger, M.**, 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, *IEEE Industry Application Magazine*, July/August, 26-34.
- [2] **Şeker, S., Ayaz, E.**, 2001. Endüstriyel Süreçlerde Durum İzleme ve Öngörülü Bakım Teknolojiler, *Elektrik-Elektronik Dergisi*, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Cilt 1, Sayı 1, s.140-142.
- [3] **O’Kane, M.M. and Sander, J. M.**, 2000. Intelligent Motors Move to the Forefront of Predictive Maintenance, *IEEE Industry Applications Magazine*, September/October, 47-51.
- [4] **Arthur, N. and Penman, J.**, 2000. Induction Machine Condition Monitoring with Higher Order Spectra, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 1031-1041.
- [5] **Chow, T.W.S. and Tan, H.Z.**, 2000. HOS-Based Nonparametric and Parametric Methodologies for Machine Fault Detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 1051-1059.
- [6] **King, B.**, 2000. Maintenance Planning, Management, and Evaluation, EQE International, Inc. (an ABS Group Company).
- [7] **Upadhyaya, B.R.**, Introduction to Maintenance and Reliability Engineering, Course Notes, Spring 2000, Knoxville.
- [8] **Lee, J. and Wang, B.**, 1999. Computer-Aided Maintenance, Methodologies and Practises, Kluwer Academic Publishers, London.
- [9] **Hodowanec, M.M., and Bezesky, D.M.**, 1999. Field Motor Testing: Limiting Risk, *IEEE Industry Application Magazine*, May/June, 38-48.
- [10] **Bowers, S.V.**, 1996. Integrated Strategy for Predictive Maintenance of AC Induction Motors, *P/PM Technology*, October, 34-40.
- [11] **Thomson, W.T.**, 1994. On line Current Monitoring to Detect Electrical and Mechanical Faults in three-phase Induction Motor Drives, *Proceedings of the 1994 IEE International Conference on Life Management of Power Plant*, London, 66-73.
- [12] **Crawford, A.R.**, 1992. The Simplified Handbook of Vibration Analysis, Volumes 1&2, Computational Systems, Inc., Knoxville.
- [13] **Bonnett, A.H. and Soukup, G.C.**, 1992. Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **28**, No.4, 921-937.
- [14] **Şeker, S.**, 2000. Bearing Damage Detection Using Wavelet Analysis of Vibration Signals in Electric Motors, *2 nd International Seminar on Vibrations and Acoustic Noise of Electric Machinery*, Lodz, Poland.
- [15] **Seker, S., Upadhyaya, B.R., Erbay, A.S. McClanahan, J.P. and daSilva, A.A.**, 1998. Rotating Machinery Monitoring and Degradation Trending Using Wavelet Transforms, *Maintenance and Reliability Conference Proceedings*, **1**, pp. 23.01-23.11, 12-14 May, Knoxville.

- [16] **Paya, B.A., Esat, I.I. and Badi, M.N.M.**, 1997. Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery Using Wavelet Transforms as a Preprocessor, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **11**, No.5, 751-765.
- [17] **Mori, K.et al.**, 1996. Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals, *Wear*, **195**, No.1-2, 162-168.
- [18] **Benbouzid, M. El H.**, 2000. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 984-993.
- [19] **Erbay, A.S., Upadhyaya, B.R.**, Multi Sensor Fusion for Induction Motor Aging Analysis and Fault Diagnosis, Research Report, UTK, UTNE/BRU/99-01, October 1999, Knoxville.
- [20] **Thorsen, O.V., Dalva, M.**, 1998. Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors, *ETEP*, **8**, No. 5, 383-395.
- [21] **Smiley, R.G.**, 1992. Using line current to diagnose faults in induction motors, *Iron and Steel Engineer*, September, 23-25.
- [22] **Albrecht, P.F., Appiarius, E.P., Cornell, E.P., Sharma, D.K.**, 1987. Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **EC-2**, No.3, 396-406.
- [23] **Joksimovic, G.M. and Penman, J.**, 2000. The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 1078-1084.
- [24] **Trzynadlowski, A.M. and Ritchie, E.**, 2000. Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors: A Case of Rotor Cage Faults, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 1092-1099.
- [25] **Bonnett, A.H.**, 2000. Root Cause AC Motor Failure Analysis with a Focus on Shaft Failures, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **36**, No.5, 1435.
- [26] **Berry, J.**, 1996. Detection of Multiple Cracked Rotor Bars on Induction Motors Using Both Vibration and Motor Current Analysis, *P/PM Technology*, June, 48-59.
- [27] **Rankin, D.**, 1995. The Industrial application of phase current analysis to detect rotor winding faults in squirrel cage induction motors, *Power Engineering Journal*, April, 77-84.
- [28] **Vas, P.**, 1993. Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines.
- [29] **Seker, S.**, 2000. Determination of Air-Gap Eccentricity in Electric Motors Using Coherence Analysis, *IEEE Power Engineering Review*, **20**, No.7, 48-50.
- [30] **Tandom, N., Choudhury, A.**, 1999. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International*, **32**, 469-477.
- [31] **Pandit, S.M., Paul, D. and Roth, J.T.**, 1996. Monitoring and Diagnosis of Bearing Defects Using Data Dependent Systems, *Integrated computer-aided engineering*, **4**, No. 4, 268-278.
- [32] **Li, C.J., Ma, J., Hwang, B.**, 1996. Bearing Condition Monitoring by pattern recognition based on bicoherence analysis of vibrations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Mechanical Engineering Science*, **210**, 277-285.

- [33] Schoen, R.R., Habetler, T.G., Kamran, F. and Bartheld, R.G., 1995. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31**, No.6, 1274-1279.
- [34] Martin, H.R. and Honarvar, F., 1995. Application of Statistical Moments to Bearing Failure Detection, Elsevier Science Limited, *Applied Acoustics*, **44**, 67-77.
- [35] Hong, S.Y., Ni, J. and Wu, S.M., 1994. Preemptive Diagnosis of Minor Machine Failure by DDS Spectrum Analysis, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, February, **116**, 130-133.
- [36] Gradin, L.P., et al., 1994. Test method improves motor bearing wear assessment at Calvert Cliffs, *Power Engineering*, June, 32-33.
- [37] Su, Y.T., Sheen, Y.T., 1993. On the detectability of roller bearing damage by frequency analysis, *Proc. of the Ins. of Mechanical Eng.*, **207**, 23-32.
- [38] Filippetti, F., et. al., 2000. Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 994-1004.
- [39] Li, B., Chow, M.Y., et al., 2000. Neural-Network Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, **47**, No.5,
- [40] Fuessel, D. and Iserman, R., 2000. Hierarchical Motor Diagnosis Utilizing Structural Knowledge and a Self-Learning Neuro-Fuzzy Scheme, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **47**, No.5, 1070-1077.
- [41] Jack, L.B., and Nandi, A.K., 2000. Genetic Algorithms for Feature Selection in Machine Condition Monitoring with Vibration Signals, *IEEE Proc.-Vis. Image Signal Process.*, **147**, No.3, June, 205-212.
- [42] Gao, X.Z., Ovaska, S.J., 2000. Motor fault detection using Elman neural network with genetic algorithm-aided training, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, **4**, pp. 2386-2392.
- [43] Benbouzid, M. El H., Vieira, M. and Theys, C., 1999. Induction Motors' Fault Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques, *IEEE Trans. on Power Electr.*, **14**, 1, 14-22.
- [44] Vas, P., 1999. Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines And Drives, Oxford University Press, Inc.
- [45] Yazıcı, B. and Kliman, G.B., 1999. An Adaptive Statistical Time-Frequency Method for Detection of Broken Bars and Bearing Faults in Motors Using Stator Current, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **35**, No.2, 442-452.
- [46] Subrahmanyam, M. and Sujatha, C., 1997. Using Neural Networks for the Diagnosis of Localized Defects in Ball Bearings, *Tribology International*, **30**, No.10, 739-752.
- [47] Murray, A. and Penman, J., 1997. Extracting Useful Higher Order Features for Condition Monitoring Using Artificial Neural Network, *IEEE Transactions on Signal Processing*, **45**, No.11, 2821-2828.
- [48] Li, C.J. and Ma, J., 1997. Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects, *NTD&E International; independent nondestructive testing and evaluation*, **30**, No.3, 143-149.
- [49] Liu, T.I., et. al., 1996. Detection of Roller Bearing Defects using Expert System and Fuzzy Logic, *Mech. Sys. and Signal Proces.*, **10**, No.5, 595-614.
- [50] Filippetti, F., et al., 1995. Neural Networks Aided On-Line Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31**, No.4, 892-899.

- [51] **Schoen, R.R., et al.**, 1995. An Unsupervised, On-Line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **31**, No.6, 1280-1286.
- [52] **Barker, S.**, 2000. Avoiding Premature Bearing Failure with Inverter-fed Induction Motors, *Power Engineering Journal*, August, 182-189.
- [53] **Wang, F.**, 2000. Motor Shaft Voltages and Bearing Currents and Their Reduction in Multilevel Medium-Voltage PWM Voltage-Source-Inverter Drive Applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **36**, No. 5, 1336-1341.
- [54] **Sharke, P.**, 2000. Current Jam, *Mechanical Engineering*, May, 64-67.
- [55] **Prashad, H.**, 1999. Diagnosis and Cause Analysis of Rolling-Element Bearing Failure in Electrical Power Equipment Due to Current Passage, *Lubrication Engineering*, May, 30-35.
- [56] **Macdonald, D. and Gray, W.**, 1999. PWM Drive Related Bearing Failures, *IEEE Industry Application Magazine*, July/August, 41-47.
- [57] **Link, P.J.**, 1999. Minimizing Electric Bearing Currents in ASD Systems, *IEEE Industry Application Magazine*, July/August, 55-66.
- [58] **Chen, S., Lipo, T.A.**, 1998. Bearing Currents and Shaft Voltages of an Induction Motor Under Hard- and Soft- Switching Inverter Excitation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **34**, No. 5.
- [59] **von Jouanne A., Zhang, H.**, 1998. Bearing Currents: A Major Source of Mechanical Failure for Motors in Adjustable Speed Drive Applications, *Turning Point* (published by US DOE program).
- [60] **Bell, S., Epperly, R.A., et al.**, 1998. Experience with Variable Frequency Drives and Motor Bearing Reliability, *IEEE Record-of-Conference-Papers-Annual-Petroleum-and-Chemical Industry Conference*, Piscataway, NJ, USA, 253-262.
- [61] **Busse, D.F., Erdman, J.M., et al.**, 1997. An Evaluation of the Electrostatic Shielded Induction Motor: A Solution for Rotor Shaft Voltage Buildup and Bearing Current, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **33**, No. 6, 1563-1570.
- [62] **Busse, D.F., Erdman, J.M., et al.**, 1997. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **33**, No. 2, 567-576.
- [63] **Busse, D.F., Erdman, J.M., et al.**, 1997. System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **33**, No. 2, 577-584.
- [64] **Kowal, D.**, 1997. Bearing Damage Resulting from Shaft Voltages and Currents, CSI.
- [65] **Langhorst, P., Tek, M. and Hancock, C.**, 1997. Dealing with Motor Shaft Voltages and Bearing Currents *Maintenance Techn.*, Nov., 24-27.
- [66] **Busse, D., Erdman, J., Kerkman, R., Schlegel, D. and Skibinski G.**, 1997. Characteristics of Shaft Voltage and Bearing Currents, *IEEE Industry Application Magazine*, November/December, 21-32.
- [67] **Chen, S., Lipo, T.A., Fitzgerald, D.**, 1996. Source of Induction Motor Bearing Current Caused by PWM Inverters, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **11**, No. 1.
- [68] **von Jouanne, A., Enjeti, P., and Gray W.**, 1996. Application issues for PWM Adjustable Speed AC Motor Drives, *IEEE Industry Applications Magazine*, September/October.

