

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK, AKIM, TİTREŞİM
VERİLERİNİN ANALİZİ VE ADAPTİF AĞ TABANLI BULANIK
ÇIKARIM SİSTEMİ UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Malik Sina YILMAZ

Anabilim Dalı: ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı: ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK, AKIM, TİTREŞİM
VERİLERİNİN ANALİZİ VE ADAPTİF AĞ TABANLI BULANIK
ÇIKARIM SİSTEMİ UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Malik Sina YILMAZ

(504041034)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Eylül 2008

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Emine AYAZ

Diğer Jüri Üyeleri: Yrd.Doç.Dr. Özgür ÜSTÜN

Doç.Dr.Zümray DOKUR ÖLMEZ

EYLÜL 2008

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sırasında özverili yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Emine AYZA'a, kendi tezini de tamamlamak için benimle birlikte gece gündüz uğraş veren sevgili amcaoğlum Uğur YILMAZ'a ve tez çalışmam boyunca manevi destek gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2008

Malik Sina YILMAZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1 GİRİŞ	1
2 ASENKRON MAKİNELERDE MEKANİK ARIZALAR	4
2.1 Rulman	5
2.2 Rulman Arızaları	6
2.3 Rulman Ömrü	7
2.3.1 Hızın rulman ömrüne etkisi	8
2.3.2 Sıcaklığın rulman ömrüne etkisi	8
2.3.3 Yağlayıcının rulman ömrüne etkisi	9
3 RULMAN DURUMUNU İZLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER	10
3.1 Sıcaklık Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme	10
3.2 Titreşim Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme	12
3.3 Stator Akımı Yardımıyla Durum İzleme	16
3.4 Kimyasal Analiz Yardımıyla Durum İzleme	18
3.5 Akustik Yayılım Yardımıyla Durum İzleme	18
3.6 Ses Basıncı Yardımıyla Durum İzleme	19
3.7 Lazer Yer Değişimi Yardımıyla Durum İzleme	19
4 SICAKLIK, AKIM VE TİTREŞİM VERİLERİNİN TOPLANMASI VE ANALİZİ	21
4.1 Hızlandırılmış Yapay Eskitme Süreçleri ve Veri Toplama Sistemi	21
4.2 Veri Analiz Yöntemleri	26
4.2.1 İstatistiksel analiz	26
4.2.2 Spektral analiz	27
4.3 Veri Analizi ve Arıza Özelliğinin Belirlenmesi	28
4.3.1 Sıcaklık verilerinin analizi	29
4.3.2 Akım verilerinin analizi	32
4.3.3 Titreşim verilerinin analizi	35
5 ADAPTİF AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE DURUM İZLEME	41
5.1 ANFIS	41
5.1.1 Yapay sinir ağları	42
5.1.2 Bulanık mantık ve bulanık çıkarım sistemleri	43
5.1.2.1 Bulanık çıkarım sistem modelleri	46

5.1.3 ANFIS	50
5.1.3.1 Hibrit öğrenme algoritması	54
5.2 ANFIS İle Durum İzleme Uygulamaları	60
5.2.1 Akım verilerini kullanan ANFIS modeli	60
5.2.2 Titreşim verilerini kullanan ANFIS modeli	64
5.2.3 Sıcaklık, akım ve titreşim verilerini kullanan ANFIS modeli	68
6. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	78

KISALTMALAR

AC	: Alternatif akım
ANFIS	: Adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi
BÇS	: Bulanık çıkarım sistemi
BS	: Rulman yüzeyi
DC	: Doğru akım
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
EDM	: Elektrik boşalması oyulması
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
GA	: Genetik algoritma
HP	: Beygir gücü
Hz	: Hertz
İBYSA	: İleri beslemeli yapay sinir ağı
Mod-I	: Isıl ve kimyasal eskitme süreci
Mod-II	: Elektriksel, ısı ve kimyasal eskitme süreci
PE	: Yüke bağlı taraf
RMS	: Etkin değer
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
SE	: Yüke bağlı olmayan taraf
W	: Sargı
YSA	: Yapay Sinir Ağı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Motor arıza nedenleri	5
Tablo 2.2 : Motor parçaları ve üzerine etkiyen kuvvetler	5
Tablo 2.3 : Rulman sıcaklık limitleri	10
Tablo 3.1 : Rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemlerin farkları.....	23
Tablo 4.1 : Test motorlarının plaka bilgisi	27
Tablo 4.2 : Yüksek bant genişlikli ivme ölçerlerin özellikleri	29
Tablo 4.3 : Motor rulmanlarının 1000 min ⁻¹ 'deki arıza frekansları.....	38
Tablo 4.4 : Motor #8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşim verilerinin istatistiksel analizi.....	42
Tablo 5.1 : Hibrid öğrenme algoritmasında işlem akışı	67
Tablo 5.2 : ANFIS girişleri.....	68
Tablo 5.3 : Akım verisi için başarımlar oranları.....	72
Tablo 5.4 : ANFIS girişleri.....	72
Tablo 5.5 : Titreşim verisi için başarımlar oranları	76
Tablo 5.6 : ANFIS girişleri.....	77
Tablo 5.7 : Sıcaklık, akım ve titreşim verisi için başarımlar oranları.....	81
Tablo 6.1 : ANFIS modellerinin başarımlar değerleri	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Sabit bilyeli rulman ve parçaları.....	6
Şekil 2.2 : Rulman arızası ve rulman ömrü arasındaki ilişki	8
Şekil 3.1 : 1800 min ⁻¹ hızda yük durumuna bağlı sıcaklık değişimi	14
Şekil 3.2 : 3600 min ⁻¹ hızda yük durumuna bağlı sıcaklık değişimi	14
Şekil 3.3 : Karakteristik rulman hata frekansları	16
Şekil 3.4 : Rulman geometrisi.....	17
Şekil 4.1 : Mile dışarıdan gerilim ve akım uygulayarak rulmanın elektriksel olarak eskitilmesi için düzenek.....	27
Şekil 4.2 : Motor performans test düzeneğinin fotoğrafı.....	28
Şekil 4.3 : Motor test düzeneği ve veri toplama sistemi.....	28
Şekil 4.4 : Sağlam durumda Motor #7 ve 11'in zamana göre sıcaklık değişimi	34
Şekil 4.5 : Bozuk durumda Motor #7 ve 11'in zamana göre sıcaklık değişimi	35
Şekil 4.6 : Motor #7'nin eskitme aşamalarına göre sıcaklık değişimi	36
Şekil 4.7 : Motor #11'in eskitme aşamalarına göre sıcaklık değişimi	36
Şekil 4.8 : Motor #7'nin (a) sağlam ve (b) bozuk durum için bir faz akım işareti	37
Şekil 4.9 : Motor #7'nin sağlam ve bozuk durumu için bir faz akımının spektrumu	39
Şekil 4.10 : Motor #11'in sağlam ve bozuk durumu için bir faz akımının spektrumu	40
Şekil 4.11 : Motor #8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşimin RMS değeri değişimi	42
Şekil 4.12 : Motor #8 PE 2:00 için bozuk durum titreşim spektrum grafiği	44
Şekil 4.13 : Motor #11 PE 2:00 için bozuk durum titreşim spektrum grafiği	45
Şekil 4.14 : Motor#8 PE 2:00 için titreşim spektrumu (logaritmik eksende)	45
Şekil 4.15 : Motor#11 PE 2:00 için titreşim spektrumu (logaritmik eksende)	46
Şekil 5.1 : Basit sinir (nöron) modeli	49
Şekil 5.2 : Temel üyelik fonksiyonu tipleri	51
Şekil 5.3 : Bulanık çıkarım sistemlerinin genel yapısı	52
Şekil 5.4 : Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla minimizasyon ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi	54
Şekil 5.5 : Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla çarpma ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi	55
Şekil 5.6 : Tsukamoto tipi bulanık çıkarım sistemi.....	56
Şekil 5.7 : Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi	57
Şekil 5.8 : Adaptif Ağ yapısı örneği.....	57
Şekil 5.9 : İki kurallı Birinci Derece Takagi-Sugeno tipi BÇS (a) ve buna eşdeğer ANFIS yapısı (b).....	59
Şekil 5.10 : Genelleştirilmiş çan-eğrisi fonksiyonu ve parametrelerinin fiziksel anlamları.....	60
Şekil 5.11 : k adım büyüklüğünün değiştirilmesine ilişkin deneysel kurallar	64

Şekil 5.12 : ANFIS ağ yapısı	69
Şekil 5.13 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları; (a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki.....	70
Şekil 5.14 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi	71
Şekil 5.15 : Dört motor için ANFIS test sonuçları.....	71
Şekil 5.16 : ANFIS ağ yapısı	73
Şekil 5.17 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları; (a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki.....	74
Şekil 5.18 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi	75
Şekil 5.19 : Dört motor için ANFIS test sonuçları.....	76
Şekil 5.20 : ANFIS ağ yapısı	78
Şekil 5.21 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları; (a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki.....	79
Şekil 5.22 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi	80
Şekil 5.23 : Dört motor için ANFIS test sonuçları.....	81
Şekil 6.1 : Üç ANFIS modeli ile motor durum izleme blok diyagramı	84

SEMBOL LİSTESİ

BD	: Bilye çapı
C	: Dinamik yük katsayısı
c	: Çarpıklık
dB	: Desibel
F	: Frekans çözünürlüğü
f	: Aktivasyon fonksiyonu
<i>f_b</i>	: Bilye dönme frekansı
<i>f_c</i>	: Kafes hata frekansı
<i>f_e</i>	: Şebeke frekansı
<i>f_{e_{bng}}</i>	: Rulman hatalarının oluştuğu frekans.
<i>f_{hizalama}</i>	: Hizalama hata frekansı
<i>f_i</i>	: İç bilezik hata frekansı
<i>f_o</i>	: Dış bilezik hata frekansı
<i>f_r</i>	: Dönme frekansı
<i>f_{v_{bng}}</i>	: Karakteristik rulman titreşim frekansları
<i>f_{yağgirdabı}</i>	: Yağ girdabı frekansı
<i>k</i>	: Basıklık
L10	: Rulman ömrü
n	: Hız
N_b	: Bilye sayısı
P	: Eşdeğer yük katsayısı
PD	: Diş açıklık çapı
T	: Örnekleme zaman aralığı
w	: Ağırlık
x	: Giriş değeri
Y	: Çıkış değeri
β	: Temas açısı
θ	: Sapma
μ	: Ortalama
σ	: Standart sapma

ASENKRON MOTORLARDA SICAKLIK, AKIM, TİTREŞİM VERİLERİNİN ANALİZİ VE ADAPTİF AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ UYGULAMASI

ÖZET

Asenkron motorlar hemen hemen her çeşit endüstriyel süreçte sıkça kullanılan elemanlardan biridir. Bu motorların elektriksel ve mekanik kısımlarındaki hatalarının erken tanısı, endüstriyel sürecin ekonomik ve güvenli işletimi bakımından 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 motorlarda arıza dağılımları üzerine yapılan istatistiksel çalışmalara göre, motor arızalarının %41'i rulman hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu tezde, rulmanın yapısı, rulmanın ömrünü etkileyen faktörler, durum izleme ve hata teşhisi yöntemleri araştırılmıştır. Rulman arıza özelliği çıkartımı amacıyla tezde kullanılan veriler The University of Tennessee, Knoxville (UTK), Maintenance and Reliability Center (MRC)'da hazırlanan akıllı motor izleme sisteminden alınmıştır. Elektriksel, mekanik ve ısı verileri 3 fazlı, 4 kutuplu, 3.7 kW'lık asenkron motorların, kimyasal, termal ve elektriksel olmak üzere hızlandırılmış eskitmeye tabi tutulması ve her eskitme süreci sonrasında test edilmesiyle elde edilmiştir. Bu veriler içerisinden sıcaklık, akım ve titreşim verilerine istatistiksel ve spektral analiz yöntemleri uygulanarak rulman arıza özelliği çıkartılmıştır.

Son yıllarda motor arızalarının geleneksel yaklaşımlarla tanısının yanı sıra, bulanık mantık, genetik algoritma, yapay sinir ağları gibi esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak arıza tanısına yeni yaklaşımlar getirilmekte ve geliştirilmiş çözümler sunulmaktadır. Bu nedenle tezde yapay sinir ağları ve bulanık mantığın birlikte kullanıldığı adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) göz önüne alınmış ve sıcaklık, akım ve titreşim verilerini kullanarak eğitilen ANFIS modellerinin rulman arıza tanısındaki başarımları karşılaştırılmıştır.

ANALYSIS OF TEMPERATURE, CURRENT, VIBRATION DATA IN INDUCTION MOTORS AND ADAPTIVE NETWORK BASED FUZZY INFERENCE SYSTEM APPLICATION

SUMMARY

Induction motors are the most frequently used components in almost every type of industrial process. Early detection and isolation of faults in electrical or mechanical part of these motors are important for the safe and economic operation of an industrial process. 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 failures are caused by bearing faults. In this thesis the structure of bearing, factors which affect the life of bearing, condition monitoring and fault diagnosis methods are explored. The data which is used for the purpose of bearing failure diagnosis was taken from the intelligent motor monitoring system which prepared at the University of Tennessee, Knoxville (UTK), Maintenance and Reliability Center (MRC). The electrical, mechanical and thermal data was obtained from the 3 phases, 4 poles, 3.7 kW induction motors which were chemically, thermally and electrically aged and tested after at the end of every aging cycle. Bearing fault features are extracted by means of statistical and spectral analysis methods on the temperature, vibration and current data.

Besides the conventional methods for motor fault diagnosis, in recent years soft computing methods such as fuzzy logic, genetic algorithms, and artificial neural networks have been used. Hence, Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) which is the combination of artificial neural networks and fuzzy logic is considered in this thesis, and the ANFIS models which are trained by using temperature, current and vibration data are compared according to bearing fault diagnosis performance.

1 GİRİŞ

Sağlam yapıları, bakım kolaylığı, fiyat-performans açısından uygun oluşları nedeniyle tercih edilen asenkron motorlar; ısıtma, soğutma, pompalama, taşıma vb hemen hemen her çeşit endüstriyel süreçte yoğun olarak kullanılmaktadır. Gelişen üretim altyapısı ve yükselen standartlar neticesinde dünya genelinde endüstride kullanılan motorların %90'dan fazlasını asenkron motorlar oluşturmaktadır [1].

Bu motorlar çalıştıkları süreçte elektriksel, mekanik, termal ve çevresel birçok zorlanmaya maruz kalarak bozular ve beklenmedik sistem arızalarına neden olurlar. Özellikle stator, rotor, mil ve rulman üzerinde kendini gösteren zorlayıcı kuvvetler ve bunların bileşkeleri motor arıza sebeplerinin büyük kısmını oluşturmaktadır [2].

Endüstride en yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle tüm asenkron motorların, özellikle hayati uygulamalarda kullanılan ve gerek yatırım gerek üretim maliyetleri açısından önemli yere sahip büyük güçlü asenkron motorların hatalarının, motor onarılamayacak duruma gelmeden, büyük üretim kayıplarına fırsat verilmeden ve süreç güvenliği açısından olabildiğince erken belirlenmesi önem kazanmıştır.

Uygun bakım yöntemi seçimi; motor arızalarının oluşumunu geciktirmek, olası arızanın yerini, çeşidini ve ne zaman meydana geleceğini belirleyebilmek ve arızayı en kısa zamanda giderebilmek için önemlidir. Uygun bakım yöntemi seçimi ve uygulanması, işletmelerdeki iş akışının devamlılığı için yapılması gereken en önemli işlerden birisidir. Amaç bakım masraflarını en az seviyede tutacak ve işleyişi uzun süreli aksatmayacak bir bakımın uygulanmasıdır. Belirli endüstri kollarına bağlı olarak, bakım masrafları üretim maliyetinin %15'i ile %40'ı arasında olabilmektedir. Örneğin gıda endüstrisinde ortalama bakım masrafları üretim maliyetinin %15'ine karşılık gelmektedir. Bu oran, demir-çelik, kâğıt ve diğer ağır endüstri kollarında %40'a kadar varmaktadır. Örneğin, bakım giderleri Amerika'da, yılda 200 milyar dolardan fazla bir rakama karşılık gelmektedir. Bakım yönetiminin verimliliği üzerine yapılan son araştırmalarda, bakım masraflarının 1/3'ünün gereksizce yapılan veya zamanında yapılmayan bakımlar sonucu israf edildiğini göstermiştir [3].

Geçmişten günümüze kadar gelişen endüstriyel sürece paralel olarak, zamanın şartlarına göre değişik bakım yöntemleri geliştirilip uygulanmıştır. Genel olarak uygulanan üç çeşit bakım yöntemi vardır. Bunlar; düzeltici ya da arıza sonrası bakım, periyodik ya da zaman tabanlı bakım ve öngörülü ya da durum tabanlı bakımdır [4].

Düzeltilen bakım ya da arıza sonrası bakım; arıza öncesi müdahalenin söz konusu olmadığı, arıza meydana geldikten sonra yapılan bakım şekli olup, genel olarak arızalana parçanın yenisi ile değiştirilmesi şeklinde uygulanır. Bir otomobilde kırık fan kayışının değiştirilmesi, bir su sızıntısı olduktan sonra çatının tamir edilmesi, bir basınç algılayıcısının hatalı okumalar gösterdiğinde değiştirilmesi ya da yeniden kalibrasyonu bu duruma örnek olarak verilebilir [4].

Periyodik ya da 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. Bakım aralıkları genellikle geçmiş tecrübe ve verilerden istatistiksel olarak belirlenir. Bir aletin periyodik olarak yapılan kalibrasyonu, filtrelerin periyodik olarak değiştirilmesi, yapımcı firma tarafından belirlendiği üzere bir otomobildeki motor yağının değiştirilmesi, şeker fabrikaları veya çimento fabrikalarında yapılan periyodik bakımlar örnek olarak verilebilir. Bu bakım yöntemi beklenmedik arızaların sayısını azaltmasına rağmen ekonomik değildir. Çünkü elemanın durumuna bakılmaksızın ve gerekli olmasa bile önlem amacıyla parçalar ömrünü tamamlamadan değiştirilmekte bu ise gereksiz masrafa yol açmaktadır [3, 4].

Öngörülü ya da durum tabanlı bakım; bir elemanın performans parametrelerinin sürekli ya da 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. Diğer iki teknikten farkı, elemanın davranışındaki başlamakta olan değişiklikleri izleyerek arıza oluşmadan önce arızanın oluşacağını belirlemesi ve bakımın gerektiği zaman yapılmasıdır. Durum tabanlı bakım zamana bağlı olmayıp gerektiğinde yapılır. Dönen makinelerde durum izlemeye, akım, titreşim, sıcaklık 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 [3, 4].

Bakım metotları içinde ön yatırım ve uygulama maliyetleri içermesine rağmen kestirimci bakım iyi bir alternatif olarak gösterilebilir. Özellikle can güvenliği içeren veya pahalı sistemlerde ön yatırımın kısa zamanda kendini amorti edeceği unutulmamalıdır [3].

Bu tezde motor arızaları içerisinde büyük öneme sahip rulman arızaları üzerinde durularak, rulman durum izleme ve hata teşhis yöntemleri anlatılmış olup uygulama olarak; kimyasal, termal ve elektriksel yapay eskitmeye tabi tutulmuş 5 HP (3.7 kW)'lik, 3 fazlı, 4 kutuplu 4 tane asenkron motorun sıcaklık, akım ve titreşim verileri kullanılarak arıza özelliği çıkartılmıştır. Daha sonra öğrenilebilir bir sistem olan adaptif ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile motor durumu izleme çalışması yapılmıştır.

2 ASENKRON MAKİNELERDE MEKANİK ARIZALAR

Endüstriyel süreçlerde kullanılan elektrik motorlarının elektriksel ve mekanik kısımlarındaki arızaların erken belirlenmesi, süreç güvenilirliği ve ekonomikliği açısından son derece önemlidir [4]. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda kullanılan asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında, birçok öngörülü bakım (predictive maintenance) amaçlı durum izleme (condition monitoring) çalışması gerçekleştirilmiştir [4, 5]. Bu çalışmalardan ortaya çıkartılan sonuçlara göre arızaların ortalama dağılımı Tablo 2.1'deki gibi belirlenmiştir. Bu tablodan motor arızalarının %50'den fazlasının rulman bozukluğu ve mil dengesizlikleri gibi mekanik nedenlerden kaynaklandığı görülmektedir.

Tablo 2.1 : Motor arıza nedenleri

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

Motor arızaların büyük kısmı, sargı, rotor, rulman ve mil üzerine etkiyen çeşitli zorlayıcı kuvvetler ve bunların birleşimi nedeniyle oluşmaktadır. Tablo 2.22'de motor parçaları üzerine etkiyen kuvvet çeşitleri gösterilmiştir [2].

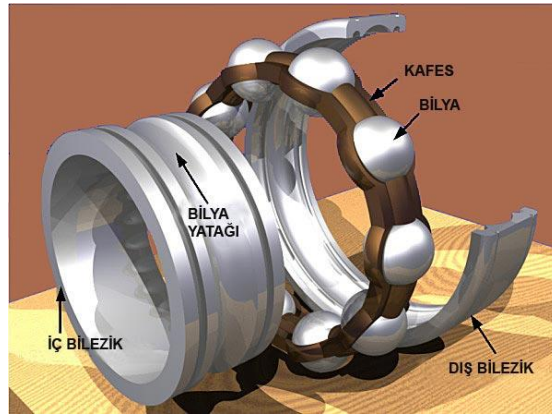
Tablo 2.2 : Motor parçaları ve üzerine etkiyen kuvvetler

Kuvvet çeşidi	Stator	Rotor	Rulman	Mil
Isıl	√	√	√	√
Elektriksel	√	√	√	
Mekanik	√	√	√	√
Dinamik		√	√	√
Makaslama-kesme (shear)				√
Titreşim ve darbe	√	√	√	√
Elektromanyetik	√	√	√	√
Çevresel	√	√	√	√
Diğer		√		√

Rulman arızalarının elektrik motor arızaları içerisinde en büyük kısmı oluşturması nedeniyle tezin bundan sonraki kısmında rulman arızaları incelenmiş ve rulman odaklı durum izleme ve hata teşhis yöntemleri ele alınmıştır.

2.1 Rulman

Rulmanlar (*bearing*), iç ve dış bilezikleri arasında bulunan yuvarlanma elemanları sayesinde minimum sürtünme ile millerin veya aksların istenen yöndeki hareketlerine müsaade eden, istenmeyen yönlerdeki hareketlerini de engelleyen yataklardır [6]. Rulmanın ana parçaları iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanları, kafes ve sızdırmazlık kapağıdır. Rulmanların bazılarında ilave parçalar vardır. Kılavuz ringi, oynak makaralı rulmanlarda kullanılan ilave parçaya bir örnektir [7]. Şekil 2.1'de sabit bilyeli bir rulman ve parçaları görünmektedir.



Şekil 2.1 : Sabit bilyeli rulman ve parçaları [6].

İç bilezik mil üzerine monte edilir ve birçok durumda dönen parçadır. İç bilezik deliği silindirik ve konik olabilir. Yuvarlanma yüzeyleri farklı formlardaki yuvarlanma elemanları ile beraber çalışırlar. Yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri, yuvarlanma elemanlarının tipine bağlı olarak; oynak, silindirik, konik olabilir.

Dış bilezik makinenin yuva kısmına monte edilir ve bir çok durumda dönmeyiz. Yuvarlanma yüzeyleri farklı formlardaki yuvarlanma elemanları ile beraber çalışırlar. Yuvarlanma elemanlarının yüzeyleri, yuvarlanma elemanlarının tipine bağlı olarak; oynak, silindirik, konik olabilir.

Yuvarlanma elemanları; bilye, silindirik makara, oynak makara, konik makara ve iğneli makara olabilir. Yuvarlanma elemanları iç ve dış bilezik yuvarlanma yüzeyleri arasında dönerler ve ince bir yağ filmi yoluyla rulman üzerinde yükü iletirler.

Kafes, yuvarlanma elemanlarını çalışma esnasında iyi olmayan yağlama şartlarında bile birbirlerine temas etmesini önler. Kafes birçok rulman tipinde taşıma esnasında, yuvarlanma elemanlarını beraber tutmayı sağlar.

Kapaklar veya keçeler, rulman ömrünün uzun olması için gereklidir. Kapaklar rulmanları pislikten korur.

Kılavuz ringinin kullanılma amacı; rulmanda yuvarlanma elemanlarına kılavuz ederek mil ile paralel dönmesini sağlamak ve yükleri eşit dağıtmaktır.

2.2 Rulman Arızaları

Rulmanlarda imalat sırasında yüzeylerde üretim hataları, yanlış montaj ve işletme sırasında değişik sebeplerden kaynaklanan hatalar oluşabilir [8]. Rulmanlarda oluşan hasarlar bölgesel ve dağınık olarak sınıflandırılabilir. Bölgesel hasarlar; yuvarlanma yüzeylerindeki çatlaklar, küçük delik şeklinde korozyon ve kabarmalardır. Dağınık hasarlar; yüzey pürüzlülüğü, dalgalılık, ekseni kaçık bilezikler, çentik, radyal açıklık, dengesizlik, kir ve ölçü dışı yuvarlanma elemanlarıdır [9].

Rulmanlar işletme koşullarında çeşitli zorlayıcı kuvvetlere maruz kalırlar. Uygun bir analiz için rulman üzerine etkiyen kuvvetler gruplar halinde maddelendirilerek aşağıda gösterilmiştir [10].

- Dinamik ve Statik Yükler
- Isıl etkiler
- Titreşim ve darbe
- Çevresel etkiler
- Elektrik akımı
- Mekanik etkiler

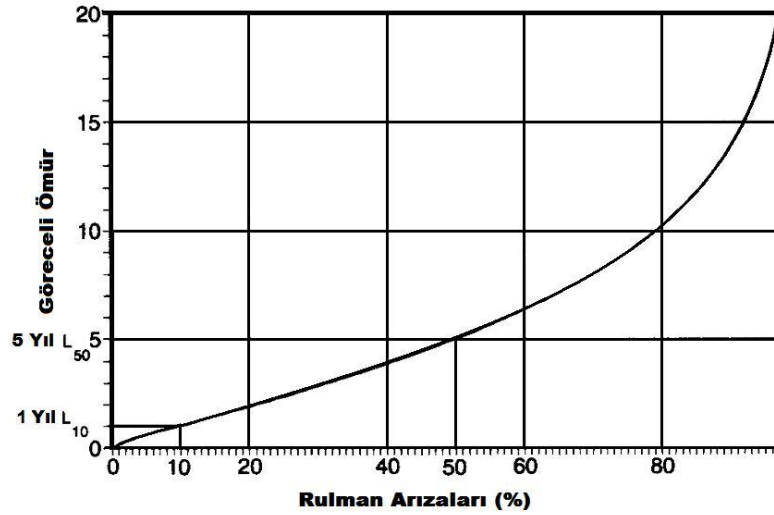
Bu kuvvetler rulmanın tasarım kapasitesini aşmadığı sürece beklenmedik arızalar oluşmaz. Diğer yandan, bu kuvvetlerin herhangi bir birleşimi rulman kapasitesini

aşarsa, rulman ömrü çok hızlı bir şekilde azalarak, beklenmedik arızalar oluşabilir [10].

En sık karşılaşılan rulman arıza nedenleri; aşırı sıcaklık, yetersiz veya aşırı yağlama, aşırı yük, kirlilik, titreşim, eksen kaçıklığı, mil boyutlarındaki uyumsuzluk, mil akımları, makine kusurları, yanlış işçilik ve montaj olarak sıralanabilir.

