



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRÜCÜ İLE BESLENEN ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TEŞHİSİ

İbrahim AKKURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRÜCÜ İLE BESLENEN ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TEŞHİSİ

İbrahim AKKURT

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayri ARABACI

2020, 59 Sayfa

Bu çalışmada sürücüden beslenen üç fazlı asenkron motorlarda meydana gelen rulman arızalarının teşhisi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için rulmanlarda iç bilezik, dış bilezik, kafes, bilyada bölgesel ve rulmanın tamamında yapay hatalar oluşturulmuştur. Her arızalı durum ve sağlam durum için motorun stator akımları veri toplama kartı ile bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Akım verilerinin zaman düzleminde istatiksel özellikleri ve Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak frekans düzlemindeki spektral özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler ile eğitilen çok katmanlı yapay sinir ağı modelinden faydalanılarak arızaların tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akım analizi, asenkron motor, arıza teşhisi, rulman arızası

ABSTRACT

MS THESIS

BEARİNG FAULT DİAGNOSİS OF INVERTER-FED INDUCTİON MOTOR WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

İbrahim AKKURT

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHATRONICS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hayri ARABACI

2020, 59 Pages

This study focuses on the detection of the bearing faults inverter-fed three-phase induction motors. Inner ring, outer ring, cage and ball are formed as regional faults; All components are formed as a result of thermal and chemical aging in the bearings used in the experiment. Stator currents of the motor are monitored for each faulty condition and robust condition. The current values are transferred to the computer with data acqusition card. Statistical properties of the current in the time dimension are determined and also the spectral properties in the frequency dimension are determined by FFT Analysis. Detection and classification of the faults are carried out by utilizing multi-layer artificial neural network model trained with these properties.

Keywords: Current analysis, induction motor, fault diagnosis, bearing failure

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yardımlarını esirgemeyen ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hayri ARABACI'ya,

Tüm bu süreçte benden desteklerini esirgemeyen ve sabır gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim AKKURT
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET……...iv

ABSTRACT…….v

ÖNSÖZ……vi

İÇİNDEKİLER…….vii

SİMGELER VE KISALTMALAR……..ix

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ……..…….……..…....1
1.2. Literatürde Akım Analizi……...…….….....3
1.3. Tezin İçeriği…….....4

2. ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARI VE ARIZA TESPİT YÖNTEMLERİ…….……..……..7

2.1. Asenkron Motorun Yapısı.....7
2.1.1. Stator…….....7
2.1.2. Rotor……...8
2.1.3 Diğer Motor Parçaları……..8
2.2. Asenkron Motorlarda Rulman Yapısı ve Karşılaşılan Arızalar…….……8
2.2.1. Rulman Yapısı…….…..9
2.2.2. Rulman Arıza Nedenleri ve Alınabilecek Önlemler…….…….10
2.3. Rulman Durumunu İzlemede Kullanılan Analiz Yöntemleri……...12
2.3.1. Sıcaklık Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme…...…….…….13
2.3.2. Kimyasal Analiz Yardımıyla Durum İzleme…….……13
2.3.3. Akustik Yayılım Yardımıyla Durum İzleme…….……13
2.3.4. Ses Basıncı Yardımıyla Durum İzleme……14
2.3.5. Lazer Yer Değiştirme Yardımıyla Durum İzleme……...……..14
2.3.6. Titreşim Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme……...…14
2.3.7 Akım Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme…….……15

3. MATERYAL VE YÖNTEM……17

3.1. Rulman Arıza Teşhis Sistemi……...17
3.2. Veri Toplama Sistemi……...18
3.3.1. Veri Toplama Kartı…….…...19
3.3.2. Sinyal Yükseltme ve Filtreleme……..…20
3.3.3. Kayma(Aliasing)…….……20

3.3. Sinyal Analiz Yöntemleri……..……..21
3.3.1. Zaman Boyutunda Analiz……..…22
3.3.1.1. Tepeden Tepeye…….…..22

3.3.1.2. Etkin Değer……..…….…..22
3.3.1.3. Çarpıklık……...……..23
3.3.1.4. Basıklık……..……23
3.3.2. Frekans Boyutunda Analiz…….…..23
3.3.2.1. Fourier Dönüşümü……...……...24
3.3.2.2. Hızlı Fourier Dönüşümü…….25
3.3.3. Zaman-Frekans Boyutunda Analiz……..……..26
3.3.3.1. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü…….……..26
3.3.3.2. Dalgacık Dönüşümü……..…….28
3.3.3.3. Park'ın Vektör Yaklaşımı……...29
3.4. Yapay Sinir Ağları…….29
3.4.1.Yapay Sinir Hücresinin Yapısı ve Özellikleri……30
3.4.2. Yapay Sinir Ağının Yapısı ve Çeşitleri…….……32
3.4.3. Çok Katmanlı Algılayıcılar……...……..……..32
3.4.4. YSA Kullanım Alanları……...……..33

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA…….35

4.1. Deney Setinin Oluşturulması ve Verilerin Toplanması……35
4.1.1. Rulman Arızalarının Oluşturulması…….…… 36
4.1.2. Akım Verilerinin Toplanması……...37
4.1.2.1. Zaman Boyutunda Değerlendirme……...……..……38
4.1.2.2 Frekans Boyutunda Değerlendirme……...……..38
4.2. Verilerin Sınıflandırılması ve YSA Modelinin Oluşturulması……45
4.2.1. İstatiksel ve Spektral Sınıflandırma……..……..……45
4.2.2. Sınıflandırma Sonuçları……48

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…….…52

5.1 Sonuçlar……....52
5.2 Öneriler……...…..53

KAYNAKLAR…….....54

EKLER……...…57

ÖZGEÇMİŞ…….……59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

n_s : Senkron hız

p : Kutup sayısı

n_r : Rotor hızı

s : Kayma

f_s : Örnekleme frekansı

f_r : Motor mil dönme frekansı

f_i : İç bilezik karakteristik hata frekansı

f_o : Dış bilezik karakteristik hata frekansı

f_c : Kafes karakteristik hata frekansı

f_b : Bilya karakteristik hata frekansı

N_b : Rulman bilya sayısı

f_{rulman} : Rulman hata frekansı

β : Bilya temas açısı

σ : Standart sapma

w : Açısal hız

BD : Bilya çapı

PD : Dış açıklık çapı

$L10$: Rulman ömrü

c : Dinamik yük katsayısı

P : Eşdeğer yük katsayısı

n, k : Tam sayı

τ : Pencereleme öteleme değeri

F : Aktivasyon fonksiyonu

W : Ağırlık matrisi

b : Eşik değeri

Y : Nöron çıkışı

Kısaltmalar

AA : Alternatif Akım

AI : Analog Giriş (Analog Input)

ASM : Asenkron Motor

AFD : Ayrık Fourier Dönüşüm

DAQ : Veri Toplama Kartı (Data Acquisiton Card)

GND : Topraklama (Ground)

HFD : Hızlı Fourier Dönüşüm (Fast Fourier Transform)

Hz : Hertz

kHz : kilo Hertz

kW : kilo Watt

KZFD : Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

mA : mili Amper

MCSA : Motor Akım İmza Analizi (Motor Current Signature Analysis)

RMS : Etkin Değer (Root Mean Square)

SZFD : Sürekli Zamanlı Fourier Dönüşümü

T : Periyod

YSA : Yapay Sinir Ağları

ÇKA : Çok Katmanlı Algılayıcı

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar, sağlam yapıları, fiyat ve performans açısından uygun olmaları nedeniyle endüstride birçok üretim hattında kullanılmaktadır. Ülkemizde elektrik motoru kullanımına bakıldığında en çok tercih edilen motorlar asenkron motorlardır. Bu motorlarda çalıştığı süreç içerinde çevresel, elektriksel ve mekanik olarak zorlayıcı kuvvetlerden dolayı rotor, stator ve rulmanda kendini gösteren arızalar meydana gelir. Bu hataların önceden belirlenebilmesi endüstriyel sürecin ekonomik, güvenilir ve plansız duruşları önleyerek işletilebilmesi için son derece önemlidir.

Üretim yapan sistemlerde ASM'ler sayesinde elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir ve üretim gerçekleşir. Enerji dönüşümü ASM'lerin dönerek hareket etmesiyle ve rulmanlar yardımıyla gerçekleşir. Rulmanlar bu sürecin sağlıklı bir şekilde işlemesi açısından kritik göreve sahip bileşenlerdendir. Rulmanda meydana gelecek bir hata motorda onarılamayacak arızalara sebebiyet verebilir. Rulman durumunu izleme tekniklerini kullanarak hem meydana gelecek arızaların önlenmesi hem de plansız duruşların önüne geçilmesi sağlanır.

Endüstriyel sürecin gelişmesiyle birlikte üretim durumu ve imkanlara bağlı olarak değişik bakım yöntemleri geliştirilerek uygulanmaktadır. Üretim yapan sistemlerde düzeltici veya arıza sonrası bakım, periyodik veya zaman tabanlı bakım ve öngörülü veya durum tabanlı bakım olmak üzere üç yöntem uygulanmaktadır (Zhou, 2016).

Düzeltici veya arıza sonrası bakım çalışması; arıza öncesi müdahale etme durumunun olmadığı, arıza oluştuktan sonra uygulanan bakım şeklidir. Genellikle arızalan elemanın yenisiyle değiştirilerek arıza giderilir. Bir otomobilde arızalanan fan kayışının değiştirilmesi, bir basınç algılayıcısının yanlış değerler gösterdiğinde değiştirilmesi veya yeniden kalibrasyonu düzeltici bakım örnekleridir.

Periyodik veya zaman tabanlı bakım çalışması; bir sistem parçasının önceden belirlenmiş zaman aralıklarıyla veya işletme koşullarında önceden belirlenen kriterleri sağlamak maksadıyla uygulanan bakımdır. Bakım periyodu genellikle tecrübe ve elde bulunan veriler kullanılarak belirlenir. Bir cihazın belli zaman aralıklarıyla kalibrasyonun yapılması, üreten firma tarafından belirlenen bir otomobildeki motor yağı değişimi, şeker fabrikaları ya da çimento fabrikalarında uygulanan bakımlar da zaman tabanlı bakım çalışmasıdır. Periyodik bakım, beklenmeyen arızaları önlenmede etkili olmasına rağmen ekonomik açıdan avantajlı değildir. Değişimi yapılacak sistem

elemanın kullanılabilirliğine bakılmaksızın önlem amacıyla parçaları değiştirilerek gereksiz maliyete neden olabilir (Orhan, 2003).

Öngörülü veya durum tabanlı bakım çalışması, sistemdeki bir parçanın performans verilerinin sürekli veya belli zaman aralıklarında izlenmesi ve bunların önceden belirlenen karakteristik özelliklerle karşılaştırılması mantığına dayanmaktadır. Bu yöntemle, sürecin çalışmasını devam ettirebilmek için nasıl önlem alınması gerektiği belirlenir. Diğer yöntemlerden farkı, sistemdeki bir parçada başlamakta olan değişikliklerin izlenerek arıza oluşmadan önce tespit edilmesi ve bakımın gerektiği anda uygulanmasıdır. Durum izleme tabanlı bakım çalışması zamana bağlı değildir ve gerektiğinde yapılır. Elektrik makinelerinde akım, voltaj, titreşim, sıcaklık, manyetik akı, tork gibi parametreleri izlemek durum izlemeye örnek olarak verilebilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için sistem parçalarının durum izleme çalışmaları gerçekleştirilir ve arıza başlamadan önce müdahale edilerek hangi karakteristik özelliklerin meydana geldiği belirlenebilir. Arızanın başlangıcını ve gelişimini gösteren bu özelliklerden faydalanılarak sistem elemanları gerektiğinde devreden çıkartılır ve bakım uygulanır. Bu sayede sistemdeki zamansız duruşlar önlenip, sistemin güvenilir ve ekonomik olarak çalışması sağlanır (Orhan, 2003).

Bu tez çalışmasında sürücü ile beslenen asenkron motorlarda rulman arızalarının akım parametresinin durum izleme sistemi gerçekleştirilmiştir. Rulmanın herhangi bir bölgesinde meydana gelecek arızalar zaman ve frekans boyutunda her hatalı duruma göre farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Motordan toplanan akım örnekleri veri toplama kartıyla bilgisayar ortamına aktarılarak zaman düzleminde istatiksel özellikleri ve frekans düzleminde spektral özellikleri belirlenmiştir. Özellik çıkarma işleminden elde edilen veriler çok katmanlı yapay sinir ağı modelinin giriş parametreleri olarak kullanmıştır ve ağ eğitilmiştir. Böylece sağlam ve hatalı rulmanlara ait tespit ve sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

1.1. Tezin Amacı

Rulmanlar, üretim yapan tesislerde motorların dairesel hareketlerindeki kayıpların önlenmesi, sürtünmenin en aza indirilmesi ve güç aktarımından en az düzeyde ödün verilerek iletim sırasında kritik rol oynayan sistem elemanlarıdır. Rulmanda meydana gelecek bir hasar yük aktarımı sırasında daha büyük arızalara neden

olacaktır. Bu nedenle arızanın kaynağını önceden belirlemek sistemin sağlıklı bir şekilde işleyişine katkı sağlayacaktır.

Günümüzde teknolojik gelişmeler sayesinde rulmanda oluşan arızalar akıllı durum izleme teknikleri ile önceden belirlemeyi mümkün kılmaktadır. Öngörülü bakım çalışması uygulanan endüstriyel sistemlerde arızaların önceden tespiti yapılarak sürecin ekonomik ve kesintisiz işlemesi sağlanabilir. Bu sayede sistemde meydana gelecek ani kesintiler önlenir ve daha büyük arızalara sebebiyet vermeden arızalı rulman bakıma alınır.

Asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti yapılırken sensörler yardımıyla akım, titreşim, sıcaklık gibi değişkenlerden örnekler alınarak toplanan verilerdeki değişim arızanın karakteristik özelliklerini ortaya koyar ve belirlenen karakteristiğe göre arıza teşhisi yapılır. Bu tez çalışmasında arıza tespiti yapılırken stator akımı yardımıyla durum izleme yöntemi tercih edilmiştir. Asenkron motorlarda karşılaşılan arızaların tespitinde kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi akım yoluyla durum izleme tekniğidir. Bu yöntemin fazla tercih edilmesinin başlıca nedeni motorda meydana gelen rotor, stator, rulman ve eksen kaçıklığı gibi birçok arızanın tespitine olanak sağlamasıdır. Motor akım işaret analizi olarak adlandırılan bu yöntem ile ASM'den alınan akım örnekleri sinyal işleme teknikleri yardımıyla zaman-frekans boyutunda analiz edilir ve arızanın kaynağına göre hata karakteristik özellikler belirlenir. Bu çalışmada akım yoluyla analiz yönteminin tercih edilmesindeki amaç düşük maliyetli bir sistem olması ve bütün endüstriyel uygulamalara uyarlanabilir olmasıdır.

Günümüz şartlarında endüstride kullanılan indüksiyon motorlarının değişken hızlarda kullanılmasını gerekli hale gelmiştir. Asenkron motorların kontrolü oldukça zor olduğundan motor hızını değiştirmek sadece frekans ve kutup sayısını değiştirerek mümkündür. Geliştirilen değişken hızlı sürücüler sayesinde frekans değiştirilerek ASM'ler istenilen hızda kontrolü sağlanabilir. Günümüzde üretim yapan tesislerde bulunan ASM'lerin çoğunluğu sürücüler ile kontrol edilmektedir. Bu çalışmada da güç kaynağı ve motor kontrolü için sürücü tercih edilmiştir.

1.2. Literatürde Akım Analizi

Asenkron motorlar üzerinde arıza tespiti çalışmalarına bakıldığında çok sayıda durum izleme yönteminin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Mevcut yöntemler incelendiğinde akım izleme yönteminin diğer durum izleme yöntemlerine göre maliyet

düşüklüğü, kullanım kolaylığı gibi avantajların yanı sıra ASM'lerde karşılaşılan birçok arızaların teşhisinde kullanılması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Rulman hatalarını tespit etmeye yönelik çalışmalar zaman düzlemi, frekans düzlemi ve hem zaman hem frekans düzlemi bilgileri ile çalışan yöntemleri içerir. Genellikle, farklı düzlemlerde bulunan istatistiksel parametreler çıkartılarak hata karakteristiklerini içeren bilgiler elde edilir. Bu bilgiler sayesinde çeşitli sınıflandırma yöntemi kullanılarak arıza teşhisi yapılır.

Başaran ve Ece, (2009) sürücüden beslenen bir ASM'de hız kontrolüyle mekanik arızaların teşhisi ile ilgili bir yöntem önermişlerdir. Deneysel çalışmada arızalı ve sağlam ASM'lerden stator akım sinyalleri 4 farklı hız ve 3 farklı yük koşulunda, gerilim kontrollü bir frekans dönüştürücü yoluyla toplanmıştır. Dalgacık dönüşümü kullanılarak stator akımlarından elde edilen katsayılar ile akım sinyallerinin özellik çıkarım elde edilmiş ve bir sınıflandırıcı kullanılarak arıza teşhisi gerçekleştirilmiştir.

Zhou ve diğerleri, (2012) yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda karşılaşılan mekanik arıza tiplerinden birisi olan rulman arızalarını Hilbert Zarf Dönüşümü yöntemiyle tespit etmişlerdir.

Ergin ve diğerleri, (2012) yaptıkları çalışmada iç bilezik ve dış bilezik olarak rulman arızası, stator arızası, kırık rotor çubuğu arızası ve açık devre sargı arızaları bulunan motorlarda stator akımı kullanılarak arıza tespiti yapılmıştır.

Hulugappa ve diğerleri, (2012) çalışmalarında titreşim, stator akımı, akustik yayılım, şok darbe ve yüzey analiz ölçümlerini kullanarak asenkron motorda bulunan hasarlı rulman üzerinde farklı yükler ve hızlarda karşılaştırma yapmışlardır. Asenkron motor, kayış, kasnak ve yük sisteminden hazırlanan deney düzeneği, motorda bulunan hasarlı rulman durumunu gözlemek için oluşturulmuştur. Vibrasyon ölçümü için piezoelektrik ivmeölçer ve HFD analizi uygulanmış, stator akım ölçümü için akım sensörü ve HFD analizi uygulanmış, akustik yayınım ölçümü için güç çevirici, amplifikatör ve filtreleme, şok darbe ölçümü için el tipi darbe ölçer kullanılmıştır.

Haddad ve diğerleri, (2015) 1.1 kW güce sahip asenkron motorda yüksüz, %50 yüklü ve %100 yüklü olacak şekilde motoru çalıştırarak dış bilezik arızası ve arıza şiddetini tespit etmişlerdir. Topladıkları akım sinyali örneklerini Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü kullanarak analiz etmişler ve Doğrusal Ayırtaç Analizi ile sınıflandırılarak dış bilezik arızasını ve arızanın şiddetini tespit etmişlerdir.

Misra ve Agarwal, (2015) çalışmalarında akım ölçümlerini izleyerek asenkron motorlarda oluşan arızaların tespitini ve tanısını araştırmışlardır. Ölçümlerde, sinyali

algılamak için kullanılan akım transformatörü ve çıkışına bağlanan dirençli şönt ve akım sinyallerini işleyen spektrum analiz yöntemini kullanmışlardır. Bu bağlamda endüstriyel uygulamalarda arıza tespiti için kullanılan motor akım sinyal analiz yöntemini içeren iki adet örnek sunmuşlardır. Bu örneklerde bir adet sağlam ve bir adet arızalı motor kullanmışlardır. Akım sinyalleri toplandıktan sonra, spektral analizi yapılarak frekans tabanlı spektrum grafiğine dönüştürülmüş ve sinyalleri işlenmiştir. Arızalı motorun aynı frekans düzleminde, sağlam motora göre akım şiddetinin desibel cinsinden değerinin arttığı tespit edilmiştir.