- [69] Costello, M.J., 1993. Shaft Voltages and Rotating Machinery, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **29**, No.2, 419-425.
- [70] Trutt, F.C. et al., 1993. Prediction of Electrical Behaviour in Deteriorating Induction Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **29**, No.6, November/December, 1239-1243.
- [71] Erbay, A.S., Upadhyaya, B.R., McClanahan, J.P. and Seker, S., 1998. Accelerated Aging Studies of Induction Motors, *MARCON' 98 Maintenance and Reliability Conference Proceedings*, **1**, pp. 33.01-33.14, 12-14 May, Knoxville, USA.
- [72] Galli A.W., Heydt, G.T., Riberio, P.F., 1996. Exploring the Power of Wavelet Analysis, *IEEE Computer Applications in Power*, October, 37-41.
- [73] Robertson, D.C., Camps, O.I., Mayer, J.S., Gish, W.B., 1996. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **11**, No.2, 1050-1058.
- [74] Wilkinson, W.A., Cox, M.D., 1996. Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients, *IEEE Trans. on Power Systems*, **11**, 4, 2038-2044.
- [75] Pillay, P., Bhattacharjee, A., 1996. Application of Wavelets to Model Short-Term Power System Disturbances, *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**, No.4, 2031-2037.
- [76] Santoso, S., Powers, E.J., Hofmann, P., 1996. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **11**, No.2, 924-930.
- [77] Gaouda, A.M., Salama, M.M.A., Sultan, M.R., Chikkani, A.Y., 2000. Application of Multiresolution Signal Decomposition for Monitoring Short Duration Variations in Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, No.2, 478-485.
- [78] Borrás, D., Castilla, M., Moreno, N., Montano, J.C., 2001. Wavelet and Neural Structure: A New Tool for Diagnostic of Power System Disturbances, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **37**, 1, 184-190.
- [79] Şeker, S., Türkcan, E., Upadhyaya, B., Erbay, A.S., Applications of Wavelet Transforms for Nuclear Power Plant Signal Analysis, *MARCON'98*.
- [80] Dowling, M.J., 1993. Application of Nonstationary Analysis to Machinery Monitoring, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **1**, I-59-I62.
- [81] Burnett, R., 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.
- [82] Burnett, R., Watson, J.F., 1995. 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 No.412, 156-160.
- [83] Chen, Chao-Ming, Loparo, K.A., 1998. Electric Fault Detection for Vector-Controlled Induction Motors using the Discrete Wavelet Transform, *Proceeding of the American Control Conference*, **6**, 3297-3301.
- [84] Wang, J., McInerny, S., Haskew, T., 2000. Insulation Fault Detection in a PWM Controlled Induction Motor – Experimental Design and Preliminary Results, *Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, **2**, 487-492.

- [85] **Zhongming, Y., Wu, B.**, Induction Motor Mechanical Fault Simulation and Stator Current Signature Analysis, 2000. *International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000*, **2**, 789-794.
- [86] **Zhongming, Y., Wu, B., Zargari, N.**, 2000. Online Mechanical Fault Diagnosis of Induction Motor by Wavelet Artificial Neural Network using Stator Current, *26th Annual Conference of the IEEE*, Industrial Electronics Society, **2**, 1183-1188.
- [87] **Zhang, X.H., Cao, Y.N., Li, Y.L.**, 2001. A New Project for Motor Fault Detection and Protection, *Developments in Power System Protection, IEE Conference Publication*, No.479, 145-148.
- [88] **Zhitong, C., Hongping, C., Guoguang, H., Ritchie, E.**, 2001, *ICEMS 2001*, **1**, 374-377.
- [89] **Abbaszadeh, K., Milimonfared, J., Haji, M.**, 2001. Toliyat, H.A., Broken Bar Detection in Induction Motor via Wavelet Transformation, *The 27th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, **1**, 95-99.
- [90] **Li, C.J., Ma, J.**, 1997. Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects, *NDT & E International; independent nondestructive testing and evaluation*, **30**, 143-149.
- [91] **Staszewski W.J.**, Structural and Mechanical Damage Detection Using Wavelets, 1998. *The Shock and Vibration Digest*, **30**, No.6, 457-472.
- [92] **Paya, B.A., Esat, I.I.**, 1997. Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery using Wavelet Transform as a Preprocessor, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **11**, No.5, 751-765.
- [93] **Engin, Ş.N., Gülez, K., Badi, M.N.M.**, 1999. Advanced Signal Processing Techniques for Fault Diagnostics – A Review, *Mathematical & Computational Applications*, **4**, No. 2, 121-136.
- [94] **Eren, L., Devaney, M.J.**, 2001. Motor Bearing Damage Detection via Wavelet Analysis of the Starting Current Transient, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, **3**, 1797-1800.
- [95] **Wowk, V.**, 1991. Machinery Vibration, Measurement and Analysis, McGraw-Hill, Inc., 148-164.
- [96] **Bodine Electric Company**, 1993. Small Motor, Gearmotor and Control: Handbook, 60618, 1–16.
- [97] SKF Application Reference Catalog CM5023, CM3005, CM1007, CM3021, CM3022.
- [98] **Ayaz, E., Şeker, S., Uçan, O.N., Kaynaş, T.**, 2000. Hızlandırılmış Eskitme Süreçleri Altında Motor Titreşim İşaretlerinin İzlenmesi Ve Arıza Uyarı Seviyesinin Belirlenmesi, *ELECO'2000*, 8-12 Kasım, Bursa.
- [99] **Şeker, S., Ayaz, E., Bağrıyanık, M.**, 1999. Bearing Damage Detection Using Accelerated Aging Processes for Electric Motors, *YTÜ Dergisi*.
- [100] **Şeker, S., Ayaz, E., Türkcan, E., Erbay, A.S.**, 1999. Dalgacık Analizi Tekniği ile Elektrik Makinalarında Hızlandırılmış Eskimeye Bağlı Rulman Arıza Tanısı, *SIU'99, Sinyal İşleme Uygulamaları Kurultayı*, Bilkent Üniversitesi, Ankara.
- [101] **Yıldız, S. D., Şeker, S., Ayaz, E.**, 1999. Elektrik Makinlarında Hızlandırılmış Rulman Arızasına İlişkin İstatistiksel Veri Analizi, *8. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Kongresi*, Gaziantep.
- [102] **Milewski, E.G.**, 1996. The Essentials of Statistics Vol. 1, Research and Education Association.

- [103] **Taylor, J.K.**, 1990. Statistical Techniques for Data Analysis, Lewis Publishers.
- [104] **Ushakov, I.A.**, 1994. Handbook of Reliability Engineering, John Wiley and Sons.
- [105] **Şeker, S., Ayaz, E., Upadhyaya, B. R., Erbay, A. S.**, 2000. Analysis of Motor Current and Vibration Signals for Detecting Bearing Damage in Electric Motors, *MARCON 2000, Maintenance And Reliability Conference*, Knoxville, May 8-10.
- [106] **Şeker, S., Türkan, E., Erbay, A. S., Ayaz, E.**, 2000. Elektrik makinalarında Hava Aralığındaki Düzgün Olmayan Magnetik Alan etkisinin Belirlenmesi, *SIU'2000, Sinyal İşleme Uygulamaları Kurultayı*, 12-14 Haziran, Antalya.
- [107] **Galli A.W., Nielsen, O.M.**, 1999. Wavelet Analysis for Power System Transients, *IEEE Computer Applications in Power*, January, 16-25.
- [108] **Valens, C.**, 1999. A Friendly Guide to Wavelets.
- [109] **Rao, R.M., Bopardikar, A.S.**, 1998. Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications, Addison-Wesley.
- [110] **Qian, S., Chen, D.**, 1996. The Joint Time -Frequency Analysis-Methods and Applications, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [111] **Strang, G., Nguyen, T.**, 1996. Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press, USA.
- [112] **Robertson, D.C., Camps, O.I., Mayer, J.S., Gish, W.B.**, 1996. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients, *IEEE Transaction on Power Delivery*, **11**, No. 2, 1050-1068.
- [113] **Galli, A.W., Heydt, G.T., Riberio, P.F.**, 1996. Exploring the Power of Wavelet Analysis, *IEEE Computer Applications in Power*, 37-41.
- [114] **Chan, Y.T.**, 1995. Wavelet Basics, Kluwer Academic Publishers.
- [115] **Akansu, A.N., Haddad, R.A.**, 1992. Multiresolution Signal Decomposition, Academic Press, USA, 1992.
- [116] **Young, R.K.**, 1993. Wavelet Theory and its Applications, Kluwer Academic Publishers.
- [117] **Daubechies, I.**, 1990. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis, *IEEE Trans. on Information Theory*, **36**, No.5.
- [118] **Mallat, S.G.**, 1989. Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L^2(R)$, *Trans. Amer. Math. Soc.*, **315**, No.1, 69-87.
- [119] **Mallat, S.**, 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition the Wavelet Representation, *IEEE Trans. Pattern Anal. And Machine Intelligence*, **11**, No.7, 674-693.
- [120] **Vaseghi, V.S.**, 1996. Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction, John Wiley, New York.
- [121] **Pasand, M.S., Malik, O.P.**, 1999. High Speed Transmission Line Directional Protection Evaluation using Field Data, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **14**, No. 3, 851-856.
- [122] **Elman, J.**, 1990. Finding structure in time. *Cognitive Science*, **14**, 179-211.
- [123] **Vonk, E., Jain, L.C., Johnson, R.P.**, 1997. Automatic Generation of Neural Network Architecture Using Evolutionary Computation, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

EK A

DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ VE ÇOK ÇÖZÜNÜRLÜ ANALİZ

Fourier teorisinden bilindiği gibi, bir işaret sonsuz uzunluklu olan sinüs ve kosinüs serilerinin bir toplamı olarak ifade edilebilir. Böyle bir ayrıştırma ile işarete varolan bütün frekanslar belirlenebilir fakat bu frekansların ne zaman varolduklarına ilişkin bir bilgi elde edilemez. Son on yılda bu problemi aşmak için çeşitli çözümler geliştirilmiştir. Bu çözümler yoluyla bir işaret hem zaman, hem de frekans tanım bölgelerinde temsil edebilir [107-119].