2.3 Rulman Ömrü

Rulmanlar işletme şartlarında belirli bir ömre (fatigue life) sahiptir. Bu ömrün (arıza zamanının) tahmininde genellikle tercih edilen yöntem *L10* olarak adlandırılan yöntemdir. Bu tahmin arızanın asıl nedeninin malzeme kaynaklı olduğu varsayımına dayanır. *L10* rulman arızalarının %10'unun olduğu tahmini zamandır. Bu bağıntı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu grafik yük durumuyla bağıntılıdır. Eğer *L10* bir yıl ise *L50* ya da ortalama ömür beş yıldır. Bunun anlamı *L10* ömrü bir yıl olan bir uygulamada rulmanların %10'u ilk bir yılda ve yarısının da beş yıl sonunda bozulabileceğidir [9].



Şekil 2.2 : Rulman arızası ve rulman ömrü arasındaki ilişki

Bilyeli rulmanların ömrü yaklaşık olarak yük artışıyla ve hızla ters orantılıdır. Bu orantı rulman büyüklüğü, tasarımı, yağlayıcı cinsi, sıcaklığı, yükü ve hızı ile alakalı belirli sınırlar içerisindedir.

$$L_{10} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^a \quad (2.1)$$

Burada;

a = 3 (Bilyeli rulman için)

a = $\frac{10}{3}$ (Silindirik bilyeli rulman için)

n = Hız (min⁻¹)

C = Dinamik yük katsayısı

P = Eşdeğer yük katsayısı

2.3.1 Hızın rulman ömrüne etkisi

Her rulmanın, ölçüleriyle, cinsiyle, tasarımı ve yağlayıcı cinsi ile alakalı fiziksel karakterine bağlı olarak belirli bir limit hızı vardır. Bu hız sınırının aşılması, aşırı sıcaklık artışı, yağlayıcıda bozulma, titreşim ve radyal iç açıklıkta azalma sonucunu doğurur. Bu da rulman ömrünü azaltacak bir etkidir [10]. Normal şartlarda rulman ömrü ve rulman hızı arasında ters orantı vardır. Yani hız iki katına çıkarsa rulman ömrü yarıya düşer, tersi olarak da hız yarıya düşerse rulman ömrü iki katına çıkar. Bu ters orantı çok yüksek hızlarda doğruluğunu kaybeder [11]. Testler sonucunda belirlenen limit hız değeri rulman üreticileri tarafından ürün kataloglarında belirtilir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, özellikle büyük motorlarda gres yağlamalı motorların limit hızları sıvı yağlamalı rulmanlara göre daha azdır. Rulman kafesinin malzemesi ve kalitesi hız sınırını etkileyen diğer bir faktördür [10].

2.3.2 Sıcaklığın rulman ömrüne etkisi

Normal şartlarda elektrik motorlarında kullanılan rulmanlarda, rulman sıcaklığı 100°C'yi geçmiyor ise rulmanın uygun şekilde yağlandığı ve çalıştığı sonucuna varılır. Bu sıcaklık sınırının aşılması durumu ısıl genleşme ve çelikteki metalik değişmeye bağlı olarak rulman ölçülerinde kalıcı değişikliğe neden olabilir. Bu durum rulman radyal iç açıklığının (radial internal clearance) azalmasına ya da tamamen yok olmasına, buna bağlı olarak aşırı sıcaklık artışına ve rulman ömrünün azalmasına neden olabilir [10].

Rulman sıcaklığındaki artışı etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır [10].

- Sargı sıcaklığı
- Yağlayıcı sıcaklığı
- Soğutma yöntemi
- Yağ ve gres viskozitesi
- Rulman contası, kapağı ve yağlayıcı cinsi
- Rulman yatağı ve boşluklarındaki yağlayıcı miktarı
- Radyal iç açıklık
- Çevresel koşullar ve kirlilik
- Yük ve hız durumu
- Rulman cinsi ve ölçüsü

Genel olarak rulmanların çalışma koşullarındaki sıcaklık limitleri Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 : Rulman sıcaklık limitleri

	Yağlayıcı cinsi	
	Standart	Sentetik
Normal	80 °C	110 °C
Alarm	90 °C	120 °C
Kapanma	100 °C	130 °C

Özel uygulamalarda biraz farklı limitler gerekebilir. Çoğu uygulamada normal sıcaklıklar bu değerlerin altındadır.

2.3.3 Yağlayıcının rulman ömrüne etkisi

Yağlamadaki ana prensip, yağın iki hareketli parça arasında bir sınır oluşturarak sürtünmeyi azaltmasıdır. Yağlama, rulmanlı yataklarda yuvarlama elemanları, yatak bilezikleri ve kafes arasındaki direk madeni teması önler [12]. Uygun yağlayıcı seçimi ve yağlama yöntemi, yüksek rulman performansı ve rulman ömrü için kritik öneme sahiptir. Yüksek sıcaklık yağın incelmesine ve kimyasal yapısının bozulmasına sebep olur. Yağlayıcı maddelerin yağlama kabiliyeti, zamanla mekanik zorlanma ve yaşlanma nedeniyle azalır. Aşırı sıcaklık artışı, yağ oksitlenmesinin hızını artırıcı yönde tetikleyerek çeliğin yumuşamasına, buna bağlı olarak rulman dayanıklılık limitinin ve ömrünün azalmasına neden olur [10].

3 RULMAN DURUMUNU İZLEMEDE KULLANILAN YÖNTEMLER

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 [11].

Tezin bu kısmında rulman arızalarının elektrik motor arızaları içerisinde en büyük kısmı oluşturması nedeniyle, asenkron motorların arıza belirleme çalışmalarında rulman odaklı öngörülü bakım amaçlı durum izleme (condition monitoring) yöntemleri ele alınmıştır. Bu yöntemler içerisinde sıcaklık, titreşim ve akım yardımıyla durum izleme yöntemlerine, tezin dördüncü bölümünde belirtilen uygulama çalışmasında incelenmeleri nedeniyle ayrıntılı olarak, diğer yöntemlere avantajları ve dezavantajları yönünden kısaca değinilmiştir.

3.1 Sıcaklık Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme

Aşırı ve uzun süreli ısı motor ömrünü azaltan en önemli etkidir. Aşırı ısıdan en çok etkilenen bileşenler; yalıtım sistemi ve rulmanlardır. Genel kural olarak sargı sıcaklığındaki her 10 °C'lik artış, yalıtım ömründe %50 azalmaya neden olur [12].

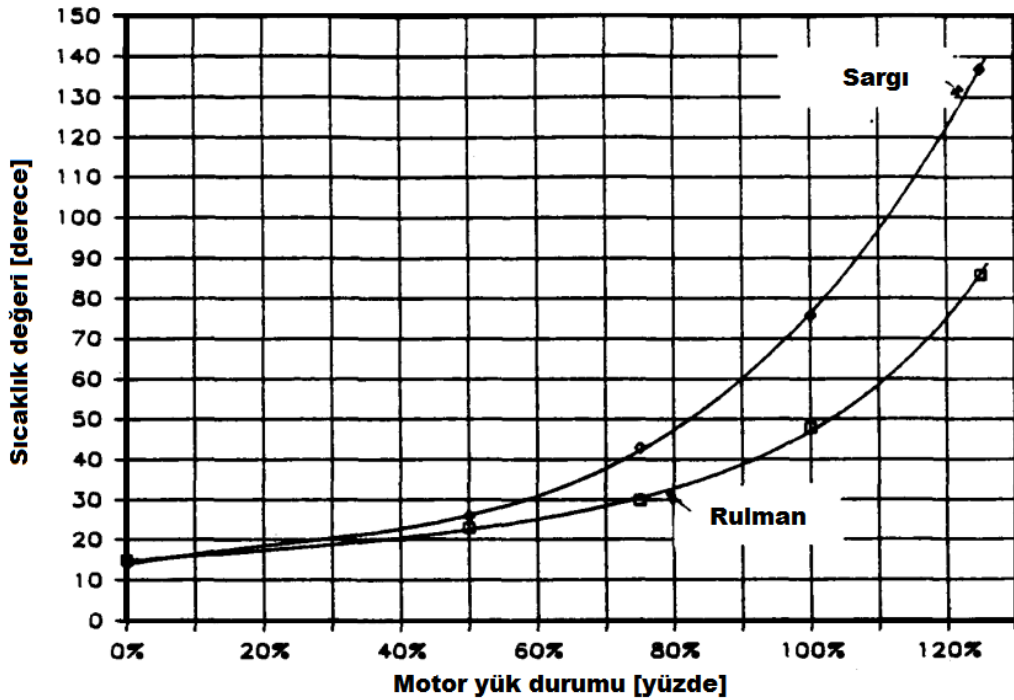
Yüksek sıcaklık, rulmandaki yağ veya gresin viskozitesini azaltır. Bu yüzden rulmanlar, uygun olmayan yağlama nedeniyle erken bozulurlar. Rulman sıcaklığı, yağlayıcı ve rulman ömrü açısından kirlilikten sonra en önemli ikinci faktördür. Bu yüzden rulman sıcaklığı ölçümü makine ve rulman sağlığı hakkında faydalı bilgiler sağlar [13].

Sıcaklık ölçümleri, motor sürekli durumda çalışırken rulman yüzeyine yerleştirilen sıcaklık algılayıcıları kullanılarak yapılır. Sıcaklık ölçümü yardımıyla durum izleme için gerekli ölçümler genellikle iki metotla gerçekleştirilir; doğrudan temasla (direct contact) ölçüm veya termal görüntüleme (thermal imaging) yoluyla ölçüm. Doğrudan

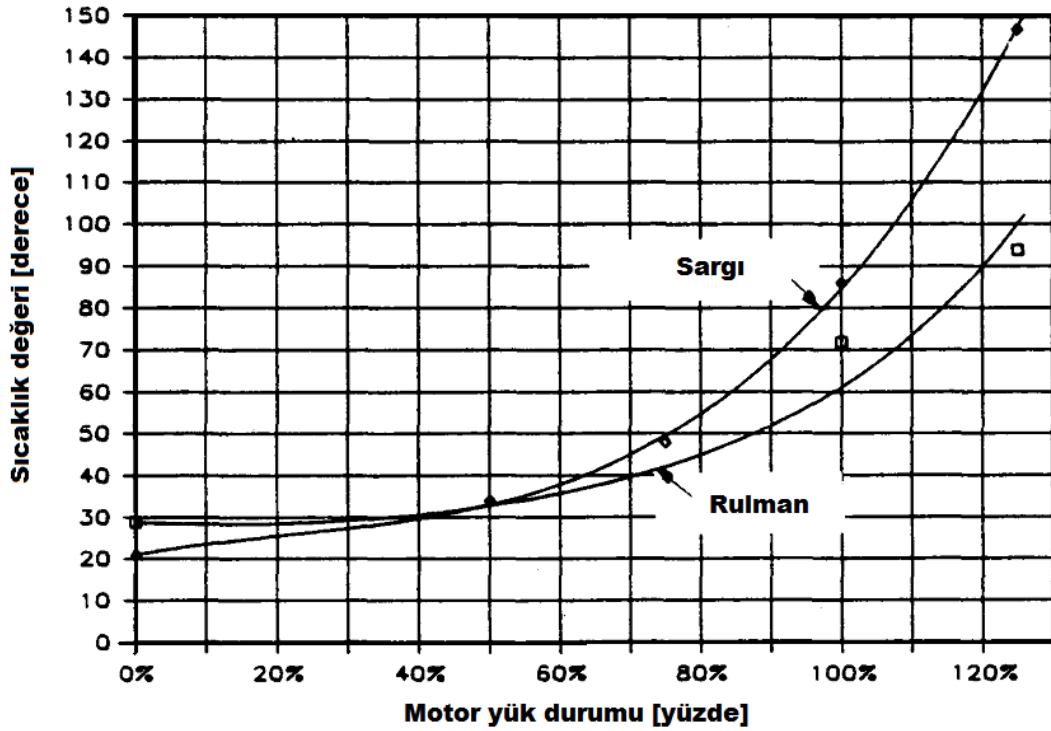
temas, konumla ilgilenildiği sürece daha hassas bir okuma verir. Algılayıcı alet, motorun içinde ve dışında hemen hemen her yere yerleştirilebilir. Termal görüntüleme motorun dışındaki sıcaklıkla görünümünü verir. Fakat her ikisi değerli sonuçlar verebilir [14].

Rulman sıcaklığı nominal çalışma koşullarında belirli değeri geçmemelidir. Örneğin, petrol ve kimya endüstrisinde, IEEE 841 standardına göre, nominal yükte rulman sıcak artışı 45 °C'yi (çift kutuplu motor için 50 °C) geçmemelidir [4]. Rulman sıcaklığındaki artışın birçok nedeni olabilir. Bunlardan bazıları; sargı sıcaklık artışı, motor hızı, motor içi sıcaklık dağılımı, yağ viskozitesi ve rulmandaki yağ miktarıdır.

Literatüre bakıldığında Maru ve Zotos [13] sargı sıcaklığı artışı ile rulman sıcaklığı artışı arasındaki ilişkiyi araştırmış ve rulman sıcaklığı artışının motor hızı ve sargı sıcaklık artışıyla yakından alakalı olduğu sonucuna varmışlardır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de hızı 1800 min⁻¹ ve 3600 min⁻¹ olan eşdeğer iki motorun yük durumuna bağlı sargı ve rulman sıcaklık artış grafiği gösterilmiştir. Bu grafiklerden motor normal çalışma bölgesinde sargı sıcaklığının 60-110 °C arasında değiştiği, 1800 min⁻¹ hızda rulman sıcaklığı sargı sıcaklığının yaklaşık olarak %65'i, 3600 min⁻¹ hızda rulman sıcaklığı sargı sıcaklığının yaklaşık %75'i kadar arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.1 : 1800 min⁻¹ hızda yük durumuna bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 3.2 : 3600 min⁻¹ hızda yük durumuna bağlı sıcaklık değişimi

Sıcaklık izlemenin en önemli dezavantajı, sıcaklık algılayıcılarını rulmana monte etme güçlüğüdür. Rulman ısınmış ve sıcaklık artışı fark edilmiş olsa bile, sıcaklık artışının sebebini belirleyebilmek için daha ayrıntılı araştırma gerekir. Bu nedenle sıcaklık ölçümü yardımıyla durum izleme, günümüzde pek popüler olmasa da rulman durumunun izlenmesinde kullanılan geleneksel bir yöntemdir [4].

3.2 Titreşim Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme

Titreşim analizi ile rulman hasarlarını belirleyebilmek, öncelikle verilerin sağlıklı olarak toplanmasına bağlıdır. Bunun için algılayıcının (sensör) yerleştirileceği yer çok önemlidir [9]. Hasarlı rulman kısa süreli darbeler ürettiği için algılayıcı doğru yere yerleştirilmezse bu darbeler kaydedilemez. Algılayıcının doğru yerleştirilme yeri, makinenin tipine, kullanılan rulmanın tipine ve makinenin konstrüksiyonuna bağlıdır. En iyi sinyal ölçme pozisyonu, algılayıcıyı yük bölgesinde yatağa mümkün olduğu kadar yakın yerleştirmektir. Titreşim kaynağından algılayıcıya kadar olan

iletim ortamının uygun olması gerekmektedir. Örneğin bir iç bilezik hasar frekansı algılayıcıya ulaşmaya kadar yuvarlanma elemanları, dış bilezik ve yatak gövdesi içinden geçmek zorundadır. Bu süre boyunca sinyal sönümlenecek ve genliği oldukça düşük görünecektir. Bu durum titreşim analizinde dalga formu (genlik-zaman) tipinin önemini ve genliğe göre değerlendirmenin her zaman doğru olmayacağını göstermektedir.

Rulman arızaları iç bilezikte, bilyede, kafeste ve dış bilezikte oluşabilmektedir. Rulman arızaları, rulmanın geometrisi ve mil dönme devrine bağlı olan formüllerle hesaplanan arıza frekansları ile ölçüm sonucu elde edilen titreşim frekanslarının karşılaştırılması ile belirlenir. Hangi elemanda bir arıza oluşmuşsa titreşim frekanslarında bu elemanın arıza frekansları, bunun katları, bazı durumlarda mil dönme devri ile oluşturduğu yan bant frekansları bulunur [15]. Sağlam bir rulmandan elde edilen titreşim frekanslarında da rulman arıza frekanslarına rastlanıldığı görülmüştür. Dolayısı ile rulman arıza frekansının oluşmuş olması her zaman rulmanın arızalı olduğu anlamına gelmez. Bu yüzden analiz çok dikkat ve bilgi gerektirir.

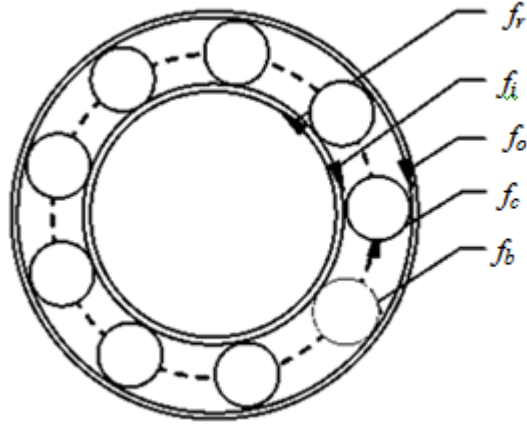
Rulmanlar, kapaklar, bilyeler (dönme elemanları), iç ve dış bilezikler ve kafes olmak üzere dört temel elemanın birleşiminden oluşurlar. Bu dört elemanda herhangi birinde bir hata varsa, bu hata rulmanın kendi titreşiminde belirli bir frekansta görülecektir.

Şekil 3.3'de karakteristik rulman hata frekanslarının oluşumuyla ilgili yerler gösterilmiştir.

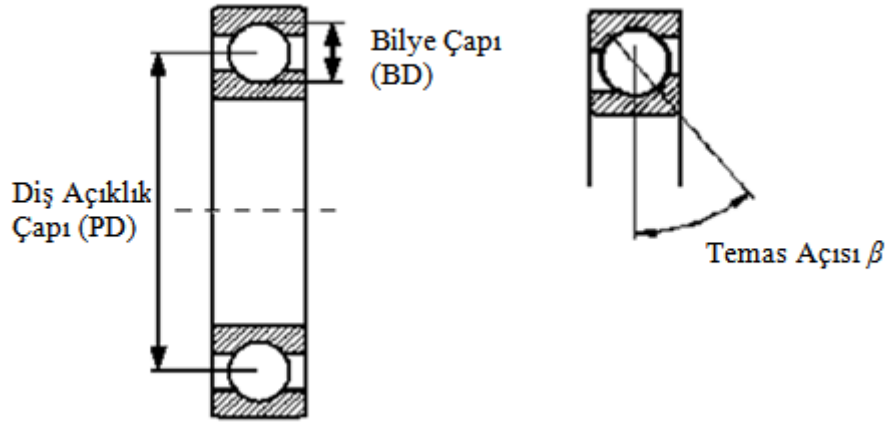
Bu titreşim frekansları;

- İç Bilezik Geçme Frekansı (Ball Pass Frequency of the Inner Race (f_i))
- Dış Bilezik Geçme Frekansı (Ball Pass Frequency of the Outer Race (f_o))
- Bilye Dönme Frekansı (Ball Spin Frequency (f_b))
- Kafes Frekansı (Cage Frequency (f_c))

olarak isimlendirilir.



Şekil 3.3 : Karakteristik rulman hata frekansları [5]



Şekil 3.4 : Rulman geometrisi [5]

Frekans birimi Hertz (1/saniye) olarak seçildiğinde, asenkron motorun mil dönme frekansı (f_r) aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$f_r = \text{Motor hızı (min}^{-1}\text{)}/60 \quad (3.1)$$

Rulman hatalarından kaynaklanan, rulmanın geometrisi ve mil dönme devrine bağlı karakteristik rulman frekansları, dış bileziğin sabit, iç bileziğin mil ile birlikte döndüğü kabulü yapılarak aşağıdaki ifadelerde verilmiş olup, rulman geometrisi Şekil 3.4'de gösterilmiştir [5,14].

$$\text{Kafes hata frekansı: } f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Dış bilezik hata frekansı: } f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (3.3)$$

$$\text{İç bilezik hata frekansı: } f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (3.4)$$

$$\text{Bilye hata frekansı: } f_b = \frac{BD}{PD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cos^2(\beta) \right] \quad (3.5)$$

$$f_{rulman} = m * (\text{karakteristik rulman frekanslarının tam katı veya alt-harmonik frekansları}) \quad (3.6)$$

Burada;

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

PD = Diş açıklık çapı

BD = Bilye çapı

N_b = Bilye sayısı

f_r = Motorun dönme frekansıdır.

Gerçekte rulmanın hareketinde bir miktar kayma da söz konusu olduğu için hesapla bulunan bu frekanslar gerçek frekanslardan biraz daha düşüktür. Bu nedenle bilye sayısı 6-12 arası olan rulmanlar için, rulman arıza frekanslarının hesabında daha basit ve kolay hatırlanabilen şu formüller kullanılmaktadır [14, 16].

$$\text{Kafes hata frekansı: } f_c = 0.4 * f_r \quad (3.7)$$

$$\text{Dış bilezik hata frekansı: } f_o = 0.4 * N_b * f_r \quad (3.8)$$

$$\text{İç bilezik hata frekansı: } f_i = 0.6 * N_b * f_r \quad (3.9)$$

N_b = Bilye sayısı

Bu karakteristik rulman hata frekansları, ölçüm sonucu elde edilen titreşim spektrumunda görülmesi gereken titreşim frekanslarından bazılarıdır. Diğer rulman problemleri yağ girdabı (oil whirl) ve rulman hizalama hatasıdır. Bu hatalara bağlı oluşan karakteristik rulman frekansları şunlardır;

$$\text{Yağ girdabı frekansı: } f_{\text{yağgirdabı}} = k * m * f_r \quad (3.10)$$

$$\text{Hizalama hata frekansı: } f_{\text{hizalama}} = n * f_r \quad (3.11)$$

$$0.38 \leq k \leq 0.49 \quad m=1,2,3,\dots \quad n=1 \text{ ve } 2$$

Pratik uygulamalarda, genellikle rulman frekansları titreşim spektrumunun yüksek frekanslarında ortaya çıkarlar. Yüksek frekansların anlamı mil dönme frekansının 5-50 katı demektir [14].

Titreşim, rulman arıza tanısında yıllardır bilinen ve güvenilir makine parametresidir [4]. Bu nedenle, titreşim izleme pratikte popüler olarak kullanılmakta ve ISO 10816 gibi kabul edilmiş bir standarda sahiptir [4]. Bununla birlikte titreşim yardımıyla durum izlemenin en önemli dezavantajı maliyetidir. Örneğin çok sayıdaki elektrik motoru için titreşim algılayıcı temin etmek büyük maliyet oluşturur. Titreşim izlemenin diğer dezavantajı ise izlenecek makineye ulaşmanın gerekli olmasıdır. Doğru ölçüm için titreşim algılayıcının montajı doğru ve sağlan bir şekilde yapılmalı, bunun için de uzman personel gerekmektedir. Buna ek olarak normal şartlarda rulman ömrünün birçok uygulamada senelerle ifade edildiği dikkate alınırsa titreşim algılayıcının kendisinin, hata kaynağı olması ve bozulması da olasıdır [4].

3.3 Stator Akımı Yardımıyla Durum İzleme

Elektrik makinelerinde, rotor-stator arasındaki ilişki bu iki parça arasındaki hava aralığından geçen manyetik akı ile sağlanır. Eğer hava aralığı rotorun 360 derecelik çevresi boyunca simetrik olarak dağılmamışsa, o zaman motor içinde düzgün olmayan manyetik alanlar oluşur. Bu manyetik dengesizlikler motorun çektiği akımı etkiler. Çünkü söz konusu bu aksel bozukluk manyetik akıda değişimlere sebep olur ve motor endüktansları üzerindeki etkisi ile stator akımlarında harmonikler üretir [14]. Rulman bozukluğunun rotor-stator arasındaki hava aralığının değişmesine neden olacağı ve buradaki manyetik akı değişiminin motorun çektiği akıma

etkiyeceği düşüncesinden hareketle stator akımının izlenmesi, rulman bozukluğunu belirlemede kullanılabilir. 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 [14, 17].

$$f_{e_{rulman}} = |f_e \pm m * f_{v_{rulman}}| \quad (3.12)$$

Burada;

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

$$f_e = \text{Şebeke frekansı}$$

$$f_{v_{rulman}} = \text{Karakteristik rulman titreşim frekansları}$$

$$f_{e_{rulman}} = \text{Akımda oluşan rulman hata frekanslarıdır.}$$

Denklem (3.12)'de belirtilen karakteristik rulman titreşim frekansları denklem (3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5)'de gösterilmiştir. Bu değerler yerine denklem (3.7, 3.8, 3.9)'da gösterilen genelleştirilmiş karakteristik rulman titreşim frekans formüllerini kullanmak, rulman geometrisini bilmeden de frekans bantlarının kolay bir tanımının yapılmasını sağlamaktadır.

Elektrik makinelerinde, stator akımı yardımıyla durum izleme uygulama açısından kolay bir yöntemdir [4]. Çünkü işletme şartlarında sistemle alakalı temel elektriksel değerler, mevcut koruma sisteminin yerleşik parçaları olan gerilim ve akım transformatörleri yardımıyla zaten ölçülmektedir. Bu nedenle stator akımı yardımıyla durum izleme uygulamasında ek bir ölçme sistemine gerek duyulmayacaktır.

Makine durumunun yerine gidilmeden uzaktan izlenebilir olması bu yöntemin başka bir avantajıdır. Aynı zamanda akımı yardımıyla durum izleme, dolaylı yoldan hız, verim v.b makine bilgilerine ulaşmaya ve diğer birçok makine hatasının tespitine olanak sağlayarak toplu bir makine durum izleme uygulamasını mümkün kılar. Bu nedenlerle stator akımı yardımıyla durum izleme ekonomik oluşu ve uygulama kolaylığı açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Stator akımı yardımıyla durum izleme yöntemin en önemli dezavantajı, stator akımı içerisindeki baskın şebeke frekansı ve bileşenleri içerisinde rulman arıza frekans bileşenlerinin ince farklarından dolayı göze çarpmamasıdır. Bölgesel rulman

hatalarında yukarıda bahsedilen karakteristik rulman hata frekans bölgeleri incelenerek bu ince farklar tespit edilebilir. Fakat dağınık rulman hatalarının tespiti ciddi bir uğraş gerektirir.

3.4 Kimyasal Analiz Yardımıyla Durum İzleme

Makine aksamlarından alınan numunelerin çeşitli tekniklerle incelenmesi ile hem yağın kalitesi hem de makine parçalarının aşınma durumu değerlendirilerek makinenin performansı ve arızaya yönelimi belirlenebilir. Kullanılmış yağlar iki aşamada analiz edilmektedir. Bunlar; yağ performans analizleri (görünüş ve koku, viskozite, yağda su varlığı, oksidasyon) ve aşınmış parçacık analizleridir.

Yağ, sıcaklık etkisi ile bozulduğunda katı, sıvı ve gaz halinde birçok kimyasal ürün ortaya çıkar. Ayrıca rulman bozulmasına bağlı parçacık aşınması da yağdan analiz edilebilir. Her ne kadar yağ bozulması ve parçacık aşınmasının tespiti, rulman durumu hakkında yararlı bilgiler verse de, bu tespit sadece sıvı yağlayıcı kullanımında mümkündür. Bu nedenle kimyasal analiz yardımıyla durum izleme büyük güçlü makinelerde (50kW'dan büyük) kullanılan sıvı yağlayıcılı rulmanlarda ve sürekli yağlamalı kaymalı yataklarda uygulanabilir [4]. Rulman içerisine gresle doldurulup kapatılmış küçük ve orta ölçekli motorlar için kimyasal analiz yardımıyla durum izleme yöntemi pratik değildir.