Leite ve diğerleri, (2015) yaptıkları çalışmada asenkron motorlarda rulmanda meydana gelen bölgesel hatalar üzerinde bir yöntem önermişlerdir. Motor akım işaret analizi yöntemiyle hatalı rulmana sahip motorun stator akım sinyalinden örnekler toplayarak spektral kurtois ve envelope spektrum tabanlı bir algoritma oluşturmuşlardır.

Kompella ve diğerleri, (2017) çalışmalarında üç fazlı asenkron motorlarda rulman arızalarının tespitinde kullanılan stator akım yöntemiyle kafes ve dış bilezikte oluşan arızalar üzerinde deneyler yapmışlardır. Akım sinyallerinden topladıkları örnekleri frekans spektrumuna aktarmış ve çeşitli dalgacık dönüşüm teknikleri uygulayarak arızayı tespit etmişlerdir.

Pandarakone ve diğerleri, (2017) asenkron motorlarda rulman arızalarının geleneksel titreşim izleme yöntemi yerine stator akım spektrumu yöntemini önermişlerdir. Akım sinyalini HFD yöntemiyle frekans boyutuna aktarmış ve Support Vector yöntemini kullanarak rulmandaki noktasal hataları tespit etmişlerdir.

Elbouchikhi ve diğerleri, (2017) çalışmalarında asenkron motorlarda rulman hatalarının tespit etmek için motor akım işaret analizi yöntemini önermişlerdir. Yaptıkları deneylerde akım örneklerini Hilbert Transform yardımıyla frekans düzleminde aktarıp arıza tespiti yapmışlardır.

1.3. Tezin İçeriği

Bu çalışmada asenkron motorlarda rulman arızası teşhisi için akım transformatörü yardımıyla örnekler toplanıp veri toplama kartı kullanılarak bilgisayar ortamında Labview programına aktarılmıştır. Bu program yardımıyla akımın zaman boyutunda istatiksel analizi ve Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) tekniği kullanılarak frekans düzleminde analizler yapılmıştır. Zaman ve frekans düzleminden belirlenen özellikler yapay sinir ağlarının test ve eğitiminde kullanılarak arıza teşhisi konulmuştur.

Bölüm 2’de ASM’lerin yapısı, meydana gelen arızalar, rulman yapısı ve arıza çeşitleri, arıza nedenleri, rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

Bölüm 3’de rulman arızalarının tespitinde kullanılan veri toplama ve ölçme sistemi gereksinimleri, sinyal analiz yöntemleri, motor akım işaret analizi, yapay sinir ağları ve en çok kullanılan YSA modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

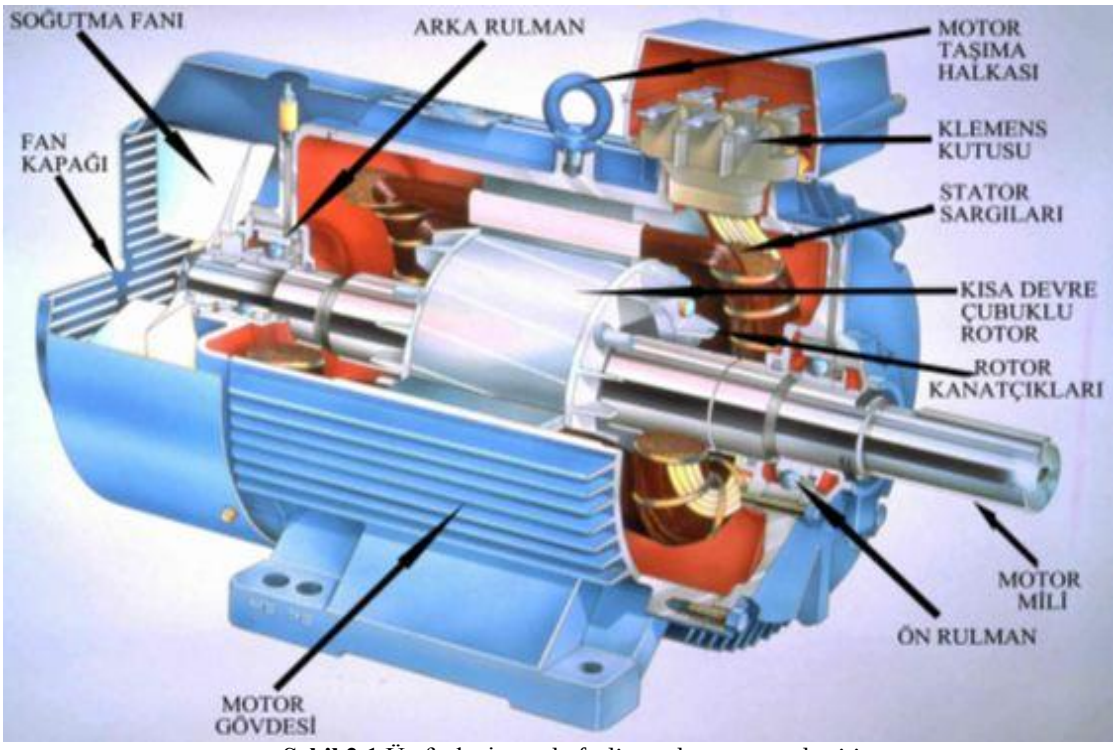
Bölüm 4’de rulmanda meydana gelen dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilya arızaları yapay olarak oluşturulmuştur. Sağlam ve hatalı rulmandan elde edilen deneysel bulgular grafiksel olarak gösterilmiştir ve ulaşılan sonuçlar açıklanmıştır.

Bölüm 5’de yapılan çalışma sonucunda ASM’lerde rulman arızalarının teşhisinde ulaşılan sonuçlar ve öneriler anlatılmıştır.

2. ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARI VE ARIZA TESPİT YÖNTEMLERİ

2.1. Asenkron Motorların Yapısı

Asenkron motorlar; stator, rotor, gövde, rulman, pervane, kapaklar ve klemens kutusundan meydana gelir. Sekil 2.1'de üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motora ait fotoğraf verilmiştir.



Şekil 2.1 Üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kesiti

2.1.1.Stator

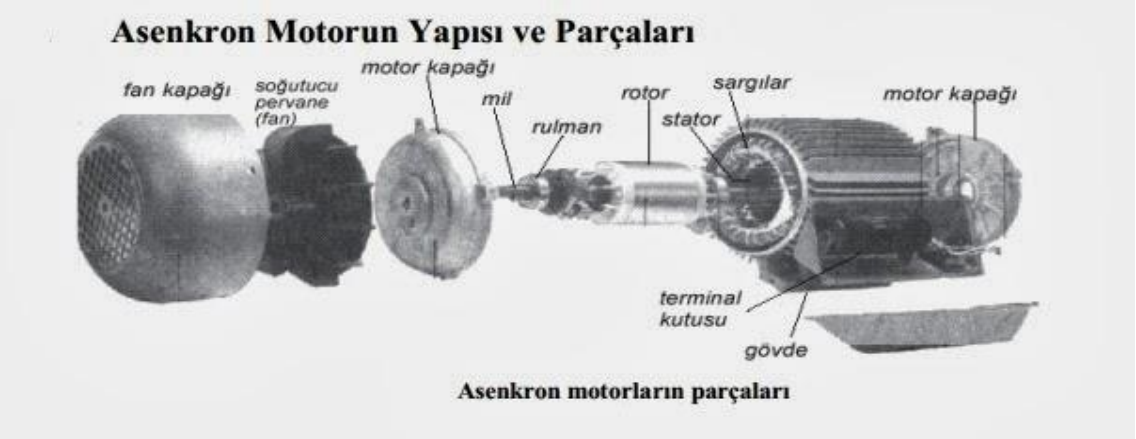
Stator, nüve ve sargılarından meydana gelir. Nüve, 0.4-0.5 mm kalınlığında silisyumla kaplanmış, üzerine oluklar açılmış saçların preslenmesiyle elde edilir ve motor gövdesinin iç kısmına montajı yapılır. Sargılar, özel kalıplarda sarılmış bakır tellerin, belirli bir sarım şekli esas alınarak nüve oluklarına yerleştirilmesiyle elde edilir. Sargıların uç kısmı motorun klemens kutusunda belirlenen yerlere bağlanır. Bu bağlantı üzerinden uygulanan üç faz alternatif akım gerilimleri ile statorda rotoru döndüren döner manyetik alanlar üretilmektedir. Şekil 2.2'de stator ve diğer motor parçaların bulunduğu bir görsel verilmiştir.

2.1.2. Rotor

Asenkron motorlarda mekanik enerjinin üretildiği parçadır. Rotor asenkron motorun mili üzerine yerleştirilerek motora montajı yapılır. Sincap kafesli (kısa devre çubuklu) rotor ve sargılı (bilezikli) rotor olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.2'de rotor ve diğer motor parçaları gösterilmiştir.

2.1.3. Diğer Motor Parçaları

Motor gövdesi dış etkilere karşı alüminyum, demir veya alaşımdan üretilir. Kapaklar sayesinde rotor, stator içinde merkezi olarak yataklanır. Rulmanlar, rotorun kolay bir şekilde dönmesini sağlayan, güç aktarımı sırasında minimum seviyede kayıp ile dönme hareketine yardımcı olan parçalardır. 0-20 KW güç aralığındaki asenkron motorlar havayla soğutulur. Soğutma fanları motorun dönen miline bağlanması ile gövdede artan sıcaklığı düşürmeye yardımcı olur. Şekil 2.2'de motor parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Asenkron motor parçaları

2.2. Asenkron Motorlarda Rulman Yapısı ve Karşılaşılan Arızalar

Asenkron motorlar genellikle ideal olmayan çalışma koşullarında, hatta bozucu ortamlarla karşı karşıyadırlar. Bu motorlar, elektriksel ve mekanik olarak birçok arızanın oluşabileceği elverişsiz çalışma koşulları ve ağır görev döngüleri altında çalışırlar. Çevresel etkilerden ve dış ortamdan kaynaklanan nem, toz, ısı gibi etkiler ve bunların yanında aşırı yükler, yetersiz yağlanma, sıklıkla yapılan dur-kalk işlemleri, yetersiz soğutma gibi çalışma faktörleri motorlar üzerinde önemli olumsuz etkilere yol açar. Böyle zor koşullarda çalışan motorlarda elektriksel ve mekanik birçok arıza

meydana gelmektedir. Bu arızaların önceden belirlenmesi kritik önem taşımaktadır (Gaeid, 2010).

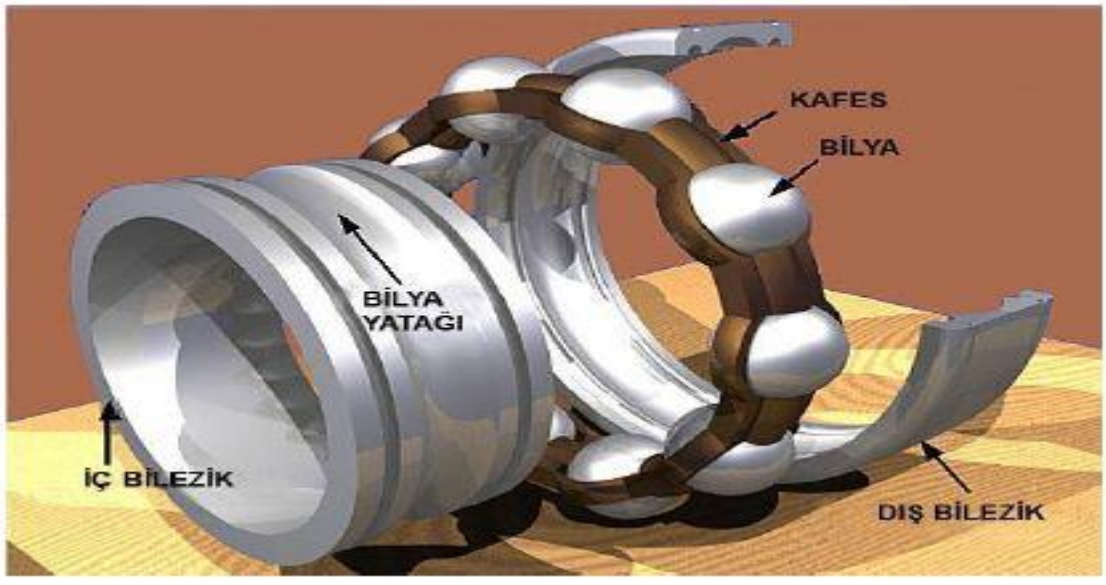
Öngörülü bakım çalışmalarının sonuçlarına bakıldığına asenkron motorlarda meydana gelen arızaların oluşum yüzdeleri çizelge 2.1'de verilmiştir. Tabloya göre rulman arızaların tüm arızalar içinde yüksek orana sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1 Asenkron motorlarda arıza sebepleri

Rulman Arızaları	%41
Stator Arızaları	%37
Rotor Arızaları	%10
Diğer Arızalar	%12

2.2.1 Rulman Yapısı

Rulman, iç bilezik ve dış bilezik arasındaki yuvarlanma elemanları yardımıyla en az düzeyde sürtünme ve rotor milinin belirlenen yöndeki hareketlerini kolaylaştıran, ters yönde hareketi de engelleyen yataklardır. Rulmanlar iç bilezik, dış bilezik, bilya, kafes ve sızdırmazlık kapağından oluşmaktadır. Bazı rulmanlarda ek parçalar da bulunmaktadır. Makaralı rulmanlarda kullanılan kılavuz ringi ek parçaya örnek verilebilir. Şekil 2.3'te en çok tercih edilen rulman çeşitlerinden biri olan bilyalı rulmanın iç yapısı ve rulmanı oluşturan parçalar gösterilmektedir (Aktürk, 2002).



Şekil 2.3 Bilyalı rulman yapısı

İç bilezik, motor miline montajı yapılır ve genelde dönen parçadır. İç bilezikte bulunan oyuk silindirik veya konik şeklindedir. Yuvarlanma yüzeyi boyutlarına göre farklı formlarda bulunan yuvarlanma elemanlarıyla birlikte çalışmaktadır. (Yılmaz, 2008).

Dış bilezik, motora montajı yapılır ama dönme hareketine katılmaz. Dış bilezikte bulunan yuvarlanma yüzeyleri farklı formlarda bulunan yuvarlanma elemanlarıyla birlikte çalışırlar. (Yılmaz, 2008).

Yuvarlanma elemanı çoğunlukla bilya veya makara şeklindedir. Bu parçalar bileziklerde bulunan yuvarlanma yüzeyleri arasında hareket ederek ince yağ filmi sayesinde rulmanın yükünü en az sürtünmeyle iletir (Yılmaz, 2008).

Yuvarlanma elemanlarının çalışma sırasında yetersiz yağlama koşullarında birbirine temas etmesini önleyen parçaya kafes denilmektedir ve rulmanlarda yuvarlanma elemanlarını birlikte tutulmasını sağlamaktadır (Yılmaz, 2008).

Kapak ya da keçe, rulman ömrünün uzamasında etkili olan parçalardır. Kapak, yuvarlanma yüzeyini ve elemanlarını pisliklerden korur. Kılavuz ringi rulmanda yuvarlanma elemanlarına kılavuzluk yapar ve mille paralel dönmesini sağlayarak yükleri eşit dağıtmaya yardımcı olur (Yılmaz, 2008).

2.2.2. Rulman Arıza Nedenleri ve Alınabilecek Önlemler

Rulmanlar çalıştıkları süre içerisinde korozyon, kirlenme, hatalı yağlama, uygun olmayan montaj, kimyasal ortamlarda çalışması gibi nedenlerle dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilyalarda kendini gösteren arızalara maruz kalırlar. Uygun olmayan çalışma koşulları nedeniyle rulmanda yorulma sonucu aşınmalar başlar ve rulmanda hasarlar meydana gelir. Rulmanlar uygun çalışma koşullarında kullanıldıklarında ve çevresel faktörlerin etkisinde kalmadan çalıştıklarında çalışma ömrünü tamamlayana kadar arızaya sebebiyet vermezler. Rulmanlar üzerinde yapılan araştırmalara göre bugünkü çalışma koşullarında rulmanların % 34'ünün ömrünü tamamladığı tespit edilmiştir. Bu sebeple üretim sürecinde zamansız kesintileri önlemek için çalışma koşullarını iyileştirmek gerekmektedir. Çizelge 2.2'de rulmanda en sık karşılaşılan hasarlar ve muhtemel nedenleri ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 2.2 Rulmanlarda en sık karşılaşılan arızalar ve nedenleri

Hasar adı	Hasar yeri	Neden												
		Stok-Nakliye	Montaj	Mil Yatağı	Kimyasal sıvı	Sıcaklık	Yağlayıcı	Yağlama	Aşırı yük-akım	Moment	Ultra yük	Yüksek hız	Titreşim-sarsıntı	Rulman Seçimi
Pullanma	Yuvarlanma yolu, yüzeyi		■	■	■		■	■	■	■				■
Soyulma	Yuvarlanma yolu, dış yüzey			■	■		■	■			■	■		
Kazınma	Kafes yüzeyi		■	■	■		■	■	■	■			■	
Kırılma	Bilezikler	■	■	■					■	■				
Çatlak	Bilezikler, Bilyalar		■	■		■			■	■				
Aşınma	Yuvarlanma yolu, yüzeyi		■		■		■	■						
Çizik	Yuvarlanma yolu, yüzeyi	■					■	■					■	
Çukur	Yuvarlanma yolu, yüzeyi				■		■	■						
Korozyon	Yuvarlanma yolu, yüzeyi, kafes, bilezik	■	■	■	■	■	■	■						
Isınma	Kafes, bilya, bilezik		■	■	■		■	■	■	■		■		■
Montaj kus.	Yuvarlanma yolu, yüzeyi		■	■										
Sürtme	Mil ve yatak ile temas	■	■	■			■	■	■			■	■	
Sürünme	Montaj yüzeyi		■	■		■	■	■	■			■		

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi rulman arızalarının oluşumunda birçok neden vardır. Günümüz şartlarında işletme koşullarına bakıldığında arıza nedenlerini tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Ama alınacak tedbirler sayesinde sistemde arıza kaynaklı herhangi bir duruşa sebebiyet verecek durumlar önlenebilir. Örneğin, motor milinden akan akımlar rulmana zarar vererek ömrünü kısaltmaktadır. Yalıtılmış rulman, milin topraklanması veya faraday kalkanı kullanarak rulmanda oluşacak akımların önüne geçilebilir. Ancak günümüzde un fabrikaları, çuval üretim fabrikaları gibi tozlu ortamlarda rulmanlar ömrünü tamamlayamamaktadır. Üretimin güvenirliği açısından arızalara önlem alınamayacak durumlarda rulmanın durumunu duruşa neden olmadan belirlemek son derece önemlidir.