Birleşik zaman-frekans gösterimini elde edebilmek için izlenilen yol; ilgilenilen işareti çeşitli parçalara bölmek ve sonra bu parçaları ayrı ayrı analiz etmektir. Bir işareti bu yolla analiz etmek farklı frekans bileşenlerinin ne zaman ve nerede olduğu hakkında daha fazla bilgi verecektir, fakat aynı zamanda da işaretin nasıl bölüneceği gibi temel bir problem de söz konusudur. Bir işaretin zaman-frekans gösterimini bulmada uygulanan ilk yöntem, Kısa-zaman Fourier dönüşümüdür. Bu dönüşümde bir işaret seçilmiş bir pencere fonksiyonuyla pencerelenir ve daha sonra işaretin bu pencere fonksiyonu ile iç çarpımının Fourier dönüşümü alınır. Böylece bir işarettaki hem zaman hem de frekans bilgisi elde edilebilir. Kısa-zaman Fourier dönüşümünün özel hali olan Gabor dönüşümünde pencere fonksiyonu olarak Gauss fonksiyonu kullanılmıştır. Bu dönüşümlerin olumsuz bir tarafı kullanılan pencere fonksiyonunun uzunluğunun sabit olmasından doğan çözünürlük problemidir. Çözünürlük, bir işarettaki bilgi miktarıdır ve zaman çözünürlüğü ile frekans çözünürlüğü arasındaki ilişki Heisenberg belirsizlik prensibi ile verilir. İşaret işleme terimleriyle belirsizlik prensibi şöyledir; işarettaki frekans oluşumunun tam zamanı ve tam frekansını bilmek mümkün değildir. Diğer bir deyişle, bir işaret zaman-frekans uzayında bir nokta olarak basitçe gösterilemez. Belirsizlik prensibi işaretin nasıl pencerelendiğinin önemli olduğunu gösterir. Örneğin zaman tanım bölgesinde verilen bir işaretin frekans çözünürlüğü yoktur. Aynı şekilde frekans tanım bölgesinde ifade edilen bir işaretin de zaman çözünürlüğü yoktur. Kısa-zaman Fourier dönüşümü kullanılarak zaman-frekans tanım bölgesinde gösterilen bir işaretin zamanda ve frekansdaki çözünürlükleri aynıdır [115,116]. Uygulamada karşılaşılan işaretler genellikle yüksek frekanslarda kısa süreli ve düşük frekanslarda uzun sürelidir. Bu nedenle farklı uzunluklu pencereler kullanmak gerekecektir.

Dalgacık dönüşümü veya dalgacık analizi, bu yetersizliğin üstesinden gelmek için en yeni çözümdür. Dalgacıkların temeli 1909 yılında Alfred Haar'ın şimdiki Haar fonksiyonu olarak isimlendirilen çalışmasına dayanır. Yakın geçmişte bu tip fonksiyonlara ilginin oluşması 1982'de Morlet ve Grossman tarafından sismik verilerin analizinde dalgacık fonksiyonlarını kullanmalarıyla sağlanmıştır. 1988'de Ingrid Daubechies in yaptığı çalışmalar modern dalgacık analizine katkıda kilometre taşı olmuştur. Ingrid Daubechies, özel durum olarak Haar dalgacığını içeren tam destekli ortonormal dalgacıklar üzerinde çalışmıştır. Aynı yıl Stephane Mallat, çok

çözünürlüklü analiz üzerinde çalışmalar yayınlamış ve Daubechies'in tanımladığı tam destekli ortogonal dalgacık fonksiyonlarını kullanarak dalgacık dönüşümünün hızlı hesaplanmasına imkan veren ve şimdi Mallat piramid algoritması olarak da isimlendirilen bir algoritma geliştirmiştir. O zamandan beri dalgacıklar, görüntü işleme, veri sıkıştırma, işaret analizi, ve diferensiyel eşitliklere sayısal çözümlemeler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [107].

A.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümünde tümüyle ölçeklenebilir modüle edilmiş bir pencere işaret boyunca kaydırılır ve her konum için spektrum hesaplanır [108]. Sonra bu işlem her yeni tur için hafif kısa (veya uzun) pencereyle bir çok kez tekrarlanır. Sonunda, işaretin zaman-frekans gösterimi, hepsi de farklı çözünürlüklü olan işaretler olacaktır. Dalgacıklar söz konusu olduğunda normalde zaman-frekans gösterimi hakkında değil, frekansın karşısının ölçek olmasından dolayı ve frekans terimi Fourier dönüşümü için kullanıldığından dolayı, zaman-ölçek gösterimi ifadesi kullanılır.

Ölçek kavramı haritalarda kullanılan ölçekle aynıdır. Büyük ölçek büyük bir resimdir, küçük ölçekler detayları gösterir. Bu yüzden büyük ölçekten küçük ölçeğe gitmek bu anlamda içe doğru resmi büyütmeektir. Aşağıdaki özellikleri sağlayan reel veya kompleks değerli sürekli zamanlı bir işarete ana dalgacık denir. Bu anlamda fonksiyonun integrali sıfır olmalı,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (A.1)$$

ve fonksiyonun karesi integre edilebilmeli, yani fonksiyon sonlu enerjili olmalıdır.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (A.2)$$

Karesel integre edilebilir bir $s(t)$ fonksiyonunun bir $\psi(t)$ dalgacığına göre sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (A.3)$$

Burada a ve b reel sayıları ve $*$ sembolü kompleks eşleniği göstermek üzere dalgacık dönüşümü iki değişkenin bir fonksiyonudur. $s(t)$ ve $\psi(t)$ fonksiyonları $L^2(R)$ karesel integre edilebilir fonksiyonlar kümesine ait olduğu için yukarıdaki eşitlik $\psi_{a,b}(t)$ tanımı ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right), \quad (A.4)$$

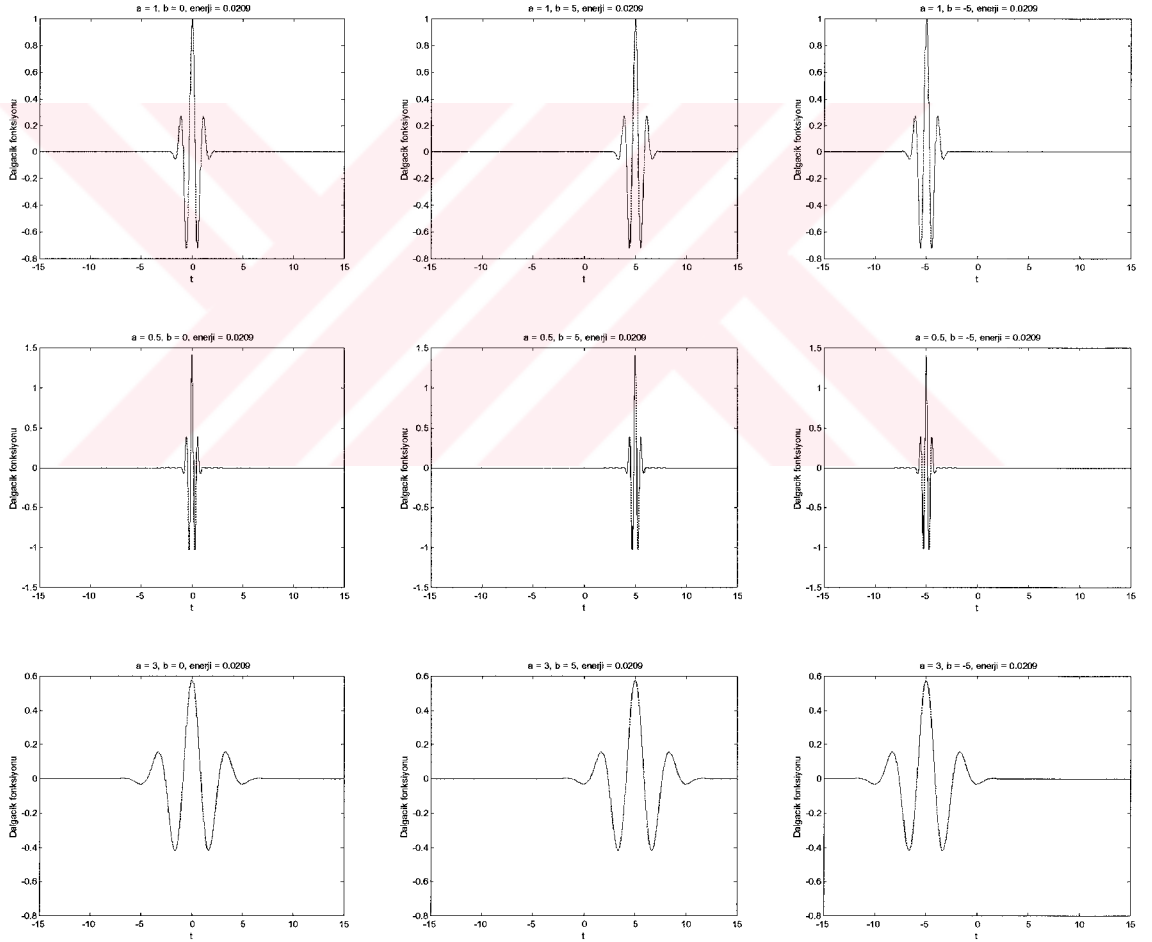
$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt. \quad (A.5)$$

Burada $\psi(t)$ ana dalgacığının farklı a ve b değerleri için elde edilen $\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonlarına dalgacık ailesi adı verilir.

Normalizasyon faktörü $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ ise her a ve b değeri için enerjinin aynı kalmasını sağlar. Yani,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi_{a,b}(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt \quad (\text{A.6})$$

Burada a parametresi ölçek veya yayılma değişkeni olarak, b parametresi de öteleme değişkeni olarak isimlendirilir. Eğer $a > 1$ ise $\psi(t)$ zaman ekseninde yayılır, $0 < a < 1$ ise $\psi(t)$ zaman ekseninde daralır. Aşağıdaki Şekil A.1'de $\psi(t) = e^{-t^2} \cos\left(\pi\sqrt{\frac{2}{\ln 2}}t\right)$ eşitliğiyle verilen reel-değerli Morlet dalgacığının farklı ölçek ve öteleme değerlerindeki değişimleri ve enerjileri gösterilmiştir.



Şekil A.1. Morlet dalgacığının reel kısmının farklı ölçek ve öteleme parametrelerindeki değişimi ve enerjisi.

Temelde, sürekli zaman dalgacık dönüşümü bir $s(t)$ işareti ile her a ve b değerinde ötelenen ve yayılan $\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonları arasındaki korelasyonların biriktirilmesidir.