3.5 Akustik Yayılım Yardımıyla Durum İzleme

Çok gürültülü ortamlarda, standart titreşim ölçümü ile durum izlemede birtakım zorluklarla karşılaşılabilir. Bunun nedeni küçük rulman hatalarıyla ilişkili düşük frekanslı titreşimlerin, ortam gürültüsüyle karşılaştırıldığında sisteme olan enerji katkıları önemsenecek derecede az olur. Örneğin; gaz türbini, uçak aktarım organları ve sıvı roket motorlarında titreşim ölçümü ile durum izlemede başarı hayal kırıklığı ile sonuçlanabilir. Bununla birlikte böyle ortamlarda, yüksek frekanslı (100 kHz üzeri) dalga yayılımı arıza hakkında açık bir uyarıcı olabilir ve böylece önceden ve oldukça güvenilir bir şekilde rulman bozukluğu hakkında bilgi verir. Örneğin akustik yayılım gibi yüksek frekanslı gerilim dalgaları, akustik yayılım dönüştürücüleri ile algılanabilir [4]. Klasik titreşim izleme ile karşılaştırıldığında, akustik yayılım izleme çok gürültülü ortamlarda, yüksek sinyal-gürültü oranı sağlar.

Ancak bununla birlikte yüksek sistem maliyeti oluşturur. Ek olarak uzman personel de gerektirir.

3.6 Ses Basıncı Yardımıyla Durum İzleme

Rulman arızasının, rulman gürültü yayılımı üzerindeki etkisinin öğrenilmesinden beri ses basıncı, rulman durum izleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ses basıncı ile durum izlemede 0 Hz den 20 kHz frekans aralığında ses kaydedilmektedir. Rulman arızası nedeniyle oluşan sesteki titreşimde olduğu gibi karakteristik hata frekansları tanımlanabilir [4].

Rulman sesinin mikrofona ile kaydedilebildiğinde ve bozulan rulmandaki gıcırta kulakla duyulabildiğinde, ses dinleme diğer geleneksel yöntemlerden az da olsa daha kullanışlı görülmektedir. Bununla birlikte ses dinlemede arka plandaki gürültülerin ve diğer rulmanlardan kaynaklanan istenmeyen gürültülerin engellenmesi gerekmektedir. Engellenmediği takdirde ilgilenilen rulman gürültüsü bozulabilir ve yanlış sonuçlar elde edilir. Bu nedenle bahsedilen engelleme yapılmadığı bir oda içerisindeki birçok makineyi içeren tesislerde, ses dinleme yöntemi uygulanabilir değildir.

3.7 Lazer Yer Değişimi Yardımıyla Durum İzleme

Titreşime bağlı yer değiştirmenin genellikle ivme-ölçer vasıtasıyla ölçülen ivmelenmeden hesaplanmasından beri, bu süreçlerde bazı hesaplama hataları olabilmektedir. Bu gibi hataları gidermek için, rulman arızasına bağlı rulman yer değişiminin lazer algılayıcı kullanılarak direkt ölçülmesi araştırılmıştır. Bu yöntem her ne kadar rulman titreşiminin ölçülmesi için alternatif bir yol olsa da, rulman yüzeyine lazer algılayıcı yerleştirilmesinin gerekmesi nedeniyle genellikle uygulanması kolay değildir [4]. Tablo 3.1’de rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemlerin başlıca avantajları ve dezavantajları özet olarak verilmiştir.

Tablo 3.1 : Rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemlerin farkları [4]

	Durum İzleme Yöntemi	Başlıca Avantajlar	Başlıca Dezavantajlar
İlave algılayıcı gerektirir	Titreşim Ölçümü	Güvenilirdir, Standartlaştırılmıştır. (ilgili standart: ISO10816)	Pahalıdır, Uygulanması zordur, Algılayıcı da hataya sebep olabilir.
	Kimyasal Analiz	Rulman ve yağından direk analiz imkanı sağlar.	Kapalı devre yağ beslemeli sistemlerle sınırlıdır, Uzman bilgisi gerektirir.
	Sıcaklık Ölçümü	Bazı endüstrilerde standarda sahiptir. (ilgili standart: IEEE 841)	Yerleşik sıcaklık algılayıcı gereklidir, Diğer etkenler de benzer sıcaklık artışına sebep olabilir.
	Akustik Yayılım (ultrasonik frekans)	Sinyal-gürültü oranı yüksektir.	Akustik algılayıcı gerektirir, Uzman bilgisi gerektirir.
	Ses Basıncı (ses frekansı)	Ölçümü kolaydır.	Arka plan gürültüsünün engellenmesi gerekir.
	Lazer yer değişimi ölçümü	Rulman titreşim ölçümünde alternatiftir.	Lazer algılayıcı gerekir, Uygulanması zordur.
İlave algılayıcı gerektirmez	Stator akımı izleme	Ucuzdur, Kullanımı kolaydır, Uygulanması kolaydır.	Sinyal-gürültü oranı bazen düşüktür, Hala gelişim sürecindedir.

4 SICAKLIK, AKIM VE TİTREŞİM VERİLERİNİN TOPLANMASI VE ANALİZİ

Bu bölümde, elektrik motorlarında hızlandırılmış eskitme deneylerinin yapılışı, yapay rulman bozukluğunun oluşturulması ve veri toplama sistemi hakkında bilgi verilmiştir. Verilerin analizinde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilerek sıcaklık, akım ve titreşim verilerine uygulanmıştır.

4.1 Hızlandırılmış Yapay Eskitme Süreçleri ve Veri Toplama Sistemi

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. Yapay eskitme süreçleri The University of Tennessee (USA), Maintenance and Reliability Center'da IEEE standardı temel alınarak yapılmıştır [19,20]. Bu yapay eskitme süreçleri Tablo 4.1'de plaka bilgisi verilen 3.7 kW'lık, 3 fazlı, 4-kutuplu asenkron motorlar üzerinde iki tip arıza modu için uygulanmış olup, her bir sürecin içeriği aşağıda anlatılmıştır.

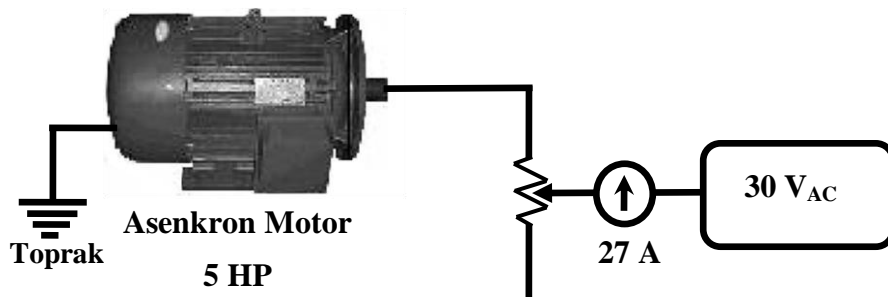
A. Isıl ve kimyasal eskitme süreci (Mod-I):

1. 3.7 kW'lık motor, sıcaklığı 140 °C olan fırına yerleştirilir.
2. Motor bu sıcaklıkta 72 saat ısıtılır. Sonra fırından çıkarılır ve 6 saat soğutulur.
3. 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.
4. Motor 72 saat sonra fırından çıkarılır ve 6 saat soğutulur.
5. Yük performans test düzeneğinde motor test edilir.

B. Elektriksel, ısıl ve kimyasal eskitme süreci (Mod-II):

1. 3.7 kW'lık motor rulman elektriksel eskitme test düzeneğinde 30 dakika çalıştırılmıştır.
2. Daha sonra, 3.7 kW'lık 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.

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 elektriksel boşalmanın benzetimi için Mod-II'de Mod-I'den farklı olarak, Şekil 4.1'de gösterilen özel bir test düzeneği yardımıyla mile dışarıdan 30 Volt, 27 Amperlik alternatif akım uygulanarak motor boşta 30 dakika çalıştırılır ve bu şekilde rulman elektriksel eskimeye maruz bırakılmış olur.

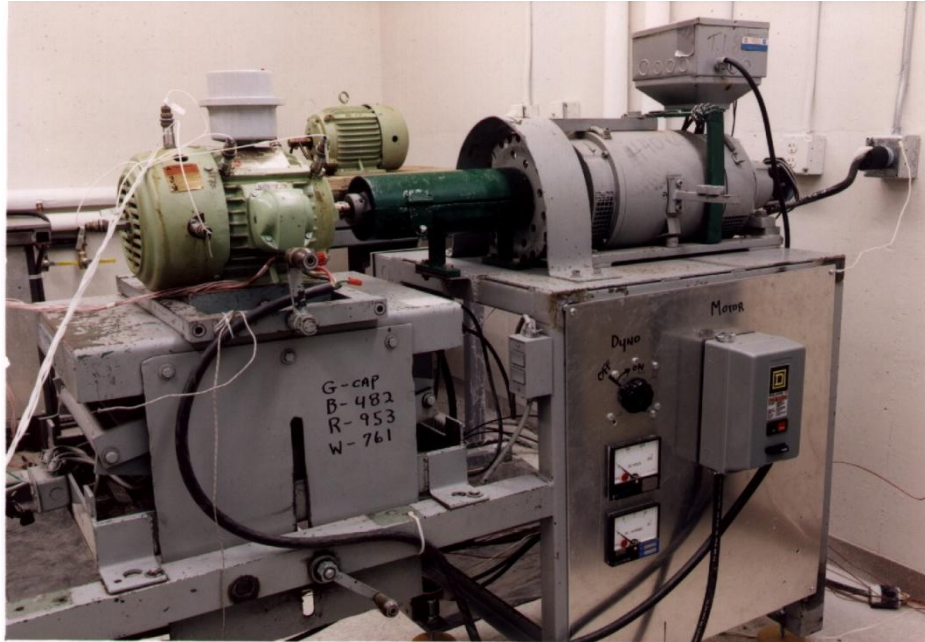


Şekil 4.1 : Mile dışarıdan gerilim ve akım uygulayarak rulmanın elektriksel olarak eskitilmesi için düzenek

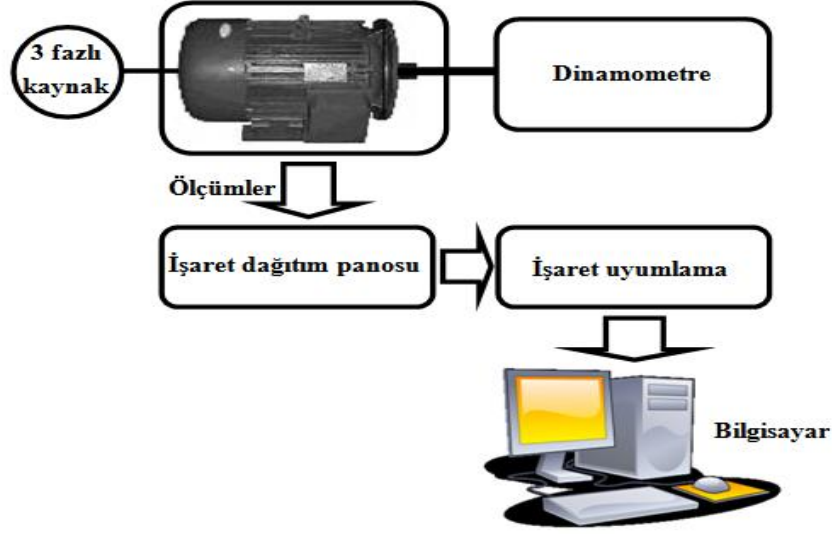
Tablo 4.1 : Test motorlarının plaka bilgisi [14]

Motor Tipi	Premium Efficiency Motor
Yapımcı	US Electrical Motors Division of Emerson electric Co. St. Louis, MO
Model Numarası	7965B
kW	3.7
Motor hızı (min ⁻¹)	1750
Faz	3
Volt	230 / 460
Amper	13.0 / 6.5
Hertz	60
NEMA Tasarımı	B
Yalıtım Sınıfı	F
Maksimum Ortam Sıcaklığı	40 °C
Güç Faktörü	82.5
Verim	90.2
Maksimum KVAR	1.4
Yüke Bağlı Olmayan Taraftaki Rulman Tipi	6206-2Z-J/C3
Yüke Bağlı Taraftaki Rulman Tipi	6205-2Z-J/C3

Her eskitme sürecinin sonunda test motorları, bir dinamometre ile yüklenerek Şekil 4.2'de gösterilen performans test düzeneği ile test edilmiş ve mekaniksel, elektriksel ve ısı verileri kaydedilmiştir.



Şekil 4.2 : Motor performans test düzeneğinin fotoğrafı [14]



Şekil 4.3 : Motor test düzeneği ve veri toplama sistemi

Şekil 4.3’de gösterilen veri toplama sistemi ile 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 ivme-ölçerleri kullanarak motor üzerinde 6 farklı yerdeki ivmelenmeler kaydedilmiştir. Verilerin toplanması sırasında işaret kuvvetlendirme, filtreleme ve toplama işlemleri National Instruments (NI) donanım ve yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Bütün algılayıcı çıkışları işaret dağıtım panosunda sonlandırılmıştır. İşaretler, *National Instruments* tarafından sağlanan işaret iyileştirme donanımı ile ön işlemden geçirilmiştir. Veri toplama için ± 10 V, 12 bitlik analog-dijital çevirici kullanılmıştır.

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. Bu sensörlerin motor üzerindeki yerleri aşağıda verilmiştir.

- Sargı sıcaklığı: Yüke bağlı taraf (*Process End*) saatin 4:00, 8:00 ve 12:00 konumları
- Sargı sıcaklığı: Yüke bağlı olmayan taraf (*Short end*) saatin 2:00, 6:00 ve 10:00 konumları
- Rulman yüzey sıcaklığı: Yüke bağlı taraf (*Bearing Surface Process End*)

- Rulman yüzey sıcaklığı: Yüke bağlı taraf (*Bearing Surface Short End*)

Motor faz akımlarını ve dinamometre yük akımını ölçmek için Hall etkili akım algılayıcıları kullanılmıştır. Bu deneyde kullanılan bir başka algılayıcı tipi; yüksek bant genişlikli ivme-ölçerlerdir. Bu ivme-ölçerler motor üzerine aşağıda belirtilen yerlere yerleştirilmiş ve bu ivme-ölçerin özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

- Yüke bağlı taraf (*Process End*) saatin 2:00 konumu
- Yüke bağlı taraf (*Process End*) saatin 10:00 konumu
- Yüke bağlı olmayan taraf (*Short End*) dikey
- Yüke bağlı olmayan taraf (*Short End*) yatay
- Yüke bağlı olmayan taraf (*Short End*) eksenel
- Gövde (*Cover box*)

Tablo 4.2 : Yüksek bant genişlikli ivme-ölçerlerin özellikleri [14]

Algılayıcı Tipi	High Frequency Industrial Accelerometer
Yapımcı	Industrial Monitoring Instrumentation
Model #	323B01
Duyarlık	100 mV/g \pm %5
Ölçme Aralığı	\pm 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	\geq 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

4.2 Veri Analiz Yöntemleri

4.2.1 İstatistiksel analiz

Genel anlamda göz önüne 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) dir [14, 18].

Ortalama değer, işaretin genliklerinin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanıp aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

Benzer şekilde, standart sapma da

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (4.2)$$

biçimindedir. $\{x_i\}$ dizisinin dağılımının simetrik durumdan sapmasının ölçüsünü veren çarpıklık (skewness) ise

$$c = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (4.3)$$

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

$$k = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (4.4)$$

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

4.2.2 Spektral analiz

Hata teşhisinde sıkça kullanılan diğer önemli bir teknik frekans izleme tekniğidir. Bu yolla büyük genlikli baskın frekanslar belirlenerek makinenin durumu hakkında bilgi elde edilebilir. Rulman arızaları, rulmanın geometrisi ve mil dönme devrine bağlı olan formüllerle hesaplanan arıza frekansları ile ölçüm sonucu elde edilen titreşim frekanslarının karşılaştırılması ile belirlenir. Hangi elemanda bir arıza oluşmuşsa titreşim frekanslarında bu elemanın arıza frekansları, bunun katları, bazı durumlarda mil dönme devri ile oluşturduğu yan bant frekansları bulunur. Spektral analiz yardımıyla arıza öncesi ve sonrası durumların karşılaştırılması ve hata teşhisi daha kolay yapılabilir.

Teknik olarak frekans birimi [Hz] = 1/saniye olmasına rağmen, Makine arızaları analizinde birimin [CPM] = 1/dakika olarak kullanımı tercih edilmektedir. Bunun nedeni, makine dönüş hızlarının [RPM] = min^{-1} , olarak anılmasıdır. Frekans birimi olarak "CPM" kullanımı, makine devrinin bilinmesi ile arıza nedenine daha hızlı erişim sağlamaktadır [7, 15].

Tek bir bileşenden meydana gelen hareket tek frekansta oluşur. Titreşim sinyalleri genellikle çok sayıda frekanslardaki titreşimlerin eş zamanlı olarak oluşmasından meydana gelmiştir. Bu yüzden de sadece basit bir bakışla derhal titreşimin kaç tane bileşeni olduğu ve bu bileşenlerin hangi frekanslarda olduğu söylenemez. Bu bileşenlerine ayırma işlemi Fourier yöntemleri kullanılarak yapılır.

Fourier Serisi; periyodik bir sinyali meydana getiren, basit harmonik sinyallerin oluşturduğu seridir. Bir periyodik fonksiyonun kendini oluşturan harmonik fonksiyonlarına ayırma metoduna Fourier Dönüşümü denir. Bu çevirim sonucu belirlenen harmonik sinyallerin, Frekans eksenine dizildiği grafiğe Spektrum grafiği denir. Fourier yöntemleri kullanılarak elde edilmiş spektrum grafiklerini analiz ederek makine arızalarını bulma işlemine Fourier analizi veya spektral analiz denir.

Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) zaman aralığında verilen bir sinyali frekans aralığına dönüştürmek için kullanılan matematiksel yöntemdir. Frekans aralığı, zaman aralığının içerdiği bilginin tamamen aynısını içerir, sadece farklı bir

gösterimdir. Zaman aralığında verilen bir sinyalin frekans aralığını hesaplama sürecine analiz, parçalama veya DFT denir. Eğer sinyal frekans aralığında verilmiş ise, bunun zaman aralığını hesaplama sürecine sentez veya ters (inverse DFT) denir.

Dönüşüm bağıntıları aşağıdaki gibidir. Burada $x(nT)$ ayrık zamanlı işaret, $X(mF)$ ayrık frekanslı dönüşüm fonksiyonu, N dizi uzunluğu, $m, n=0 \dots N-1$, T örnekleme zaman aralığı (zaman çözünürlüğü), F frekans çözünürlüğü olmak üzere;

Ayrık Fourier Dönüşümü;

$$X(mF) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j(nm2\pi FT)}$$

Ters Ayrık Fourier Dönüşümü;

$$x(nT) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(mF) e^{j(nm2\pi FT)}$$

eşitlikleri ile verilir. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ise DFT'nin hızlı hesaplanmasını sağlayan bir algoritmadır.

4.3 Veri Analizi ve Arıza Özelliğinin Belirlenmesi

Tezde kullanılan veriler The University of Tennessee, Knoxville, USA, Maintenance and Reliability Center (MRC)'da hazırlanan akıllı motor izleme sisteminden alınmıştır [19]. Hızlandırılmış eskime süreçleri uygulanarak üç asenkron motor (Motor #6, 7 ve 8), çeşitli termal ve kimyasal etkiler altında laboratuvar ortamında yaşlandırılmıştır. Bu eskitme süreci Bölüm 4.1'de detaylı olarak verilmiş olup bu arıza Mod-I olarak tanımlanmıştır. Ayrıca farklı üç motor (Motor #11, 12 ve 13) için bu etkilerin yanı sıra her eskime sürecinden sonra motor miline dışarıdan akım ve gerilim vermek suretiyle mil akımı ve geriliminin oluşması sağlanmış ve bu akımın rulmanlar üzerinden geçmesi nedeniyle rulmanda meydana getireceği bozulmalar yapay olarak oluşturulmuştur [21, 22]. Bu eskitme süreci de Bölüm 4.1'de detaylı olarak verilmiş olup bu arıza Mod-II olarak tanımlanmıştır. Her eskime sürecinden sonra bir dinamometreye bağlı olan bu motorlardan çeşitli algılayıcılar yardımıyla titreşim, akım, gerilim, sıcaklık, hız, moment gibi veriler bir veri toplama sistemine ve oradan da analiz için kişisel bilgisayara aktarılmıştır. Bu yolla motor performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen yapay eskitme süreçlerine, motor çalışamaz

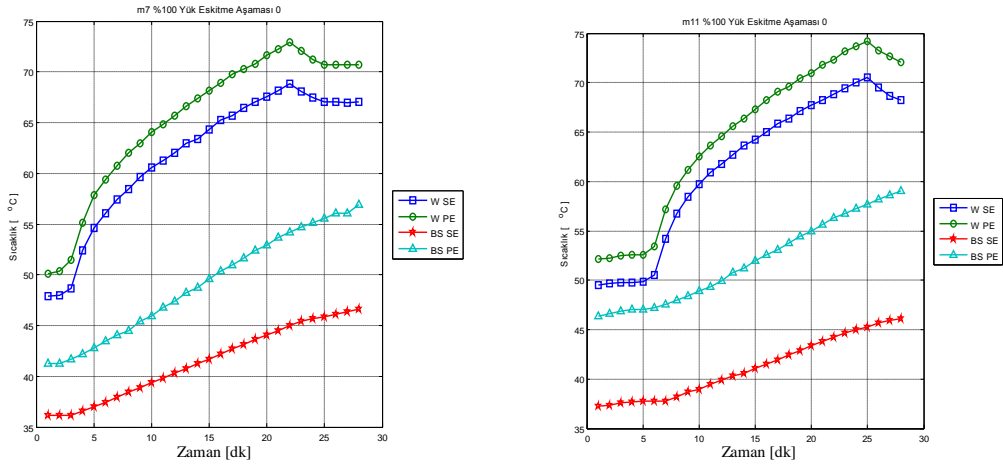
duruma gelinceye kadar devam edilmiştir. Eskitme süreçleri sonrasında altı adet motor da yedinci yapay eskitme süreci sonunda tamamen arızalanmıştır.

Mod-I ve Mod-II için hızlandırılmış eskime süreçlerine tabi tutularak yaşlandırılan dört adet asenkron motorun, %100 yük durumu için yapılan performans testleri sırasında kaydedilen sıcaklık, akım ve titreşim verilerinin istatistiksel ve spektral analizleri yoluyla durum izleme ve arıza tanısı bu bölümde incelenecektir.

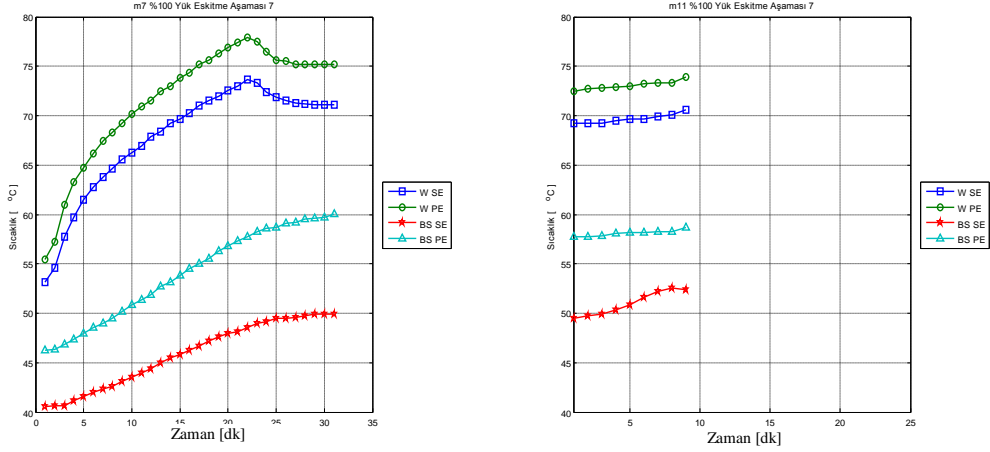
4.3.1 Sıcaklık verilerinin analizi

Bu analizde termal ve kimyasal eskitmeye tabi tutulmuş Motor #7 (Mod-I) ve ek olarak elektriksel eskitmeye de maruz bırakılmış Motor #11 (Mod-II)'in yedi eskitme süreci sonunda, performans testlerinden elde edilen sıcaklık verileri kullanılmıştır. Sıcaklık verileri dakikalık olarak ölçülmüş fakat her süreç sonunda eşit sayıda veri toplanamamıştır.