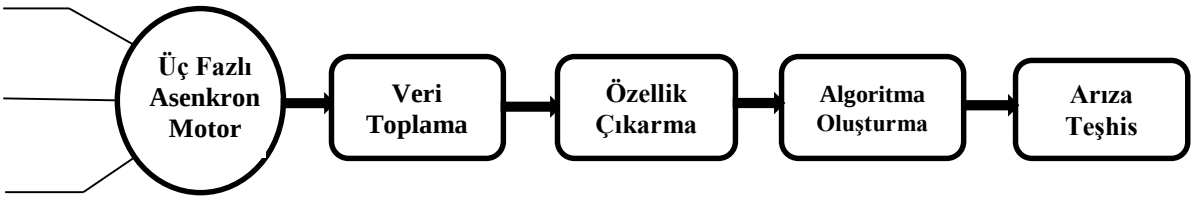
Rulmanlarda meydana gelen hasarlarda dört önemli aşama vardır. İlk aşamada; spektrum grafiğinde karakteristik hata frekansına ait harmonikler ortaya çıkar. Arızanın ilk belirtileri genellikle 20 KHz ile 60 KHz gibi ultrasonik frekans aralığında meydana

gelir. İkinci aşamada; arızanın büyümesiyle oluşan harmoniklerin sayısı artar ve dönme hızıyla titreşim frekansları modülasyona uğramasından kaynaklanan yan bantlar oluşur. Bu bantların genliği kaynak frekansının genliğini geçtiğinde hasarın önemli boyuta ulaştığı anlaşılır. Üçüncü aşamada; durum izleme sinyalinden elde edilen grafikte hasar frekans harmonikleri ve yan bantlara ilave olarak temel hasar frekansı da ortaya çıkar. Yan bant oluşumlarındaki artış rulman hasar frekanslarındaki gibi göründüğü zaman hasar önemli seviyeye gelmiştir ve rulman değiştirilmelidir. Dördüncü aşamada; rulmanda meydana gelen hasar büyümeye devam ettiği için rulman parçalarının bozulmasını hızlandıran boşluklar artar ve parçaların arasındaki çarpmaları hızlandırır. Çarpmalar nedeniyle akım-spektrum grafiğinde geniş bant aralığında gürültü oluşur. Rulman hasar frekansları bu aşamada dağınık ve gürültülü görünümdedir ve başka arızalara sebebiyet vermeden rulmanın değiştirilmesi gerekir. (Akar, 2009).

2.3 Rulman Durumunu İzlemede Kullanılan Analiz Yöntemleri

İndüksiyon motorlarında oluşan arızalarının durumunu incelemek için kullanılan birçok yöntem vardır. Motorun herhangi bir parçasında meydana gelecek bir arıza akım, sıcaklık, titreşim, moment, verim gibi parametrelerde değişikliğe neden olur. Parametrelerde oluşan bu değişiklikler sayesinde çeşitli analizler yapılarak arıza tespiti yapmak mümkündür.

Rulman durumunu izlemede kullanılan analiz yöntemlerinin çoğu sistem tasarımı açısından benzerlik gösterir. Arıza tespitinde kullanılacak ve arızanın durumuna göre değişkenlik gösteren motor parametresinin durumu izlenerek veriler toplanır. Bu veriler sinyal işleme teknikleri kullanılarak ön işleme alınarak analiz edilir ve arıza tespit algoritması geliştirilerek teşhis konur. Şekil 2.4'te tipik bir arıza tespit sisteminin blok gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4 Tipik bir arıza tespit sistemi

Asenkron motorlarda rulman arızalarının teşhisinde başlıca kullanılan metotlar akım, titreşim, sıcaklık, ses basıncı, akustik yayılım, lazer yer değiştirme ve kimyasal analiz olarak sınıflandırılabilir.

2.3.1. Sıcaklık Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme

Motor kayıplarından dolayı çalıştığı sürece ısı üretmektedir. Motorun uzun süreli sıcak olarak çalıştırılması ömrünü azaltacaktır. Sıcaklığın yüksek olması etkisini artıracaktır. Rulmanlar, rulmanda bulunan yağ ve stator sargı yalıtkanları yüksek ısıdan en çok etkilenen motor parçalarıdır (Taner, 1991). Bu nedenle sıcaklığının takip edilmesi makine ve rulman sağlığı açısından önem arz eder (Maru, 1989). Sıcaklık ölçümleri motor üzerine fiziksel olarak temas edecek şekilde yerleştirilen sıcaklık algılayıcıları ile ya da termal görüntüleme yoluyla gerçekleştirilir. Rulman sıcaklığındaki artışın; sargı sıcaklığında artış, motorun hızı, sıcaklık dağılımı, yağın viskozitesi ve rulman yağı gibi birçok nedeni olabilir (Ayaz, 2002). Ayrıca sargı sıcaklık artışı ve rulman sıcaklık artışı arasında oluşan ilişki incelenerek durum izlemesi yapılabilir (Maru ve Zotos, 1989).

2.3.2. Kimyasal Analiz Yardımıyla Durum İzleme

Rulmanda bulunan yağ, sıcaklığın etkisiyle bozulduğu esnada katı, sıvı ve gaz olarak kimyasal ürünler oluşur. Bunun yanı sıra rulman bozulmasına bağlı parçacık aşınmasıyla da yağ analiz edilebilir. Yağ bozulmasından ve aşınan parçacıkların tespiti yapılarak rulman durumu ile ilgili bilgilere ulaşılsa bile, bu yöntem sadece sıvı yağlayıcı kullanıldığında uygulanabilir. Kimyasal analiz yapılarak durum izleme 50 KW'dan büyük güce sahip makinelerde kullanılan sıvı yağlayıcı rulmanlarda ve sürekli yağlamalı yataklarda uygulanabilir. Rulmanın içine gres ile doldurulup kapağı kapatılan küçük veya orta güçteki motorların kimyasal analizini yapmak uygun değildir (Zhou, 2007).

2.3.3. Akustik Yayılım Yardımıyla Durum İzleme

Yüksek gürültüye sahip ortamlarda, titreşim ölçümü yardımıyla durum izleme yöntemiyle hata tespiti yapmak çok zor olacağından akustik yayılım yöntemi

geliştirilmiştir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı ise yüksek sistem maliyeti gerektirmesidir (Zhou, 2007).

2.3.4. Ses Basıncı Yardımıyla Durum İzleme

Ses basıncı, rulman arızalarının gürültü yayılımı üzerinde oluşan etkinin bilinmesinden bu yana durum izleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle rulman durumu izlenirken 0 Hz ve 20 kHz frekans bandında ses kaydedilmektedir. Bu sesler yardımıyla, titreşimle durum izlemede olduğu gibi karakteristik hata frekansları belirlenebilir. Rulmanda oluşan sesin mikrofonla kaydedilebilmesi ve bozulan rulmandaki sesin kulakla duyulabilmesi sayesinde ses dinleme yöntemiyle arıza tespiti yapılabilir. Sağlıklı bir tespit yapılabilmesi için arka plan gürültülerinin ve diğer motor parçalarından gelen istenmeyen gürültünün engellenebilmesi gerekmektedir. Aksi halde yanlış sonuçlar elde edilir. Bu nedenle üretim yapan sistemler, birçok makine içerdiği için ses dinleme yöntemi uygulanabilir değildir (Zhou, 2007).

2.3.5. Lazer Yer Değiştirme Yardımıyla Durum İzleme

Titreşim ile yapılan ölçümler ivme-ölçer sensöründen kaynaklanan ve bu süreçlerde bazı hesaplama hataları nedeniyle doğru sonuçlara ulaşmak zor olabilir. Böyle hataları önlemek amacıyla, rulman arızasına göre yer değiştirmenin lazer algılayıcı yardımıyla ölçülmesi üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Lazer yer değiştirme yöntemi rulmandaki titreşimin ölçülmesi için farklı bir yöntem olsa bile, rulman yüzeyine lazer algılayıcı yerleştirerek ölçüm yapılacağından uygulama açısından oldukça zordur (Zhou, 2007).

2.3.6. Titreşim Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme

Makine üzerine yerleştirilen ivme algılayıcılarından alınan titreşim verileri ile rulman hatalarını belirlenebilmektedir. Bu verilerin sağlıklı bir biçim toplanabilmesi ve arıza tespitinin yapılabilmesi için algılayıcının yerleştirileceği yer büyük önem taşımaktadır. Sensörün doğru şekilde yerleştirilmesi, makine tipi, rulmanın tipi ve konstrüksiyona göre değişir. Algılayıcının doğru yerleştirilmemesi alınan sinyallerin değerlendirmesi yapılırken doğru olmayacağını göstermektedir (Arslan, 2003).

2.3.7. Akım Ölçümü Yardımıyla Durum İzleme

Elektrik makinelerinde dönme hareketi, rotor-stator arasında kalan hava aralığındaki manyetik akıyla sağlanır. Hava aralığı akısındaki herhangi bir düzgünsüzlük motorun çektiği akımı etkiler. Rulmanın arızalı olması rotor boyunca oluşan hava aralığının bozulmasına sebep olacağı için buradaki manyetik akıyı değiştirecek ve dolayısı ile stator akımını etkileyecektir. Stator akımındaki bu etkiler rulman hatalarının tespitinde kullanılabilir (Zarei, 2007).

Rulman arızası motorun hava aralığında değişime sebep olmasıyla stator akımındaki kaynak frekansı ve rulmana ait karakteristik frekanslar ile alakalı olarak eşitlik (2.1)'de bağıntısıyla verilen frekansları üretir (Zarei, 2007).

$$f_{rulman} = \left| f_r \pm m * f_{o,i,c,b} \right| \quad (2.1)$$

m = 1,2,3,…

f_r = şebeke frekansı

$f_{o,i,c,b}$ = dış ve iç bilezik, kafes, bilya karakteristik rulman titreşim frekansları

f_{rulman} = akımda oluşan rulman hata frekansı

Eşitlik 2.1 'de verilen rulman hata frekans hesabı şebekeden beslenen asenkron motorlarda rulman arızalarının akım yoluyla tespiti için kullanılmaktadır. Sürücüden beslenen asenkron motorlarda arıza tespiti yaparken motoru sürmek için ayarlanan frekans ve harmoniklerini dikkate almak gerekmektedir. Bu yüzden frekans değişikliği ile kontrolü yapılan asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti yapılırken eşitlik 2.2'de verilen formül ile rulman hata frekans hesabı yapılması gerekmektedir.

$$f_{rulman} = \left| n * f_r \pm m * f_{o,i,c,b} \right| \quad (2.2)$$

$$f_{dış\ bilezik} = \left| n * f_r \pm m * f_o \right| \quad (2.3)$$

$$f_{iç\ bilezik} = \left| n * f_r \pm m * f_i \right| \quad (2.4)$$

$$f_{kafes} = |n * f_r \pm m * f_c| \quad (2.5)$$

$$f_{bilya} = |n * f_r \pm f_c \pm m * f_b| \quad (2.6)$$

n = motor dönme frekansı harmonik kat sayısı

Asenkron motorlarda arıza teşhisinde kullanılan durum izleme yöntemleri karşılaştırıldığında akım yardımıyla analiz yönteminin diğer yöntemlere göre arıza teşhis kapsamının daha geniş bir uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir. Akım yoluyla analiz yönteminde ASM'lerde meydana gelen rotor, stator, izolasyon, rulman ve yataklama arızalarını tespit etmek mümkündür.

Çizelge 2.3'te rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemler arasındaki farklar gösterilmiştir (Zhou, 2007).

Çizelge 2.3 Rulman durumunu izlemede kullanılan yöntemler arası farklar

Durum İzleme Yöntemi	**Avantajlar**	**Dezavantajlar**
Kimyasal Analiz	• Kolay analiz imkanı sağlar.	• Kapaklı rulmanlarda uygulanamaz.
Sıcaklık Ölçümü	• Standarda sahiptir (IEE841).	• Sıcaklığı artıran birçok neden vardır ve arızanın kaynağı belirlenemez
Akustik Yayılım	• Sinyal-gürültü oranı yüksektir.	• Akustik algılayıcı gereklidir. • Maliyeti yüksektir.
Lazer Yer Değiştirme	• Rulman titreşim ölçümüne alternatiftir.	• Lazer algılayıcı gerektirir. • Uygulaması zordur.
Ses Basıncı	• Ölçümü kolaydır.	• Arka planda oluşan gürültünün engellenmesi gerekir.
Titreşim Ölçümü	• Güvenilirdir. • Standarda sahiptir (ISO10816).	• Pahalıdır. • Uygulaması zordur. • Algılayıcı hataya neden olabilir.
Akım Analiz	• Maliyeti düşüktür • Uygulanması kolaydır. • Kullanımı kolaydır.	• Gelişim sürecindedir.

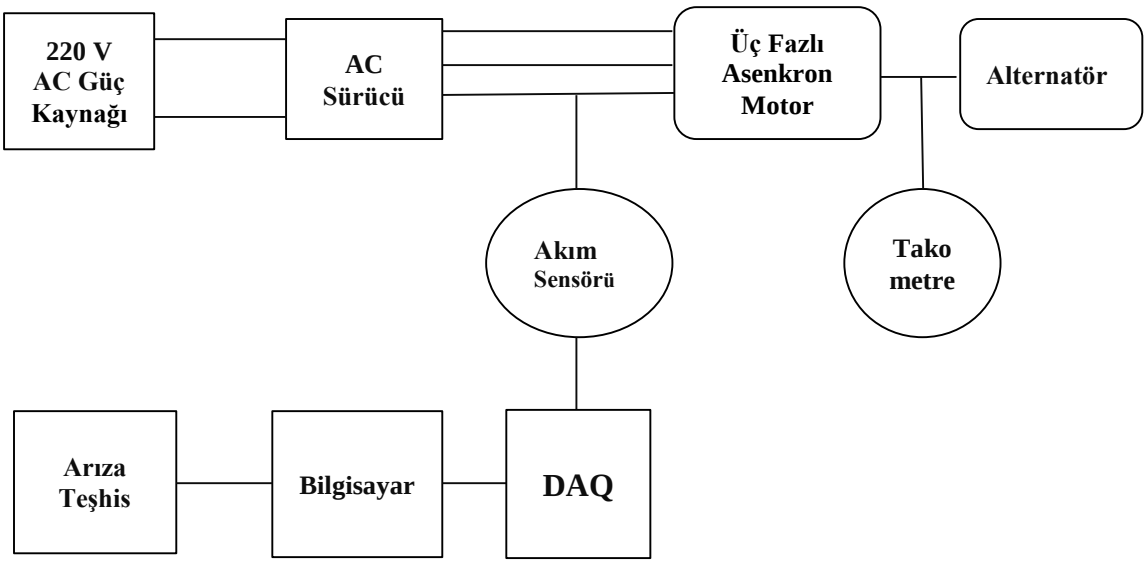
3. MATERYAL VE YÖNTEM

İndüksiyon motorlarında arıza tespit çalışmalarına bakıldığında ön görülü bakım uygulamalarında kullanılan genel metot, motor üzerinde arızanın durumuna değişkenlik gösteren akım, sıcaklık, titreşim, moment, akı gibi parametrelerden örnekler toplanıp zaman veya frekans boyutunda analiz ve arıza tespit algoritması geliştirilerek teşhis etme mantığına dayanır.

Bu bölümde sürücü ile beslenen asenkron motorlarda rulman arızalarını teşhis etmek maksadıyla rulman parçalarından iç bilezik, dış bilezik, kafes ve bilya üzerinde yapay olarak arızalar oluşturulup, stator ve sürücü arasına yerleştirilen akım transformatörü yardımıyla alınan örnekler veri toplama kartı ile bilgisayar ortamına aktarılmasında kullanılan materyal ve yöntem anlatılmıştır. Motordan alınan akım örnekleri incelendiğinde akım sinyalinde bozulmalar olduğu gözlemlenmiştir ama arızanın neden kaynaklandığı hakkında daha detaylı bilgi almak için akım örnekleri HFD analiz yardımıyla frekans düzlemine aktarılmıştır. Bu düzlemde inceleme yapıldığında rulmanda oluşturulan arızaların karakteristik frekansları ve motor sürme frekansından kaynaklanan harmonik katlar nedeniyle spektrumda tepe değerler görülmüştür. Zaman boyutundan belirlenen istatiksel özellikler ve frekans boyutundan belirlenen spektral değerler yapay sinir ağları kullanılarak hata teşhisi ve sınıflandırması gerçekleşmiştir.

3.1. Rulman Arıza Teşhis Sistemi

Rulmanlarda akım ölçümüyle durum izleme sistemi öngörülü bakım çalışmaları incelendiğinde, ucuz, kolay kullanım ve uygulama gibi avantajları sebebiyle çoğunlukla tercih edilen analiz yöntemlerinden birisidir. Bu çalışmada rulman hata tespiti için sağlam ve yapay olarak arızalandırılmış rulmanlardan toplanan akım örnekleri veri toplama kartı ile Labview programına aktarılmıştır. Akım örneklerinin zaman ve frekans düzleminden analizi yapılarak her durum için özellikler belirlenmiştir. Bu özellikler yapay sinir ağında giriş parametreleri olarak kullanılmış ve ağ eğitilmiştir. Şekil 3.1'de sürücü ile beslenen asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti için tasarlanan yöntemin blok gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1 Rulman arıza teşhis sistemi blok gösterim

Veri toplama sisteminde, şebekeye tek faz 220 V olarak bağlanan Siemens firması tarafından üretilen Sinamics V20 serisi 1.1 KW inverter ile Elk Motor firmasının ürettiği 0,37 KW sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Motor ile sürücü arasına tek faza yerleştirilen SCT-13 marka akım transformatörü yardımıyla akım örnekleri toplanıp National Instrument tarafından üretilen NI-6001 marka 20 kHz örnekleme hızına sahip veri toplama kartı ile National Instrument firmasına ait Labview paket programına aktarılmıştır. Motorun boşta ve yükte testi için 12 V otomobil alternatörü (şarj dinamosu) deney setine eklenmiş olup takometre yardımıyla devir sayısı ölçülmüştür. Belirlenen devir sayısıyla rulmandaki arıza kaynağına göre karakteristik hata frekansları hesaplanmıştır ve Labview programına aktarılan akım örneklerinin frekans spektrumunda görülen tepe değerler ile hesaplanan değerler arasında karşılaştırma yapılmıştır.

3.2. Veri Toplama Sistemi

Bir sistemdeki fiziksel özellikler hakkında sensörler aracılığıyla bilgi toplama ve ölçme sonucu elde edilen bir analog sinyalin Analog/Dijital (A/D) dönüştürücüler kullanılarak bu sinyallerin bilgisayar ortamında anlamlı hale getirilmesi için dijital sinyale dönüştürülmesi işlemi veri toplama olarak adlandırılır. Veri toplama sisteminin temel bileşenleri; bilgi toplanacak fiziksel özellik, sensör, veri toplama kartı ve bilgisayar olarak tanımlanır.

Bu çalışmada 5V DC güç kaynağından beslenen, 0-33 mili Amper (mA) çıkış üreten akım transformatörü için sönt direnç devresi kurularak akım örnekleri 14 bit çözünürlükte 20 kS/s (örnek/saniye) örnekleme hızına sahip veri toplama kartının analog giriş kısmına bağlanıp bilgisayara aktarılmıştır. Şekil 3.2'de deney setinde kullanılan veri toplama kartı ve sensör bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Sensör ve veri toplama kartı bağlantısı

Bir veri toplama sisteminden güvenilir ve doğru ölçümler alabilmek için analog sinyalin sayısala dönüşümü aşamasında dikkat edilecek unsurları anlamak gerekir. Bu bölümde veri toplamada kullanılan kavramlar açıklanmıştır.