Eğer ana dalgacık $0 < C < \infty$ olmak üzere

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega \quad (\text{A.7})$$

kabul edirlilik koşulunu sağlıyorsa $s(t)$ işareti

$$s(t) = \frac{1}{C} \int_{a=-\infty}^{\infty} \int_{b=-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a,b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (\text{A.8})$$

bağıntısıyla yeniden tam olarak elde edilebilir. Burada $\psi(\omega)$; $\psi(t)$ 'nin Fourier dönüşümüdür. $0 < C < \infty$ koşulundan $\Psi(0)=0$ olmalıdır ve bu da ana dalgacığın bant geçiren bir yapıda olduğunu gösterir.

A.2 Ayırık Dalgacık Dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümünde, sürekli olarak ölçeklenen bir fonksiyonun sürekli olarak işaret üzerinde kaydırılıp ikisi arasındaki korelasyonların hesaplanmasıyla elde edilen dalgacık dönüşümü katsayıları gereksiz terimler ve gereksiz bilgi içerir, ve hesaplama zamanı fazladır. Ayırık dalgacık dönüşümü, orjinal işaretin hem analizi hem de sentezi için yeterli bilgiyi sağlamakla birlikte hesaplama zamanında önemli bir azalma da getirir [108]. Bu amaçla dalgacıklar ayrıklaştırılır.

m ve n tamsayı ve $a_0 > 1$, $b_0 > 0$ olmak üzere (A.4) denkleminde ölçek parametresi $a = a_0^m$ ve öteleme parametresi $b = nb_0 a_0^m$ alınarak a ve b parametreleri ayrıklaştırılır. Genellikle $a_0=2$ ve $b_0=1$ olarak seçilir ve bu seçim sırasıyla frekans ve zaman eksenlerinin diadik (ikinin kuvvetleri) olarak örneklenmesine olanak verir. Bu yolla elde edilen dalgacık ailesi aşağıda verilmiştir.

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (\text{A.9})$$

Eğer $\{\psi_{m,n}(t)\}$ dalgacık kümesi

$$\int \psi_{m,n}(t) \psi_{m',n'}(t) dt = \begin{cases} 1, & m = m', n = n' \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

eşitliğini sağlıyorsa bunlara ortonormal dalgacıklar denir. $s(t)$ işareti aşağıdaki bağıntıdaki gibi ifade edilen formda gösterilir.

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{m,n} 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (\text{A.10})$$

İki-boyutlu $d_{m,n}$ dizisi, $s(t)$ işaretinin ayırık dalgacık dönüşümü olarak isimlendirilir. Burada yalnızca a ve b parametreleri ayrıklaştırılmış olup ayırık dalgacık dönüşümü, hala sürekli zamanlı bir işaretin dönüşümüdür ve dalgacıklar da sürekli. Bu nedenle ayırık dalgacık dönüşümü, sürekli zaman dalgacık serisi olarak da isimlendirilir.

Ayrık ana dalgacık $\psi(k)$ 'e göre ayrık zaman dalgacık serisi de aşağıdaki gibi tanımlanır [116]:

$$d_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k) \psi\left(\frac{k - n2^m}{2^m}\right) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k) \psi(2^{-m}k - n) \quad (\text{A.11})$$

Dalgacık dönüşümünün pratik ve etkin olabilmesi için hızlı algoritmalara ihtiyaç duyulur ve aslında bu hızlı algoritmaların varlığı dalgacık dönüşümünü bugün oldukları yere getirmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümünü etkin bir şekilde hesaplayan algoritma, 1988 yılında Mallat tarafından filtreler kullanılarak geliştirilmiştir.

A.3 Çok Çözünürlü İşaret Analizi

Mallat ve Meyer, dalgacık ve çok çözünürlü analiz yapısı arasında yakın bir ilişki olduğunu ortaya çıkararak ana dalgacığın kolaylıkla hesaplanabilmesini sağlamışlardır [110]. Daubechies ise, sonlu impuls cevaplı filtre (FIR) kümeleri yardımıyla, sonlu uzunluklu ortonormal dalgacıkları elde etmede sistematik bir teknik geliştirmiştir.

Kısa-zaman Fourier dönüşümü tabanlı işaret ayrıştırma ile dalgacık dönüşümü tabanlı işaret ayrıştırma arasındaki önemli bir fark şudur: Kısa-zaman Fourier dönüşümünde pencere fonksiyonu olarak hemen hemen her fonksiyon kullanılabilirken dalgacıkla işaret ayrıştırması için kullanılacak ana dalgacık kabul edirlilik koşulunu sağlamalıdır. Bu yüzden, dalgacık analizinde temel bir konu istenilen ana dalgacığın nasıl oluşturulacağıdır. Ana dalgacık $\psi(t)$ 'yi hesaplamak için ilk olarak Mallat ve Meyer'in çalıştığı popüler bir algoritma, çok çözünürlü analiz yapısına dayanır. Bu kısımda çok çözünürlü analiz ve ayrık dalgacık dönüşümünün filtre kümeleriyle hesaplanması incelenecektir. Gerçekte, çoğu uygulamalarda ana dalgacık fonksiyonunu açık olarak hesaplamaksızın filtre kümeleri yardımıyla dalgacık dönüşümü iyi bir şekilde hesaplanmaktadır.

A.3.1 Çok Çözünürlü Analiz Tanımı

Çok çözünürlü analizde $f \in L^2(\mathbb{R})$ olmak üzere bir fonksiyon, her biri farklı çözünürlükte olan yaklaşımları biçiminde ifade edilir. Fonksiyonun bu yaklaşımları ölçekleme fonksiyonu olarak isimlendirilen ve alçak geçiren özellikte olan bir $\phi(t)$ ana fonksiyonuyla konvolüsyon alınarak bulunur. Çok çözünürlü analiz; içiçe girmiş $\{V_m, m \in \mathbb{Z}\}$ lineer vektör uzaylarını içerir ve bunlar aşağıdaki özellikleri sağlarlar [115]:

$$(i) \quad \dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \dots \quad (\text{A.12})$$

$$(ii) \quad \bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m = \{0\} \text{ ve } \bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m = L^2(\mathbb{R}) \quad (\text{A.13})$$

$$(iii) \quad \text{Her } f \in L^2(\mathbb{R}) \text{ için } f(x) \in V_m \Leftrightarrow f(2x) \in V_{m-1} \quad (\text{A.14})$$

$$(iv) \quad \forall m \in \mathbb{Z} \text{ olmak üzere } \phi(t) \in V_0 \text{ fonksiyonu vardır, öyleki}$$

$$\{\phi_m(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n)\} \quad (\text{A.15})$$

kümesi V_m 'in ortonormal bir bazıdır, yani,

$$\int \phi_{mn}(t) \phi_{m'n'}(t) dt = \delta_{n-n'} \quad (\text{A.16})$$

olur. V_{m-1} içinde V_m 'in ortogonal tümleyeni W_m olsun.

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m, \quad V_m \perp W_m \quad (\text{A.17})$$

Ayrıca mümkün olan sonsuz sayıdaki W_m uzaylarının direk toplamı $L^2(R)$ 'yi versin:

$$\dots \oplus W_j \oplus W_{j-1} \dots \oplus W_0 \dots \oplus W_{-j+1} \oplus W_{-j+2} \dots = L^2(R) \quad (\text{A.18})$$

P_m ve Q_m , $L^2(R)$ 'den V_m ve W_m uzaylarına izdüşüm operatörleri olsun. ii) özelliğinden dolayı her $f \in L^2(R)$ için $\lim_{m \rightarrow \infty} P_m f = f$ olur. i) özelliğinden dolayı m azalırken $P_m f$, f 'in daha iyi yaklaşımlarını verir.

Her f fonksiyonunun $P_{m-1}f$ yaklaşımı, V_{m-1} uzayına fonksiyonun izdüşümü alınarak bulunur. (A.17) eşitliğinden f fonksiyonunun $m-1$ 'deki yaklaşımı; f 'in V_m ve W_m üzerine izdüşümlerinin toplamı olarak yazılırsa

$$P_{m-1}f = P_m f + Q_m f \quad (\text{A.19})$$

elde edilir. $P_m f$; V_m uzayında f 'in alçak geçiren kısmıdır ve $Q_m f$; yüksek frekans detayı ya da farktır. (A.19) eşitliğinden $Q_m f \in W_m$ olmak üzere $Q_m f = P_{m-1}f - P_m f$ dir ve $Q_m f$, V_m 'den V_{m-1} 'e giden bilgidir. $\phi(t-n) \in V_0$ ve $\phi(2t-n) \in V_{-1}$ olup V_0 uzayını $\{\phi(t-n)\}$ ortonormal kümesi ve V_{-1} uzayını da $\{\phi(t-n)\}$ ortonormal kümesi tanımlar. Bu durumda $\psi(t) \in W_0$ gibi bir fonksiyon vardır ve bu fonksiyonun $\{\psi(t-n)\}$ ile gösterilen ötelenmiş biçimleri W_0 uzayını oluşturur. $\psi(t)$ fonksiyonu çok ölçekli analiz ile birleştirilen dalgacık fonksiyonudur. iii) özelliğinden dolayı W_m uzayı $\{\psi(2^{-m}t-n)\}$ 'lerden oluşur. (A.18) denklemi W_m uzaylarının birbirleriyle ortogonal olduğunu ve bunların direk toplamı $L^2(R)$ 'yi verdiğini gösterir. Her m için $\{\psi_{mn}(t); n \in \mathbb{Z}\}$ kümesi W_m 'in ortonormal bazı olduğu için $\{\psi_{mn}(t); m, n \in \mathbb{Z}\}$ de $L^2(R)$ nin ortonormal dalgacık bazıdır. $\{\psi_{mn}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t-n)\}$ kümesi çok ölçekli analiz ile ilişkilendirilen dalgacık bazıdır ve dalgacıklar

$$\int \psi_{mn}(t) \psi_{m'n'}(t) dt = \delta_{m-m'} \delta_{n-n'} \quad (\text{A.20})$$

bağıntısını sağlar.

$$V_{i-1} = W_i \oplus V_i = W_i \oplus W_{i+1} \oplus W_{i+2} \dots \quad (\text{A.21})$$

olduğu için f 'in $m-1$ çözünürlüğündeki yaklaşımı olan $P_{m-1}f$, farklı ölçeklerdeki detayların toplamı olarak ifade edilir. Çok çözünürlü analizinin sonucu olarak ölçekleme fonksiyonu

$$\phi(t) = 2 \sum_n h_0(n) \phi(2t-n) \quad (\text{A.22})$$

biçiminde ifade edilirse dalgacık fonksiyonu da

$$\psi(t) = 2 \sum_n h_1(n) \phi(2t - n) \quad (\text{A.23})$$

olur. Burada $\{h_0(n)\}$ ara ölçek bazları katsayıları olup aşağıda gösterileceği gibi iki kanallı filtre kümesinde alçak geçiren filtrenin impuls cevabına, $\{h_1(n)\}$ 'de yüksek geçiren filtrenin impuls cevabına karşı düşer.