Şekil 4.4'de sağlam durum için ve Şekil 4.5 de bozuk durum için Motor #7 ve 11'in zamana göre sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.4 : Sağlam durumda Motor #7 ve 11'in zamana göre sıcaklık değişimi

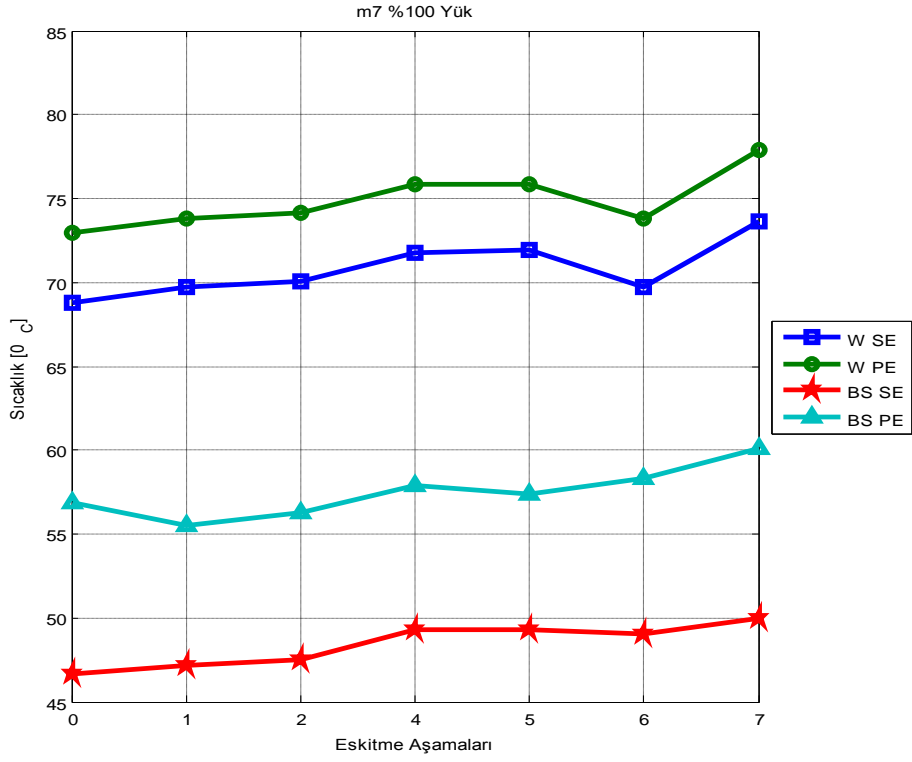


Şekil 4.5 : Bozuk durumda Motor #7 ve 11'in zamana göre sıcaklık değişimi

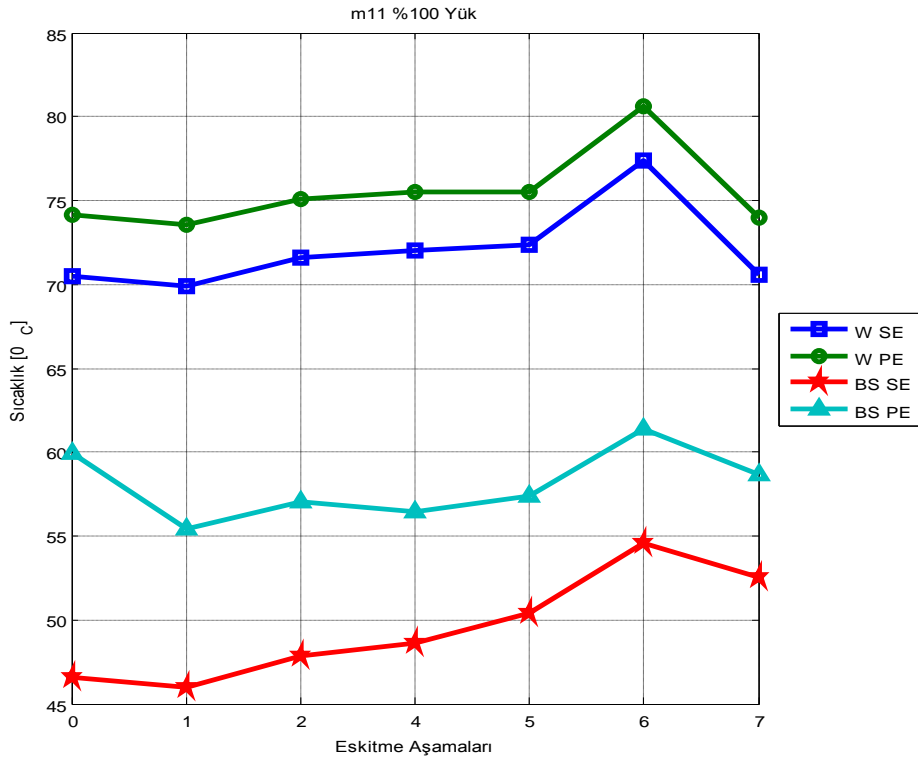
Sıcaklık verilerinin analizinde;

- Motorun yüke bağlı olduğu taraftaki sargıların saatin 4:00, 8:00 ve 12:00 konumunda bulunan sıcaklık algılayıcılarının kayıt süresi boyunca ölçtükleri sıcaklığın maksimum değeri, (WPE)
- Motorun yüke bağlı olmadığı taraftaki sargıların saatin 2:00, 6:00 ve 10:00 konumunda bulunan sıcaklık algılayıcılarının kayıt süresi boyunca ölçtükleri sıcaklığın maksimum değeri, (WSE)
- Motorun yüke bağlı olduğu taraftaki rulmanın yüzeyinde bulunan sıcaklık algılayıcının kayıt süresi boyunca ölçtüğü sıcaklığın maksimum değeri, (BSPE)
- Motorun yüke bağlı olmadığı taraftaki rulmanın yüzeyinde bulunan sıcaklık algılayıcının kayıt süresi boyunca ölçtüğü sıcaklığın maksimum değeri (BSSE) kullanılmıştır.

Şekil 4.6'da motor #7'nin ve Şekil 4.7'de motor #11'in eskitme aşamalarına göre sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.6 : Motor #7'nin eskitme aşamalarına göre sıcaklık değişimi



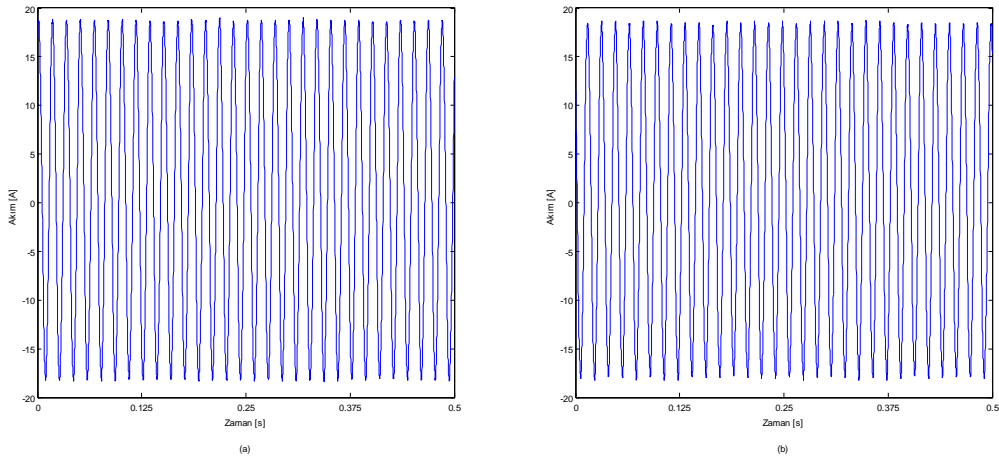
Şekil 4.7 : Motor #11'in eskitme aşamalarına göre sıcaklık değişimi

Şekil 4.7'den görüldüğü üzere; eskitme aşamalarındaki artışla birlikte iki motordaki tüm sıcaklık değerleri artış göstermektedir. Sargı sıcaklıkları rulman sıcaklıklarından daima yüksek değerlidir. Bunun yanında sargı sıcaklık ve rulman sıcaklık artış eğilimleri benzer özellik göstermektedir. Termal ve kimyasal eskitmeye (Mod-I) maruz kalan Motor #7'den farklı olarak elektriksel bozulmaya da (Mod-II) maruz kalan Motor #11'in sıcaklık değerleri çok farklı bir değişim göstermemektedir.

Tüm sıcaklık değişimi eğilimine bakıldığında ilk ve son eskitme aşaması sonunda en fazla 5°C'lik artış olduğu görülmektedir. Bu sıcaklık artışı arıza oluşumu hakkında bilgi verse de kesin sonuca götürmekte yetersiz kalmaktadır. Sıcaklık artışının sargı izolasyonunu etkilediği bilinmekle birlikte, rulman arızası sonucu ortaya çıkan sıcaklık artış değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.

4.3.2 Akım verilerinin analizi

Bu analizde termal ve kimyasal eskitmeye (Mod-I) tabi tutulmuş Motor #7 ve ek olarak elektriksel eskitmeye de (Mod-II) maruz bırakılmış Motor #11'in yedi eskitme süreci sonunda, performans testlerinden elde edilen bir faz akım verileri kullanılmıştır. Akım verileri 10 s boyunca saniyede 12000 nokta (12 kHz örnekleme frekansı) olarak ölçülmüştür. Bu analizde motorun bir fazına ait akım değerinin anlık değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.8 : Motor #7'nin (a) sağlam ve (b) bozuk durumu için bir faz akım işareti gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Motor #7'nin (a) sağlam ve (b) bozuk durumu için bir faz akım işareti

Sağlam ve bozuk durum için Şekil 4.8'de verilen akım dalga şekilleri arasında arıza durumunu belirten bir farklılık görülmemektedir. Bu nedenle akım işaretlerinin

spektral analizi yapılarak denklem (3.12) ile hesaplanan karakteristik rulman hata frekanslarının varlığı araştırılacaktır.

Motor hızını $f_r = 1742 \text{ min}^{-1}$ veya Hz birimiyle $f_r = 1742/60 = 29.03 \text{ Hz}$ şeklinde göz önüne alınarak ve rulmandaki bilye sayısı $n = 9$ olmak üzere, rulman bilyelerinin dış bilezik üzerindeki hatalı bir noktayı geçme frekansı;

$$f_0 = 0.4 n f_r = 0.4 \times 9 \times 29.03 = 104.5 \text{ Hz}$$

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.

SKF USA Inc.'nin 1000 min^{-1} hızında motor rulmanları arıza frekansları Tablo 4.3'de verilmiştir. Gerçek frekans orantı yoluyla hesaplanır.

Tablo 4.3 : Motor rulmanlarının 1000 min^{-1} 'deki arıza frekansları [14]

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

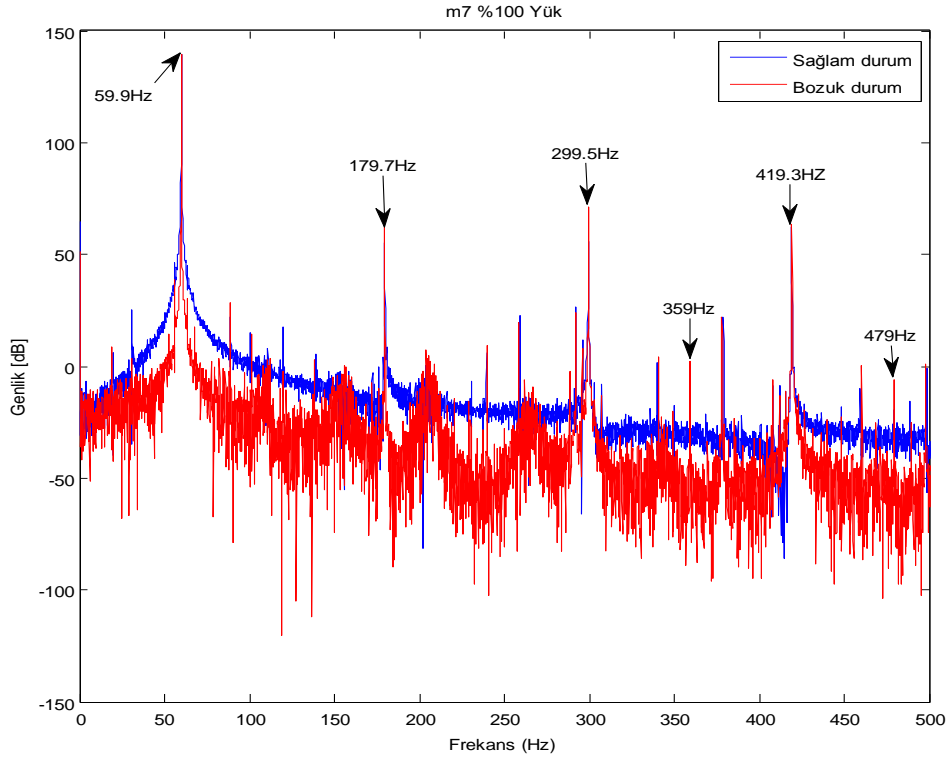
Tablo 4.3'de verilen bilye hata frekansı, 1742 min^{-1} 'lik dönme hızı için

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

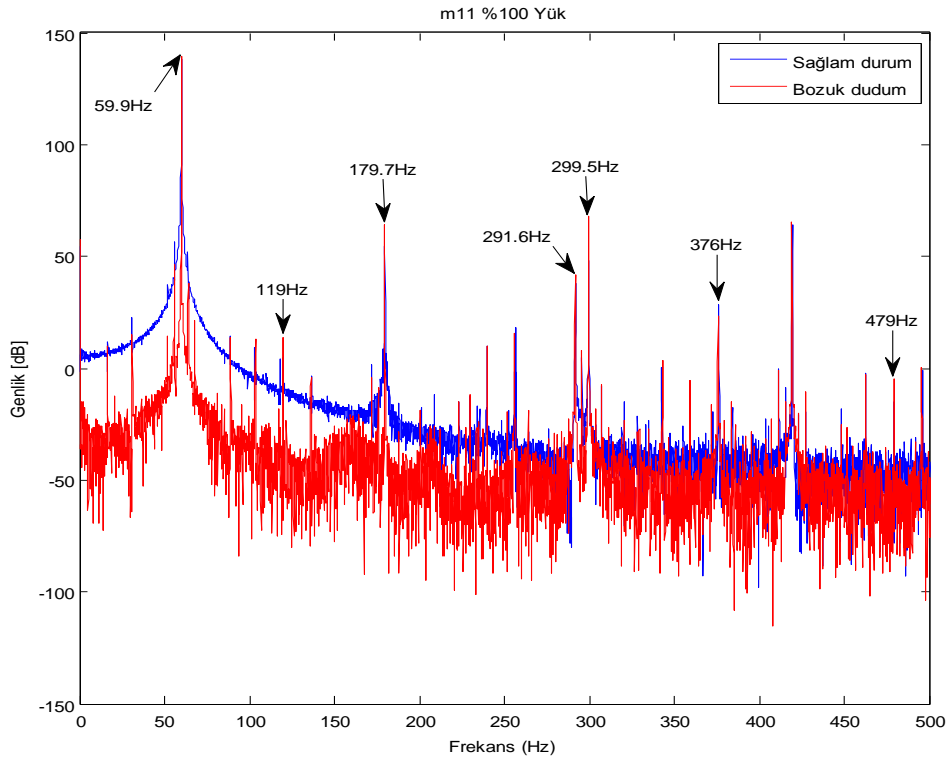
olarak bulunur. (3.12) denkleminde rulman hatası nedeniyle akımda meydana gelen bazı rulman bozukluğu frekansları $f_{vbn} = f_0$ alınarak, m' nin farklı değerleri için,

$$f_{e_{rulman}} = 60 + 4 * 104.5 = 478 \text{ Hz}, \quad f_{e_{rulman}} = |60 - 4 * 104.5| = 358 \text{ Hz},$$

olarak hesaplanır.



Şekil 4.9 : Motor #7'nin sağlam ve bozuk durumu için bir faz akımının spektrumu



Şekil 4.10 : Motor #11'in sağlam ve bozuk durumu için bir faz akımının spektrumu

4.3.3 Titreşim verilerinin analizi

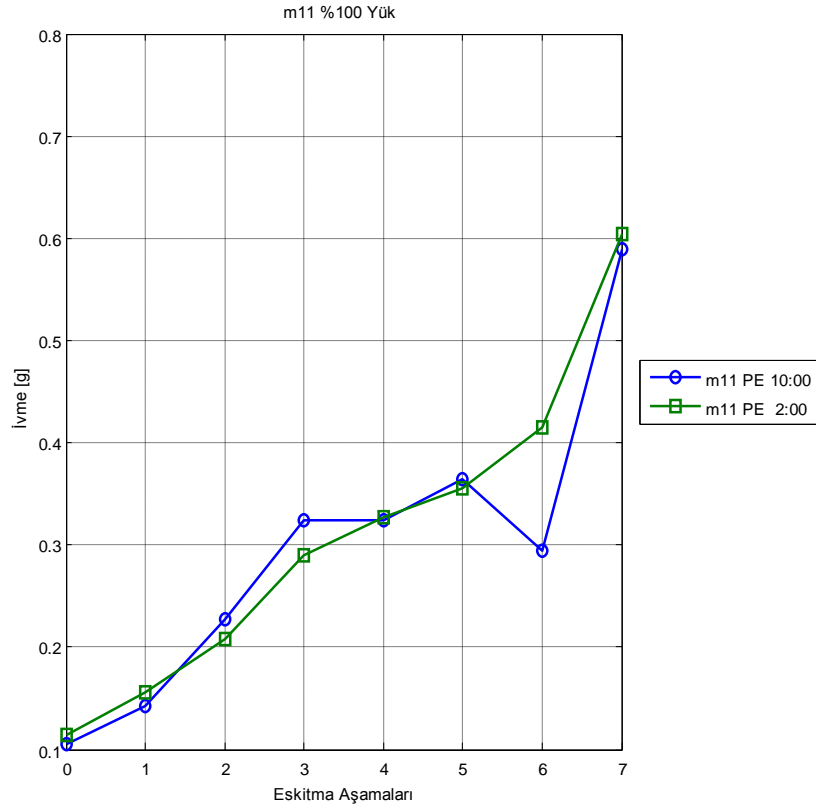
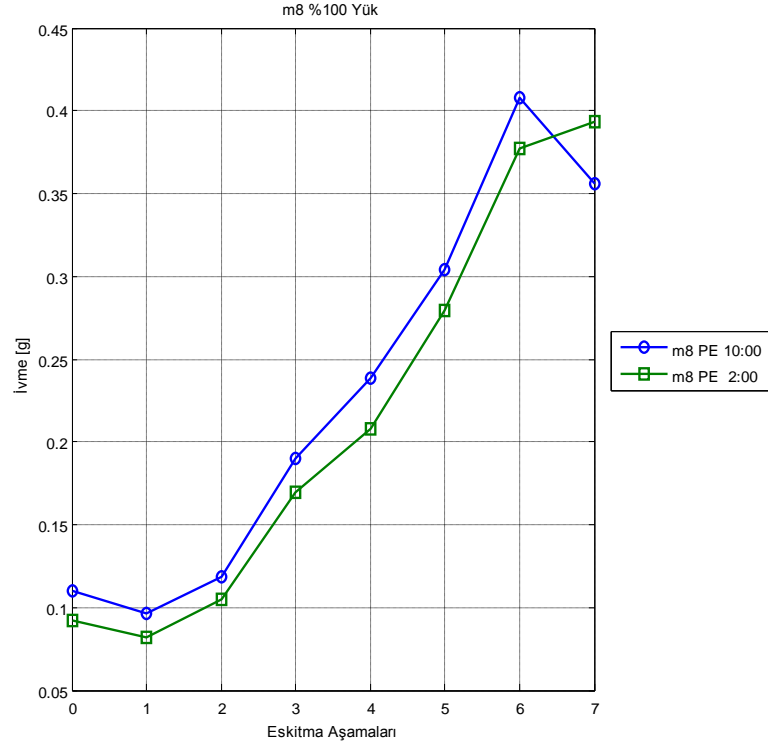
Bu analizde termal ve kimyasal eskitmeye (Mod-I) tabi tutulmuş Motor #7, Motor #8 ve ek olarak elektriksel eskitmeye de (Mod-II) maruz bırakılmış Motor #11'in yedi eskitme süreci sonunda, %100 yükteki performans testlerinden elde edilen titreşim verileri kullanılmıştır. Titreşim verileri 10 s boyunca saniyede 12000 nokta (12 kHz örnekleme frekansı) olarak ölçülmüştür. Bu analizde motorun yüke bağlı olduğu tarafta (*Process End*) saatin 2:00 (PE 2:00) ve 10:00 (PE 10:00) konumunda bulunan ivme ölçerlerin ölçümleri kullanılmıştır.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de Motor #8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşimin RMS değeri değişimi,

Tablo 4.4'de Motor #7, 8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşim verilerinin istatistiksel analizi gösterilmiştir.

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 4.4'deki gibi hesaplanmıştır. Titreşim verilerinin analizi ile rulman durumunun izlenmesinde, ivme-ölçerle ölçülen verilerin istatistiksel analizi alternatif bir metottur. Normal olarak çalışan bir rulmanda titreşim frekans bileşenleri Gauss dağılımlıdır. Rulmandaki bozulma bu dağılımın şeklini bozar. Bu metot orijinal durumu bilmeden de rulman durumunu belirlemede yardımcı olur [14].



Şekil 4.11 : Motor #8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşimin RMS değeri değişimi

Tablo 4.4 : Motor #8 ve 11'in eskitme aşamalarına göre titreşim verilerinin istatistiksel analizi

%100 yükte 8 ve 11 nolu motorların saat 2:00 konumundaki titreşim algılayıcıdan alınan 8 eskitme aşaması sonundaki verilerinin istatistiksel analiz sonuçları						%100 yükte 8 ve 11 nolu motorların saat 10:00 konumundaki titreşim algılayıcıdan alınan 8 eskitme aşaması sonundaki verilerinin istatistiksel analiz sonuçları					
motor no	eskitleme aşamaları	aritmetik ortalama	standart sapma	çarpıklık	basıklık	motor no	eskitleme aşamaları	aritmetik ortalama	standart sapma	çarpıklık	basıklık
8	0	-0,0076	0,0918	0,0612	3,2779	8	0	-0,0080	0,1098	-0,3399	4,5087
	1	0,0016	0,0817	-0,0965	3,2016		1	0,0012	0,0962	-0,1162	3,1634
	2	0,0014	0,1052	0,0224	2,8529		2	0,0011	0,1184	0,0123	2,9357
	3	0,0013	0,1695	0,0078	2,9604		3	0,0009	0,1899	0,0067	2,8554
	4	0,0012	0,2076	0,0135	3,0096		4	0,0003	0,2388	0,0178	2,7350
	5	0,0010	0,2795	0,0075	3,0626		5	0,0004	0,3038	0,0017	3,1464
	6	0,0006	0,3770	-0,0110	3,0429		6	0,0005	0,4082	0,5245	2,6296
	7	0,0002	0,3936	0,0061	3,0150		7	0,0001	0,3559	-0,0091	3,0241
11	0	0,0016	0,1135	0,0591	2,9266	11	0	0,0013	0,1054	-0,1041	3,1243
	1	0,0014	0,1553	-0,0107	3,2875		1	0,0009	0,1427	0,0045	3,2115
	2	0,0012	0,2082	0,0178	3,0367		2	0,0011	0,2270	0,0526	3,1644
	3	0,0013	0,2894	0,0162	2,9985		3	0,0007	0,3239	-0,0195	3,0952
	4	0,0009	0,3275	-0,0031	3,0409		4	0,0002	0,3243	-0,0218	3,0082
	5	0,0010	0,3548	-0,0019	2,9832		5	0,0001	0,3643	-0,0030	3,0187
	6	0,0005	0,4147	-0,0103	2,9871		6	0,0001	0,2948	0,3476	3,1215
	7	0,0030	0,6040	-0,0060	3,0093		7	0,0012	0,5894	-0,0109	3,0214

Hesaplanan bu büyüklükler yardımıyla makine durum değişikliklerinin istatistiksel parametrelerden sadece standart sapma değerindeki değişikliklere bağlı olduğu kolaylıkla görülmektedir.

Tablo 4.4'e göre Mod-I ve Mod-II arıza durumlarının bütün eskitme aşamaları için ortalama değer yaklaşık olarak sıfırdır. Titreşim verisinin tümü için hesaplanan standart sapma, termal ve kimyasal eskitmeye (Mod-I, Motor #8) bağlı rulman bozukluğu nedeniyle, son durumda ilk durumdakine göre $0.3936/0.0918= 4.28$ kat, ek olarak elektriksel eskitmeye (Mod-II, Motor #11) bağlı rulman bozukluğu nedeniyle, son durumda ilk durumdakine göre $0.6040/0.1135= 5.32$ kat artmıştır. Ayrıca, çarpıklık ve basıklık parametrelerinin Mod-I ve Mod-II arıza durumlarının bütün eskitme aşamaları için yaklaşık olarak $c = 0$ ve $k = 3$ değerlerini almasından dolayı olasılık yoğunluk fonksiyonlarının da normal dağılımlı kaldığı görülmektedir.

Şekil 4.12'de Motor #8'in, Şekil 4.13'de Motor #11 in bozuk durumları için titreşim işaretinin spektrumları gösterilmiştir. Bu şekiller karşılaştırıldığında Mod-II (Motor #11) arıza durumunda 250-500 Hz aralığında ek frekans bileşenleri ortaya çıkarken bu frekans bandındaki bazı frekansların genliğinin kuvvetlendiği de görülmektedir. Titreşim verisi spektrum analizi yapılarak karakteristik rulman hata frekanslarının

varlığını belirlemek amacıyla baskın olan frekans değerleri şekiller üzerinde ayrıca gösterilmiştir.

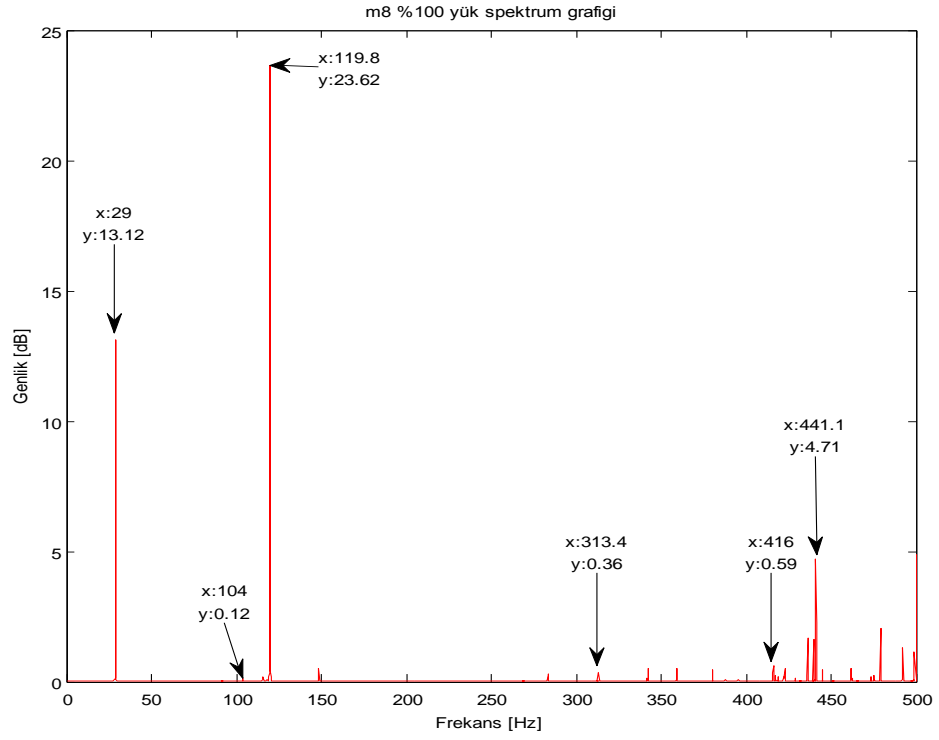
Bölüm 4.3.2’de karakteristik rulman hata frekansları $f_0 = 104.5 \text{ Hz}$, $f_i = 156.7 \text{ Hz}$, $f_b=136.9 \text{ Hz}$ olarak bulunmuştu. (3.6) denkleminde rulman hatası nedeniyle titreşimde meydana gelen rulman bozukluğu frekansı, $m = 1,3,4$ alınarak,

$$f_{o_1} = 104.5\text{Hz}, f_{o_3} = 313.5\text{Hz}, f_{o_4} = 418\text{Hz},$$

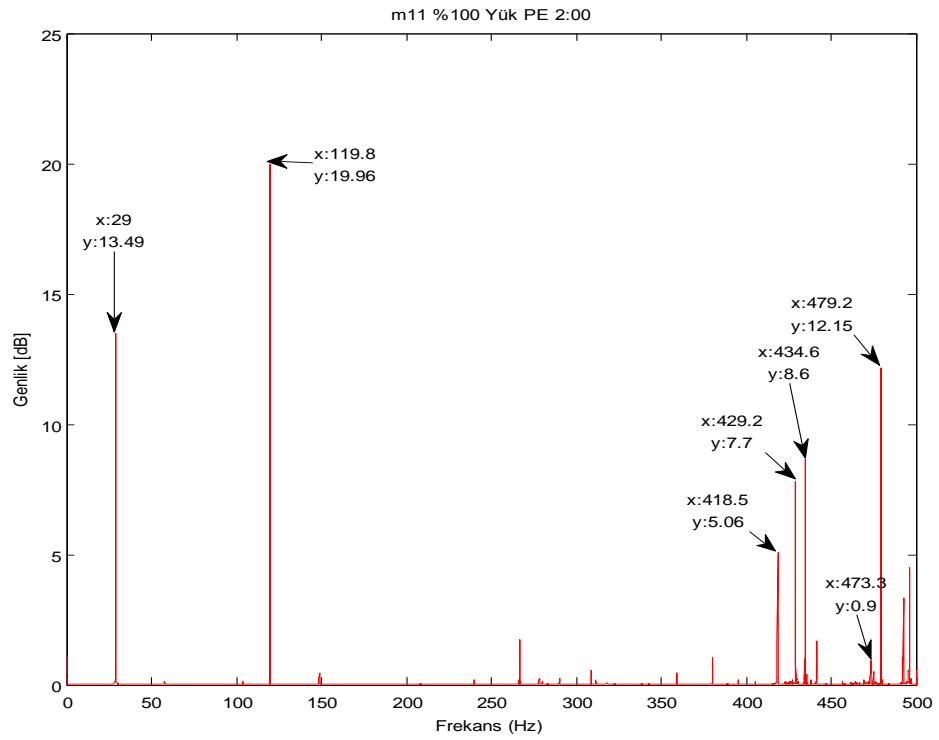
$$f_{i_3} = 470.1\text{Hz},$$

olarak hesaplanır.