3.2.1. Veri Toplama Kartı

Sensörden alınan analog akım sinyalini dijital sinyale dönüştürmek için kullanılan devreler A/D dönüştürücülerdir. Bu çalışmada sinyal dönüşümü için veri toplama kartı kullanılmıştır. Veri toplama kartları analog-dijital dönüşümle birlikte giriş-çıkış portu, dijital-analog dönüşüm portu ve sayaç (counter) portuna sahip çok işlevli bir sisteme sahiptir. Çizelge 3.1'de deney setinde kullanılan NI-6001 veri toplama kartının analog giriş portu özellikleri gösterilmiştir.

3.2.2 Sinyal Yükseltme ve Filtreleme

Sensörün ölçtüğü stator akım sinyalleri mili Amper olarak veri toplama kartı analog girişine gelir. Kartın sahip olduğu bir diğer özellik ise giriş sinyallerini yükseltmektir. Bu sayede sinyalin çözünürlüğü artırmak mümkündür.

Çizelge 3.1 Veri toplama kartı özellikleri

Analog giriş çözünürlük	14-bit
Analog giriş örnekleme oranı	20 kS/s
Analog giriş bant genişliği	300 kHz
Tam skala mutlak doğruluk	6 mV
Maksimum akım	150 mA
Veri aktarım hızı	12 Mb/s
PC haberleşme	USB
Analog giriş kanal sayısı	8

Analog sinyalin dijitale dönüşümde sinyalde kaymayı önlemek ve sinyal gürültüsünü azaltmak için filtrelemeye ihtiyaç duyulur. Eğer Nyquist kriterine uygun bir örnekleme frekansı seçilmiş ise sinyalde kayma belirlenen frekans aralığının dışında kalacaktır. Bu deney setinde filtre olarak sinyal gürültü oranını azaltmak kaymayı önlemek için dijital alçak geçiren filtre kullanılmıştır.

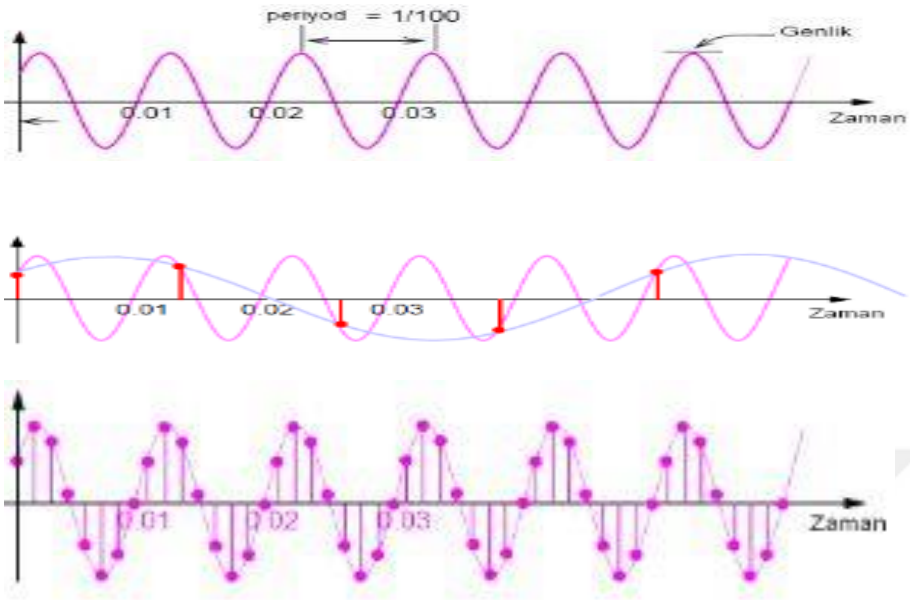
3.2.3. Kayma (Aliasing)

Örnekleme hızı yavaş olduğunda, elde edilen verilerden tamamen farklı bir düşük frekans dalgası oluşturulur ve bu duruma kayma (aliasing) denir. Kaydedilen sinyalde varyans arttırma etkisine sahiptir, hızla değişen sinyalin doğruluğunu ve çukurlarını kaçırarak sinyalde gürültüyü ekler. Kayma meydana geldiğinde sinyal her zaman aynı tepe noktasına sahip olsa bile, kart yükselen ve düşen fazı yakalar ancak zirveyi değiştirerek kaçırır.

Sinyalde kaymayı önlemek için, örnekleme oranının en yüksek frekans girdisinin en az iki katına eşit olması gerekir. Örnekleme frekansı, Nyquist kriterine göre hesaplanmadığı zaman veya örnekleme oranı öncesinde belirlendiği zaman, örneklenmesi yapılan sürekli zaman sinyalinin en yüksek frekans değerinin bant sınırı olan Nyquist frekansından büyük olması durumunda örneklemesi yapılan sinyalde bozucu bir etki (kayma) meydana gelir. Böyle durumlarda, harmonikler iç içe geçmesi nedeniyle örtücü bir etkinin oluşacağı görülebilir ve orijinal sinyalin bozulmasından çok daha ciddi bir sonuca neden olabilir (Amasya Üniversitesi).

Sinyalde kayma faktörünün daha iyi anlaşılması için periyodu T=0,01 saniye olan sinüzoidal bir sinyal örneğinin 100 Hz'lik işarete ait bütün bilgiyi kayıpsız ve

eksiksiz alabilmesi için şekil 3.3'te orijinal sinyal, örtüşme ve doğru örnekleme grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Analog sinyal, örtüşme ve doğru örnekleme

3.3. Sinyal Analiz Yöntemleri

Sinyal analiz yönteminde hedef, sinyale uygun bir analiz metodu uygulandıktan sonra elde edilen sinyalden istenen bilgiyi almaktır. Bu çalışmada Labview ortamında hazırlanan simülasyon programı kullanılarak motordan alınan akım sinyalleri ile sinyal hem zaman boyutunda hem de frekans boyutunda analiz edilmiştir. Veri toplama kartıyla toplanan akım sinyalleri dijital alçak geçiren filtreden geçirilerek frekans spektrumuna aktarılmıştır ve spektrumda oluşan tepe değerlerden arızanın kaynağı hakkında bilgi alınmıştır. Asenkron motorlarda rulman arızalarının teşhisinde kullanılan sinyallerden özellik çıkarma işlemi zaman boyutunda analiz, frekans boyutunda analiz, zaman-frekans boyutunda analiz ve Park'ın vektör yaklaşımı olarak sınıflandırılabilir.

3.3.1. Zaman Boyutunda Analiz

Zaman boyutunda analiz, ASM'lerde arıza teşhisinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Sensörler yardımıyla motordan alınan sinyaller zamana karşı bir grafiği oluşturmaktadır. Bu durum nedeniyle zaman boyutundaki ham sinyaller üzerinde yapılacak analiz temel ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Lineer olmayan sinyaller analiz

edilse dahi hesaplama kolaylığı nedeniyle zaman kazanımı sağlayacağından etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Arızalı bir rulmanda zaman boyutunda akım sinyalinde bozulmalar tespit edilebilir ama bu yöntemle rulmanın hangi kısmında hasar oluştuğu ile ilgili bilgi sahibi edinmek mümkün değildir. Zaman düzlemindeki bir sinyali analiz etmek için temel çözüm, analizi gerçekleştirilecek sinyalin karakteristik özelliklerine uygun istatistiksel proses uygulayarak belli parametrelerin elde edilmesi ve özellik çıkarılmasıdır. Literatürde çok fazla yöntem olsa bile elektrik motorlarında arıza teşhisi için en çok kullanılan parametreler maksimum, minimum, çarpıklık, basıklık, etkin değer, varyans, entropi, ortalama ve standart sapmadır (Bellini ve diğ., 2008).

3.3.1.1. Tepeden Tepeye (Peak to Peak)

Tepeden Tepeye (TT) değeri verinin hangi iki değer arasında olduğunu gösteren istatistiksel bir ölçüttür ve elde edilen verinin maksimum ve minimum değeri arasındaki farkı göstermektedir (Ghate ve Dudul, 2010).

3.3.1.2. Etkin Değer (RMS)

Kuadratik ortalama ismiyle de bilinen bu yöntem; karelerin ortalamasının karekökü ve değişken verinin genliğini ölçer. Etkin değer, eşitlik (3.1)'de gösterildiği şekilde hesaplanır (Ghate ve Dudul, 2010).

$$RMS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2 \tag{3.1}$$

3.3.1.3. Çarpıklık (Skewness)

İstatistiksel dağılımda üçüncü moment ve bir değişkendeki olasılık dağılımı asimetri ölçüsü çarpıklık değerini verir. Eşitlik (3.2)'de standart sapma ve eşitlik (3.3)'te çarpıklık gösterildiği gibi hesaplanır (Ghate ve Dudul, 2010).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\bar{x} - x_i)^2} \tag{3.2}$$

$$çarpıklık = \frac{1}{N\sigma^3}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3 \tag{3.3}$$

3.3.1.4. Basıklık (Kurtosis)

İstatistiksel dağılımda 4. Moment basıklık olarak adlandırılır. Sivrilik ya da basıklık derecesinin ölçüsüdür. Basıklık, dağılımdaki büyüklüğü ölçmede ve verideki tepelerin gösterilmesini sağlar. Eşitlik (3.4)'te gösterildiği şekliyle hesaplanmaktadır (Samanta ve Al-balushi, 2003).

$$basıklık = \frac{1}{N\sigma^4}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3 \tag{3.4}$$

3.3.2. Frekans Boyutunda Analiz

Zaman düzleminden çıkarılan istatistiksel parametrelerin motor hızıyla orantılı olarak artması rulman hasarı hakkında bilgi edinmeyi olumsuz etkilemektedir. Hızı düşük çalışan bir motorda hasarlı bir rulman ile yüksek hızda çalışan hatasız bir rulmanın istatistiksel parametreleri birbirinden ayırt etmek zor olabilir. Zaman bölgesinde oluşan böyle problemlerin üstesinden gelmek için elde edilen sinyallerin spektrum grafiğinde frekans bileşenlerine bakarak, hasar hakkında sağlıklı ve güvenilir bilgiler alınabilir. Arızalı rulmandan alınan sinyal örneğinin frekans spektrumuna aktarılarak bölgesel hataların frekans analizini yapmak mümkündür. Bu yolla rulmanın geometrik özellikleri ve rotor dönme frekansı bilindiğinde rulmanın karakteristik hata frekansları hesaplanabilir. Arızanın şiddetine göre hasar frekanslarının genliklerinde artış görülmektedir (Aliustaoğlu, 2008).

3.3.2.1. Fourier Dönüşümü

Fourier serileri, periyodik olan sinyallerin matematiksel gösterimi için kullanılan ve sinyal işleme alanında kullanılan ilk yöntemlerdendir. Bu seriler ısı iletimi ve sıcaklık tanımlamalarını modellemek amacıyla Jean Baptiste Joseph Fourier 1807 yılında bulmuştur. Bu yöntemle modellenen sinyal, şeklini oluşturan sinüzoidaller ve karmaşık üsteller gibi harmoniklerin doğrusal ağırlıklı toplamıyla hesaplanır. Eşitlik (3.5)'te verilen formül ile hesaplanmaktadır (Proakis, 2007).

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_k e^{j2\pi\frac{k}{T}t} \tag{3.5}$$

Formülde verilen; T sinyalin periyodu, c_k harmoniklerin ağırlıklarını ve $x(t)$ ağırlıklı harmoniklerin toplamıyla elde edilen işaretin sembolüdür. Fourier serisinden Fourier dönüşümü yapılırken Sürekli Zamanlı Fourier Dönüşüm (SZFD) denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler denklem (3.6) ve (3.7)'de verilmiştir (Proakis, 2007).

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, e^{-jwt} dt \qquad w = \frac{2\pi}{T} \tag{3.6}$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(w) e^{jwt} dw \tag{3.7}$$

Elektrik motorlarında arızayı tespit etmek için kullanılacak olan akım sinyalleri belli zaman aralığında sınırlandırılmış sayıda örnek içerir. Böylece sonsuz toplama işlemi ortadan kalkar. Bu sebeple uygulamalarda SZFD yerine, Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) kullanılmaktadır. Sırasıyla eşitlik (3.8) ve (3.9)'da AFD ve ters dönüşüm ifadeleri verilmiştir (Proakis ve Manokalis, 2007).

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\, e^{-j2\pi\frac{k}{N}n} \tag{3.8}$$

$$x(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x(k)\, e^{j2\pi\frac{k}{N}n} \tag{3.9}$$

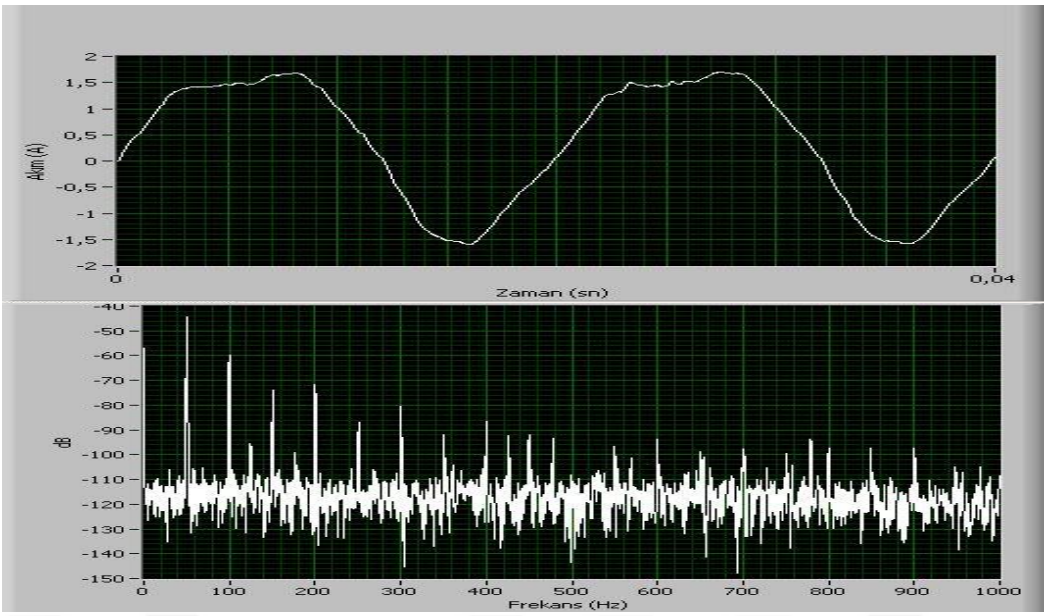
Formüllerde verilen; N belirli bir sayıda örneğe sahip *x* sinyalinin uzunluğudur. Sinyal analiz çalışmalarında Fourier yöntemini kullanarak belirlenen özellikler genelde güç spektrum yoğunluğundan faydalanılarak hesaplanır. Bu işlem, AFD yöntemiyle sinyal örneğini frekans bölgesine aktarır. N örnekli AFD ile elde edilen bir sinyalde güç spektrum yoğunluğu, eşitlik (3.10) ile hesaplanmaktadır (Arabacı, 2004).

$$S_{xx}(k) = \frac{1}{N}|X(k)|^2 \tag{3.10}$$

3.3.2.2. Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD)

N örnekli bir sinyalin AFD ile hesaplanması karmaşık bir hesap gerektirir. Eşitlik (3.8)'de görülen ifade ile yapılacak bu işlem, her bir frekansın ayrı ayrı değerlendirilmesinde N^2 mertebeden bir hesap gerektirir. Cooley ve Tukey isimli araştırmacılar, yeni bir yöntem olarak Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) algoritması ile bu hesap sayısını azaltmanın en uygun metodunu 1965'te yayınladıkları bir makalede ortaya koymuşlardır. Bu yöntemle sinyalin spektrum analizi, kovülasyon ve kolerasyon işlemleri yoluyla motorlarda uygulanan arıza teşhislerinde başarılı bir şekilde yapılmaktadır (Zhang ve diğ, 2010).

Şekil 3.4'te 50 Hz'lik sürücüden beslenen ASM'den alınmış akım sinyali ve bu sinyalin HFD analizi ile elde edilen spektrum grafiği görülmektedir.



Şekil 3.4 ASM akım sinyali örneği ve HFD spektrumu

3.3.3. Zaman-Frekans Boyutunda Analiz

Zaman boyutundaki sinyallerin Fourier dönüşümü ile analizi yapılırken bazı karakteristik özelliklerin kaybolduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni frekans bölgesine aktarılan bir sinyalde zaman bilgisi taşınamaz ve bir olayın ne zaman gerçekleştiği bilinemez. Bu sebeple Fourier dönüşümü ile durağan haldeki sinyallerde başarılı sonuçlar alınırken, dinamik sinyallerde bu dönüşüm yetersiz kalmaktadır (Akar, 2009).

3.3.3.1. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD)

Dinamik halde bulunan sinyallerde zaman ve frekans bilgisini dikkate alan bir analiz yapabilmek için birçok araştırmacı tarafından farklı uygulamalar önerilmiştir. Denis Gabor tarafından 1946 yılında önerilen Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ile Fourier dönüşümünün eksiklikleri ortadan kalkmıştır (Morrison, 1994).

Bu yöntem ile dinamik sinyali zamanda durağan kabul ederek küçük parçalara böler ve elde edilen her bir parçaya Fourier dönüşümü uygulanarak analiz edilir. KZFD ile sinyal, pencereleme fonksiyonları kullanılarak küçük parçalara bölünür. Bu fonksiyonların sinyali frekans dönüşümü yapılmadan önceki orijinal sinyalin, ayrılmış her bir dalgadan tam olarak yalıtılması sağlanır. Pencere içerisinde bulunan her bir dalga durağan kabul edilir. Bu metot spektrogram olarak da adlandırılmaktadır.

KZFD'nün matematiksel ifadesi eşitlik (3.11)'de verilmiştir (Haji ve Toliyat, 2001; Orhan, 2011).

$$\boldsymbol{X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t-\tau) e^{-jft} dt} \qquad (\mathbf{3.11})$$

Formülde verilen;

x(t) = orijinal sinyal,

τ orijinal sinyal üzerinde pencere öteleme değeri,

w(t- τ *)* pencere fonksiyonudur.

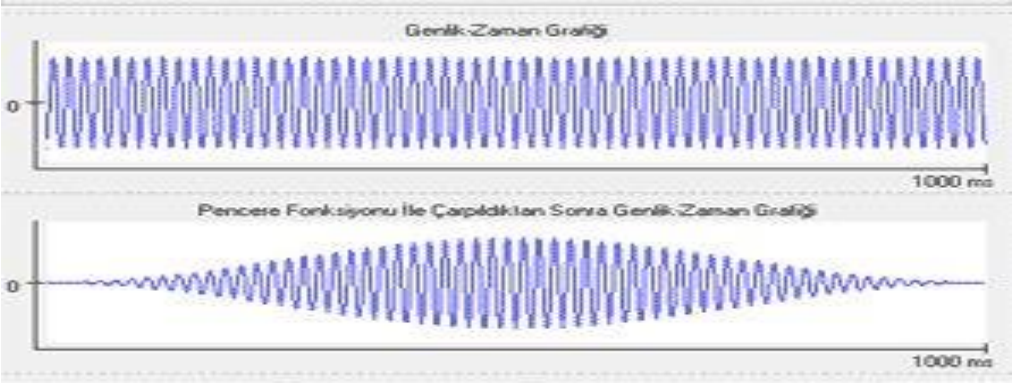
Pencereleme metotlarına incelendiğinde aşağıdaki fonksiyonların yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür.