A.3.2 Filtre Kümeleri ve Dalgacık İlişkisi

(A.22) eşitliğinin her iki tarafının Fourier dönüşümü alınarak yinelenmesi sonucu Ω ve ω ; sürekli zaman ve ayrık zaman işaretinin frekans değişkenleri, $\Phi(\Omega)$ ve $\Psi(\omega)$; $\phi(t)$ ve $\psi(t)$ 'nin Fourier dönüşümü, $H_0(e^{j\omega})$ ve $H_1(e^{j\omega})$; $h_0(n)$ ve $h_1(n)$ 'in Fourier dönüşümü olmak üzere

$$\Phi(\Omega) = \Phi(0) \prod_{k=1}^{\infty} H_0\left(e^{j\frac{\Omega}{2^k}}\right) \quad (\text{A.24})$$

bulunur. Ölçekleme fonksiyonunu

$$\int \phi(t) dt = 1 \quad (\text{A.25})$$

olarak normalize edilirse

$$\Phi(0) = 1 \quad (\text{A.26})$$

olur. (A.23) ve (A.24) eşitliklerinden $\sum_n h_0(n) = 1$ ve $H_0(e^{j\omega})|_{\omega=0} = 1$ olur.

$\sum_n h_0(n) = 1$ 'deki toplamın yakınsaması için $\{h_0(n)\}$ sonlu sayıda olmalıdır ve bu yüzden $\{h_0(n)\}$ sonlu impuls cevaplı filtre (FIR-Finite Impulse Response Filter) olur. Bu durumda sürekli zamanlı ölçekleme fonksiyonunun Fourier dönüşümü, $\{h_0(n)\}$ ölçek katsayılarının ayrık zaman Fourier dönüşümünün sonsuz çözünürlü sayıdaki çarpımından oluşur. Eğer $\{h_0(n)\}$ sonlu sayıda ise $\phi(t)$ ölçekleme fonksiyonu tam (compact) desteklidir denir, yani, eğer $h_0(n)$; $0 \leq n \leq N-1$ gibi sonlu sayıda elemandan oluşuyorsa $\phi(t)$ 'de $0 \leq n \leq N-1$ aralığındadır.

Her m için $\{\phi_{mn}(t)\}$ kümesinin ortonormal olabilmesi için $H_0(e^{j\omega})$ 'nın sağlaması gereken bağıntı, $\Phi(\Omega)$ 'nin aşağıdaki eşitlikle verilen frekans domenindeki ortonormallik bağıntısı kullanılarak

$$\sum_k |\Phi(\Omega + 2k\pi)|^2 = 1 \quad (\text{A.27})$$

ve bazı ara işlemlerden sonra [115],

$$|H_0(e^{j\omega})|^2 + |H_0(e^{j(\omega+\pi)})|^2 = 1 \quad (\text{A.28})$$

olarak elde edilir. Burada

$$\omega = 0 \Rightarrow |H_0(e^{j\omega})|^2 + |H_0(e^{j\omega}e^{j\pi})|^2 = 1 \Rightarrow 1 + |H_0(e^{j\pi})|^2 = 1 \Rightarrow |H_0(e^{j\omega})|_{\omega=\pi} = 0$$

olur. (A.28) eşitliğini sağlayan H_0 alçak geçiren filtresine *tam olarak yeniden oluşturan karesel ayna filtre* (PR-QMF: Perfect Reconstruction-Quadrature Mirror Filter) denir ve $|H_0(e^{j(\omega+\pi)})|$; $|H_0(e^{j\omega})|$ 'nın $\omega=\pi/2$ çeyrek frekans etrafında yansımasıdır [109].

Benzer şekilde (A.23) eşitliğini ve yukarıdaki sonuçları gözönünde bulundurarak ortonormal dalgacık bazları için filtre koşulları aşağıdaki gibi bulunur. Buna göre

$$\Psi(\Omega) = H_1\left(e^{j\frac{\Omega}{2}}\right) \prod_{k=2}^{\infty} H_0\left(e^{j\frac{\Omega}{2^k}}\right) \quad (\text{A.29})$$

olur. (A.23) eşitliğinden $\sum_n h_1(n) = 0$ olur ve buradaki toplamın yakınsaması için $\{h_1(n)\}$ sonlu sayıda olmalıdır ve bu yüzden $\{h_1(n)\}$ 'de FIR'dir. Eğer $\phi(t)$; $[0, N-1]$ aralığında tam destekli ise bu ölçekleme fonksiyonuna karşı düşen ve (A.23) eşitliği ile elde edilen $\psi(t)$ dalgacığı da $\left[1 - \frac{N}{2}, \frac{N}{2}\right]$ aralığında tam desteklidir.

Ortonormal dalgacık bazları aynı ölçekte ve farklı ölçekte ortonormallik koşulunu sağlarlar, yani,

$$\langle \psi_{mn}(t), \psi_{kl}(t) \rangle = \delta_{m-k} \delta_{n-l} \quad (\text{A.30})$$

dir. $\{\psi(t-n)\}$ kümesi W_0 'ın ortonormal bazı olduğu için frekans domeninde ortonormallik bağıntısı olan

$$\sum_k |\Psi(\Omega + 2k\pi)|^2 = 1 \quad (\text{A.31})$$

bağıntıyı sağlar. Bu durumda

$$\begin{aligned} |H_1(e^{j\omega})|^2 + |H_1(e^{j(\omega+\pi)})|^2 &= 1 \\ \text{veya} & \\ H_1(z)H_1(z^{-1}) + H_1(-z)H_1(-z^{-1}) &= 1 \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

olarak elde edilir.

Ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları aynı ve farklı ölçeklerde olmak üzere birbirleri arasında da ortonormallik koşulunu sağlarlar, yani,

$$\langle \phi_{mn}(t), \phi_{kl}(t) \rangle = 0 \quad (\text{A.33})$$

dir. Buna göre zaman domenindeki (A.33) eşitliği frekans domeninde de

$$\sum_k \Phi(\Omega - 2k\pi) \Psi^*(\Omega - 2k\pi) = 0 \quad (\text{A.34})$$

dir. (A.24), (A.29) ve (A.34) denklemleri kullanılarak frekans domeni koşulu

$$\begin{aligned} H_0(e^{j\omega})H_1(e^{j\omega}) + H_0(e^{j(\omega+\pi)}) + H_1(e^{-j(\omega+\pi)}) &= 0 \\ \text{veya} & \\ H_0(z)H_1(z^{-1}) + H_0(-z)H_1(-z^{-1}) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

olur. Tam destekli ortonormal dalgacığı ve ölçekleme fonksiyonunu elde etmede $\{h_0(n)\}$ ve $\{h_1(n)\}$; (A.28), (A.32) ve (A.35) bağıntılarını sağlaması durumunda iki kanallı filtre bloğuna eşdeğer olur. Özellikle (A.35) denklemindeki çapraz filtre ortonormallığı

$$\begin{aligned} H_1(z) &= z^{-(N-1)} H_0(-z^{-1}), \quad N : \text{çift} \\ \text{veya zaman domeninde} & \\ h_1(n) &= (-1)^{n+1} h_0(N-1-n) \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

seçimiyle sağlanır.

$$\begin{aligned} \left[|H_0(e^{j\omega})|^2 + |H_1(e^{j\omega})|^2 = 1 \right] \quad \text{ve} \quad \left[H_0(e^{j\omega}) \Big|_{\omega=0} = 1 \right] \quad \text{olduğundan} \\ H_1(e^{j\omega}) \Big|_{\omega=0} = \sum_n h_1(n) = 0 \text{ olup } H_1(e^{j\omega}) \text{ yüksek geçiren filtre olmalıdır.} \end{aligned}$$

$H_0(z)$ 'in $z=-1$ 'de, $H_1(z)$ 'in $z=1$ 'de en az bir sıfırı olmalıdır. (A.36) eşitliğinden de eğer $h_0(n)$, FIR ise $h_1(n)$ 'in de FIR olacağı sonucu çıkar ve ölçekleme fonksiyonu tam destekli ise dalgacık fonksiyonu da tam desteklidir. Sonuç olarak tam destekli ortonormal dalgacık bazlarından iki bir kanallı FIR PR-QMF filtre kümesi elde edilir, tersine bir FIR PR-QMF filtre çiftinden $H_0(z)$ 'in $z=-1$ 'de en az bir sıfırı olması kısıtlaması altında tam destekli ortonormal dalgacık ailesi elde edilir [115].

A.3.3 Çok Çözünürlü İşaret Ayırıştırma ve Yeniden Oluşturma

Bu kısımda, yukarıda açıklanan çok çözünürlü analiz bir işareti, farklı çözünürlüklerdeki detayları ve en düşük çözünürlükteki yaklaşım işaretinin toplamı olarak ifade etmede kullanılacaktır.

$f \in V_0$ olsun. V_0 uzayını $\{\phi(t-n)\}$ ortonormal kümesi tanımladığı için f , ötelenmiş ölçekleme fonksiyonlarının bir süperpozisyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$f(t) = \sum_n c_{0,n} \phi(t-n) = \sum_n c_{0,n} \phi_{0n}(t) \quad (\text{A.37})$$

Burada

$$c_{0,n} = \langle f, \phi_{0n} \rangle = \int f(t) \phi(t-n) dt \quad (\text{A.38})$$

dir. $V_0 = V_1 \oplus W_1$ olduğu için f , biri V_1 'de, diğeri de V_1 'in ortogonal tümleyeni W_1 'de olan iki fonksiyonun toplamı olarak yazılabilir:

$$f(t) = P_1 f + Q_1 f = \sum_n c_{1,n} \phi_{1n} + \sum_n d_{1,n} \psi_{1n}(t) \quad (A.39)$$

Burada $c_{1,n}$; ölçekleme katsayıları, $d_{1,n}$; dalgacık katsayıları olup aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{aligned} c_{1,n} &= \langle f_v^1, \phi_{1n} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f_v^1(t) \phi\left(\frac{t}{2} - n\right) dt \\ d_{1,n} &= \langle f_w^1, \psi_{1n} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f_w^1(t) \phi\left(\frac{t}{2} - n\right) dt \end{aligned} \quad (A.40)$$