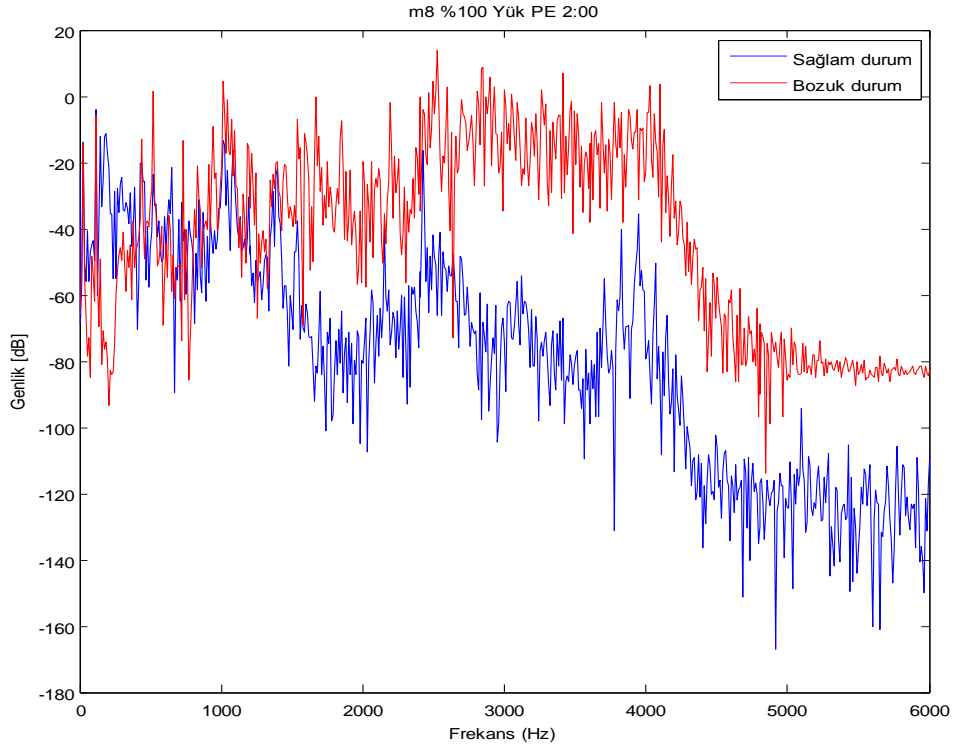
Şekil 4.14’de Motor #8’in, Şekil 4.15’de Motor #11’in sağlam ve bozuk durumları için titreşim işaretinin logaritmik ekseninde 0-6000 Hz frekans bandı için spektrumları gösterilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde her iki arıza modu için 1,5-4 kHz’lik frekans bandında işaretin enerjisinin belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu gözlem literatürle uyumlu olup rulman arızalarının karakteristik bir özelliğidir.



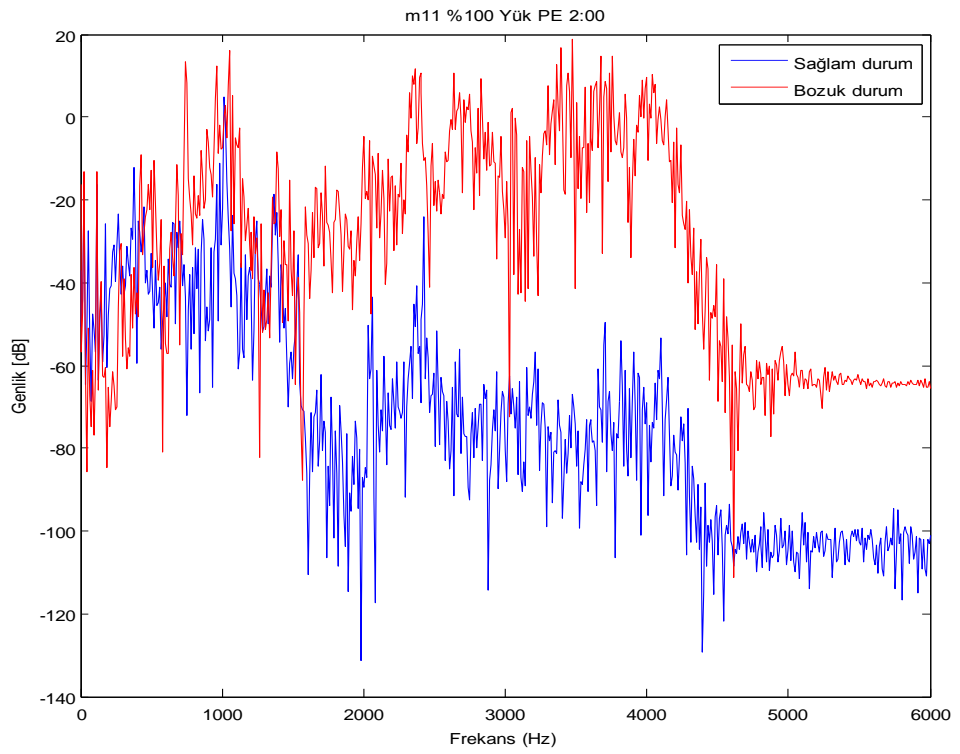
Şekil 4.12 : Motor #8 PE 2:00 için bozuk durum titreşim spektrum grafiği



Şekil 4.13 : Motor #11 PE 2:00 için bozuk durum titreşim spektrum grafiği



Şekil 4.14 : Motor#8 PE 2:00 için titreşim spektrumu (logaritmik eksen)



Şekil 4.15 : Motor#11 PE 2:00 için titreşim spektrumu (logaritmik eksen)

5 ADAPTİF AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE DURUM İZLEME

Son yıllarda motor arızalarının geleneksel yaklaşımlarla teşhisinin yanı sıra, bulanık mantık, genetik algoritma, yapay sinir ağları gibi esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak arıza tanısına yeni yaklaşımlar getirilmekte ve geliştirilmiş çözümler sunulmaktadır.

Gao ile Ovaska arıza tanısında kullanılan bu esnek hesaplama yöntemleri ve kullanımları hakkında bilgi vermiş, Çalış ile Kayaalp literatürde bu yöntemler ile yapılmış olan durum izleme çalışmalarını incelenmiş ve bu çalışmaların nasıl yapıldığını şekillerle açıklayarak her çalışmanın avantajlarını ve dezavantajlarını değerlendirmişlerdir [23, 24]. Nguyen ve Lee, ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System) kullanarak titreşim ölçümü yardımıyla arıza tanısı yapmış ve Genetik Algoritma ile de en uygun üyelik sayısı ve şeklini belirlemeye çalışmışlardır [25]. Zarei ve Poshtan titreşim verisini dalgacık dönüşümü ve ANFIS kullanarak rulman arıza tanısında kullanmışlardır [26]. Ballal ve diğerleri tek fazlı asenkron motordaki yalıtım hatası ve rulman hatasının tespit edilmesi amacıyla iki tane ANFIS modeli oluşturmuşlar ve birinde akım ve hız olmak üzere iki giriş, diğerinde ek olarak sargı sıcaklığı, rulman sıcaklığı ve motor gürültüsü olmak üzere toplam beş girişli iki ANFIS modelinin başarımlarını karşılaştırmışlardır [27].

Bu bölümde esnek hesaplama yöntemlerinden olan yapay sinir ağları ve bulanık mantık yapılarının birbirlerini tamamlar şekilde birleşmelerinden oluşan ANFIS hakkında teorik bilgi verildikten sonra rulman arıza tanısı amacıyla uygulaması yapılmıştır.

5.1 ANFIS

Adaptif Ağ tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi, kısaca ANFIS, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Bulanık Çıkarım Sistemleri (BÇS) gibi esnek hesaplama yöntemlerinin birleşiminden oluşur. Bu iki yöntem, birçok disiplin tarafından tahmin, kontrol, sınıflandırma vb. gibi problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin

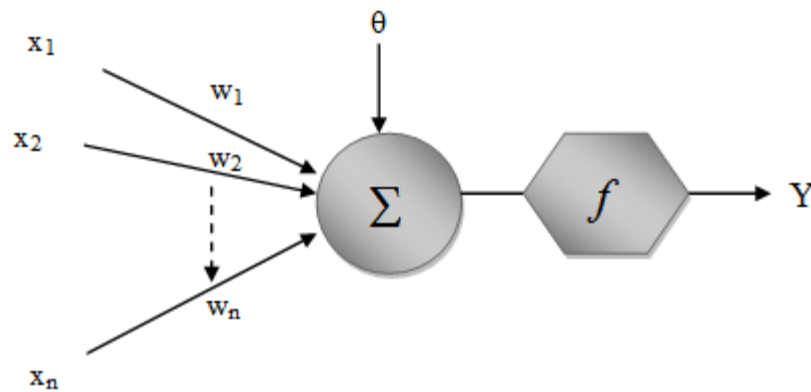
geçmişleri çok yakın olmakla beraber özellikle bilgisayar sistemleri ve hesaplama tekniklerindeki hızlı ilerlemelerle kullanımları artan bir gelişme göstermiştir [28].

BÇS ve YSA, akıllı sistemlerin geliştirilmesinde birlikte kullanılan tamamlayıcı araçlardır. YSA, ham verilerle uğraşıldığında iyi sonuçlar veren düşük seviyeli yapılardır. BÇS ise, uzman görüşü sonucu elde edilen dilsel bilgileri kullanarak daha yüksek seviyeli sonuçlar çıkarmaktadır. Aslında BÇS'lerinin öğrenme kabiliyeti yoktur ve kendilerini yeni çevreye adapte edemezler. Diğer yandan YSA'lar öğrenme kabiliyetine sahiptir; fakat kullanıcı tarafından anlaşılmazlar [29]. Bu iki yöntemin birbirlerinin eksiklerini tamamlayıcı yönde birleşiminden sinirsel bulanık sistemler oluşmuştur. Bu anlamda sinirsel bulanık sistemler, yapay sinir ağlarının paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuçlar çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuç olarak sinirsel bulanık sistemler sayesinde yapay sinir ağları daha anlaşılır hale gelir [29].

Sinirsel bulanık sistemlerin ve dolayısıyla ANFIS'in daha iyi anlaşılabilmesi için YSA ve BÇS'lerinin yapısal özellikleri ve çalışma prensiplerine kısaca değinilecektir.

5.1.1 Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları, insan beyni ve sinir sisteminin davranışını temel alarak; öğrenme, hafızaya alma ve doğrusal olmayan, karmaşık problemleri çözümüleme yetilerine sahip olan nümerik modelleme teknikleridir [30]. Beyin, sinir olarak adlandırılan ve birbirleri ile sinaptik bağlarla bağlanmış basit işlemci elemanlardan oluşur. YSA'larda beyindeki bu yapı, yapay olarak tanımlanmış sinirler arasındaki söz konusu bağlantıların ağırlıklandırılması ile simüle edilmiştir [28].



Şekil 5.1 : Basit sinir (nöron) modeli

Şekil 5.1 de görülen örnek bir sinir (nöron) için, girişlerin (x_j) her birini uygun ağırlık katsayıları (w_{ij}) ile çarpılarak bulunan ağırlıklandırılmış girişler toplanır ve bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek, sinir çıkışı (Y_j) elde edilir.

$$Y_j = f \left(\sum_{i=1}^n x_j \cdot w_{ij} + \theta_j \right)$$

Burada, x_j ; giriş değeri, w_{ij} ; ağırlık katsayısı, θ_j ; sapma, Y_j ; sinir çıkışı, f ; aktivasyon fonksiyonudur. Bu çıkış, ağırlık yapısına göre, giriş olarak başka bir işlem elemanına veya bir dış bağlantıya gönderilir. Genellikle kullanılan transfer fonksiyonları eşik, sigmoid, hiperbolik tanjant vb. fonksiyonlardır.

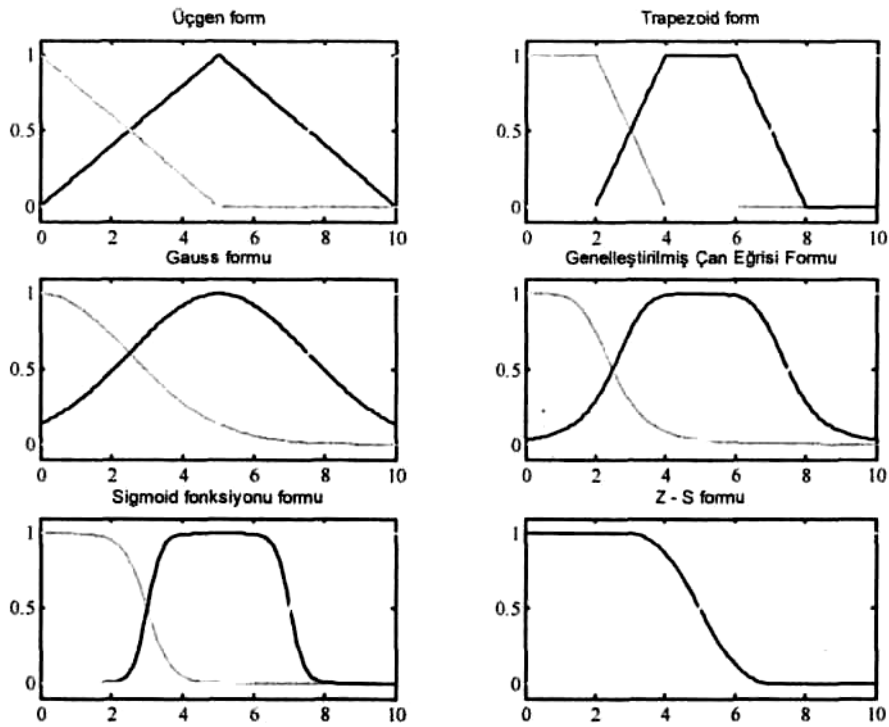
Öğrenme; eğitime yoluyla giriş-çıkış verilerinin işlenmesi sonucu gerçekleşir. Yapay sinir ağları öğrenme biçimine göre “yönlendirmeli (supervised)” ve “yönlendirmesiz (unsupervised)” olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Yönlendirmeli eğitimde hem giriş hem de çıkış verileri kullanılır. Öncelikle, ağ rasgele belirlenen başlangıç ağırlıklarını kullanarak girişleri işler ve çıkışı hedef çıkış ile karşılaştırır. Elde edilen hatalar, sistem içinde geriye gönderilir ve bu hatalar kullanılarak ağı kontrol eden bağlantı ağırlıkları güncellenir. Bu işlem defalarca tekrarlanır ve ağırlık katsayıları sürekli olarak ayarlanır. Yönlendirmesiz eğitim ise dış müdahale olmaksızın, girişlerin ağ tarafından analiz edilmesi ve bu analiz sonucunda bağlantıların oluşturulmasıdır [30].

5.1.2 Bulanık mantık ve bulanık çıkarım sistemleri

BÇS’ler, genel anlamda, giriş değişkenlerinden çıkış değişkenlerine dönüşümü sağlamak amacıyla bulanık kümeleri ve bulanık mantığı kullanan sistemlerdir. Bulanık küme teorisi 1965 yılında Zadeh tarafından klasik küme teorisinin bir genelleştirilmesi olarak ortaya konulmuştur [28]. Bulanık kümelerde, klasik kümelerden farkı olarak, bir elemanın herhangi bir kümeyle ait olması konusunda verilecek yanıtın klasik kümelerdeki gibi ‘evet’ ya da ‘hayır’ gibi keskin olmayıp, bu elemanın ilgili kümeyle ait olma olasılığının 0 ile 1 arasında değerler alabilen sürekli bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesidir [31]. Örneğin klasik küme kavramında bir renk beyaz ya da siyahtır. Bulanık küme kavramında ise bir renk beyaz ve siyah arasında sonsuz griden biri olabilir. Klasik mantığa göre bir önerme doğru ya da

yanlıştır. Bulanık mantığa göre ise önerme, durumu üyelik derecesine göre belirlenen kısmi doğru veya kısmi yanlış olabilir. Bulanık mantık genel olarak, tam ve kesin olmayan bilgilere bağlı olarak tutarlı ve doğru kararlar alınmasını sağlayan düşünme ve karar verme mekanizması olarak tanımlanabilir [30]. Bulanık mantığın bir diğer önemli özelliği de sadece sayısal değil aynı zamanda sözel değişkenler ile de işlem yapılabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu da insan deneyimlerinin ve sözel verilerin modele katılmasında büyük yarar sağlamaktadır.

Bulanık modeller oluştururken değişik formlarda üyelik fonksiyonları seçilebilir. Literatürde, üyelik fonksiyonları olarak yaygın olarak üçgen, yamuk (trapezoid), gauss eğrisi, sigmoid fonksiyonu, çan eğrisi vb. kullanılmaktadır [31]. Üyelik fonksiyonunun seçimi matematiksel kurallardan çok kişisel tercihlerle yapılır. Şekil 5.2'de yaygın kullanılan bazı temel üyelik fonksiyonu tipleri verilmiştir.



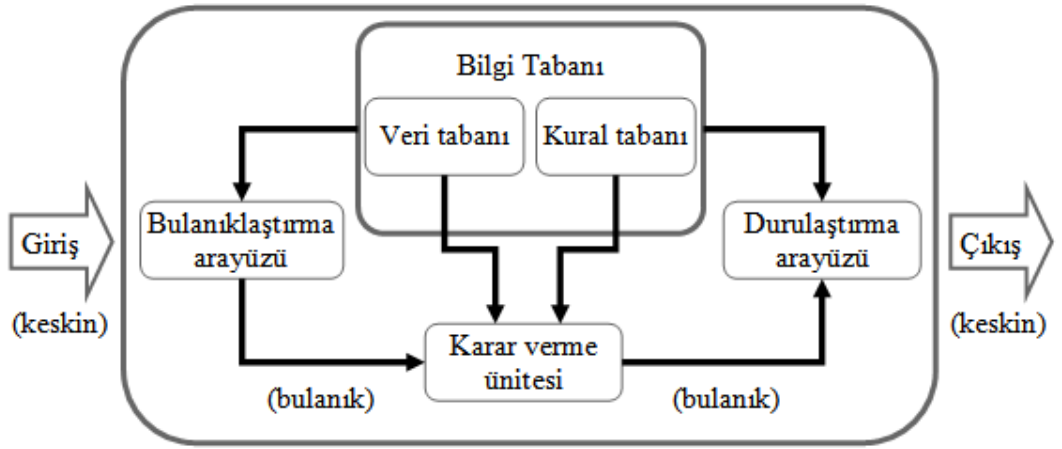
Şekil 5.2 : Temel üyelik fonksiyonu tipleri [31]

Bulanık çıkarım sistemleri, bulanık *eğer-ise* kuralları adı verilen bulanık kurallara dayanan sistemlerdir. Bu nedenle bulanık çıkarım sistemleri, bulanık kural tabanlı sistemler olarak da adlandırılır. Bulanık çıkarım sistemlerinin temeli olan bulanık *eğer-ise* kuralları, anlaşılacağı üzere öncül ve soncul kısımlardan oluşmaktadır.

Öncül kısımda sonuca sebep olan giriş değişkenleri ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler, soncul kısımda ise bu giriş değişkenlerine bağlı olarak ortaya çıkan sonuç değişken(ler)i yer alır. Genel olarak bir bulanık kural aşağıdaki formdadır:

Kural: *eğer* A ("koşul") *ise* B ("sonuç")

Burada A öncül kısımdaki giriş değişkenlerince tanımlanan koşulları, B ise soncul kısımdaki çıkış değişkenlerince tanımlanan sonuçları ifade eder. Şekil 5.3'de genel olarak bir bulanık çıkarım sisteminin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Bulanık çıkarım sistemlerinin genel yapısı

Bir bulanık çıkarım sistemi, Şekil 5.3'den görüldüğü gibi beş adet işlevsel bloktan oluşmaktadır [28, 32]. Bunlar:

1. Sayısal giriş değerlerini sözel olarak nitelendirilmiş bulanık kümelerdeki üyelik derecelerine atayan bir *bulanıklaştırma* ara yüzü:

Burada giriş değişkeninin öncül kısımdaki üyelik fonksiyonları ile karşılaştırılıp her bir sözel bulanık kümedeki üyelik değerleri elde edilir.

2. Bulanık kurallar içerisindeki bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı bir *veri tabanı*.

3. Bulanık *eğer-ise* kurallarından oluşan bir *kural tabanı*:

- Her bir kuralın *gerçeklik değerini* (*ağırlığını*) elde etmek için öncül kısımdaki üyelik değerleri (genellikle cebirsel çarpım veya minimizasyon işlemiyle) birleştirilir. Bir bulanık sistemdeki toplam kural sayısı,

problemin karmaşıklığına, girişlerin sayısına ve her bir giriş değişkeni için kullanılan bulanık küme sayısına bağlıdır. Eğer bütün giriş değişkenlerindeki bulanık kümelerin birbirleri ile olan kombinasyonları ile yazılacak bütün bulanık kurallara ihtiyaç var ise, kural sayısı aşağıdaki eşitliğe bağlı olarak üstel olarak artış gösterir:

$$\text{Kural sayısı} = M \prod_{i=1}^N n_i$$

Burada; M çıkış değişkeni sayısını, N: giriş değişkeni sayısını ve n: her bir giriş değişkeninde tanımlı olan bulanık küme sayısını göstermektedir.

4. Kurallar üzerindeki çıkarım işlemlerini yürüten bir *karar verme ünitesi* (implikasyon):
 - Ağırlıklarına bağlı olarak her bir kuralın soncul kısmı (bulanık ya da keskin değer olabilir) belirlenir.
5. Bulanık işlemler sonucu elde edilen bulanık çıkarım sonuçlarını keskin sayısal çıkış değerlerine dönüştüren bir *durulaştırma* ara yüzü:
 - Bütün kuralların soncul bölümleri birleştirilerek sistem çıkışı için tek bir keskin sayısal değer belirlenir [28, 32]. Durulaştırma işlemi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler; en büyük üyelik ilkesi, sentroid yöntemi, ağırlıklı ortalama yöntemi, ortalama en büyük üyelik, toplamların merkezi, en büyük alanın merkezi ve en büyük ilk veya son üyelik derecesi olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağına, problemin türüne bağlı olarak karar verilmektedir [30, 32].

5.1.2.1 Bulanık çıkarım sistem modelleri

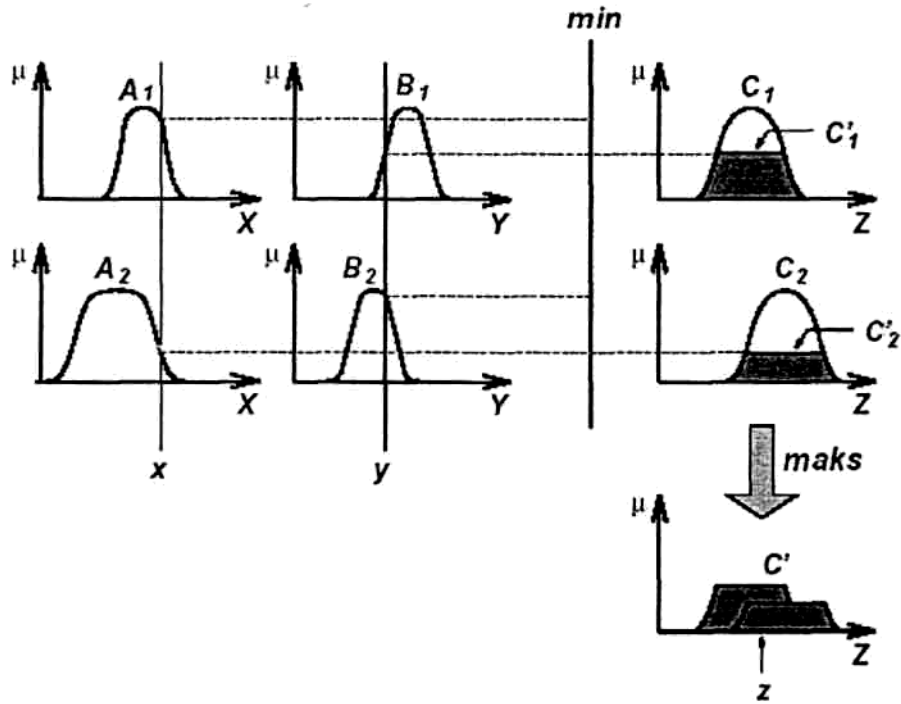
BÇS'nin gelişimi, bulanık küme ve bulanık mantık teorisini izlemiştir. Daha sonra geliştiren kişinin adı ile anılan, Mamdani, Tsukamoto, Takagi-Sugeno (ya da basitçe Sugeno) tipi BÇS gibi çok sayıda değişik BÇS modelleri geliştirilmiştir. Bu BÇS'ler arasındaki temel farklılık, soncul kısımdaki bulanık kümelerin türleri ve çıkarımın çıktısı olarak keskin sayısal değerler üretmek için yine soncul kısımda yapılan bulanık birleşim işlemlerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu değişik BÇS'ler arasında Sugeno tipi kontrollü öğrenmeye yatkınlığından dolayı avantajlıdır.