- Hanning Pencereleme
- Barlett Pencereleme
- Hamming Pencereleme
- Blackman-Harris Pencereleme
- Kaiser Pencereleme
- Gauss Pencereleme
- Dikdörtgen Pencereleme
- Üçgen Pencereleme

Dönüşümü yapılacak orjinal sinyalin parçalara ayırma işleminde pencere fonksiyonu uzunluğunun seçimi çok önemlidir. Fonksiyon uzunluğunun dar aralıkta seçimi Fourier yöntemiyle bulunamayan çözünürlük oranını artırır, geniş aralıkta seçimi frekans çözünürlük oranını artırır. Bunun yanı sıra zaman çözünürlüğü azalacaktır. Seçilen pencere fonksiyonunun ideal uzunluğu, sinyalin durağan kabul edilebilecek kapsamda olmalıdır ve sinyalin tamamı için aynı uzunluktaki pencere kullanılması tüm frekanslar için aynı çözünürlüğü üretecektir. Bu sebeple, pratikte sinyaller için pencere fonksiyonunun uzunluğu esnek seçilmesi gerekmektedir (Morrison, 1994; Akar, 2011).

Bu çalışmada zaman düzleminde toplanan akım örnekleri HFD tekniği kullanılarak frekans düzlemine aktarılmıştır ama pencereleme fonksiyonu kullanmadan yapılan analiz sonucunda frekans spektrumunda tek bir çizgi görülmüştür. Akım analizinde en çok kullanılan metotlardan biri olan Hanning Pencereleme fonksiyonu uygulandığında rulmana ait hata karakteristik frekanslarına ait tepe değerler tespit

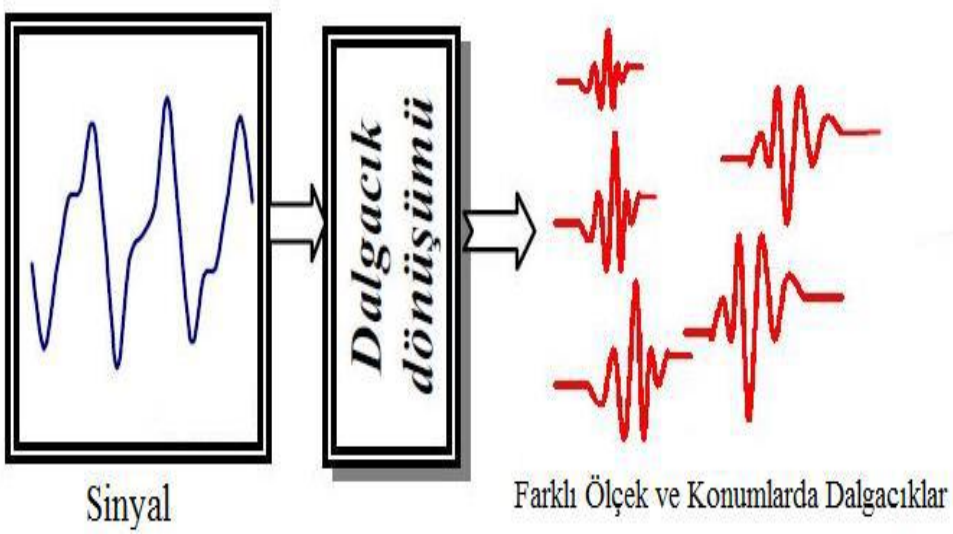
edilmiştir. Hanning Pencereleme, diğer yöntemlere göre sinyalde daha geniş alanda pencereleme işlemi yapar ve sinyalde bozulma oranı düşüktür. Şekil 3.5'te Hanning pencereleme metodu uygulanan bir sinyal gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Hanning Pencereleme

3.3.3.2. Dalgacık Dönüşümü

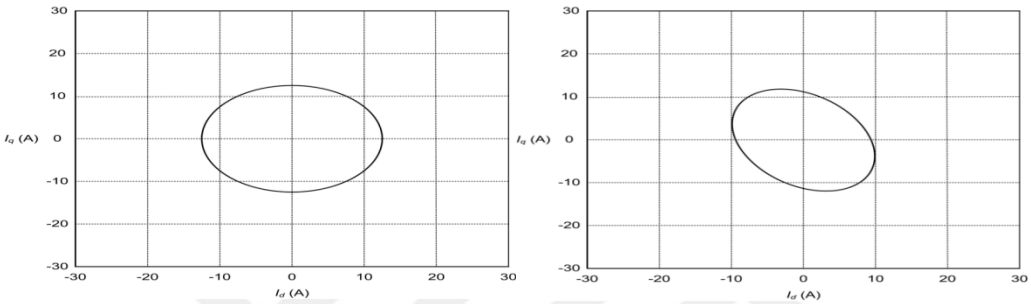
Dalgacık dönüşümü genellikle durağan olmayan sinyalleri analiz ederken kullanılmaktadır. Bu yöntemde "dalgacık" adı verilen küçük bir zaman penceresinde özel salınım fonksiyonları kullanılır ve sinyal dalgacıklar yoluyla analiz edilir. Dalgacık Dönüşümü, Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) olarak iki farklı dönüşüm ile analiz edilmektedir Şekil 3.6'da dalgacık dönüşümü grafiksel olarak gösterilmiştir (Doğan, 2012).



Şekil 3.6 Dalgacık dönüşümü

3.3.4. Park'ın Vektör Yaklaşımı

ASM'lerde arıza tespiti için motor akımlarının izlenmesi, algılayıcılarla kolaylıkla erişilebilen bir veri olması nedeniyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Motor akımlarından alınan örneklerin spektral yöntemler olarak bilinen frekans ve zaman-frekans düzleminde analizlerinde bir faz akımları üzerindeki bilgiler değerlendirilir. Park'ın vektör yaklaşımı üç faz akımların analiz edebilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.7'de sağlam ve arızalı bir motorun Park dönüşümü gösterilmiştir (Benbouzid, 2000)



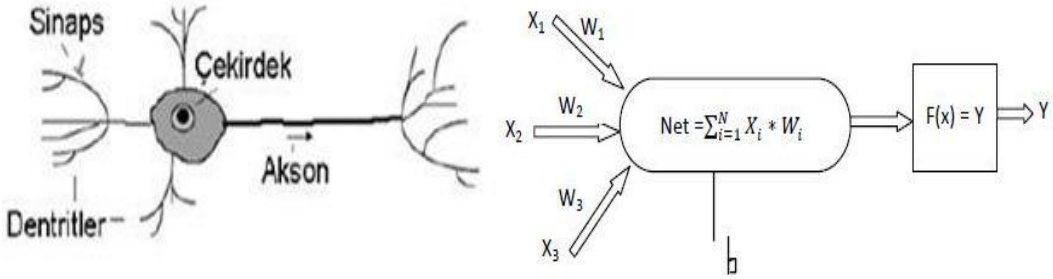
Şekil 3.7 Sağlam ve arızalı bir motorun Park dönüşümü

3.4. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları, insandaki beyin yapısına benzer bir şekilde öğrenerek yeni bilgiler türetme, keşfetme ve şartlara uygun kararlar oluşturması gibi insana ait yetenekleri gerçekleştirmek için tasarlanmış bilgisayar sistemine denir. Ancak bu programlar sıradan bilgisayar programlarından tamamen farklı olarak, programlanması çok zor olan durumlar için geliştirilmiş uyarlamalı bilgi isleme ile ilgili, bilgisayar bilim dallarından biridir. Bir YSA modeli farklı şekillerde birbirine bağlanmış nöronlardan oluşan bir ağ görünümü sahiptir. Nöronlar girişine gelen veriyi bir aktivasyon fonksiyonu yardımıyla işler ve bir çıkış değeri üretir. Elde edilen çıkış değeri başka bir nörona ağırlıklı bağlantı yoluyla iletilir. Nöronun çıkışı ilgili başka nöronun bağlantılarına ve aktivasyon fonksiyonuna bağlıdır. Bu nedenle YSA modeline uygun aktivasyon fonksiyonunun seçimi büyük önem taşımaktadır. Çözülecek problemin özelliğine uygun seçilen aktivasyon fonksiyonu ile öğrenme süreci hızlı olur ve çıkış başarısı artar (Öztemel, 2003).

3.4.1. Yapay Sinir Hücresinin Yapısı ve Özellikleri

Bir katman ve aktivasyon fonksiyonu içeren yapay sinir ağı hücresi perseptron (perceptron) olarak adlandırılmaktadır. Yapay bir sinir ağının hücresi, biyolojik sinir hücresiyle karşılaştırıldığında daha basit bir yapı içerir. Şekil 3.8'de biyolojik sinir hücresinin en temel nöron modeli ve yapay sinir ağı hücresi gösterilmiştir (Öztemel, 2003).



Şekil 3.8 Biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir hücresi yapısı

Bir yapay sinir ağı hücresi, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, girişler (*X*), ağırlıklar (*W*), toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu (*F*), eşik değeri (b) ve çıkışlar (*Y*) bulunur. Hücre dışından alınan veriler, ağırlıklar yardımıyla nörona bağlanıp ilgili girişteki etkiyi belirlemektedir. Eşitlik (3.12)'de yapay sinir hücresine ait formül verilmiştir (Öztemel, 2003).

$$Y = F\left(\sum_{i=1}^{N} X_i * W_i + b\right) \tag{3.12}$$

Eşitlik (3.12)'de de görüldüğü gibi bir yapay sinir hücresi temelde beş kısımdan oluşmaktadır (Çayıroğlu, 2019);

- Girdiler
- Ağırlıklar
- Toplama Fonksiyonu
- Aktivasyon Fonksiyonu
- Çıktı

Girdiler yapay sinir hücresinde nörona gelen verilerdir. Girdiler herhangi bir hücreden de gelebilir veya direk dış ortamdan da gelebilir. Girdiye gelen bu veriler biyolojik sinir hücrelerine benzer şekilde toplanarak nöronun çekirdeğine gönderilir (Çayıroğlu, 2019).

Yapay sinir hücresine gelen veriler çekirdeğe varmadan geldiği ağ bağlantısının ağırlığı ile çarpılarak çekirdeğe gönderilir. Böylece giriş verilerinin üretilecek çıkış verisi üzerindeki etkisi ayarlanabilir. Ağırlık değerleri pozitif, negatif ya da sıfır olabilir. Ağırlıkları sıfıra eşit olan girdilerin çıkış verisi üzerinde herhangi bir etkisi olmaz (Çayıroğlu, 2019).

Toplama fonksiyonu, ağırlıklar çarpılarak gelen verileri toplayıp, o hücrenin net girdisini hesaplamada kullanılır. Bazen gelen girdilerin değeri dikkate alınır, bazen de nörona gelen girdilerin sayısı önemli olabilir. Bir problemin çözümünde toplama fonksiyonunun en uygun olanının seçilmesinde belli bir yöntem yoktur. Toplama fonksiyonun seçimi genelde deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Bazı durumlarda, her yapay sinir hücresinin toplama fonksiyonu aynı olmayabilir ve bu durumun kararı tasarımcıya aittir. (Çayıroğlu, 2019).

Aktivasyon fonksiyonu, yapay sinir hücresine iletilen net giriş verisini işleyip hücrenin bu bilgiye göre üreteceği çıkış verisini belirlemektedir. Bu fonksiyon için genelde doğrusal olmayan bir fonksiyon tercih edilir. YSA'ların özelliklerinden biri olan "doğrusal olmama" durumunu aktivasyon fonksiyonları belirlemektedir. Aktivasyon fonksiyonun tercihi yapılırken dikkat edilecek önemli bir husus da türevi kolay hesaplanabilen fonksiyonun kullanılmasıdır. Geri beslemeli YSA'larda aktivasyon fonksiyonu türevinin de kullanılması nedeniyle hesaplamanın yavaşlamaması olmaması için fonksiyon türevinin kolay hesaplanabilir seçilmesi süreci hızlandırır. Yaygın bir şekilde kullanılan "Çok katmanlı algılayıcı" yapay sinir ağında genellikle aktivasyon fonksiyonu olarak "Sigmoid fonksiyonu" tercih edilir. (Çayıroğlu, 2019).

Aktivasyon fonksiyonundan çıkış yapan veri yapay sinir hücresinin çıktı değeri olmaktadır ve ağın çıkışı olarak dış ortama verilebilir veya tekrar ağın içerisinde kullanılabilir. YSA'da bulunan her hücren birden fazla girdiye sahip olmasına rağmen bir tane çıktı olmaktadır ve gerekli sayıdaki hücrelere bağlanabilir (Çayıroğlu, 2019).

3.4.2. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı ve Çeşitleri

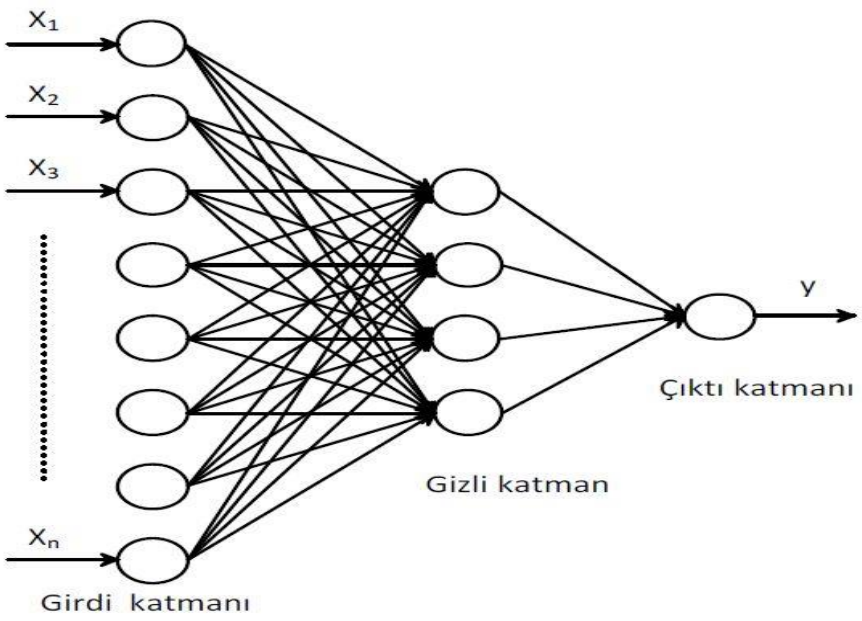
YSA, hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla oluşan yapılardır ve üç ana katmandan oluşur. Bunlar; Giriş Katmanı, Ara (Gizli) Katmanlar ve Çıkış Katmanıdır. Giriş Katmanı, dış ortamdan girdilerin geldiği katmandır ve girişlerin sayısı kadar hücreye sahip olmasına rağmen genellikle veriler herhangi bir işlem görmeden alt katmana iletilirler. Giriş katmanından çıkan veriler gizli katmana gelip sayısında ise ağdan ağa değişiklik gösterebilir. Gizli katmanlarda bulunan nöron sayısı giriş ve çıkış sayısından bağımsız seçilebilir. Birden çok gizli katman bulunduran YSA'larda her katman farklı sayıda hücreye sahip olabilir. Gizli katmanların ve nöron sayılarının artması, hesaplama karmaşıklığını ve süresini arttırsa bile kompleks problemleri çözülmesini kolaylaştırır. Çıkış katmanı, gizli katmanlardan gelen verileri işler ve ağın çıkış verilerini üretir. Çıkış katmanında üretilen veriler dış ortama gönderilir. Geri beslemeli ağlarda çıkış katmanında üretilen değer kullanılır ve yeni ağırlık değerleri hesaplanır (Öztemel, 2003).

YSA modelleri problem çözme açısından benzer özelliklere sahip olmaları tasarım ve işleyiş standardına sahip olduğu anlamı taşımaz. Bu modeller nöronların dizilimlerine ve ağırlıklarının belirlenmesi nedeniyle yapılacak hesaplamanın zamanına veya türüne göre farklılıklar gösterdiği gibi uygulama alanlarına göre de farklı modellere sahiptir. YSA'lar, yapılarına göre; ileri ve geri beslemeli, öğrenme algoritmalarına göre; danışmanlı, danışmansız ve destekleyici öğrenmeli, öğrenme zamanına göre; statik ve dinamik öğrenmeli ağlar olarak sınıflandırılır (Çayıroğlu, 2019).

3.4.3. Çok Katmanlı Algılayıcılar (Multi-Layer Perceptron)

Günümüz uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ağ modellerinin başında Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) sinir ağı gelir. Bu ağlar, giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katmanlar olarak arasında birden fazla gizli katmanın kullanılabildiği YSA modelidir. ÇKA katmanları birbirine paralel olarak sıralanır ve her katmanda en az bir nörona bulunur. Paralel katmanların tüm nöronları birbirine bağlıdır ve yapısındaki gizli katmanlar genellikle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılır. ÇKA ağ yapılarının oluşturulmasında gizli katman sayısının seçimi istenilen ağ çıkısına

bakılarak deneme yanılma yöntemiyle bulunur. Şekil 3.9'da "çok katmanlı bir yapay sinir ağı modeli" gösterilmiştir (Öztemel, 2003).



Şekil 3.9 Çok katmanlı algılayıcı modeli

Bu ağların eğitilmesi genelleştirilmiş delta kuralına göre gerçekleştirilir ve öğretmenli öğrenme stratejileri kullanıldığı için eğitim sırasında hem girişler ve bunlara karşılık YSA'nın üretmesi gerekli olan çıkışlar ağa gösterilir. ÇKA'larda kullanılan öğrenme kuralında mantık, YSA'nın eğitimi esnasında üreteceği çıkışlar ile üretmesi beklenilen çıkışlar arasında oluşan hatanın ağırlıklara dağıtılarak farkın en aza indirmektir. Ağın öğrenmesi esnasında önce girdiler ağa sunulur ve karşılık gelen çıktı üretilir. Bu süreç ileri doğru hesaplama olarak adlandırılır. Üretilen çıktı ve beklenen çıktı arasında karşılaştırma yapılarak hata geriye doğru dağıtılıp ağırlıklar değiştirilir ve bu süreç geriye doğru hesaplama olarak adlandırılır. ÇKA ağlarında öğrenmeyi etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir (Öztemel, 2003).

- Örneklerin seçimi,
- Girdi ve çıktının YSA'ya sunulması
- Girdi ve çıktının sayısal gösterimi
- Ağırlıklar ve başlangıçtaki değerlerin atanması
- Öğrenme ve momentum katsayısının belirlenmesi
- Örneklerin YSA'ya sunulması
- Ağırlıkların değiştirilme zamanı

- Girdi ve çıktının ölçeklendirilmesi
- Durdurma kriterlerinin belirlenmesi

Çok katmanlı algılayıcılar, sınıflandırma, tahmin etme, tanıma, yorumlama ve tespit etme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle mühendis uygulamalarında, tıp dünyasında, askeri alanlarda ve finans sektöründe yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada rulman arızalarının teşhisi için ÇKA modeli kullanılmıştır.

3.4.4. Yapay Sinir Ağı Kullanım Alanları

Geçmişten günümüze kadar çözülmesi zor, karmaşık ve ekonomik açıdan maliyetli alanlarda problemlerin çözümü için YSA'lar uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. YSA'lar insan beynine benzer biçimde fonksiyonel özelliklere sahip birçok uygulama alanında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. YSA'lar geniş bir uygulama alanına sahip olduğundan bütün bu alanların genel olarak sınıflandırması yapılarak YSA'ların kullanıldığı alanlar 6 bölüm şeklinde ayrılabilir. Bunlar; arıza analiz ve tespit, tıp alanı, savunma sanayi, haberleşme, ulaşım, otomasyon ve kontrol olarak sınıflandırabilir (Öztemel, 2003).