(A.39) eşitliğinin her iki tarafı $\phi_{1,n}(t)$ ile çarpılıp integre edilirse,

$$\langle f, \phi_{1n} \rangle = \langle f_v^1, \phi_{1n} \rangle + \langle f_w^1, \phi_{1n} \rangle \quad (A.41)$$

yazılır. $f_w^1(t)$; her bileşeni $\phi_{1n}(t)$ 'ye ortogonal olan $\{\psi_{1k}(t)\}$ 'nin lineer bir birleşiminden oluştuğu için (A.41) bağıntısındaki ikinci iç çarpım sıfır olur ve

$$\langle f, \phi_{1n} \rangle = \langle f_v^1, \phi_{1n} \rangle = c_{1,n} \quad (A.42)$$

olur. Buradan

$$c_{1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int f(t) \phi\left(\frac{t}{2} - n\right) dt \quad (A.43)$$

olur. (A.22) eşitliğinden

$$\phi\left(\frac{t}{2} - n\right) = 2 \sum_k h_0(k) \phi(t - 2n - k) \quad (A.44)$$

yazılarak (A.43) denkleminde yerleştirilirse

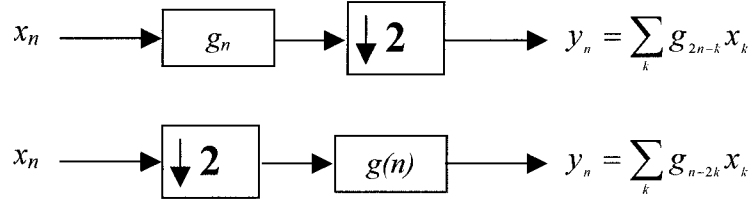
$$\begin{aligned} c_{1,n} &= \sqrt{2} \int f(t) \sum_k h_0(k) \phi(t - 2n - k) dt = \sqrt{2} \sum_k h_0(k) \int f(t) \phi(t - 2n - k) dt \\ c_{1,n} &= \sqrt{2} \sum_k h_0(k) c_{0,2n+k} = \sqrt{2} \sum_k h_0(k - 2n) c_{0,k} \end{aligned} \quad (A.45)$$

olur. Benzer yolla

$$d_{1,n} = \sqrt{2} \sum_k h_1(k - 2n) c_{0,k} \quad (A.46)$$

elde edilir.

(A.45) ve (A.46) eşitlikleri konvolüsyon işlemi sonrasında alt örnekleme tanımlar. Aşağıdaki şekilde alt örnekleme ve üst örnekleme işlemcileri gösterilmiştir.



Şekil A.2. Alt ve üst örnekleme işlemcileri.

Yukarıdaki çıkarımlardan elde edilen sonuç; verilen bir $\{c_{0,n}\}$ başlangıç dizisi için bir alt çözünürlükteki $\{c_{1,n}\}$ ve $\{d_{1,n}\}$ katsayıları, $c_{0,n}$ 'in sırasıyla $\tilde{h}_0 = h_0(-n)$ ve $\tilde{h}_1 = h_1(-n)$ ile konvolüsyonundan sonra sonucun alt örneklemeyle ifade edilir. $\{\tilde{h}_0(n), \tilde{h}_1(n)\}$; FIR filtre çiftidir. $d_{1,n}$ ayrık işareti $\frac{1}{2}$ çözünürlüğündeki ayrık dalgacık dönüşümü katsayısı olup $c_{0,n}$ orjinal işareti ve bunun düzgünleştirilip alt örnekleme hali olan $c_{1,n}$ arasındaki detay veya fark bilgisini verir. Eğer $c_{0,n}$ birim çözünürlükte ise $c_{1,n}$ ve $d_{1,n}$; $\frac{1}{2}$ çözünürlükte. İki ile alt örnekleme işlemi çözünürlüğü yarıya düşürür.

İşaret ayrıştırmasının bir sonraki adımı şöyledir: $f_v^1 \in V_1 = V_2 \oplus W_2$ olarak V_2 ve W_2 'deki bileşenlerine ayırarak ifade edilir, yani,

$$\begin{aligned} f_v^1(t) &= f_v^2(t) + f_w^2(t) \\ f_v^2(t) &= \sum c_{2,n} \phi_{2n}(t) \\ f_w^2(t) &= \sum d_{2,n} \psi_{2n}(t) \end{aligned} \quad (A.47)$$

Yukarıdaki işlemler tekrarlanırsa $\frac{1}{4}$ çözünürlüğündeki düzgünleştirilmiş işaret (yaklaşım) ve detay işareti (yaklaşım hatası) katsayıları aşağıdaki gibi bulunur.

$$c_{2,n} = \sqrt{2} \sum c_{1,k} h_0(k - 2n) \quad (A.48)$$

$$d_{2,n} = \sqrt{2} \sum c_{1,k} h_1(k - 2n) \quad (A.49)$$

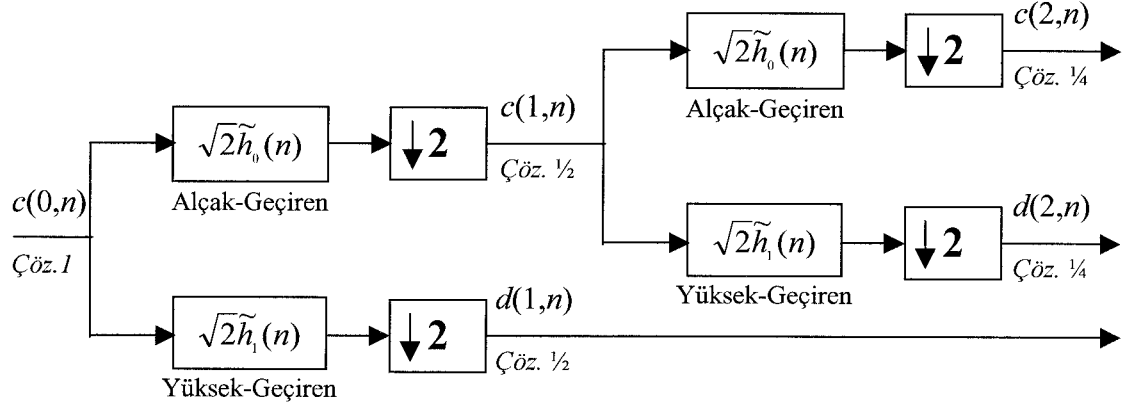
Bu ayrıştırma işlemi istenildiği kadar alt seviyelere kadar yapılarak düzgünleştirilmiş işaret ve detay elde edilir. Bu bağıntılar çok çözünürlü piramidin iki aşaması için Şekil A.3'de gösterilmiştir.

Ayrıştırılan işaretin dönüşüm katsayılarından yeniden elde edilmesi yani $c_{0,n}$ 'nin $c_{1,n}$ ve $d_{1,n}$ 'den yeniden oluşturulması, üst örnekleme ve $h_0(n)$ ve $h_1(n)$ filtreleriyle konvolüsyon alınarak elde edilir.

(A.22) ve (A.23) eşitliklerinden

$$\phi\left(\frac{t}{2}\right) = 2 \sum_k h_0(k) \phi(t - k) \text{ ve } \int dt \phi\left(\frac{t}{2}\right) \phi(t - n) = 2h_0(n)$$

elde edilir. Buradan



Şekil A.3. İki aşama için çok çözünürlü analiz.

$$h_0(n) = \frac{1}{2} \int \phi\left(\frac{t}{2}\right) \phi(t-n) dt \quad (\text{A.50})$$

Benzer olarak

$$h_1(n) = \frac{1}{2} \int \psi\left(\frac{t}{2}\right) \phi(t-n) dt$$

elde edilir. $c_{0,n}$ katsayısı aşağıda verildiği gibi iç çarpımların toplamı olarak yazılırsa

$$c_{0,n} = \langle f, \phi_{0n} \rangle = \langle f_v^1, \phi_{0n} \rangle + \langle f_w^1, \phi_{0n} \rangle = y_v(n) + y_w(n)$$

olur. Burada interpolate edilmiş alçak geçiren işaret

$$y_v(n) = \int f_v^1(t) \phi_{0n}(t) dt = \int \phi_{0n}(t) \sum_k c_{1,k} \phi_{1k}(t) dt$$

$$y_v(n) = \sum_k c_{1,k} \frac{1}{\sqrt{2}} \int \phi(t-n) \phi\left(\frac{t}{2} - k\right) dt$$

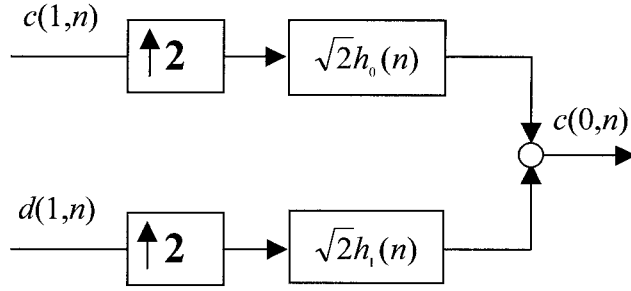
biçiminde elde edilir. (A.50) denkleminde yukarıdaki integral $2h_0(n-2k)$ 'ya eşit olduğu için

$$y_v(n) = \sqrt{2} \sum_k c_{1,k} h_0(n-2k) \quad (\text{A.51})$$

olur. Benzer olarak

$$y_w(n) = \sqrt{2} \sum_k d_{1,k} h_1(n-2k) \quad (\text{A.52})$$

olarak elde edilir. Yukarıdaki sentez eşitlikleri aşağıdaki şekildeki gibi gösterilir.



Şekil A.4. Çok çözünürlü analizde işaretin yeniden oluşturulması.

Sonuç olarak kompakt destekli ortonormal dalgacıklar FIR PR-QMF filtre kümelerini içerirler. Yukarıda belirtilen koşulları sağlayan $H_0(e^{j\omega})$ filtresi verildiğinde ana dalgacık (A.29) denklemindeki sonsuz çarpımla bulunabilir.

Yukarıda belirtildiği gibi işaret L sayıda ölçekte ayrıştırılmışsa, ayrıştırma katsayılarından yeniden elde edilmesi aşağıdaki bağıntıdaki gibi olur.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c(L,n) 2^{-L/2} \phi\left(\frac{t}{2^L} - n\right) + \sum_{m=1}^L \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(m,n) 2^{-m/2} \psi\left(\frac{t}{2^m} - n\right) \quad (\text{A.53})$$

Bu bağıntı $f(t)$ işaretinin L ölçeğindeki alçak geçiren yaklaşımla farklı çözünürlükteki L sayıdaki dalgacık bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilebilir.

EK B

GÜÇ SPEKTRUMU YOĞUNLUĞU

Bir raslantı işaretine ait frekans bilgisini elde etmek amacıyla kullanılan yaygın olan bir yaklaşım, ayrık Fourier dönüşümü hesaplanarak o işareti frekans tanım bölgesine dönüştürmektir. N örnekli bir veri bloğu için Δf frekans çözünürlüğü ve Δt 'de örnekleme zamanı olmak üzere $m\Delta f$ frekansındaki dönüşüm

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp[-j2\pi km / N] \quad (\text{B.1})$$

bağıntısıyla hesaplanır. $x(t)$ işaretinin öz güç spektral yoğunluğu (ÖGSY)'da

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

bağıntısıyla hesaplanır. Herhangi iki $x(t)$ ve $y(t)$ işaretleri arasındaki çapraz güç spektral yoğunluğu (ÇGSY)'da benzer şekilde hesaplanır. (B.2) denklemindeki kestirimin istatistiksel doğruluğu, veri noktası sayısının veya veri bloğu sayısının artmasıyla artar [120].