Esas olarak soncul kısımdaki farklılıklar nedeniyle birbirinden ayrılan üç BÇS modelinin yapısı aşağıda anlatılmıştır.

a) *Mamdani Tipi Bulanık Çıkarım Sistemleri*: Bulanık modellemenin en temel yöntemidir. İlk defa bir buhar motorunun insan tecrübelerinden elde edilen sözel kontrol kuralları yardımıyla kontrolü amacıyla kullanılmıştır [28]. Bu modelde hem giriş değişkenleri hem de çıkış değişkeni kapalı formdaki üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Şekil 5.4'de x ve y gibi sayısal iki değişkeni içeren iki-kurallı bir Mamdani tipi bulanık çıkarım sisteminde z çıkış değerinin c_i bulanık küme fonksiyonlarından nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

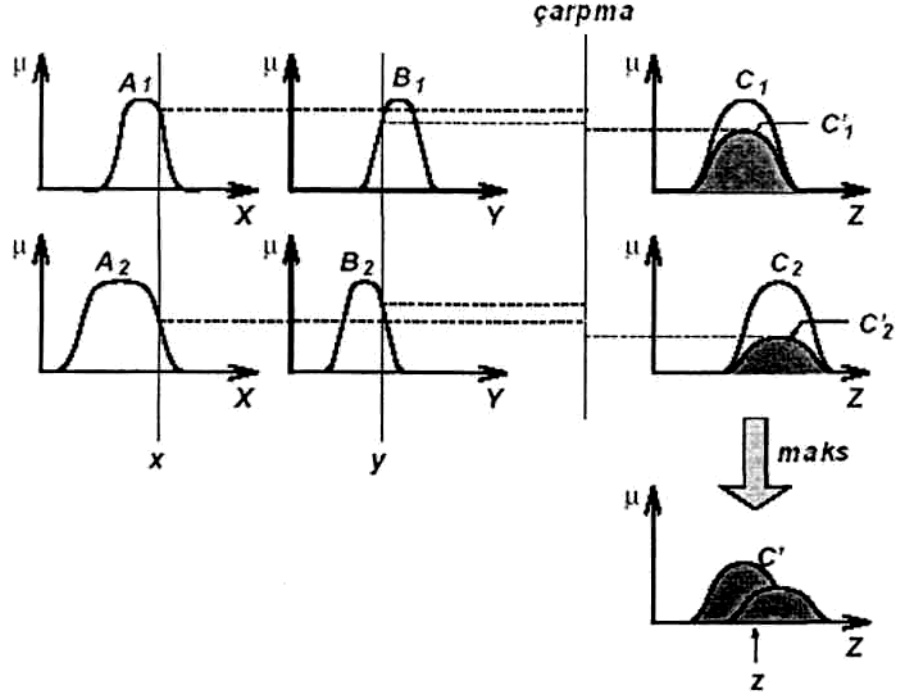
Kural 1: *eğer $x \in A_1$ VE $y \in B_1$ ise $z \in C_1$*

Kural 2: *eğer $x \in A_2$ VE $y \in B_2$ ise $z \in C_2$*



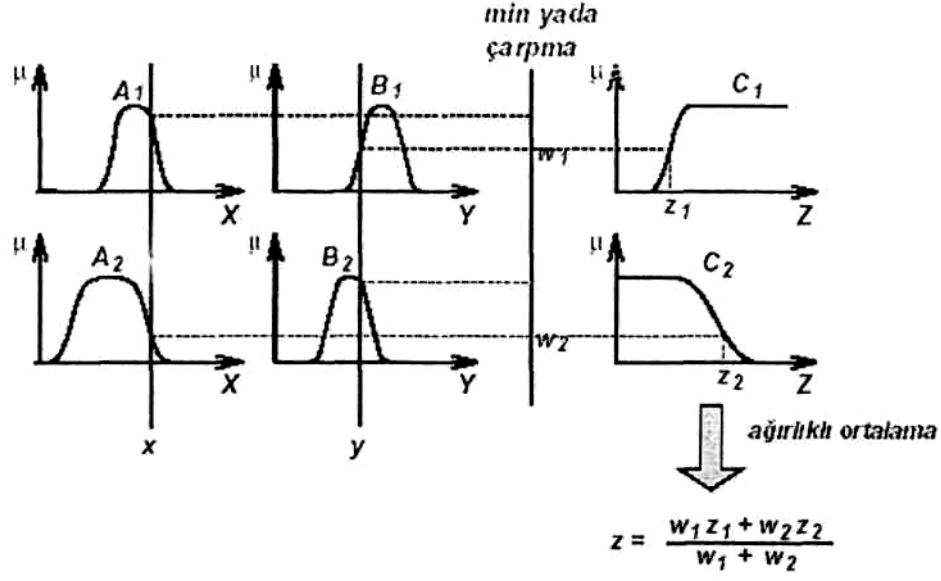
Şekil 5.4 : Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla minimizasyon ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi [28]

Eğer bulanık "VE" ve "VEYA" işlemleri için çarpma ve maksimizasyon operatörleri seçilirse Şekil 5.5'de gösterilen bulanık çıkarım sonucu elde edilir.



Şekil 5.5 : Bulanık VE ve VEYA işlemleri için sırasıyla çarpma ve maksimizasyon operatörlerini kullanan Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi [28]

b) *Tsukamoto Tipi Bulanık Çıkarım Sistemleri:* Şekil 5.6'da gösterildiği gibi her bir bulanık kuralın soncul kısmı monoton üyelik fonksiyonları ile ifade edilir [28, 32]. Bunun sonucu olarak her bir kuralın soncul kısmı öncül kısmının "gerçeklik değeri" ile ağırlıklandırılır. Sistem çıkışı olan keskin sayısal değer de bu kuralların ağırlıklı ortalamaları alınarak hesaplanır. Tsukamoto tipi bulanık çıkarım sistemlerinde her bir kural doğrudan doğruya soncul kısımda keskin sayısal bir değerle sonuçlandırıldığından bu sonuçlardan tek bir çıkış değeri elde etmek için ağırlıklı ortalamaları alınır. Böylelikle durulaştırma işlemi açısından da zaman kazanılmış olur.

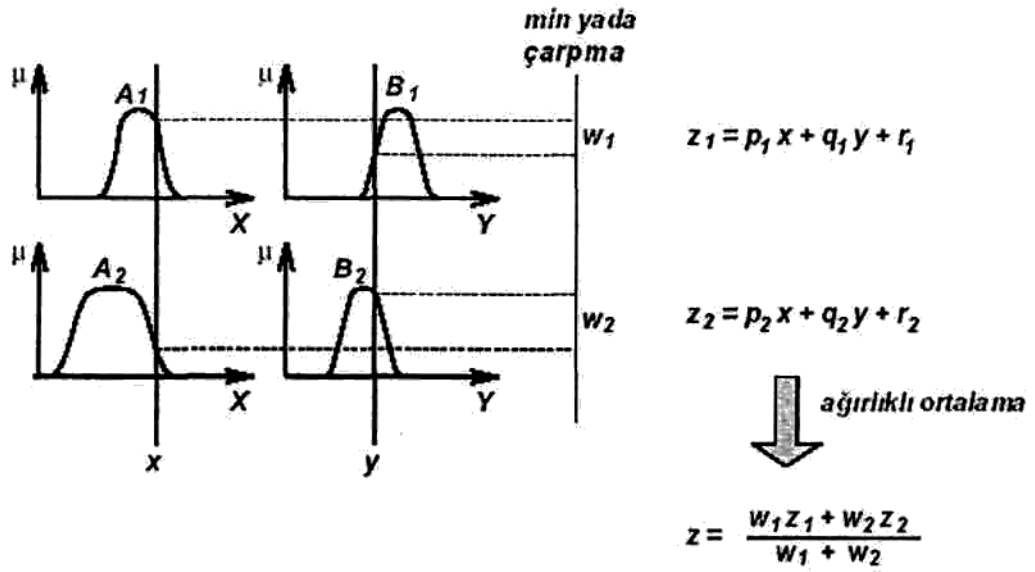


Şekil 5.6 : Tsukamoto tipi bulanık çıkarım sistemi [28]

c) Takagi-Sugeno Tipi Bulanık Çıkarım Sistemi: Aynı zamanda TSK-Takagi-Sugeno-Kang modeli ya da Sugeno modeli olarak da bilinir. Bu sistem verilen bir giriş-çıkış veri kümesinden faydalanılarak bulanık kurallar üretilmesi için sistematik bir yöntem bulunması çabaları sonucu Takagi, Sugeno ve Kang tarafından önerilmiştir [28, 32]. Sugeno tipi bulanık modelde tipik bir bulanık kuralın yapısı aşağıdaki gibidir:

$$\text{eğer } x \in A \text{ VE } y \in B_1 \text{ ise } z = f(x, y)$$

Bu eşitlikte A ve B öncül kısımdaki bulanık kümeler, $z=f(x,y)$ ise soncul kısımdaki keskin bir matematiksel fonksiyondur. $f(x,y)$, genellikle x ve y giriş değişkenlerine bağlı bir polinom fonksiyonudur. Soncul kısımdaki $f(x,y)$ fonksiyonunun birinci derece bir polinom olarak seçilmesi durumunda elde edilen bulanık çıkarım sistemine *Birinci Derece Sugeno Tipi Bulanık Çıkarım Sistemi* adı verilir. f 'nin sabit bir fonksiyon olması durumunda ise bulanık çıkarım sistemi *Sıfırıncı Derece Sugeno Tipi Bulanık Çıkarım Sistemi* adını alır. Şekil 5.7'de Sugeno tipi bulanık çıkarım sisteminin çıkarım mekanizması verilmiştir.

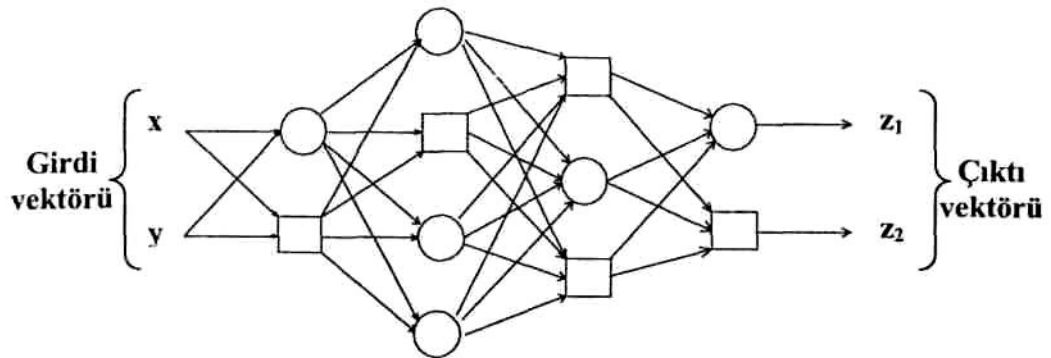


Şekil 5.7 : Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi [28]

Burada ağırlıklı ortalama yönteminin durulaştırma ara yüzünün yerini aldığı görülmektedir. Böylelikle hesaplama süresinden kazanılmış olunur.

5.1.3 ANFIS

ANFIS, Şekil 5.8’de gösterildiği üzere bulanık sistem yapısının, YSA’ların topolojik yapısı olan adaptif ağ yapısı ile birleştirilerek model parametrelerinin optimize edildiği bulanık çıkarım sistemidir.



Şekil 5.8 : Adaptif Ağ yapısı örneği [28]

Bir adaptif ağ, kontrollü öğrenme yeteneğine sahip olan bütün İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı (İBYSA) türlerinin bir üst kümesidir. Düğümlerden ve bu düğümler

arasındaki yönlendirilmiş bağlantılardan oluşan bir ağ yapısına sahiptir. Bu düğümlerin tamamı ya da belli bir bölümü adaptif yani parametrik olabilir. Parametrik sözü ile kastedilen, söz konusu düğümlerin çıkış değerlerinin belirli parametrelere bağlı olmasıdır ve öğrenme algoritmasının amacı da bu parametrelerin optimize edilmesidir. Şekil 5.8'deki kare ve daire gösterimleri sırasıyla parametrik ve parametrik olmayan düğümleri karakterize etmektedir [28, 32].

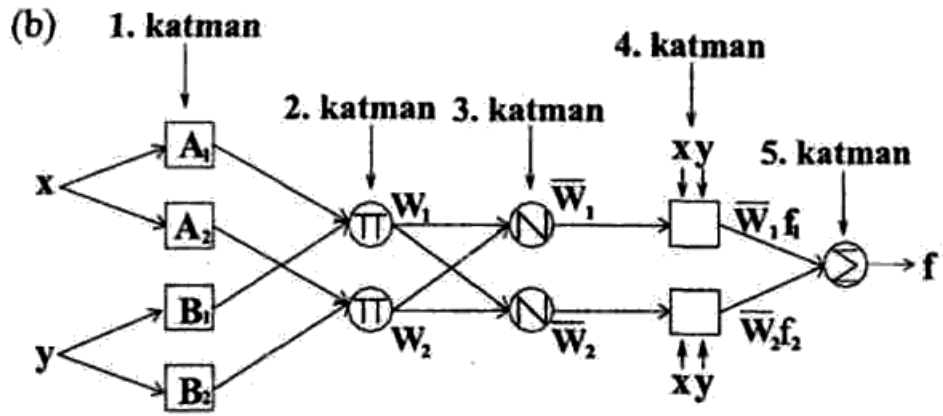
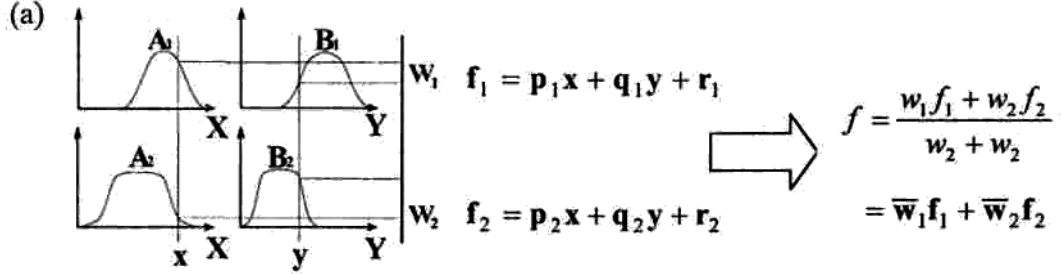
Klasik eğitimsiz bulanık çıkarım sistemleriyle problemlere sadece yaklaşık çözümler getirilebilmektedir. Bunun nedeni, uzman deneyimleri ile ortaya konan üyelik derecelerinin kişiye bağlı olarak ve sadece yaklaşık değerler olması ve böylece giriş-çıkış ilişkisini yeterli doğrulukta ortaya koyamamasıdır.

Diğer taraftan, YSA ile modelleme insan tecrübelerine bağlı değildir. Bunun yerine, probleme ait veri grubundan faydalanılarak model parametreleri (yani ağırlıklar) yeterli doğruluk sağlanana dek bir öğrenme prosedürü ile optimize edilir. YSA'ların homojen yapısı nedeniyle, ilgili YSA'nın ağırlıklarından ya da yapısından sözel bir anlam çıkarmak imkansızdır. Bu nedenle YSA, kara-kutu niteliğindeki modellerden sayılmaktadır. Her iki bulanık modelleme ve YSA modelleme yöntemleri bahsedilen bu avantaj ve dezavantajları ile birbirini tamamlar niteliktedir. Bu avantaj ve dezavantajlar göz önüne alınarak, özellikle veri hacminin büyük olduğu problemlerde, belirli öğrenme algoritmalarının kullanılmasıyla bulanık sistem parametrelerinin optimize edilmesini sağlayan ANFIS önerilmiştir [32]. Parametreleri öğrenme algoritmaları ile optimize edilen Sugeno tipi BÇS, özel olarak ANFIS (Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemleri) olarak adlandırılmaktadır [28, 32].

ANFIS, beş tabakalı ileri beslemeli bir yapay sinir ağı mimarisine sahiptir. Bu mimari için öğrenme algoritmasının temel görevi, ANFIS çıkışı ile öğrenme verilerini benzetmek için tüm uyarlanabilir parametreleri ayarlamaktır. Eğitim veri seti, sinir ağına tanıtılır ve herhangi bir eğitime algoritması yardımıyla ağ eğitilir. Model çıkışı ile öğrenme verileri arasındaki hata fonksiyonun minimum olduğu şartların belirlenmesi hedeflenir [30]. Şekil 5.9'da iki kurallı Birinci Derece Takagi-Sugeno tipi BÇS ve buna eşdeğer ANFIS yapısı gösterilmiştir. Söz konusu kurallar x ve y olmak üzere iki giriş ve f olarak ifade edilen bir çıkıştan oluşmaktadır.

Kural 1: Eğer $x \in A_1$ VE $y \in B_1$ ise $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2: Eğer $x \in A_2$ VE $y \in B_2$ ise $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$



Şekil 5.9 : İki kurallı Birinci Derece Takagi-Sugeno tipi BÇS (a) ve buna eşdeğer ANFIS yapısı (b) [28]

Şekil 5.9 (b) de aynı katmandaki düğüm fonksiyonlarının hepsinin aynı karakterde olduğu görülmektedir (parametrik olmayan dairesel düğümler ve parametrik olan karesel düğümler). Her bir katmanın işlevi aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

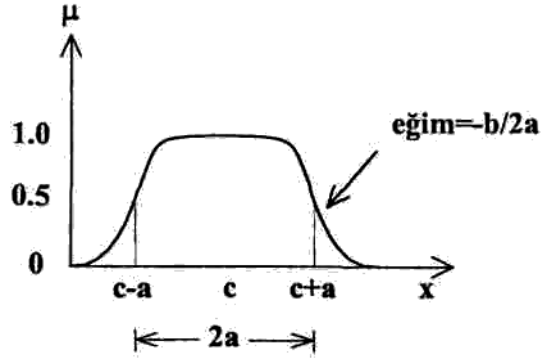
Katman 1:

Bulanıklaştırma katmanı olarak adlandırılır. Bu katmandaki her bir i düğümü,

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad O_{i+2}^1 = \mu_{B_i}(x), \quad i = 1,2 \quad (5.1)$$

düğüm fonksiyonuna sahip karesel düğümlerdir. (5.1) eşitliğinde x , i . düğüme gelen girişi, A ise söz konusu düğüm fonksiyonu ile tanımlanan bulanık kümeleri göstermektedir. Bir başka deyişle, O_i^1 verilen bir x girişinin A_i bulanık kümesindeki üyelik derecesini belirleyen üyelik fonksiyonudur. Genellikle, üyelik fonksiyonu olarak maksimum değeri 1 ve minimum değeri 0 olan (5.2) bağıntısı ile verilen çan-

eğrisi fonksiyonu ve (5.3) bağıntısı ile verilen Gauss-fonksiyonu kullanılır. Şekil 5.10'da genelleştirilmiş çan-eğrisi fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Genelleştirilmiş çan-eğrisi fonksiyonu ve parametrelerinin fiziksel anlamları [28]

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (5.2)$$

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (5.3)$$

Burada $\{a_i, b_i, c_i\}$ (veya Gauss-fonksiyonu olduğunda $\{a_i, c_i\}$) üyelik fonksiyonunun parametre kümesini oluşturur. Burada a_i ve b_i çan eğrisi şekilli üyelik fonksiyonunun sırasıyla orta noktasını ve standart sapmasını gösterir. Bu parametreler değiştikçe üyelik fonksiyonları da değişir. Böylece A_i için değişik üyelik fonksiyonları tanımlanabilir. Bu katmandaki parametrelere "öncül parametreler" denir.

Katman 2:

Kural katmanıdır. Bu katmandaki her bir düğüm, bir önceki katmandan gelen sinyaller üzerinde bulanık kesişim işlemlerini gerçekleştirip sonucu bir sonraki katmana gönderen dairesel düğümlerdir. Bu kesişim işlemleri aşağıda verilen (5.4) eşitliği ile olur.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \text{ veya } O_i^2 = w_i = \min[\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)] \quad , i = 1, 2 \quad (5.4)$$

Buradaki işlemler sırasıyla cebirsel çarpım ve minimizasyon yöntemleri ile yapılmış bulanık kesişim işlemleridir. Her iki yöntem de klasik küme teorisindeki kesişim

işlemleri ile tutarlı genelleştirmelerdir. Her bir düğüm çıkışı, Şekil 5.9'da görüldüğü gibi bir kuralın ağırlığını temsil etmektedir.

Katman 3:

Normalizasyon katmanıdır. Yine bu katmandaki bütün düğümler dairesel düğümlerdir, i . düğüm, i . kuralın ağırlığının tüm kuralların ağırlıkları toplamına oranını (5.5) eşitliği ile hesaplanır.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2 \quad (5.5)$$

Katman 4:

Arındırma katmanıdır. Bu katmandaki düğümler verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerinin hesaplandığı karesel düğümlerdir. Bu katmandaki her bir düğüm, ilgili kurala ait çıkış değerini normlandırılmış ağırlıklarla hesaplayan karesel düğümlerdir;

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (5.6)$$

Burada \bar{w}_i , 3-üncü katmanın çıkışı ve $\{ p_i, q_i, r_i \}$ "soncul parametreler" adı verilen parametrelerdir.

Katman 5:

Toplam katmanıdır. Bu katmandaki tek düğüm, aşağıdaki şekilde ağırlıklı ortalama yöntemiyle durulaştırmayı yapıp sistemin çıkış değerini hesaplayan dairesel düğümdür:

$$O_i^5 = \text{sistem çıktısı} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5.7)$$

5.1.3.1 Hibrit öğrenme algoritması

Hibrit öğrenme algoritması model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan “eğim düşümü” yöntemi ve “en küçük kareler” yöntemlerinin birleşiminden oluşan bir algoritmadır. Eğim düşümü yöntemi, lineer olmayan giriş parametrelerinin düzenlenmesinde, en küçük kareler yöntemi ise lineer çıkış parametrelerinin düzenlenmesinde kullanılmaktadır. Eğim düşümü yöntemi, modellemede ağ hatasını

en küçük yapacak şekilde ağırlık katsayılarının değiştirilmesi ve güncelleştirilmesi için kullanılmaktadır. Hibrit öğrenme algoritması yardımıyla, giriş üyeli fonksiyonu parametrelerinin ve çıkış üyeli fonksiyon parametreleri güncellenmekte ve en uygun değerler elde edilmektedir [28, 32].

Eğim-azaltımı (gradient descend) yöntemi;

Adaptif ağlar ile girdi-çıkı ilişkisini yüksek doğrulukla ortaya koyabilmek için daha önce de bahsedilen adaptif düğümlere ait parametrelerin optimize edilmesi gerekir. Adaptif ağların optimizasyonunda en yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemi iteratif eğim-azaltımı (*gradient descend*) yöntemidir.

L sayıda katmana ve k -inci katmanda $\#(k)$ adet düğüme sahip bir Adaptif Ağ göz önüne alınsın. Ek olarak, (k, i) ve O_i^k sırasıyla k -inci katmandaki i -inci sıradaki düğümünü ve bunun düğüm fonksiyonunu ifade etsin. Bir düğümün çıktısı kendisine gelen sinyale ve parametrelerine bağlı olduğu için aşağıdaki fonksiyonel ilişki yazılabilir.

$$O_i^k = O_i^k(O_i^{k-1}, \dots, O_{\#(k-1)}^{k-1}, a, b, c, \dots), \quad (5.8)$$

Burada a, b, c , vb. terimler bu düğüme ait parametrelerdir. (O_i^k 'nin hem düğüm çıktısı hem de düğüm fonksiyonunu ifade etmek için kullanılmıştır).

P adet satıra sahip bir veri grubu ele alalım. Bu durumda p -inci satırdaki eğitim verisi için ($1 \leq p \leq P$ ile) *doğruluk ölçütü* (*performans indeksi* ya da *maliyet fonksiyonu* da denir) hataların kareleri toplamı ile aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$E_p = \sum_{m=1}^{\#(L)} (T_{m,p} - O_{m,p}^L)^2 \quad (5.9)$$

Burada $T_{m,p}$, p -inci girdi için hesaplanan çıktı vektörünün m -inci bileşeni ve $O_{m,p}^L$, aynı girdi için olması gereken gerçek çıktı vektörünün m -inci bileşenidir. Böylece toplam hata ölçütü;

$$E = \sum_{p=1}^P E_p \quad (5.10)$$

ile hesaplanır. (5.9) ile verilen hata ölçütü ile parametre uzayında eğim-azaltımı yöntemine dayanan bir öğrenme algoritması geliştirebilmek için, p -inci girdi verisi ve

de her bir O düğüm çıktısı için $\frac{\partial E_p}{\partial O}$ hata oranı hesaplanmalıdır. L -inci (son) katmandaki i -inci düğüm (L, i) çıktısı için hata oranı Eşitlik (5.9)'dan aşağıdaki şekilde türetilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L) \quad (5.11)$$

İç katmandaki bir (k, i) düğümü için ($1 \leq k \leq L - 1$) hata oranı zincir kuralı ile,

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k} = \sum_{m=1}^{\#(k+1)} \frac{\partial E_p}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^k} \quad (5.12)$$

hesaplanır. Bu şekilde, iç katmandaki bir düğümün hata oranı sonraki katmandaki düğümlerin hata oranlarının lineer kombinasyonu olarak ifade edilebilir. Böylece, her

$1 \leq k \leq L$ ve $1 \leq i \leq \#(k)$ için, $\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k}$ hata oranı Eşitlik (5.11) ve Eşitlik (5.12)

yardımıyla hesaplanabilir.

α söz konusu adaptif ağıın bir parametresi olsun. Bu durumda $\partial E_p / \partial \alpha$ kısmi türevi;

$$\frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{O^* \in S} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \frac{\partial O^*}{\partial \alpha} \quad (5.13)$$

olacaktır. Burada S , çıktısı α 'ya bağlı olan düğümler kümesidir. Toplam hata ölçütü E 'nin α 'ya göre türevi aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^P \frac{\partial E_p}{\partial \alpha} \quad (5.14)$$

Jenerik (generic) parametre α aşağıdaki eşitlikle güncellenir:

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (5.15)$$

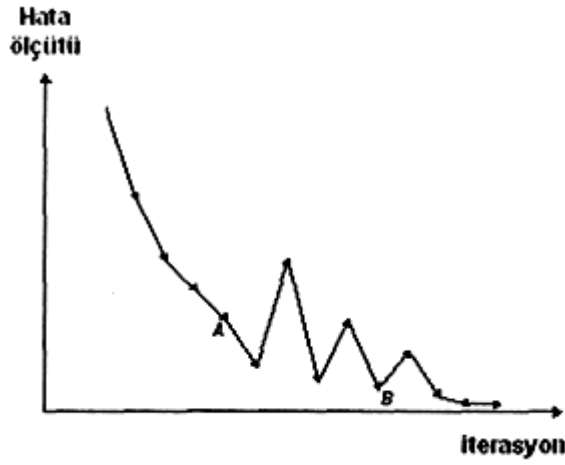
Burada η , öğrenme oranı olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2}} \quad (5.16)$$

Burada k adım büyüklüğü, yani parametre uzayındaki her bir eğim geçişinin uzunluğudur. Genellikle, k değeri yakınsama hızını değiştirmek amacıyla değiştirilebilir, k 'nın hata ölçütünün ilk birkaç iterasyondaki trendine bağlı olarak nasıl değiştirilmesi gerektiğine ilişkin tecrübeye dayalı aşağıdaki kurallar önerilmiştir (Şekil 5.11):

Eğer hata oranı ardışık dört iterasyonda da azalma eğiliminde ise k , %10 oranında artırılır.

Eğer hata oranı ardışık 2 defa bir azalma bir yükselme kombinasyonu şeklinde bir gidiş gösterirse, k , %10 oranında azaltılır.



Şekil 5.11 : k adım büyüklüğünün değiştirilmesine ilişkin deneysel kurallar [28]

Buraya kadar eğim azaltımı yönteminin adaptif ağlarda ağ parametrelerinin optimizasyonunda kullanılabileceği gösterilmiştir. Ne var ki, bu yöntem genellikle çok yavaş yakınsar ve bazen çözüm lokal bir optimumda takılıp kalır.

En Küçük Kareler (EKK) kestirim yöntemi:

Tek bir çıktısı olan bir adaptif ağ düşünüldüğünde, I girdi değişkenleri kümesi ve S ise parametreler kümesi olmak üzere:

$$çıktı = F(\bar{I}, S) \quad (5.17)$$

olur. Eğer $H \circ F$ bileşke fonksiyonunun S 'nin bazı elemanları içinde lineer olmasını sağlayan H gibi bir fonksiyon mevcut ise, o zaman bu elemanların EKK yöntemi ile kestirimi mümkündür. Takagi-Sugeno tipi bulanık çıkarım modeli ANFIS'in bu koşulu

sağladığı görülmektedir (Şekil 5.9 (b)). Çünkü soncul bölümdeki parametreler (soncul parametreler) lineer parametrelerdir.

Göz önüne alınan ANFIS modelinin tüm parametreler kümesi S , S_1 ve S_2 sırasıyla öncül ve soncul parametreler olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$S = S_1 \oplus S_2 \quad (5.18)$$

Burada \oplus cebirsel dolaysız toplamı ifade etmektedir. Şekil 5.9'daki ANFIS yapısına bakıldığında, verilen sabit öncül parametreler için model çıktısı soncul parametrelerin lineer kombinasyonları olarak ifade edilebilir. Daha açık bir ifadeyle, soncul parametreler $\{p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2\}$ 'nin lineer bir fonksiyonu olan f çıktısı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

öncül ve soncul parametreler olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \\ &= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Bu durumda, daha önce bahsedilen H ve F fonksiyonları sırasıyla birim fonksiyon ve bulanık çıkarım sisteminin fonksiyonudur.

S_1 öncül parametreleri sabit tutulursa, P adet eğitim verisi için aşağıdaki denklem sistemi yazılabilir.