"Bir sistemin ya da herhangi bir elemanının doğru çalışma biçimini öğrenen yapay sinir ağı modeli kullanılarak meydana gelmesi muhtemel arızaları tespit etme imkanı vardır. Böylece elektrik makinelerinde arıza tespiti, uçakların veya bileşenlerinin arızalarında tespit ve entegre devrelerin arıza tespitinde YSA kullanılmıştır.

YSA'lar EEG ve ECG sinyal analizinde, kanserli hücre tespitinde, protez tasarımında olmak üzere çeşitli tıp uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

YSA silah otomasyonu ve hedef takibi, nesneleri ayırt etme ve tespit etme ve gürültü önleme gibi askeri alanlara kullanılmaktadır.

Görüntüyü ve veriyi sıkıştırma, otomatik olarak bilgiyi bulma, konuşmaların gerçek zamanda çevrilmesi gibi haberleşme alanlarında da kullanılmaktadır.

Üretim sistemlerinde optimizasyon, ürünlerin analiz ve tasarımı, ürün kalitesinde analiz ve kontrol, planlama ve yönetim analizi gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

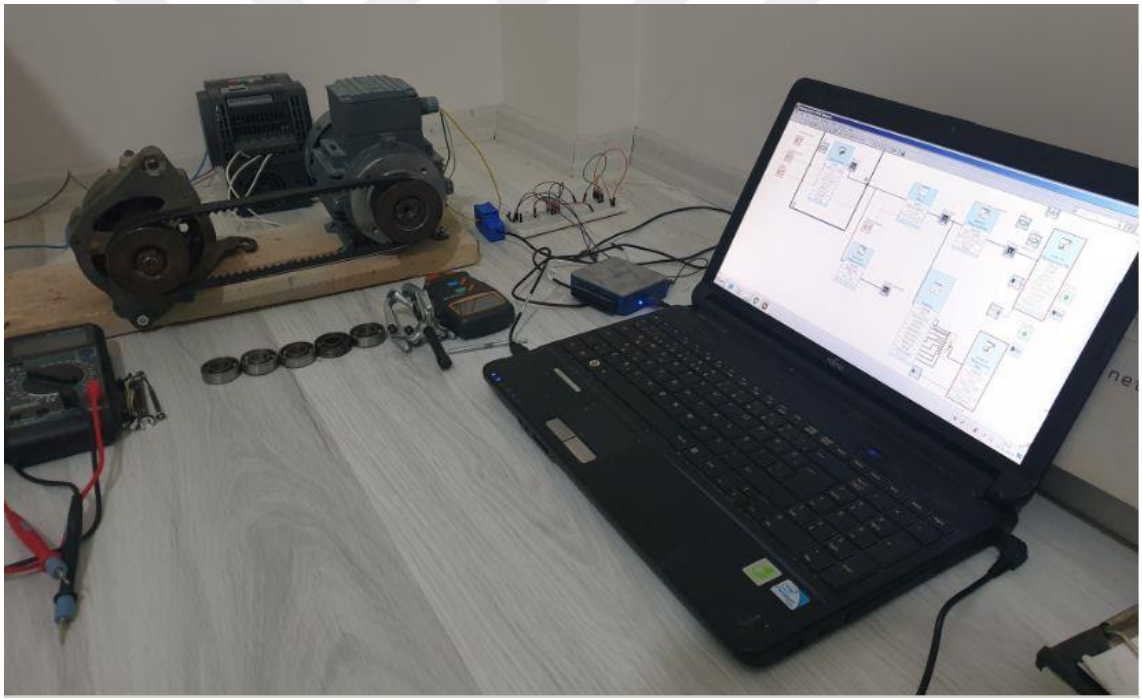
Uçaklarda bulunan otomatik pilot sisteminde, araçlarda otomatik yol bulmada, robot sistemlerin kontrolünde, doğrusal olmayan sistemlerin modellemesinde ve kontrolünde, elektrikli sürücü sistemlerin kontrolünde de kullanılmaktadır" (Öztemel, 2003).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, rulmanda eskitme deneylerinin yapılışı ve rulman bozukluğunun oluşturulması, verilerin toplanması için hazırlanan sistem, zaman ve frekans boyutunda analiz sonuçları, rulman hata teşhisinin yapılması için yapay sinir ağları kullanılarak deney sonuçlarının eğitimi ve test edilmesi hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Deney Setinin Oluşturulması ve Verilerin Toplanması

Şekil 4.1'de verilen motor test düzeneği ve veri toplama sistemiyle yapay olarak arızalandırılan 5 farklı rulmandan boşta ve yükte olmak üzere tek fazdan alan etkili sensör yardımıyla akım verileri toplanmıştır ve sağlam rulmanın akım verileriyle zaman-frekans boyutunda karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 4.1 Rulman testi için hazırlanan deney düzeneği

Deney setinde çizelge 4.1'de motor etiket değerleri verilen 0,37 KW güce sahip üç fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Test motorunu beslemek için 220 V tek fazlı şebekeden 1 faz giriş/3 faz çıkışa sahip Siemens firmasının ürettiği 1.1 KW güce sahip Sinamics V20 marka sürücü deney düzeneğine eklenmiştir ve sürücü ile stator arasına yerleştirilen akım sensörü ile tek fazdan ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1 Motor etiket değerleri

GÜÇ	0.37	KW
Frekans	50	Hz
Gerilim (Δ / Y)	230/400	V
Akım (Δ / Y)	1,73/1	A
Devir	1425	d/dk
Kutup sayısı	4	
cos φ	0,70	

4.1.1. Rulman Arızalarının Oluşturulması

Bu motorda yataklama elemanı olarak iki adet bilyalı rulman kullanılmakta olup, rulmanın kod numarası 6202 ZZ'dir. Çizelge 4.2'de rulmana ait bilya çapı, dış açıklık çapı, temas açısı ve bilya sayısı verilmiştir.

Çizelge 4.2 Rulman özellikleri

BD	PD	Temas Açısı	Bilya Sayısı
2,5 mm	9,84 mm	0	8

Deney setinde hızlandırılmış yapay eskitmeye maruz bırakılan 5 adet rulman kullanılmıştır. Birinci rulmanda dış bilezikte 3 mm genişliğinde, 1 mm derinliğinde çukur oluşturulmuştur. İkinci rulmanda iç bilezikte 3 mm genişliğinde, 1 mm derinliğinde çukur oluşturulmuştur. Üçüncü rulmanda bilyaları tutan kafeslerden ikisi arasındaki pim alınarak kafes arızası oluşturulmuştur. Dördüncü rulmanda içindeki yağ alınarak bir tane bilyada hata oluşturulmuştur. Beşinci rulman tuzlu suda bekletildikten sonra fırında 200 derecede ısıtılarak termal ve kimyasal eskitmeye maruz bırakılmıştır. Böylelikle rulman hem korozyona maruz kalmıştır hem de kalan yağ özelliğini kaybetmiştir. Bu işlem iki defa tekrarlandıktan sonra rulman motora yerleştirilmiştir. Şekil 4.2'de deneyde kullanılan rulmanlar gösterilmiştir.

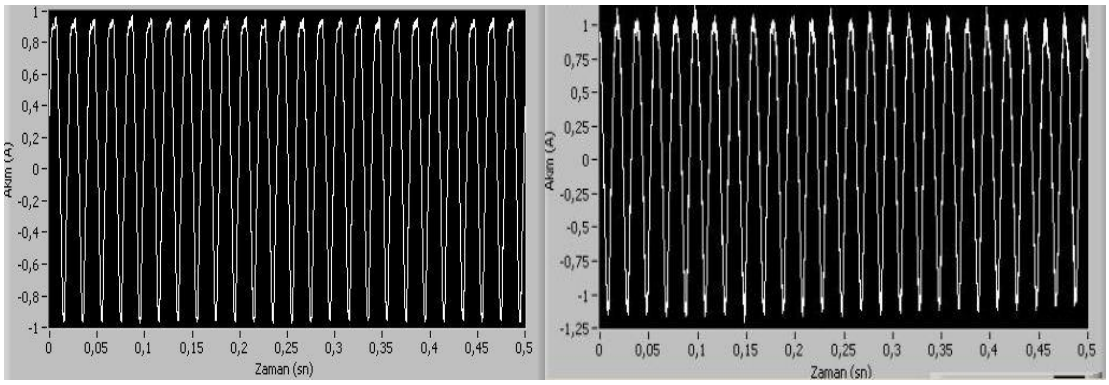
Şekil 4.2-a **Şekil 4.2-b** **Şekil 4.2-c** **Şekil 4.2-d**



Şekil 4.2 Deneyde kullanılan rulmanlar; (a) dış ve iç bileziği arızalandırılan rulman, (b) kafesi arızalandırılan rulman, (c) bilyası arızalandırılan rulman, (d) termal ve kimyasal eskitilen rulman

4.1.2. Akım Verilerinin Toplanması

Akım verilerinin filtrelenmesi, yükseltilmesi, verilerin toplanması ve kaydedilmesinde 14-bit çözünürlüğe sahip National Instrument firmasının ürettiği veri toplama kartı ve aynı firmaya ait Labview arayüz programı kullanılmıştır. Veri toplamak için geliştirilen programın ön panel ve blok diyagramı ekler bölümünde verilmiştir. Asenkron motor ile sürücü arasına tek fazdan toplanan akım örnekleri şönt direnç üzerinden veri toplama kartına aktarılarak gerçek zamanlı akım sinyali elde edilmiştir. Sinyalde meydana gelecek kaymayı önlemek ve gürültüyü azaltmak için alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Kesme frekansı olarak 8 kHz ve sinyalde gürültüyü önlemek için üçüncü dereceden Chebyshev Filtre tercih edilmiştir. Şekil 4.3'te sağlam rulman ve hatalı rulmanın akım sinyalinden bir kesit gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Sağlam ve hatalı rulman akım sinyali

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi verilen akım sinyalleri arasında arızalı durumu belirgin bir fark görülmemektedir. Ancak yapılan deneylerde hatalı rulmana ait akım zaman grafiği detaylı incelendiğinde sinyalde gürültü oranının artığı ve yük durumuna göre sinyalde bozulmalar görülmektedir. Ama gürültüye sebebiyet veren başka nedenler

veya başka arızalar olabilir. Bu nedenle hem akım işaretlerinin istatiksel analizi hem de spektral analizi yapılmıştır.

4.1.2.1. Zaman Boyutunda Analiz

Rulmanda oluşturulan her arızalı durum ve sağlam durumun zaman boyutunda analizi için 20 kHz örnekleme hızında akım verilerinin motor yükte ve boşta çalışırken etkin değeri, basıklık, çarpıklık, standart sapma ve varyans değerleri hesaplanmış ve kaydedilmiştir. Verilerin zenginleştirilmesi ve güvenirliği için her bir durum 20 defa tekrarlanmıştır. Elde edilen istatiksel sonuçlardan bir kısmı çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Rulmanın zaman boyutunda analizi

Rulman Durumu	Etkin Değer	Stand. Sapma	Varyans	Basıklık	Çarpıklık
Sağlam	0,006554	0,006069	0,000037	1,662323	-0,383963
Dış bilezik arızası	0,005655	0,005535	0,000031	1,813615	-0,363328
İç bilezik arızası	0,00591	0,005866	0,000034	1,624977	-0,297494
Kafes arızası	0,005036	0,004929	0,000024	1,83094	-0,40276
Bilya arızası	0,006682	0,006668	0,000044	1,73298	-0,338324
Termal ve kimyasal arıza	0,005009	0,004601	0,000021	1,803765	-0,409094

İstatiksel parametreler incelendiğinde sağlam rulman ve hatalı rulman değerleri arasında farklar görülmektedir. Elde edilen sonuçlar yapay sinir ağlarının eğitilmesi ve test edilmesinde kullanılmıştır.

4.1.2.2. Frekans Boyutunda Analiz

20 kHz örnekleme hızında 2 saniyelik akım sinyalinden her bir durum için motor yükte ve boşta olmak üzere 0-10 kHz arası frekans bandından 20000 örneğin 10000 noktalı HFD'si hesaplanmıştır. Akım sinyalinin spektrum verileri etkin değer yöntemiyle normalize edilerek kaydedilmiştir.

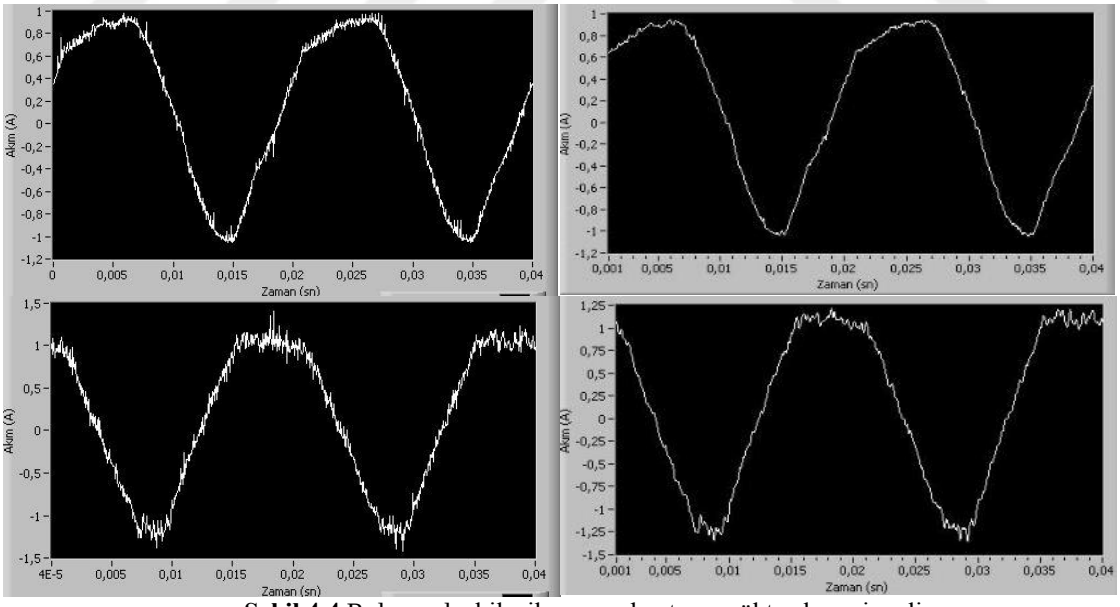
Yapılan deneylere ait spektrum grafikleri ve bölüm 3'te verilen rulman karakteristik hata frekans formülleri kullanılarak karşılaştırılmalar yapılmıştır. Rulmanın dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilyada meydana gelen hataya geçme frekansları boşta ve yükte olmak üzere hesaplanmış ve çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Rulmanın 50 Hz'deki hataya geçme frekansları

Hata frekansları (Hz)	Dış bilezik	İç bilezik	kafes	bilya
Boşta	74,85	125,82	9,35	46,18
Yükte	74,1	124,36	9,26	45,72

Çizelge 4.4'teki değerlere bakıldığında deneyde kullanılan motorun boşta ve yükteki hızı arasında fazla fark olmadığı anlaşılmaktadır. Sürücüler sayesinde asenkron motorlar, yük altında çalışsa bile devir sayılarında fazla değişiklik olmaz. Dijital takometre ile yapılan ölçümlerinde motor devri boşta iken 1505 devir/dakika, yükte iken 1490 devir/dakika olarak kaydedilmiştir. ASM'ler normal koşullar altında senkron hızın yani 1500 devir/dakikanın üzerinde hıza ulaşması mümkün değildir. Ancak motor sürücüsü gibi dışarıdan kuvvet uygulandığında senkron hızın üzerinde hızla çalışabilirler. Ayrıca motor yükte iken devir sayısına bakıldığında kayma miktarının önemsenmeyecek kadar küçük olduğu görülmektedir.

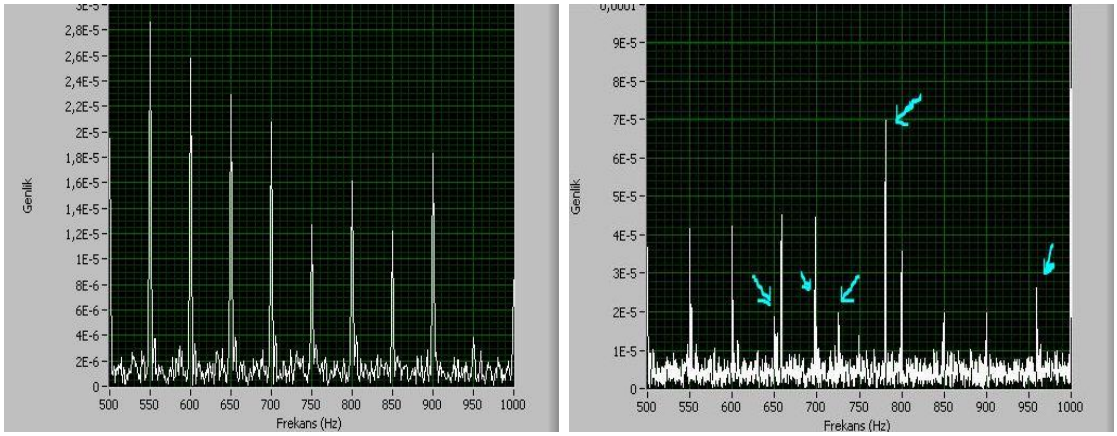
Deney 1'de rulmanın dış bileziğinde oluşturulan arızanın özelliğini belirlemek için motor boşta ve yükte test edilerek akım sinyali örnekleri toplanmıştır ve HFD yöntemiyle frekans düzlemine aktarılmıştır. Şekil 4.4'te deneyde kullanılan rulmana ait akım sinyalinden bir kesit ve filtre uygulanmış haliyle birlikte verilmiştir.



Şekil 4.4 Rulman dış bilezik arızası boşta ve yükte akım sinyali

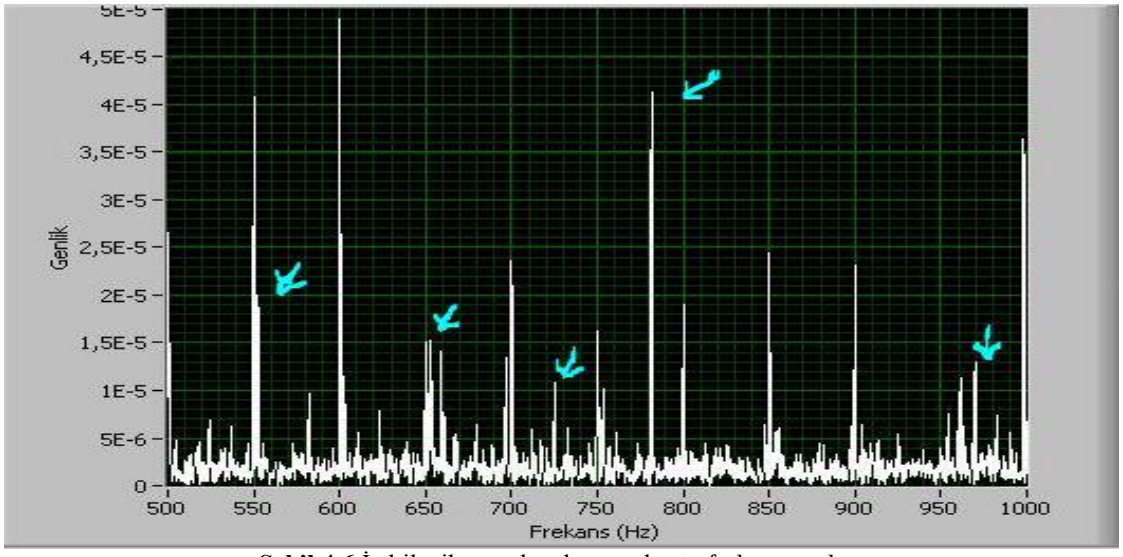
Elde edilen sinyallerden akım işaretlerinin spektrum grafiğine bakılarak çizelge 4.4'te verilen karakteristik rulman hata frekansları ve harmoniklerinin varlığı araştırılmıştır. Motor yükte iken frekans spektrumu incelendiğinde 659, 698, 726, 781 ve 959 Hz olan frekanslarda genlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Eşitlik 2.14'te

verilen formülle karşılaştırıldığında hesaplanan değerlerle denk olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.5'te sağlam ve dış bilezik arızalı rulmanın yükte iken frekans spektrumundan bir kesit verilmiştir.