EK C

KISA ZAMAN FOURIER DÖNÜŞÜMÜ

1946 yılında Gabor tarafından tanıtılan Kısa-Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD), işaretlerin frekans bileşenlerinin zaman içindeki yerini ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. Fourier Dönüşümüne benzer olan kısa-zaman Fourier dönüşümünde, $f(t)$ işaretinin, zamandaki pozisyonu τ ile ötelenmiş bir $g(t)$ pencere fonksiyonu ile iç çarpımı alınarak $f(t)$ işaretinin pencerelenmiş Fourier dönüşümü bulunur. τ ve Ω sırasıyla zaman ve frekans parametreleri olmak üzere kısa-zaman Fourier dönüşümü

$$F(\Omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g^*(t - \tau) e^{-j\Omega t} dt \quad (C.1)$$

ile hesaplanır ve

$$f(t) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\Omega, \tau) g(\tau - t) e^{j\Omega t} d\Omega d\tau \quad (C.2)$$

eşitliği ile $f(t)$ işareti yeniden elde edilir.

Kısa-zaman Fourier dönüşümünün sakıncası tek bir pencere fonksiyonu kullanmasıdır. Oysa uygulamada seçilen pencere fonksiyonlarının yüksek ve alçak frekans bilgisini elde etmek için farklı olması gerekir. Dolayısıyla bant genişliği frekansa bağlı olarak değişen filtreler kullanmaya gerek duyulur [110,115].

EK D

KOHERENS (FREKANS UYUMLULUĞU) FONKSİYONU

Bir ölçme sisteminden alınan iki ya da daha fazla işaret arasındaki neden ve etki ilişkisi veya işaretler arasındaki ortaklık genel olarak, koherens fonksiyonu kullanılarak belirlenir. Zaman domeninde iki işaret arasındaki normalize edilmiş çapraz korelasyonun karşılığı frekans domeninde koherenstir. Koherens fonksiyonu

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}}, \quad 0 < \gamma_{xy} < 1 \quad (D.1)$$

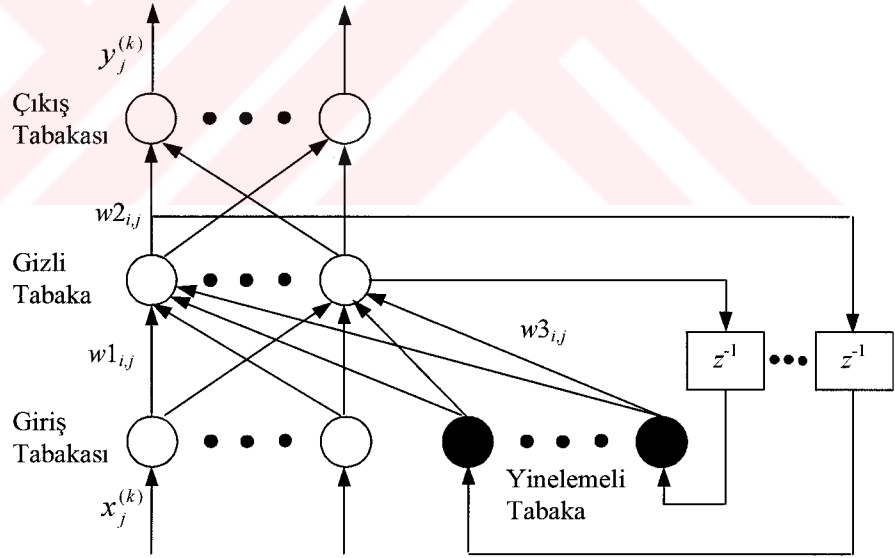
bağıntısıyla hesaplanır. Burada S_{xx} ve S_{yy} sırasıyla $x(t)$ ve $y(t)$ işaretlerinin ÖGSY ve S_{xy} 'de $x(t)$ ve $y(t)$ işaretleri arasındaki ÇGSY dur. Bire yakın bir koherens değeri lineerliğin yüksek olduğunu ve bu iki işaret arasındaki yakın bir ilişkiyi gösterir. γ_{xy} 'nin küçük bir değeri ise verilen bir frekans bölgesinde iki işaretin küçük koherense sahip olduğunu gösterir [120].

EK E

YİNELEMELİ YAPAY SİNİR AĞLARI - ELMAN AĞI

Yapay sinir ağlarında bir sistemdeki dinamik davranışları gözlemleyebilmenin bir yolu ağı yinelemeli yapmaktır. Yinelemeli bir ağı ile ileri beslemeli ağı arasındaki fark, yapısında en az bir geribesleme kullanmasıdır. Bu tür bir ağı Elman tarafından önerilmiştir [42,121,122].

Elman Yinelemeli Yapay Sinir Ağı (YYSA) mimarisi Şekil E.1’de gösterildiği gibi giriş tabakası, gizli tabaka, yinelemeli tabaka ve çıkış tabakası olmak üzere dört tabakadan oluşur. Burada z^{-1} bir birim gecikme olup gizli tabaka çıkışından giriş tabakasına birim gecikmeyle geri besleme vardır. Bu geri besleme, YYSA çıkışlarını yalnızca o andakine değil aynı zamanda geçmişteki giriş verisine de duyarlı yaparak ağı hafızalı olmasını sağlar, bu ise özellikle zaman serisi kestiriminde ve dinamik sistem uygulamalarında kullanışlıdır.



Şekil E.1. Elman YYSA mimarisi.

Elman nöral ağının eğitim algoritması Geriye Yayılım (Back-Propagation) öğrenme algoritmasına benzerdir, her ikisi de gradyan düşüm prensibine dayanır. Bununla birlikte, bu öğrenme algoritmasının türetilmesinde başlangıçtaki yinelemeli tabaka düğüm çıkışları olduğu kadar yinelemeli tabaka ağırlıklarının da hatanın geriye yayılması prosedüründe rol oynadığı gözönüne alınmalıdır. Şekil E. 1’den k . iterasyonda aşağıdaki eşitlik vardır:

$$o_c_i^{(k)} = net_c_i^{(k)}, \quad (E.1)$$

burada o_c_i ve net_c_i ; yinelemeli tabakadaki i düğümünün sırasıyla çıkışı ve girişidir. Yinelemeli tabaka düğümlerinin düğüm aktivasyon fonksiyonu lineerdir. $w1_{i,j}$, giriş tabakasındaki i düğümünü gizli tabakadaki j düğümüne bağlayan ağırlıklardır; $w2_{i,j}$, gizli tabakadaki i düğümünü çıkış tabakasındaki j düğümüne bağlayan ağırlıklardır; ve $w3_{i,j}$, yinelemeli tabakanın i düğümünü gizli tabakadaki j düğümüne bağlayan ağırlıklardır. m, n, l sırasıyla giriş, çıkış ve gizli tabakadaki düğüm sayılarıdır. j . gizli düğüm çıkışını gibi girişi hesaplamak için

$$net_h_j^{(k)} = \sum_{i=1}^m w1_{i,j} x_i^{(k)} + \sum_{i=1}^l w3_{i,j} o_c_i^{(k)}, \quad (E.2)$$

ve

$$o_h_j^{(k)} = a(net_h_j^{(k)}). \quad (E.3)$$

bağıntıları kullanılır. $x_i^{(k)}$ Elman YYSA'nın girişidir, burada $i=1,2,\dots,m$. net_h_i gizli tabakadaki i düğümünün girişidir, ve o_h_i gizli tabakadaki i düğümünün çıkışıdır, burada $i=1,2,\dots,l$. Gizli tabakadaki lineer olmayan aktivasyon fonksiyonu $a(\cdot)$ ile gösterilir. Dolayısıyla, çıkış tabakasındaki j . düğümünün çıkışı, $y_j^{(k)}$

$$y_j^{(k)} = \sum_{i=1}^l w2_{i,j} o_h_i^{(k)}, \quad (E.4)$$

olarak verilir. Burada $j=1,2,\dots,n$ 'dir. k . öğrenme iterasyonunda yinelemeli tabakadaki i . düğümünün çıkışı, gerçekte, buna karşı düşen i . gizli düğümünün bir adım gecikmiş çıkışıdır:

$$net_c_i^{(k)} = o_h_i^{(k-1)}, \quad (E.5)$$

Elman YYSA'nın k . iterasyon adımındaki istenilen çıkışı $Y_i^{(k)}$ olsun ve çıkış tabakasındaki E yaklaşım hatasını minimize etmek için $w1_{i,j}$, $w2_{i,j}$, ve $w3_{i,j}$ ağırlıklarını güncellenir:

$$w^{veni} = w^{eski} + \eta \Delta w, \quad (E.6)$$

burada η öğrenme oranıdır ve E aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^n (Y_i^{(k)} - y_i^{(k)})^2. \quad (E.7)$$

Burada, T eğitim dizisinin uzunluğudur. $w1_{i,j}$ ve $w2_{i,j}$, standart geriye yayılım öğrenme algoritmasını kullanarak ayarlanabilir, çünkü Elman YYSA'nın bu kısmı sadece normal bir ileri beslemeli ağ yapısıdır. Özel olarak, $w3_{i,j}$ ağırlığı için zincir kuralıyla adaptasyon algoritması ortaya çıkartıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\Delta w_{3_{i,j}} = -\frac{\partial E}{\partial o_{-}h_j} \frac{\partial o_{-}h_j}{\partial w_{3_{i,j}}} . \quad (E.8)$$

k . iterasyon adımımda

$$\frac{\partial E}{\partial o_{-}h_j^{(k)}} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial E}{\partial y_i^{(k)}} \frac{\partial y_i^{(k)}}{\partial o_{-}h_j^{(k)}} = -\sum_{i=1}^n [(Y_i^{(k)} - y_i^{(k)}) w_{j,i}^{(k)}] \quad (E.9)$$

elde edilir ve

$$\frac{\partial o_{-}h_j^{(k)}}{\partial w_{3_{i,j}}^{(k)}} = a'(net_{-}h_j^{(k)}) \frac{\partial net_{-}h_j^{(k)}}{\partial w_{3_{i,j}}^{(k)}} = a'(net_{-}h_j^{(k)}) o_{-}h_i^{(k-1)} . \quad (E.10)$$

(E.10) eşitliğinde, $a'(\cdot)$; $a(\cdot)$ 'nın birinci dereceden türevidir. Bu halde, $\Delta w_{3_{i,j}}$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\Delta w_{3_{i,j}} = a'(net_{-}h_j^{(k)}) o_{-}h_i^{(k-1)} \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^n [(Y_i^{(k)} - y_i^{(k)}) w_{j,i}^{(k)}] , \quad (E.11)$$

burada $o_{-}h_i^{(0)}$ ($i=1,2,...,l$); Elman YYSA'nın başlangıç durumlarıdır. Normalde, bunlar basitlik için

$$o_{-}h_i^{(0)} = 0, \quad (i=1,2,...,l) \quad (E.12)$$

olarak kabul edilirler ve buna eşdeğer olarak $o_{-}c_i^{(1)} = 0$, ($i=1,2,...,l$) olarak alınrlar.