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}, \quad (5.20)$$

Burada \mathbf{X} , elemanları S_2 soncul parametreler kümesi elemanları olan bilinmeyenler vektörüdür. S_2 'nin boyutu $|S_2| = m$ ve p veri sayısını göstermek üzere \mathbf{A} , \mathbf{X} ve \mathbf{B} 'nin boyutları sırasıyla $p \times m$, $m \times 1$ ve $p \times 1$ olur.

Sistemin ölçü elemanları olarak görülebilen eğitim verisi sayısı genellikle bilinmeyen sayısından daha büyük olduğu için \mathbf{X} 'in EKK kestirimi olan $\hat{\mathbf{X}}$, düzeltmelerin kareleri toplamının $(\sum(\mathbf{AX} - \mathbf{B})^2)$ minimum olmasını sağlayan çözümdür.

Eşitlik (5.20)'deki düzeltme denklemlerinden türetilen normal denklemlerin çözümü aşağıdaki şekilde yapılır.

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5.21)$$

Bu yöntem, ne var ki, matris inversi işlemi yönünden zaman alıcıdır. Ayrıca normal denklemler matrisinin tekil olması durumunda nümerik problemler ortaya çıkar. Eşitlik (5.21)'de verilen bu doğrudan çözüm yerine EKK yöntemine dayalı sıralı dengeleme yöntemleri (örneğin; Kalman filtresi) kullanılabilir. Bu sıralı dengeleme yöntemi özellikle serbestlik derecesinin yüksek olduğu problemlerin çözümünde daha etkin bir yöntemdir.

a_i^T ve b_i^T sırasıyla \mathbf{A} matrisinin i -inci satır vektörünü ve \mathbf{B} vektörünün i -inci elemanını göstermek üzere, bahsedilen iteratif çözüm aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır:

$$X_{i+1} = X_i + C_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i)$$

$$C_{i+1} = C_i - \frac{C_i a_{i+1} a_{i+1}^T C_i}{1 + a_{i+1}^T C_i a_{i+1}}, \quad i = 0, 1, \dots, P - 1 \quad (5.22)$$

Burada C , kovaryans matrisidir. X 'in EKK kestirimi X_p 'ye eşittir, Eşitlik (5.22) için başlangıç değerleri $X_0 = 0$ ve γ pozitif büyük bir sayı ve I , $M \times M$ boyutunda birim matris olmak üzere $C_0 = \gamma I$ dir. Çok çıktılı bulanık çıkarım sistemleri söz konusu olduğunda, eşitlik (5.22)'deki b_i^T terimi \mathbf{B} matrisinin i -inci satır vektörü olur. Bu verilen sıralı dengeleme yöntemi aşağıda verilen Kalman filtresi eşitliklerinde $X(k) = X_k$, $Y(k) = b_k$ ve $A(k) = a_k$ olarak düşünülürse iki yöntemin birbiriyle aynı olduğu görülür:

$$X(k + 1) = X(k), \quad (5.23)$$

$$Y(k) = A(k)X(k) + gürültü \quad (5.24)$$

Bu nedenle eşitlik (5.22) ile verilen sıralı dengeleme algoritmasına nadiren Kalman Filtreleme algoritması da denilmektedir.

ANFIS'de kullanılan hibrid öğrenme algoritmasında her bir iterasyonda ileri yönde ve geri yönde olmak üzere çift yönlü bir işlem süreci vardır. İleri yönde, öncül parametreler sabit tutulur ve giriş verilerinden gelen sinyaller eşitlik (5.21)'deki \mathbf{A} ve \mathbf{B} matrisleri elde edilene kadar her bir düğümün çıktısı hesaplanarak ilerlenir. Soncul parametreler, S_2 , Eşitlik (5.23) ile hesaplanır. Fonksiyonel sinyaller daha sonra hata ölçütü hesaplanana kadar ileri yönde devam eder. Geri yönde, hata oranları (hata ölçütünün her bir düğüm çıktısına göre türevleri; Eşitlik (5.22) ve (5.23) çıktı

kısından geriye girdi yönüne doğru transfer edilir ve öncül parametreler S_1 , Eşitlik (5.15) ile verilen eğim azaltımı yöntemi ile güncellenir. Hibrit algoritmanın işlem akışı Tablo 5.1’de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 : Hibrit öğrenme algoritmasında işlem akışı

	İleri Yönde	Geri Yönde
Öncül parametreler	Sabit	Eğim azaltımı
Soncul parametreler	EKK kestirimi	Sabit

Hata ölçütü olarak hataların (gerçek çıktı değeri ile modelden hesaplan çıktı değerleri arasındaki farkların) kareleri toplamı kullanıldığından, sabit öncül parametrelere bağlı olarak hesaplanan soncul parametreler, S_2 parametre uzayında global optimum çözümdür. Ayrıca, verilen bu Hibrit yöntem salt eğim azaltımı yönteminden çok daha hızlı yakınsar [32, 28].

5.2 ANFIS İle Durum İzleme Uygulamaları

Bu kısımda akım, titreşim ve sıcaklık verilerini giriş olarak kullanan üç adet ANFIS modeli oluşturularak motor arıza durumunu belirlemedeki başarımları karşılaştırılmıştır.

5.2.1 Akım verilerini kullanan ANFIS modeli

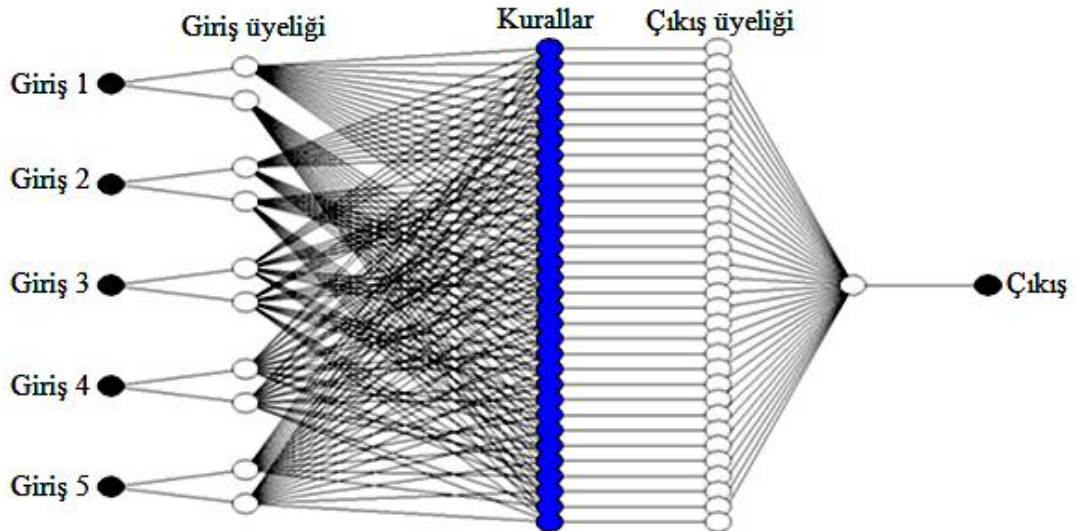
Bütün motor için bozuk ve sağlam durumda örnekleme frekansı 12 kHz alınarak 10 s boyunca yapılan ölçümler sonucu her ölçüm durumu için 120.000 örnek elde edilmiştir. Elde edilen örnekler ANFIS uygulamasında eğitim ve test verisi olarak kullanılmak üzere 3000’er örnekleli guruplara ayrılarak 40 tane örnek gurubu oluşturulmuştur. Her bir gurup için FFT sayısı 2048 alınarak spektrum hesabı yapılmıştır. Bu şekilde 0 - 6000Hz arası 1024 noktalı spektrum verisi elde edilmiştir. Elde edilen 1024 nokta kendi içerisinde normalize edilmiştir. Normalize edilmiş spektrum verisi beş frekans bant aralığına bölünmüştür. Bu frekanslar rulman hatasına bağlı arıza özelliğinin görüldüğü düşük frekans bölgesinden seçilmiş olup Tablo 5.2’de gösterilmiştir. 60 Hz şebeke frekansı olması nedeni ile alınmamıştır.

Tablo 5.2 : ANFIS girişleri

Frekans bant aralıkları (Hz)		
	İlk frekans	Son frekans
1	0	53
2	76	117
3	123	234
4	240	352
5	357	586

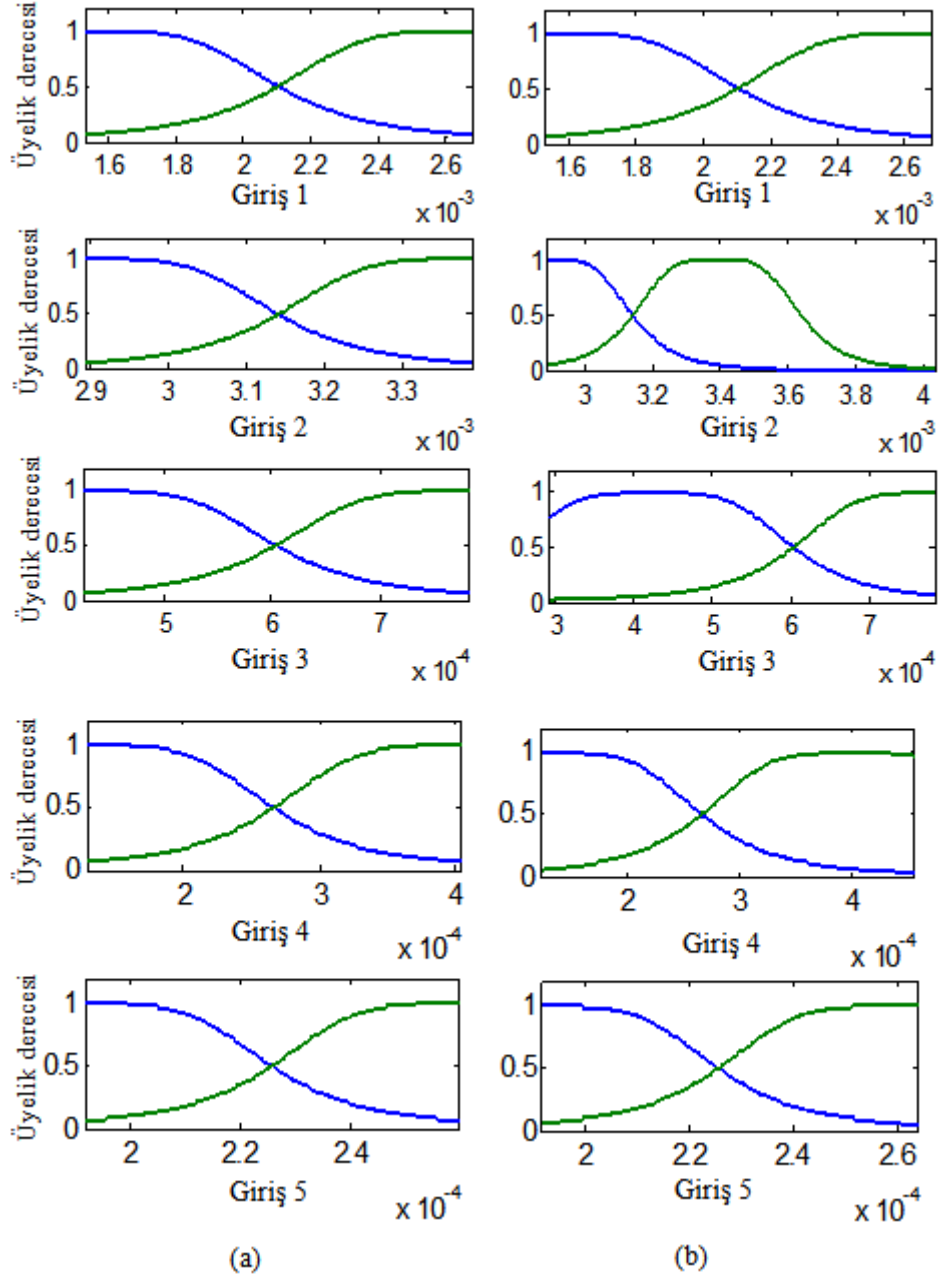
Her frekans bandı için daha önce hesaplanan spektrum genlik değerlerinin toplamı bulunarak tek değer elde edilmiştir. Bu işlemler tüm motorların sağlam ve bozuk durumları için yapıldığında, sonuç olarak 4 motorun her biri için 80 satır (ilk 40 satır sağlam durum, sonraki 40 satır bozuk durum için) ve beş sütundan oluşan veri seti hazırlanmıştır.

Hazırlanan veri setinin beş sütunu ANFIS'in veri girişlerini oluşturur. Eklenecek altıncı yani son sütun ise çıkış verisi olacaktır. Motorların sağlam durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.1 ve bozuk durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.9 olacak şekilde altıncı sütun oluşturulmuştur. Şekil 5.12 de beş giriş ve bir çıkıştan oluşan ANFIS ağ yapısı görülmektedir.

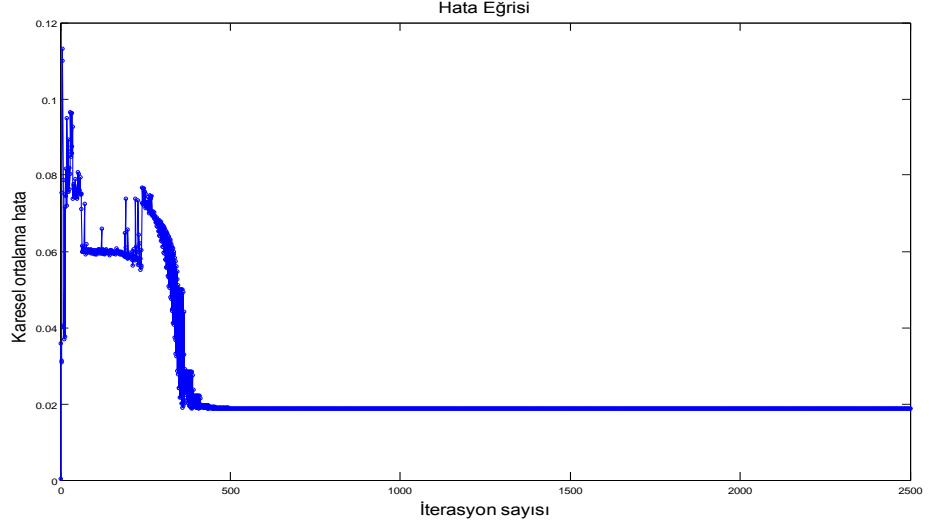


Şekil 5.12 : ANFIS ağ yapısı

Giriş üyelik fonksiyonları genelleştirilmiş çan eğrisi şeklinde ve her giriş için 2 tane seçilmiş (kural sayısı $2^5=32$), iterasyon sayısı 2500 ve çıkış fonksiyonu sabit alınarak ANFIS eğitim işlemine başlanmıştır. Motor #8'in sağlam durumu için 20, bozuk durumu için 20 olmak üzere 40 örnek grubu eğitim için kullanılmıştır. Şekil 5.13'de eğitim öncesi (a) ve sonrası (b) için üyelik fonksiyonlarının değişimi görülmektedir. Eğitim sırasındaki karesel ortalama hata değişimi Şekil 5.14'de görülmektedir.

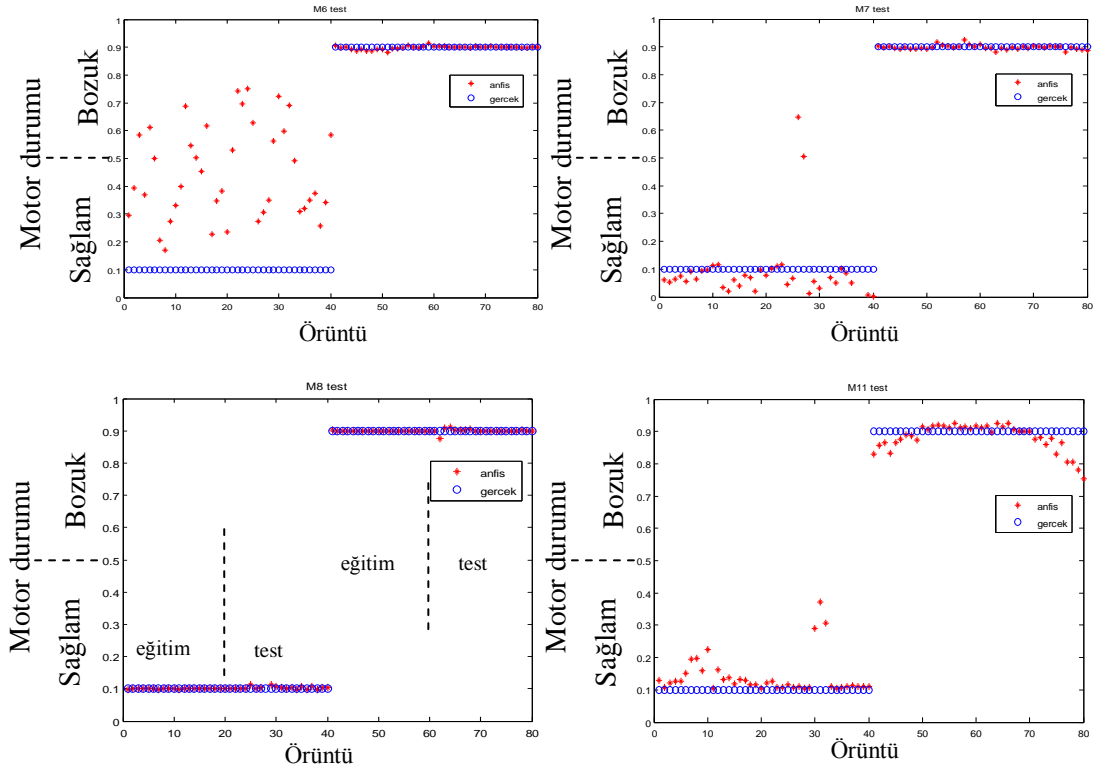


Şekil 5.13 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları;
(a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki



Şekil 5.14 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi

ANFIS eğitiminin tamamlanmasını müteakiben dört motor için test yapılmıştır. Şekil 5.15’de dört motor için gerçek (olması gereken) sonuçlar ve ANFIS’in bulduğu sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.15 : Dört motor için ANFIS test sonuçları

Akım verisi ile eğitilen ANFIS yardımı ile rulman arıza tanısı için başarımlar oranları sağlam ve bozuk durumun belirlenmesinde orta nokta olarak 0.5 eşik değeri alınarak Tablo 5.3’de ki gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.3 : Akım verisi için başarımlar oranları

m6		m7		m8		m11	
sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum
63%	100%	95%	100%	100%	100%	100%	100%

5.2.2 Titreşim verilerini kullanan ANFIS modeli

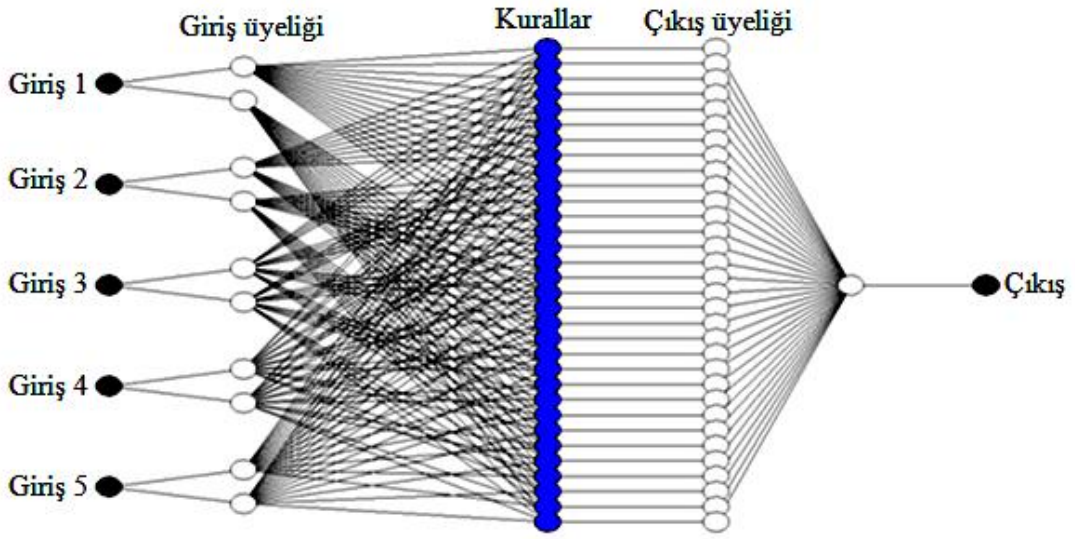
Bütün motor için bozuk ve sağlam durumda örnekleme frekansı 12 kHz alınarak 10 s boyunca yapılan ölçümler sonucu her ölçüm durumu için 120.000 örnek elde edilmiştir. Elde edilen örnekler ANFIS uygulamasında eğitim ve test verisi olarak kullanılmak üzere 3000’er örneklili gruplara ayrılarak 40 tane örnek grubu oluşturulmuştur. Her bir grup için FFT sayısı 8192 alınarak spektrum hesabı yapılmıştır. Bu şekilde 0 - 6000 Hz arası 4096 noktalı spektrum verisi elde edilmiştir. Elde edilen spektrum verisi beş frekans bant aralığına bölünmüştür. Bu frekanslar Tablo 5.4’de gösterildiği gibi olup 4000 Hz den büyük frekans değerleri alçak geçiren filtre olması nedeni ile alınmamıştır.

Tablo 5.4 : ANFIS girişleri

Frekans bant aralıkları (Hz)		
	İlk frekans	Son frekans
1	0	732
2	734	1465
3	1466	2197
4	2199	2930
5	2931	4028

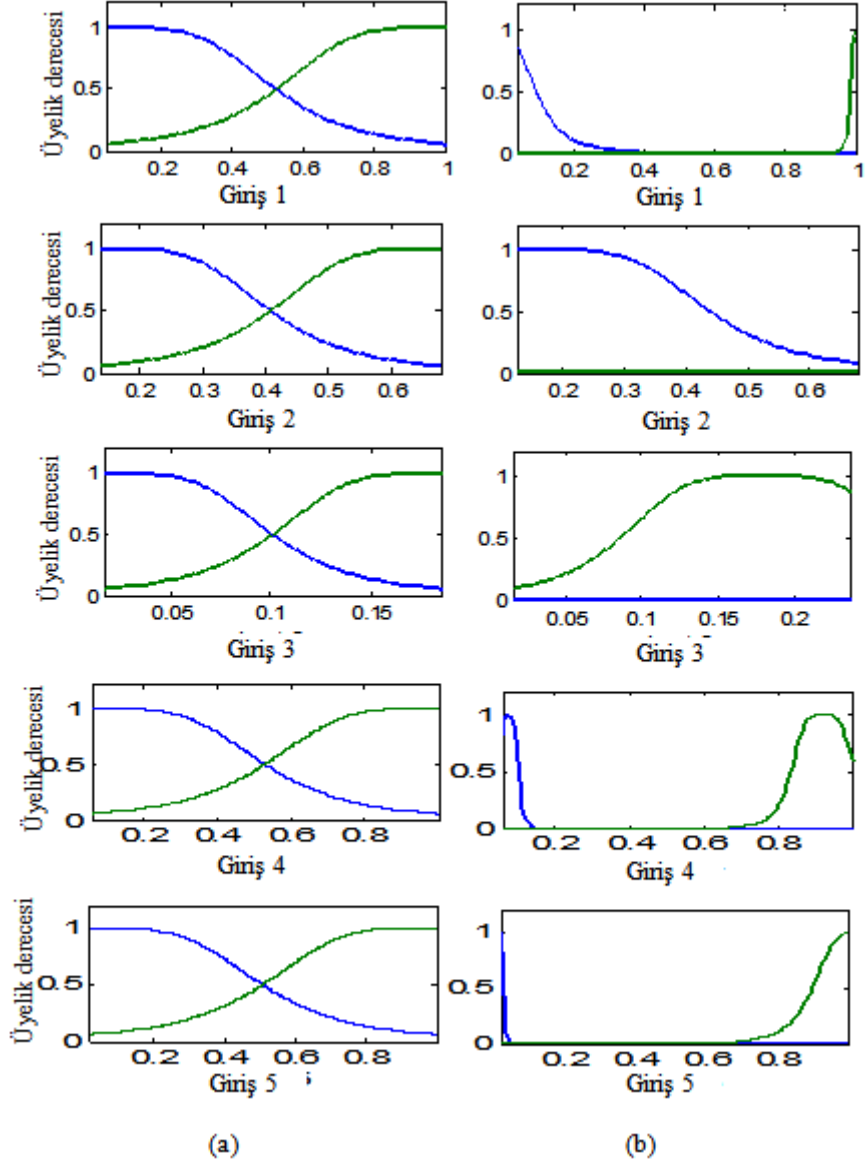
Her frekans bandı için daha önce hesaplanan spektrum genlik değerlerinin toplamı bulunarak tek değer elde edilmiştir. Elde edilen beş değer kendi içerisinde normalize edilmiştir. Bu işlemler tüm motorların sağlam ve bozuk durumları için yapıldığında, sonuç olarak dört motorun her biri için 80 satır (ilk 40 satır sağlam durum, sonraki 40

satır bozuk durum için) ve beş sütundan oluşan veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri setinin beş sütunu ANFIS'in veri girişlerini oluşturur. Eklenecek altıncı yani son sütun ise çıkış verisi olacaktır. Motorların sağlam durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.1 ve bozuk durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.9 olacak şekilde altıncı sütun oluşturulmuştur. Şekil 5.16'da beş giriş ve bir çıkıştan oluşan ANFIS ağ yapısı görülmektedir.

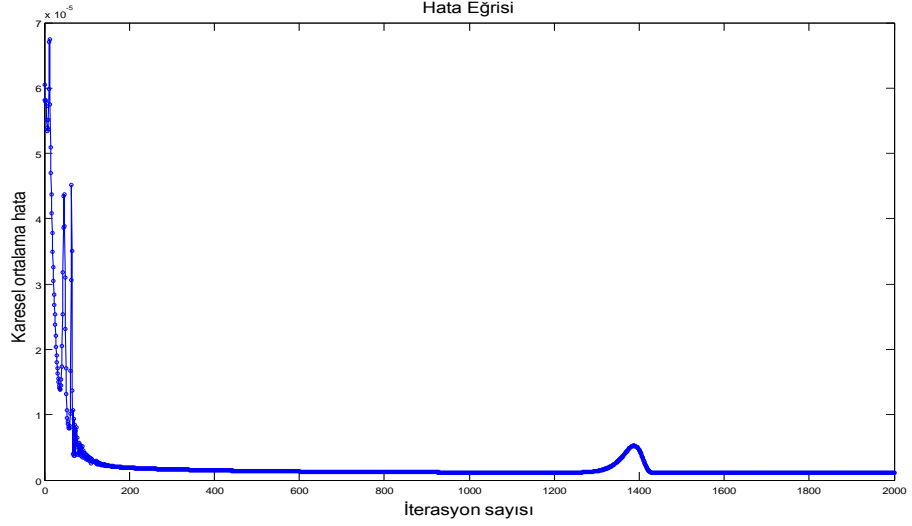


Şekil 5.16 : ANFIS ağ yapısı

Giriş üyelik fonksiyonları genelleştirilmiş çan eğrisi şeklinde ve her giriş için 2 tane seçilmiş (kural sayısı= $2^5=32$), iterasyon sayısı 2000 ve çıkış fonksiyonu sabit alınarak ANFIS eğitim işlemine başlanmıştır. Motor #8'in sağlam durumu için 20, bozuk durumu için 20 olmak üzere 40 örnek gurubu eğitim için kullanılmıştır. Şekil 5.17'de eğitim öncesi (a) ve sonrası (b) için üyelik fonksiyonlarının değişimi görülmektedir. Eğitim sırasındaki karesel ortalama hata değişimi Şekil 5.18'de görülmektedir.