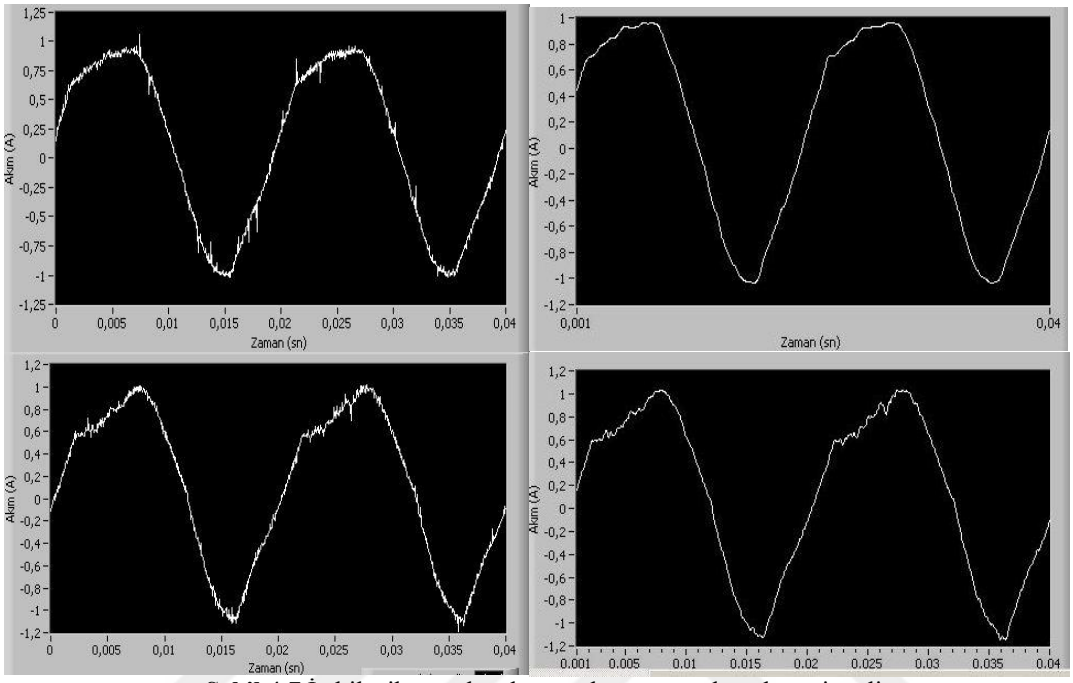
Şekil 4.5 Sağlam ve yükte dış bilezik arızalı rulmanın frekans spektrumu

Sağlam rulmanın spektrum grafiğinde sadece sürücüye uygulanan motor sürme frekansı ve harmonikleri görülürken hatalı rulmana ait spektrum grafiğinde ise hata karakteristik frekansları ve harmoniklerinde tepe değerler görülmüştür. Motor boşta çalışırken akım sinyalinin spektrum grafiği incelendiğinde 424, 553, 653, 782, 970 Hz frekanslarda genlik değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. Hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında denk değerler olduğu ve hesaplanan değerlerinin bazıları motor sürmek için uygulanan frekansın harmoniklerine denk olduğunda yani 550, 600 ve 1000 Hz'e karşılık gelen genlik değerlerinde de artış görülmüştür. Şekil 4.6'da akım spektrum grafiğinden bir kesit gösterilmiştir.



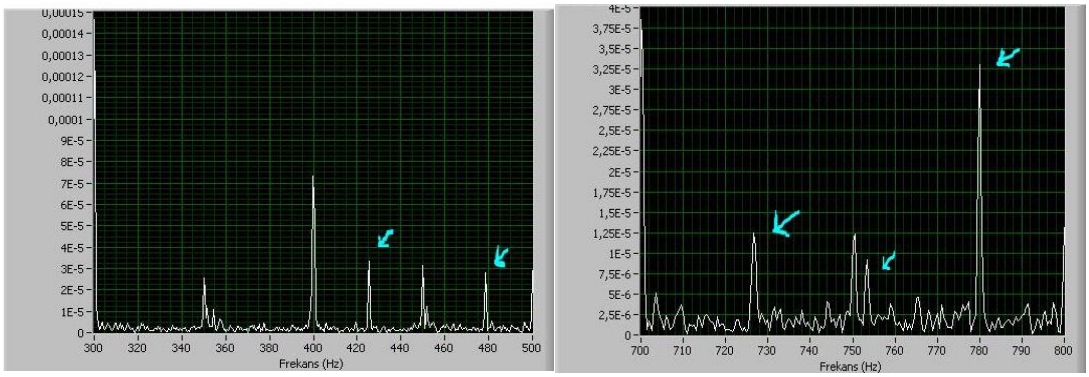
Şekil 4.6 İç bilezik arızalı rulmanın boşta frekans spektrumu

Deney 2'de iç bilezik hatasına sahip rulmanın özelliğini belirlemek için boşta ve yükte test edilerek Deney 1'deki işlem tekrarlanmıştır. Şekil 4.7'te deneyde kullanılan rulmana ait akım sinyalinin 0,04 saniyelik bölümü ve filtre uygulanmış haliyle birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.7 İç bilezik arızalı rulmanın boşta ve yükte akım sinyali

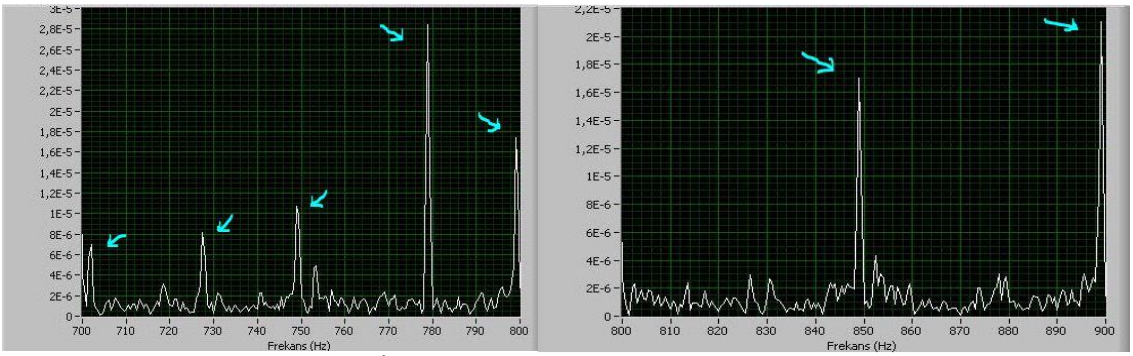
Rulmanda iç bilezik arızası için akım işaretlerinin spektrum grafiği incelendiğinde motor boşta iken 426, 479, 727, 753 ve 780 Hz frekanslarda genlik değerlerinde artış görülmüştür. Hesaplanan hata frekans değerleriyle karşılaştırıldığında denk oldukları tespit edilmiştir. Şekil 4.8'de etkin değer yöntemiyle normalize edilmiş frekans spektrumundan kesitler gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Rulman boşta iç bilezik arızası spektrum grafiği

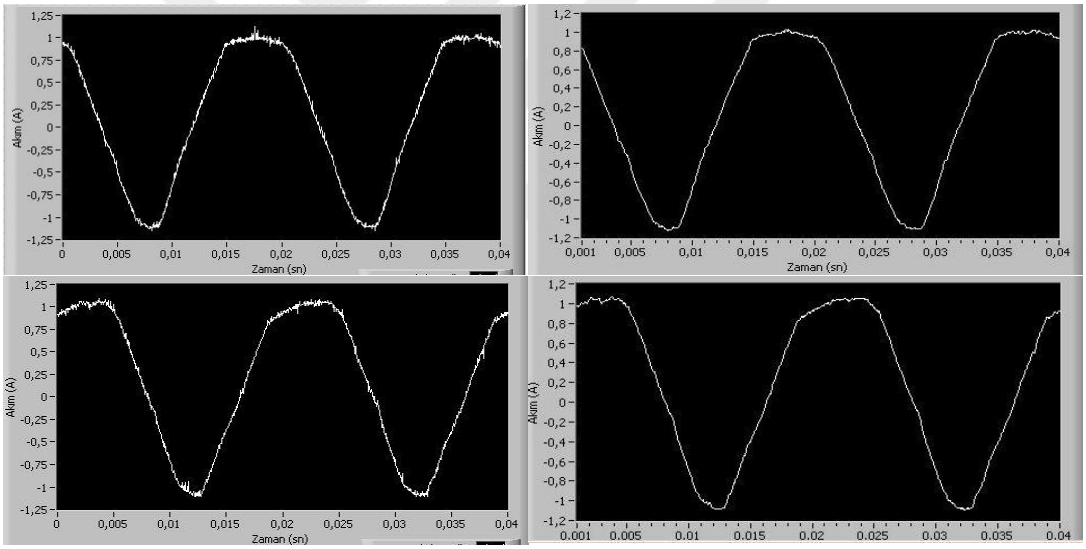
Motor yük testinde akım işaretlerinin spektrum grafiği incelendiğinde 702, 728, 749, 779, 799, 849, 899 Hz frekanslarda tepe değerler görülmüştür. Hesaplanan değerler

ile karşılaştırıldığında denk değerler olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.9'da etkin değer yöntemiyle normalize edilmiş frekans spektrumundan bölümler gösterilmiştir.



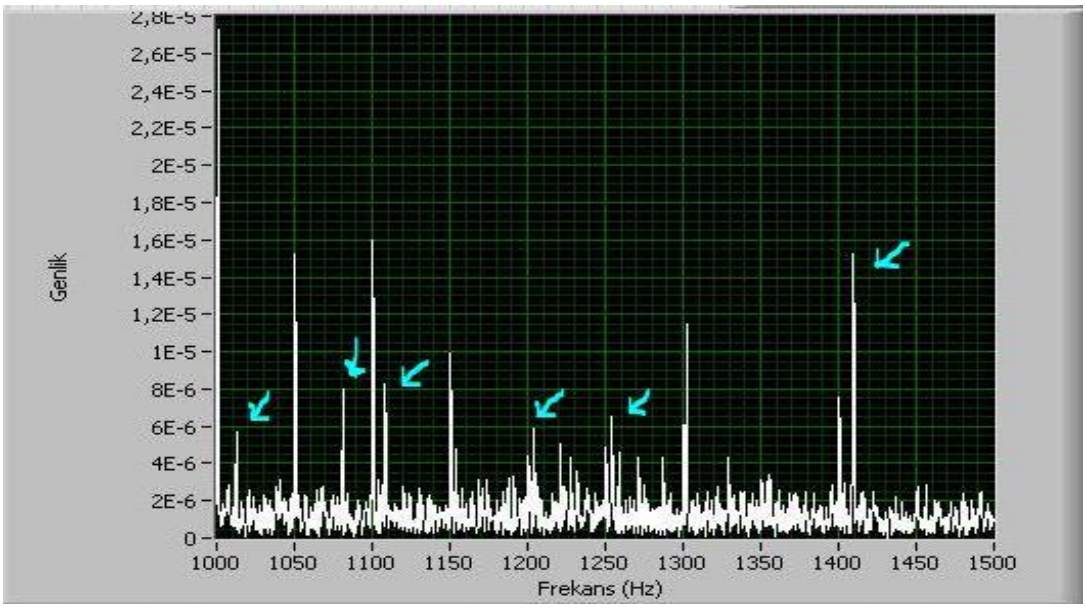
Şekil 4.9 İç bilezik arızalı rulmanın yükte spektrum grafiği

Deney 3'te kafes arızalı rulmanın özelliğini belirlemek için boşta ve yükte test edilerek akım sinyali örnekleri toplanmıştır ve frekans düzlemine aktarılmıştır. Şekil 4.10'da deneyde kullanılan rulmana ait akım sinyalinin 0,04 saniyelik bölümü ve filtre uygulanmış haliyle birlikte verilmiştir.



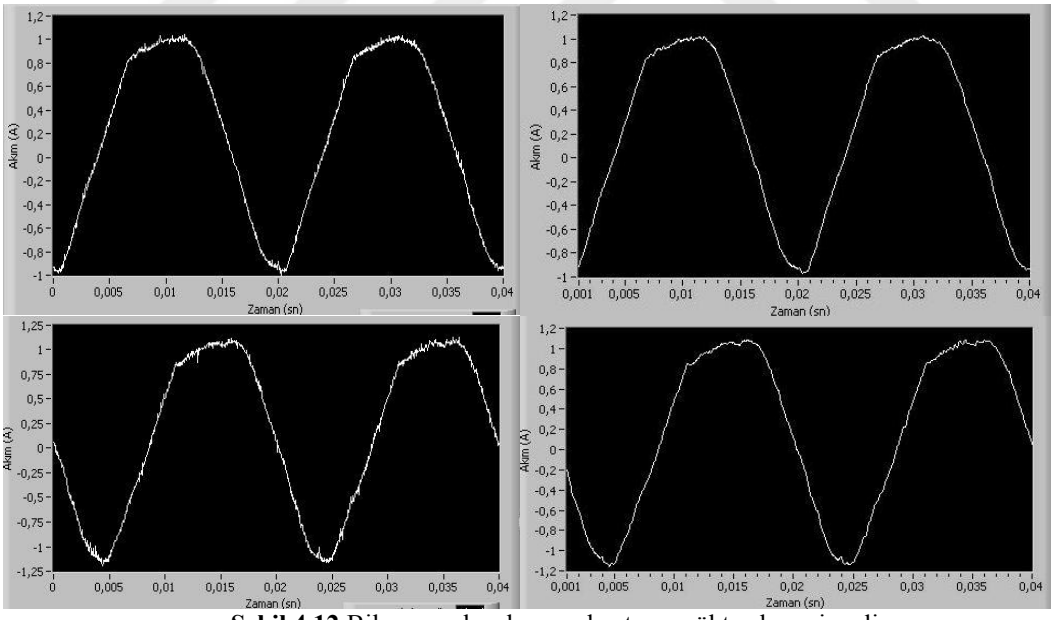
Şekil 4.10 Kafes arızalı rulmanın boşta ve yükte akım sinyali

Rulmanda kafes arızasının akım işaretlerinin spektrum grafiği incelendiğinde motor boşta ve yükte karakteristik hata frekansları arasındaki fark düşük olduğundan ayırt edilememiştir. Hesaplanan harmonik frekans değerleri de yaklaşık olarak aynıdır. Her iki durum içinde grafikler karşılaştırıldığında 1012, 1081, 1109, 1202, 1252 ve 1409 Hz frekanslarda genlik değerlerinde artış görülmüştür. Hesaplanan kafes hata frekansıyla denk değerler olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.11' de kafes arızası spektrum grafiğinden bir kesit verilmiştir.



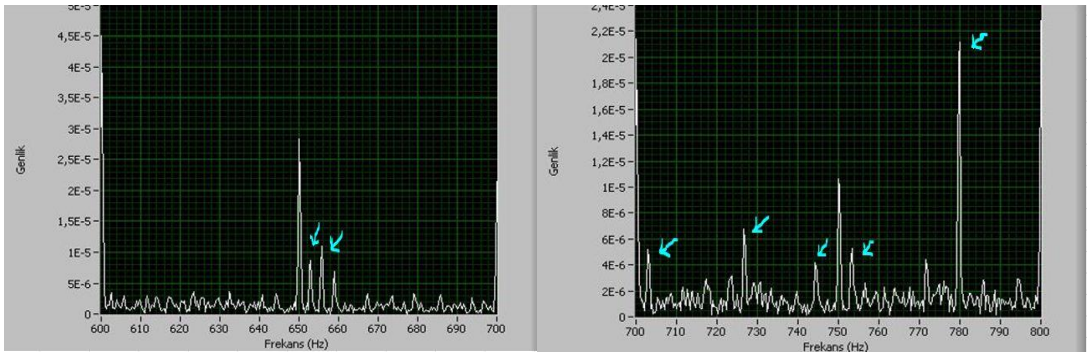
Şekil 4.11 Kafes arızalı rulmanın spektrum grafiği

Deney 4'te bilya arızasına sahip rulmanın özelliğini belirlemek için için boşta ve yükte test edilerek akım sinyali örneklere toplanmıştır ve frekans düzlemine aktarılmıştır. Şekil 4.12'de deneyde kullanılan rulmana ait akım sinyalinin 0,04 saniyelik bölümü ve filtre uygulanmış haliyle birlikte verilmiştir.



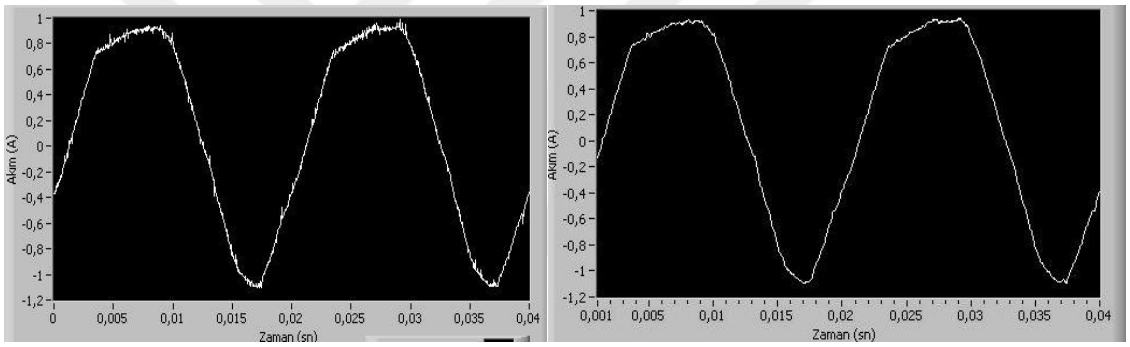
Şekil 4.12 Bilya arızalı rulmanın boşta ve yükte akım sinyali

Rulman bilya arızasının akım işaretlerinin spektrum grafiği incelendiğinde 653, 653, 657, 703, 726, 745, 753 ve 780 Hz frekanslarda genlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Hesaplanan hata frekansları ile karşılaştırıldığında değerlerin denk olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.13'te frekans spektrumundan bölümler gösterilmiştir.