EK F

GENETİK ALGORİTMALAR

Genetik Algoritmalar (GA), 1970’lerde John Holland tarafından geliştirilmiş olup popülasyondaki, yeni birey yaratma şansı daha yüksek ve daha güçlü bireylerin en uygun stratejideki birleşimiyle Darwin teorisine göre hayatta kalma prensibine dayanır [123]. Popülasyondaki her birey, çözümlenmesi istenen problem için potansiyel bir çözümü temsil eder. Organizmalarda genetik bilginin kromozomlar olarak kodlanmasına benzer olarak, genetik algoritmada bireyler lineer karakter (string) yoluyla temsil edilirler. Bu yüzden GA terminolojisinde bir popülasyonun üyeleri de kromozomlar olarak isimlendirilir. Kromozomlar genlerin bir kümesinden oluşurlar ve ikilik tabanlı geleneksel durumda bu genler sadece bit lerdir. Daha genel olarak, genler belirli bir A alfabesine ait olan karakterler olarak işaret edilirler. Bir kromozom l tane a_i genlerinden oluşan bir x vektörü olarak düşünülebilir:

$$x = (a_1, a_2, \dots, a_l), \quad a_i \in A_i \quad (F.1)$$

l kromozom uzunluğu olarak işaret edilir. Genellikle kullanıldığı gibi ikilik tabandaki genler durumunda $A=\{0,1\}$ olur ve ayrıca reel değerli genler ($A=\mathbb{R}$)de kullanılabilir.

Bir genetik algoritmadaki temel terimlerin tanımları aşağıdaki gibidir:

Kromozom:	Genetik algoritmada kullanılabilecek bir formda problemin potansiyel çözümünün gen kümeleriyle gösterimi
Gen:	Bir kromozomu oluşturan ve değişmeyen veri parçası
Alfabe:	Bir genin alabileceği değerler kümesi
Popülasyon:	Bir jenerasyonu diğer bir jenerasyona geliştiren kromozomların bir kümesi
Jenerasyon:	Var olan popülasyondan bir sonrakine tek geçiş
Uygunluk:	Gerçek problem üzerinde bir bireyin performansının ölçüsü
Değerlendirme:	Kromozomun problemin potansiyel çözümüne çevrilmesi ve uygunluğunun hesaplanması

Genetik algoritmanın amacı, çözüm uzayının stokastik global araştırılması yoluyla, maksimum uygunlukta bir birey bulmaktır.

Genetik algoritmalarda, bir birey genellikle tek bir kromozomla temsil edilir. Birey terimi popülasyonun bir üyesi için kullanılır, burada bir bireyin kromozomu x ile problemin potansiyel bir çözümü olarak rol oynayan p arasındaki ilişki uygunluk fonksiyonuyla sağlanır.

Bir kromozomun uygunluğu, $f(x)$, kromozomun problem üzerinde bireyin performansını ölçen pozitif reel bir değere, $f(x) \in \mathbb{R}^+$ yakınsamasıyla değerlendirilir.

Algoritma:

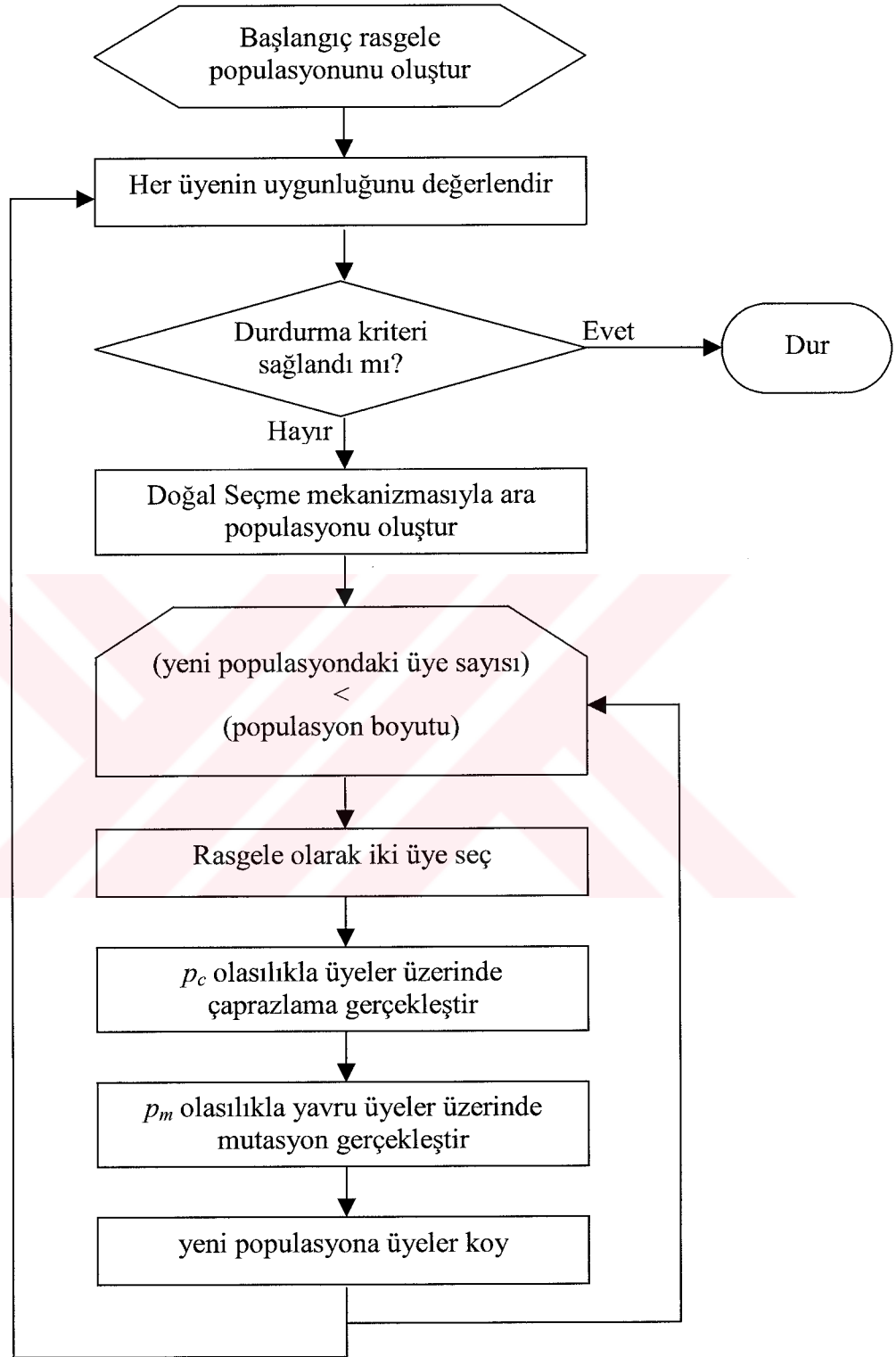
Standart genetik algoritma işlemini aşağıdaki adımlar tanımlar:

1. Başlangıçtaki bir kromozom popülasyonunu rasgele üret.
2. Popülasyondaki her üyenin uygunluğunu hesapla.
3. Popülasyondaki üyeleri, üretme (reproduction) işlemcisi yoluyla atarak ara bir popülasyon yap.
4. Bu ara popülasyona genetik işlemcilerini (çaprazlama, mutasyon) uygulayarak yeni bir popülasyon üret.
5. Eğer var olan popülasyonda problemin çözümünü sağlayan bir üye varsa dur, yoksa adım 2 ye git.

En yaygın olarak kullanılan üretme (seçme-selection) işlemcisi, bir popülasyonun üyelerinin ortalama uyumluluklarına dayanan olasılıksal bir Monte Carlo metoduna göre popülasyonun üyelerinin çıkarıldığı, rulet tekerleği metodudur.

GA daki işlemler temel olarak, seçim ve çaprazlama işlemcilerine ve ayrıca çok küçük bir ölçekteki mutasyon işlemcisine dayanır. Çaprazlama işlemcisi ara popülasyonda rasgele seçilen iki üyenin kromozomlarının bazı kısımlarını değiştirir ve yeniden oluşturulmuş kromozomlar yeni popülasyona yerleştirilir. Bazan iki yerine, sadece bir yeni oluşturulmuş kromozom yeni popülasyona konulur, diğeri atılır. Mutasyon işlemcisi sadece tek bir kromozom üzerinde çalışır ve temsil karakterinin bazı kısmını rasgele olarak değiştirir. Her iki işlemci belirli bir olasılıkla uygulanır. Şekil F.1 standart genetik algoritma akış diyagramını gösterir.

Durdurma kriteri genellikle probleme yeterli bir çözümü veren bir bireyin bulunduğu zamanki nokta veya basit olarak çok sayıda bir üretim kümesinin çalıştırıldığı noktadır. Popülasyonun tek bir çözüme yakınsadığı yerdeki noktaya eşit olarak da kurulabilir. Bir genin yakınsadığı, kromozom popülasyonunun %95'inin o genle aynı değeri paylaştığı zaman söylenir. İdealde, GA, optimal çözüme yakınsayacaktır, bununla birlikte bazan alt optimal bir çözüme de erken bir yakınsama gözlenir.



Şekil F.1. Standart genetik algoritma akış diyagramı.

ÖZGEÇMİŞ

Akşehir’de 1972 yılında doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Akşehir’de yaptı. 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak Elektrik Yüksek Mühendisi ünvanını aldı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda doktora öğrenimini tamamlamıştır. Eylül 1999 – Nisan 2000 tarihleri arasında *Nuclear Engineering Department, The University of Tennessee, Knoxville, USA*’de doktora tez konusuyla ilgili olarak araştırmalarda bulunmuştur.

İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde 1994 yılından itibaren Araştırma Görevlisi olarak çalışan Emine Ayaz, çeşitli zamanlarda, Signals & Systems, Probability & Statistics, Modern Fizik, Sayısal Analiz, Olasılık Hesabı, Elektroteknik dersleri ve Elektrik Tesisleri Laboratuvarında öğrenci deneylerinin yaptırılması gibi akademik alanda öğretim yardımcılığı yapmıştır.

Araştırma alanları arasında elektrik motorlarında arıza tanısı, işaret işleme, yapay sinir ağları ve dalgacık dönüşümü gibi konular yer almaktadır.