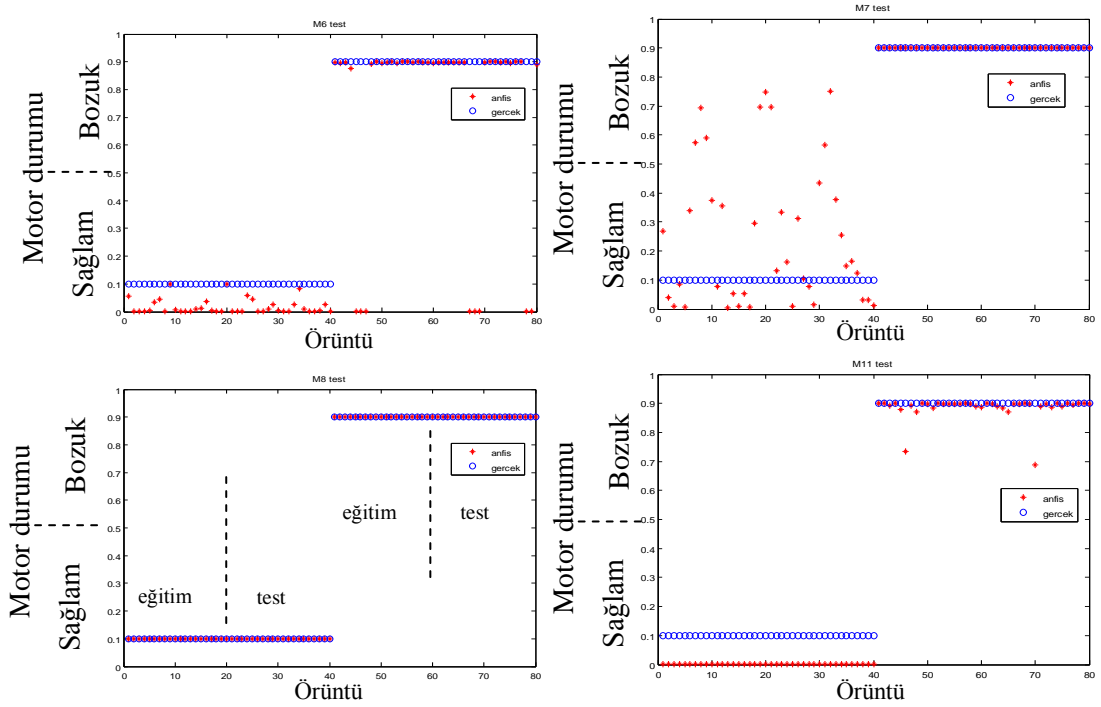


Şekil 5.17 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları;
 (a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki



Şekil 5.18 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi

ANFIS eğitiminin tamamlanmasını müteakiben dört motor için test yapılmıştır. Şekil 5.19’da dört motor için gerçek (olması gereken) sonuçlar ve ANFIS’in bulduğu sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.19 : Dört motor için ANFIS test sonuçları

Titreşim verisi ile eğitilen ANFIS yardımı ile rulman arıza tanısı için başarımlar oranları, sağlam ve bozuk durumun belirlenmesinde orta nokta olarak 0.5 eşik değeri alınarak Tablo 5.5’deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.5 : Titreşim verisi için başarımlar oranları

m6		m7		m8		m11	
sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum
100%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	100%

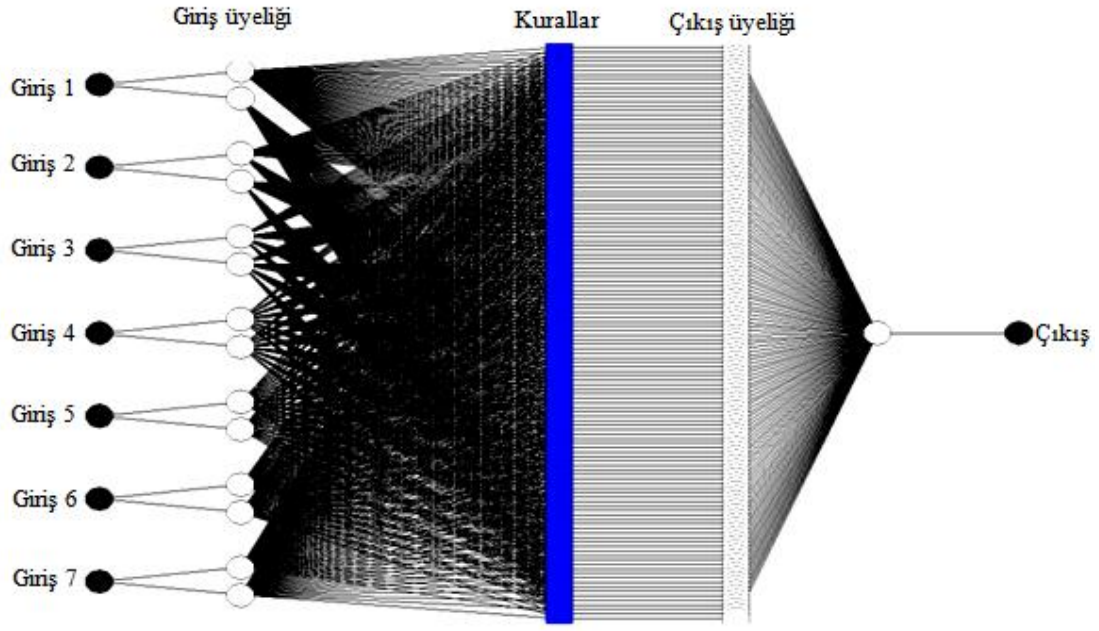
5.2.3 Sıcaklık, akım ve titreşim verilerini kullanan ANFIS modeli

Sıcaklık verisinin dakikalık olarak toplanması nedeni ile veri sayısı azdır. Yetersiz sayıdaki sıcaklık verisi nedeni ile yapılan denemeler sonucunda ANFIS den anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Bu nedenle daha önceki uygulamalar için hazırlanan titreşim ve akım verilerinden uygun olan üç tanesi seçilerek üçü titreşim, üçü akım ve bir tanesi de sıcaklık olmak üzere yedi girişli ANFIS modeli oluşturulmuştur. Yedinci giriş olarak rulman sıcaklığının sağlam ve bozuk durumdaki maksimum değerleri kullanılmıştır.

Tablo 5.6 : ANFIS girişleri

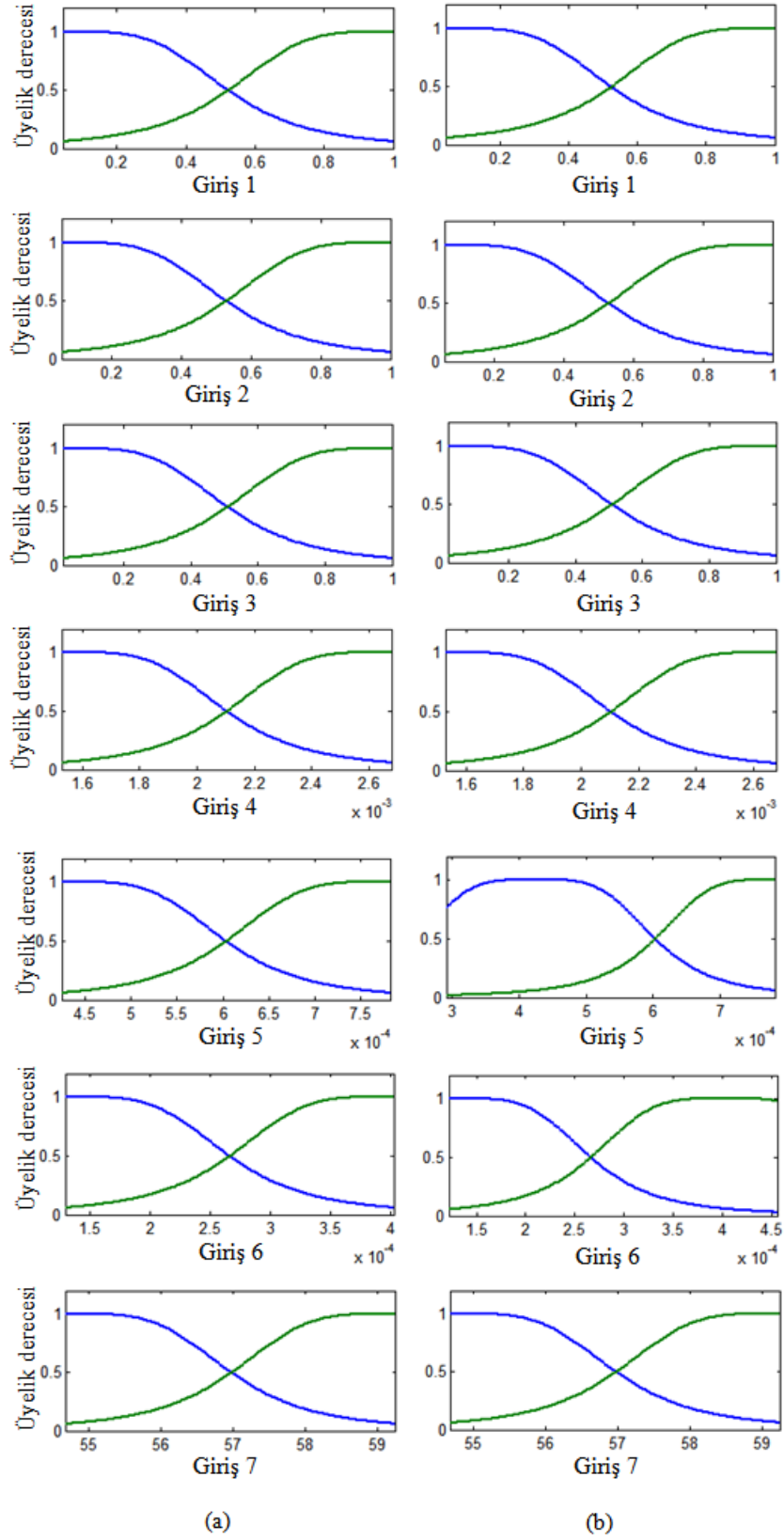
Frekans bant aralıkları (Hz)			
		İlk frekans	Son frekans
Titreşim	1	0	732
	2	2199	2930
	3	2931	4028
Akım	4	0	53
	5	123	234
	6	240	352
Sıcaklık	7	-	-

Tüm motorların sağlam ve bozuk durumları için titreşim, akım ve sıcaklık verileri birlikte kullanılmıştır. Sonuç olarak dört motorun her biri için 80 satır (ilk 40 satır sağlam durum, sonraki 40 satır bozuk durum için) ve yedi sütundan oluşan veri seti hazırlanmıştır. Hazırlanan veri setinin yedi sütunu ANFIS'in veri girişlerini oluşturur. Eklenecek sekizinci yani son sütun ise çıkış verisi olacaktır. Motorların sağlam durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.1 ve bozuk durumlarını ifade etmek için çıkış değeri 0.9 olacak şekilde sekizinci sütun oluşturulmuştur. Şekil 5.20'de yedi giriş ve bir çıkıştan oluşan ANFIS ağ yapısı görülmektedir.

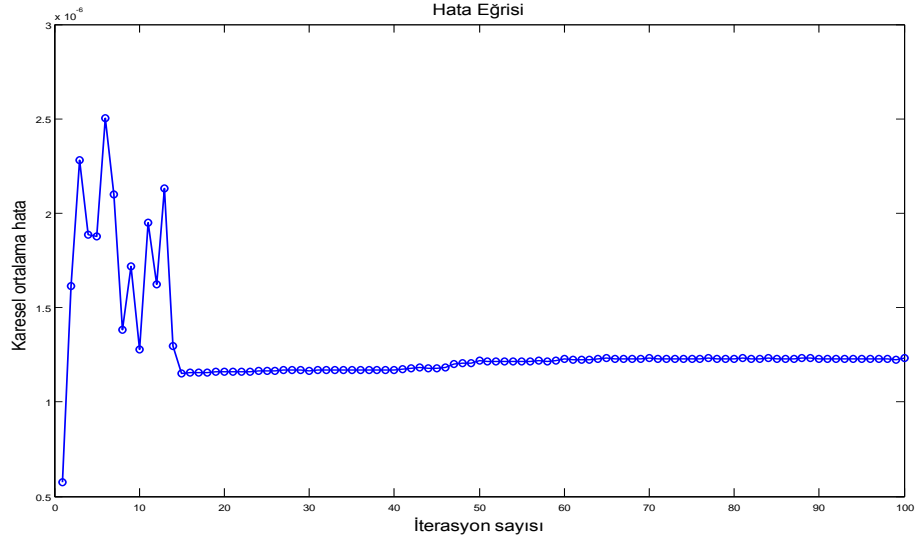


Şekil 5.20 : ANFIS ağ yapısı

Giriş üyelik fonksiyonları genelleştirilmiş çan eğrisi şeklinde ve her giriş için 2 tane seçilmiş (kural sayısı $2^7=128$), iterasyon sayısı 100 ve çıkış fonksiyonu sabit alınarak ANFIS eğitim işlemine başlanmıştır. Motor #8'in sağlam durumu için 20, bozuk durumu için 20 olmak üzere 40 örnek gurubu eğitim için kullanılmıştır. Şekil 5.21'de eğitim öncesi (a) ve sonrası (b) için üyelik fonksiyonlarının değişimi görülmektedir. Eğitim sırasındaki karesel ortalama hata değişimi Şekil 5.22'de görülmektedir.

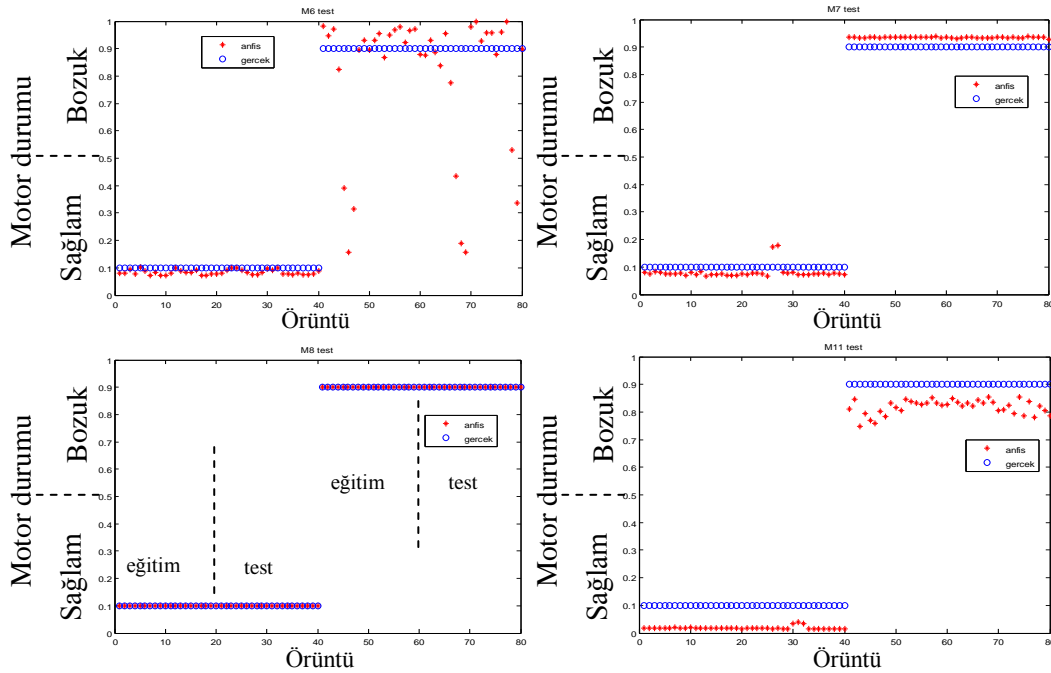


Şekil 5.21 : Her bir giriş için üyelik fonksiyonları;
 (a) başlangıç, (b) öğrenme sonundaki



Şekil 5.22 : ANFIS eğitimi sırasındaki hata değişimi

ANFIS eğitiminin tamamlanmasını müteakiben dört motor için test yapılmıştır. Şekil 5.23’de dört motor için gerçek (olması gereken) sonuçlar ve ANFIS’in bulduğu sonuçlar görülmektedir.



Şekil 5.23 : Dört motor için ANFIS test sonuçları

Sıcaklık, akım ve titreşim verileri ile eğitilen ANFIS yardımı ile rulman arıza tanısı için başarımlarını sağlam ve bozuk durumun belirlenmesinde orta nokta olarak 0.5 eşik değeri alınarak Tablo 5.7’deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.7 : Sıcaklık, akım ve titreşim verisi için başarımları

m6		m7		m8		m11	
sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum
100%	83%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

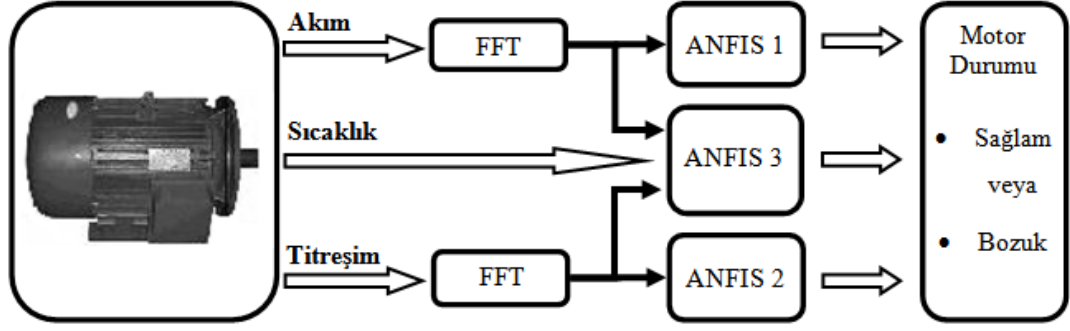
6. SONUÇLAR

Bu tezde rulmanın yapısı, ömrünü etkileyen faktörler, durum izleme ve hata teşhis yöntemleri anlatılmış olup uygulama olarak; kimyasal, termal ve elektriksel yapay eskitmeye tabi tutulmuş 3.7 kW'lık, 3 fazlı, 4 kutuplu dört tane asenkron motorun sıcaklık, titreşim ve akım verilerine dayalı rulman arıza tanısı yapılmıştır.

Veri analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- *Sıcaklık verisi analizi sonuçları:* Rulman sıcaklığı ile sargı sıcaklığı doğru orantılıdır. Mod-II'deki sıcaklık artışı Mod-I'dekine göre daha fazladır. Sıcaklık artışının sargı izolasyonunu etkilediği bilinmekle birlikte, bu deneyde rulman arızası sonucu ortaya çıkan sıcaklık artışının izolasyonu bozacak seviyeye ulaşmadığı görülmüştür. Bu gözlemler rulman arıza tanısı için sıcaklık verisinin tek başına yeterli olmadığını göstermiştir.
- *Akım verisi analizi sonuçları:* Akımın spektral analizi yapılarak 0 - 500 Hz bölgesinde enerji artışı gözlenmiştir fakat bu artış arıza özelliğini belirleyebilecek derecede belirgin değildir. Rulman hataları nedeniyle akım spektrumunda görülmesi beklenen hata frekansları, rulman bozulmasının bu deney için yüzeysel olması nedeniyle belirgin olarak tespit edilememiştir.
- *Titreşim verisi analizi sonuçları:* İstatistiksel analiz sonucunda titreşimin rms değerinin Mod-I ve Mod-II için arttığı ve Mod-II'deki artışın Mod-I'e göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Spektral analiz sonucunda ise Mod-I ve Mod-II için yüksek frekanslarda (1,5 - 4 kHz) belirgin bir artış gözlenmiştir. Karakteristik rulman frekansları düşük frekans bölgesinde rulman bozulmasının bu deney için yüzeysel olması nedeniyle önemli bir değişim göstermemiştir.

Veri analizi yardımı ile arıza özelliği çıkartılmasından sonra motor durumunun belirlenmesi amacıyla oluşturulan üç adet ANFIS modeli Şekil 6.1'deki blok diyagram ile ve modellerin başarımları da Tablo 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Üç ANFIS modeli ile motor durum izleme blok diyagramı

Tablo 6.1 : ANFIS modellerinin başarımlar değerleri

ANFIS modeli	Eğitim hatası	Başarımlar oranları							
		m6		m7		m8		m11	
		sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum	sağlam durum	bozuk durum
Sadece Akım verisi için (ANFIS 1)	18,84E-03	% 63	% 100	% 95	% 100	% 100	% 100	% 100	% 100
Sadece Titreşim verisi için (ANFIS 2)	1,07E-06	% 100	% 80	% 80	% 100	% 100	% 100	% 100	% 100
Sıcaklık, Akım ve Titreşim verisi için (ANFIS 3)	1,23E-06	% 100	% 83	% 100	% 100	% 100	% 100	% 100	% 100

Bu ANFIS modellerinde Motor #8 verisinin sağlam ve bozuk durum için 5 s ‘lik kısmı eğitimde kullanılmıştır. Test verisi olarak da Motor #8 in sağlam ve bozuk durumları için son 5 s ‘lik kısmı, Motor #6, Motor #7 ve Motor #11’in ise tüm 10 s ‘lik kısmı kullanılmıştır.

Tablo 6.1’e göre öğrenebilen bir sistem olan ANFIS sadece akım işaretlerinin kullanıldığı durumda da başarılı performans göstermiştir. Titreşim verilerinin kullanıldığı ANFIS’in başarımının iyi olması beklenen bir sonuçtur çünkü rulman arızası spektrum analizinde belirgin farklılıklar göstermiştir. Sıcaklık, akım ve titreşim verilerinin bir arada kullanılması ise başarımlar sonucunu biraz arttırmıştır.

İleriki çalışma olarak ANFIS’in başarımını elektriksel hatalar için test edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Devaney, M.J. ve Eren, L.**, 2004. Detecting motor bearing faults, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, December, 30-35.
- [2] **Bonnett, A.H.**, 2000. Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 5.
- [3] **Orhan, S., Aktürk, N., Çelik, V.**, 2003. Bir santrifüj pompa rulmanlarının titreşim analizi ile belirlenmesi, *G.Ü. Fen bilimleri dergisi*, 543-552.
- [4] **Zhou W., Habetler T.G., Harley R.G.**, 2007. Bearing condition monitoring methods for electric machines: A General Review, *IEEE SDEMPED*, Cracow, Poland, Sep. 6-8.
- [5] **Silva, J.L.H., Cardoso, A.J.M.**, 2005. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by Extended Park's Vector approach, *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Raleigh, United States, Nov. 6-10.
- [6] http://tr.wikipedia.org/wiki/Rulman%C4%B1_yatak, erişim tarihi: Mart 2008
- [7] **Aktürk N., Eroğlu, M., Karaçay, T.**, 2002. Rulmanların titreşimlerinin incelenmesiyle rulmanlarda sağlık kontrollerinin yapılması, *G.Ü. DPT Projesi Son Raporu, DPT 95 K 120370*, Ankara.
- [8] **Arslan, H., Orhan, S., Aktürk N.**, 2003. Bilyalı rulman hasarlarının neden olduğu titreşimlerin modellenmesi, *G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, No 4, 123-146.
- [9] **Arslan, H., Orhan, S., Aktürk N.**, 2003. Titreşim analiziyle rulman arızalarının belirlenmesi, *G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, No 2, 39-48.
- [10] **Bonnett, A.H.**, 1992. Cause and analysis of bearing failures in electrical motors, *39th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications* San Antonio, TX, USA., Sep. 28-30, p. 87-95.

- [11] **Ayaz, E., Şeker, S.**, 2002. İleri işaret işleme yöntemleri ile elektrik motorlarında rulman arıza tanısı, *İTÜ Dergisi*, c.1 s.1.
- [12] **Taner, E.**, 1991. Makine parçalarında yeni ıslah yöntemleri, Roketsan A.Ş.
- [13] **Maru, B., Zotos, P.A.**, 1989. Anti-friction bearing temperature rise for NEMA frame motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, No. 5.
- [14] **Ayaz, E.**, 2002. Elektrik motorlarında dalgacık analizi yaklaşımı ile rulman arıza tanısı ve yapay zeka tabanlı bir durum izleme, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Orhan, S.**, 2003. Dönen makinelerde oluşan arızalar ve titreşim ilişkisi, *Teknoloji*, Yıl 6, Sayı 3-4, 41-48.
- [16] **Köse, R.K.**, Makine arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 45, Sayı: 538.
- [17] **Zarei, J., Poshtan, J.**, 2007. Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current, *Tribology International*, 40, 763–769.
- [18] **Karatoprak, E., Şeker, S., Çataltepe, Z., Şengüler, T.**, 2007. Bayes-karar verme kuramının motor arıza tanısında kullanılması, IEEE 15. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU), Eskişehir, 11-13 Haziran.
- [19] **Erbay, A.S., Upadhyaya, B.R.**, 1999. Multi sensor fusion for induction motor aging analysis and fault diagnosis, *Research Report, UTK,UTNE/BRU/99-01*, Knoxville, TN, USA.
- [20] **Erbay, A.S., Upadhyaya, B.R., McClanahan, J.P., Şeker, S.**, 1998. Accelerated aging studies of induction motors, *Maintenance and Reliability Conference Proceedings (MARKON)*, Knoxville, USA, May 12-14.
- [21] **Costello, M.J.**, 1993. Shaft voltages and rotating machinery, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29, Issue 2, 419 – 426.

- [22] **Koval, D.**, 1997. Bearing damage resulting from shaft voltages and currents, CSI.
- [23] **Çalış, H., Kayalp, K.**, 2007. Asenkron motor hata teşhisinde modern metotlar, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **2**, 49-57.
- [24] **Gao, X.Z., Ovaska, S.J.**, 2001. Soft computing methods in motor fault diagnosis, *Applied Soft Computing*, Vol. 1, Issue 1, 73-81.
- [25] **Nguyen, N.T, Lee, H.H.**, 2007. Bearing fault diagnosis using adaptive network based fuzzy inference system , *International Symposium on Electrical & Electronics Engineering*, HCM City, Vietnam, Oct 24- 25.
- [26] **Lou, X., Loparo, K.A.**, 2004. Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, Issue 5, 1077-1095.
- [27] **Ballal, M.S., Khan, Z.J., Suryawanshi, H.M., Sonolikar, R.L.**, 2007. Adaptive neural fuzzy inference systemfor the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No.1.
- [28] **Akyılmaz, O.**, 2005. Esnek hesaplama yöntemlerinin jeodezide uygulamaları, *Doktora tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **Özkan, İ.A., Sarıtaş, İ., Herdem, S.**, 2007. Manyetik filtreleme işleminin ANFIS ile modellenmesi, *12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*, Eskişehir, 14-18 Kasım.
- [30] **Uzundurukan S.**, 2006 Zeminlerin şişme özelliklerine etkiyen temel parametrelerin belirlenmesi ve modellenmesi, *Doktora Tezi*, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [31] **Yılmaz M., Arslan E.**, 2005. Bulanık mantığın jeodezik problemlerin çözümünde kullanılması, *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, İ.T.Ü., İstanbul, 23-25 Kasım.
- [32] **Jang J.S.R.**, 1993. Adaptive-network-based fuzzy inference system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3.

ÖZGEÇMİŞ

Erzurum'da 1981 yılında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gümüşhane'de yaptı. Lise öğrenimini Erzincan Fen Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş.'de göreve başladı. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2006 – 2007 yılları arasında askerliğini tamamladı. Halen SEDAŞ Gebze İlçe İşletme Müdürlüğü'nde görevine ve yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.