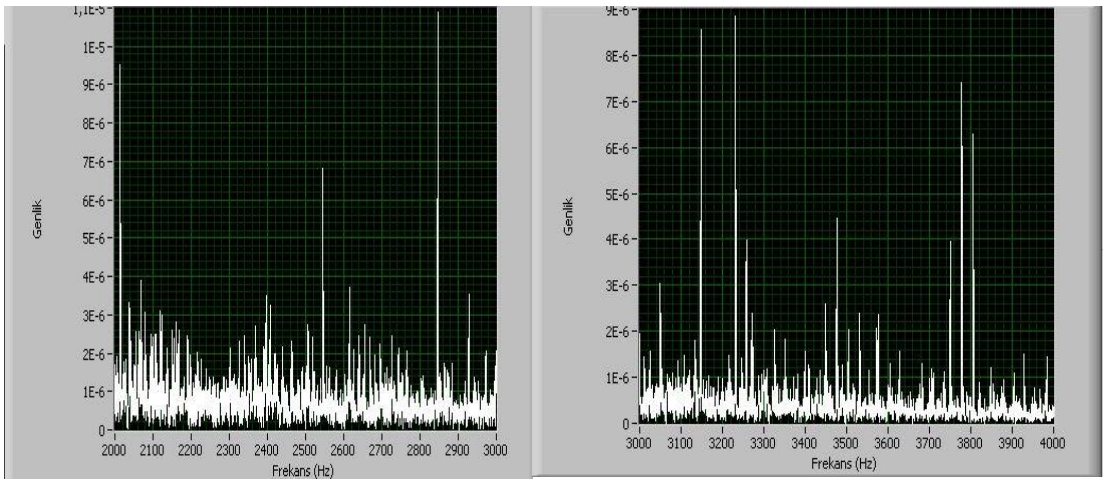
Şekil 4.13 Bilya arızalı rulmanın spektrum grafiği

Deney 5'te termal ve kimyasal bozulmaya maruz bırakılan rulmanın özelliğini belirlemek için akım örnekleri toplanmıştır ve frekans düzlemine aktarılmıştır. İlk dört deneyden farklı olarak rulmanın tüm parçaları korozyona maruz bırakılmıştır. Şekil 4.14'te deneyde kullanılan rulmana ait akım sinyalinin 0,04 saniyelik bölümü ve filtre uygulanmış haliyle birlikte verilmiştir.



Şekil 4.14 Termal ve kimyasal eskitilmiş rulmanın akım sinyali

Diğer deneylerde bölgesel hata tespiti için yapılırken 5. deney rulmanın tüm parçalarının hataya maruz kalması için yapılmıştır. Şekil 4.15'te spektrum grafiğinden kesitler verilmiştir.



Şekil 4.15 Deney 5 spektrum grafiği

4.2. Verilerin Sınıflandırılması ve YSA Modelinin Oluşturulması

Verilerin sınıflandırılması ve yapay sinir ağı modeli oluşturulmasında Matlab 2019 Deneme Sürümünün Neural Network Toolbox arayüzü kullanılmıştır. Giriş ve hedef veriler belirledikten sonra YSA modeli eğitilip sonuç matrisi olan karışıklık (confusion) matris yöntemiyle sınıflandırma yapılmıştır. Karışıklık matrisi, sınıflandırma modellerinde performansı değerlendirmek amacıyla hedefe ait tahminler ve gerçek değerlerin karşılaştırıldığı bir hata tespit yöntemidir.

4.2.1. İstatiksel ve Spektral Sınıflandırma

Deney düzeneğinde kullanılan asenkron motordan sağlam ve bozuk beş farklı durum için 20 kHz örnekleme hızında toplanan 2 saniyelik akım sinyallerinin 10000 örnekli hem istatiksel verileri hem de spektral verileri hesaplanmıştır ve YSA modelinde giriş olarak kullanılmak üzere kaydedilmiştir. Zaman ve frekans düzleminde elde edilen verilerin doğruluğunu anlamak için ayrı ayrı YSA modelinde eğitimi ve testi gerçekleştirilmiştir.

İstatiksel Verilerinin Sınıflandırılması: Zaman boyutunda analiz için kullanılan standart sapma, varyans, basıklık, etkin değer, çarpıklık, maksimum, minumum ve aralık gibi istatiksel parametreler toplamda 8 sütununa yerleştirilerek ilk 16 satır sağlam rulman verileri, sonraki satırlar arızalı rulman verileri olmak üzere toplamda 128 satır YSA eğitiminde ve testinde giriş olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.4'da yapay sinir ağı modelinde kullanılan giriş verilerinin 24 satırı verilmiştir.

Çizelge 4.5 YSA hedef matris

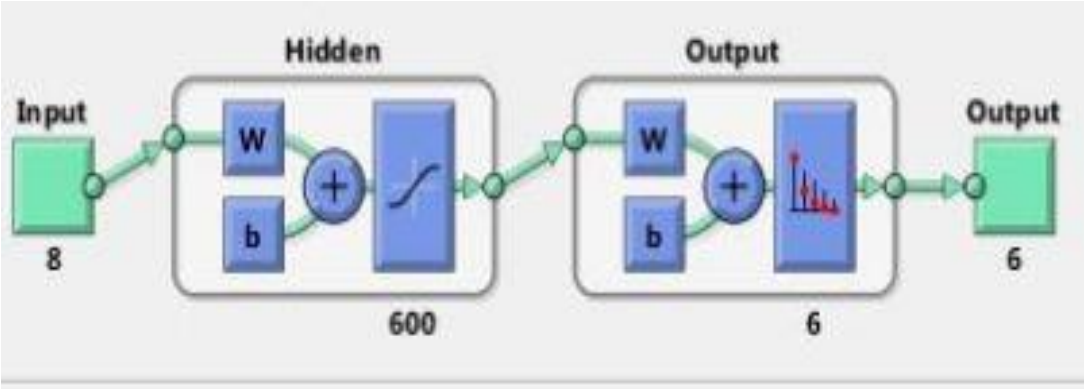
Sağlam	1	0	0	0	0	0
dış bilezik	0	1	0	0	0	0
iç bilezik	0	0	1	0	0	0
Kafes	0	0	0	1	0	0
Bilya	0	0	0	0	1	0
termal-kimyasal	0	0	0	0	0	1

Hata sınıflandırmasında kullanılan YSA modeli çok katmanlı yapay sinir ağı, sigmoid fonksiyonu ise aktivasyon fonksiyonu olarak kullanılıp geri yayılım (backpropagation) algoritması tercih edilmiştir. Yapay sinir ağı çıkış matrisi olarak sağlam durum, dış bilezik arızası, iç bilezik arızası, kafes arızası, bilya arızası ve termal-kimyasal arıza olmak üzere 6 çıkış olacak şekilde 128 satırlı hedef matris belirlenmiştir. Çizelge 4.5'te hedef matris gösterilmiştir

Çizelge 4.6 YSA istatiksel giriş verileri

	Etkin Değer	Stand.Sap.	Varyans	Basıklık	Çarpıklık	Maksimum	Minimum	Aralık
SAĞLAM	0,005988	0,005749	0,000033	1,621911	-0,40086	0,007909	-0,00767	0,015578
	0,005981	0,005465	0,00003	1,644975	-0,45783	0,007881	-0,00967	0,016554
	0,005584	0,005527	0,000031	1,619157	-0,38358	0,008307	-0,00807	0,015374
	0,005768	0,005677	0,000032	1,645369	-0,46319	0,008602	-0,00901	0,017615
DIŞ BİLEZİK	0,006255	0,005174	0,000027	1,71276	-0,31028	0,009914	-0,01101	0,020294
	0,006008	0,00499	0,000025	2,030121	-0,38271	0,009095	-0,01215	0,020233
	0,006312	0,005134	0,000026	1,871514	-0,40362	0,009377	-0,01077	0,001915
	0,006655	0,04535	0,000021	1,813615	-0,36333	0,009183	-0,01068	0,018858
İÇ BİLEZİK	0,003237	0,005152	0,000026	1,87879	-0,54406	0,008577	-0,01178	0,018353
	0,005759	0,005717	0,000033	1,886461	-0,31121	0,008809	-0,01171	0,018523
	0,004233	0,005174	0,000026	2,037827	-0,35756	0,008331	-0,01023	0,018559
	0,004978	0,004921	0,000025	1,968153	-0,32297	0,009017	-0,01001	0,019025
KAFES	0,005036	0,004929	0,000024	1,83094	-0,40276	0,008966	-0,01962	0,019589
	0,005006	0,004906	0,000024	1,87695	-0,39094	0,009878	-0,01081	0,020684
	0,005305	0,004214	0,000018	1,822635	-0,38581	0,009302	-0,01052	0,019824
	0,005733	0,004711	0,000022	1,889417	-0,37622	0,009005	-0,01095	0,01995
BİLYA	0,006734	0,006682	0,000045	1,725684	-0,33095	0,009983	-0,01182	0,021801
	0,005742	0,005697	0,000032	1,849407	-0,37538	0,009743	-0,01165	0,02139
	0,006385	0,006382	0,000041	1,712556	-0,33865	0,008471	-0,01206	0,020527
	0,005403	0,005399	0,000029	1,905815	-0,39741	0,008609	-0,01214	0,020744
TER-KİM	0,005347	0,005297	0,000028	1,851984	-0,39535	0,009496	-0,0108	0,020298
	0,006535	0,006509	0,000042	1,749351	-0,32576	0,010004	-0,01216	0,022163
	0,005863	0,005672	0,000032	1,912255	-0,34508	0,010364	-0,01051	0,020874
	0,006567	0,006556	0,000043	1,678518	-0,30908	0,00935	-0,01154	0,020893

YSA sınıflandırmasında kullanılacak eğitim, test, doğruluk veri yüzdelerinin ve gizli katman sayısında belli bir standard olmadığı için deneme yöntemiyle belirlenmiştir. En iyi sonuçlar 44 iterasyon ile verilerin %75'i eğitim, %15'i test, %15'i doğruluk ve gizli katman sayısı 600 olarak uygulandığında gözlenmiştir. Şekil 4.16'da hata tespiti için oluşturulan YSA modeli verilmiştir.



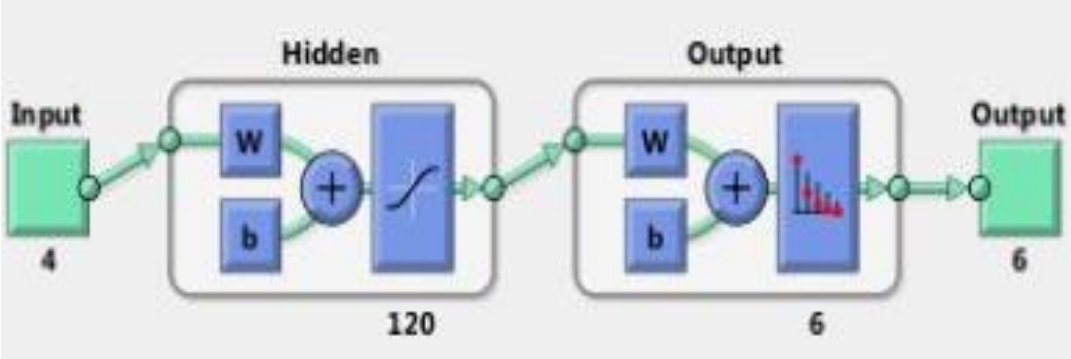
Şekil 4.16 Hata tespiti için kullanılan YSA Modeli-1

Spektral Verilerin Sınıflandırılması: Frekans boyutuna aktarılan akım sinyalinin 10000 noktalı HFD'si hesaplanarak, veriler sağlam durum ve hatalı durum için etkin değer yöntemiyle normalize edilmiştir ve kaydedilmiştir. Verilerin güvenirliği ve zenginliği için her bir deney 20 defa hesaplanmıştır. HFD'si hesaplanan bu veriler YSA giriş parametreleri olarak kullanılmıştır. Çizelge 4.7'de YSA giriş parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 YSA spektral giriş verileri HFD toplamı

SAĞLAM	DIŞ BİLEZİK	İÇ BİLEZİK	KAFES	BİLYA	TER-KİM
0,02271	0,046144	0,038195	0,03445	0,04129	0,02702
0,02167	0,048952	0,036431	0,03335	0,04126	0,02871
0,02269	0,045193	0,037936	0,03179	0,04226	0,029
0,02119	0,049271	0,038634	0,03292	0,04386	0,02942
0,02356	0,049871	0,037673	0,03164	0,0426	0,02633
0,02191	0,123915	0,036753	0,03289	0,04219	0,02832
0,0246	0,0476031	0,038681	0,03323	0,04113	0,02913
0,02298	0,048495	0,039585	0,0342	0,04321	0,02879
0,0219	0,046463	0,038211	0,03215	0,04328	0,02731
0,02353	0,055211	0,038319	0,03353	0,04199	0,02896
0,02075	0,049198	0,037889	0,03179	0,04238	0,02632
0,01729	0,044255	0,036984	0,02559	0,04306	0,02462
0,02175	0,092	0,0351	0,0298	0,0428	0,02513
0,01908	0,0452	0,0346	0,02989	0,0392	0,02648
0,01722	0,046255	0,037984	0,03259	0,04306	0,02562
0,01729	0,047255	0,036995	0,03459	0,04273	0,02289
0,01875	0,045818	0,038316	0,03524	0,04363	0,02766
0,01908	0,065034	0,03715	0,0338	0,03953	0,0268
0,01721	0,050758	0,037937	0,03284	0,04096	0,0286
0,01782	0,047675	0,036821	0,0318	0,04214	0,02862

Giriş parametreleri ilk 20 satır sağlam durum sonraki satırlar hatalı durum olmak üzere HFD toplamı, maksimum nokta, minumum nokta ve ortalama değerden oluşan 120 satır 4 sütun olarak belirlenmiştir. Çıkış olarak çizelge 4.5'de verilen hedef matrisi 120 satırlı 6 sütunlu olarak hazırlanmıştır. YSA eğitiminde kullanılacak veriler %75 eğitim, %15 test, %15 doğruluk ve gizli katman sayısı 120 olarak uygulandığında en iyi sonuçlar 90 iterasyon sonunda elde edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu sigmoid fonksiyon tercih edilmiştir ve geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Şekil 4.17'de hata tespiti için oluşturulan YSA modeli verilmiştir.



Şekil 4.17 Hata tespiti için kullanılan YSA Modeli-2

4.2.2. Sınıflandırma Sonuçları

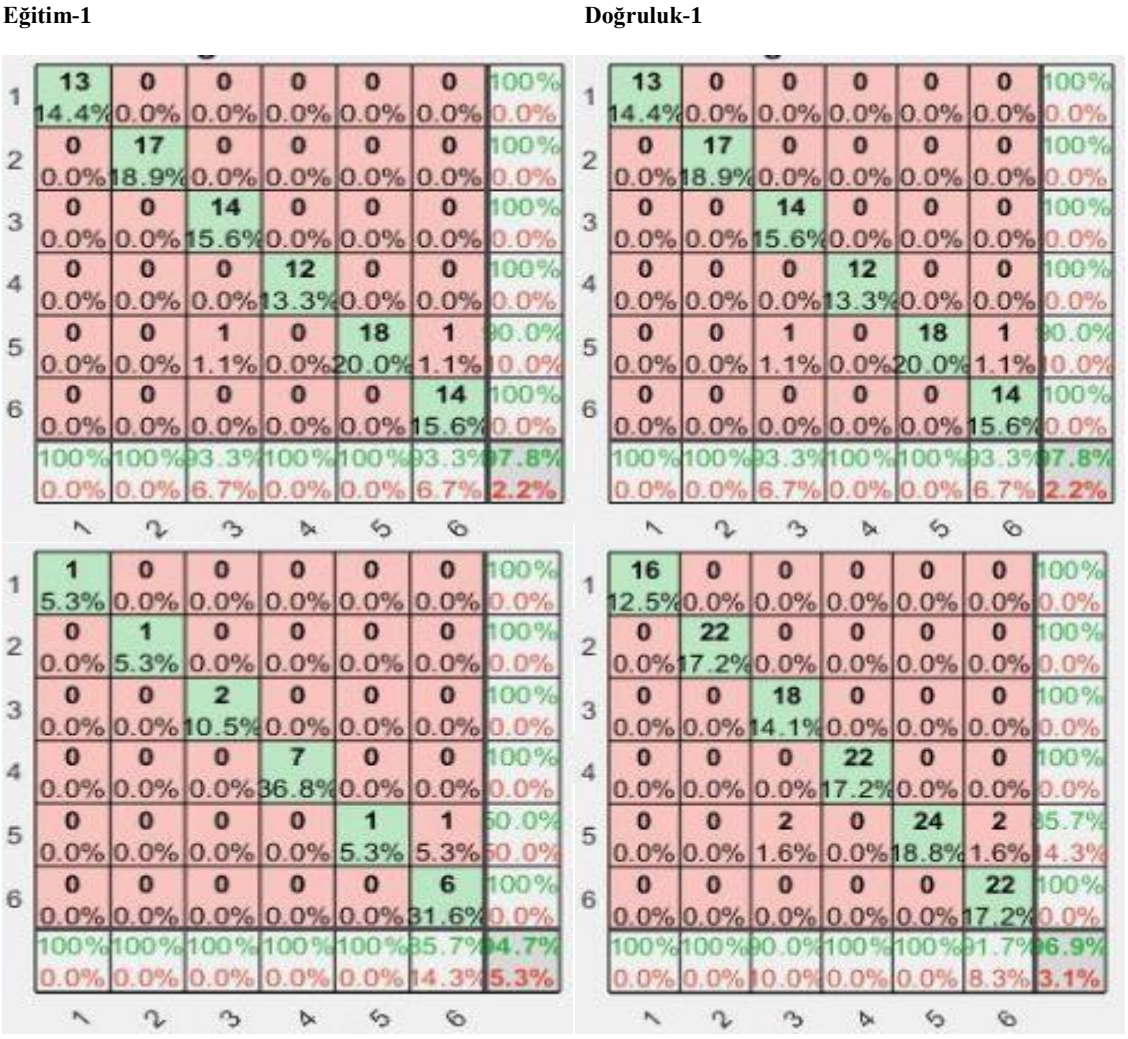
Akım örneklerinden zaman ve frekans düzleminde elde edilen özellikler yapay sinir ağı giriş verisi olarak kullanılıp sağlam durum ile hata durumların ayırt edilmesi için YSA modeli eğitilerek sınıflandırma işlemi gerçekleşmiştir.

Zaman boyutundan elde edilen istatiksel özellikler kullanılarak YSA modelinin eğitilmesi sonucunda gizli katman sayısına göre ortaya çıkan sınıflandırma hataları çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 İstatiksel verilerin hata oranları(%)

Gizli Katman Sayısı	**Eğitim Hatası(%)**	**Test Hatası(%)**	**Doğruluk Hatası(%)**	**Teşhis Hatası(%)**
20	4,4	15,8	5,3	6,3
50	11,1	36,8	26,3	17,2
60	10	26,3	10,5	12,5
200	4,4	31,6	10,5	9,4
300	4,4	21,1	10,5	7,8
600	**2,2**	**5,3**	**5,3**	**3,1**

İstatiksel verilerin YSA eğitim sonuçlarına bakıldığında 600 gizli katmana sahip olan ağda hatanın en düşük olduğu görülmüştür. Bu eğitime ait karışıklık matrisi tahmin sonuçları şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18 İstatiksel verilerin karışıklık (confusion) matrisi ile sınıflandırılması

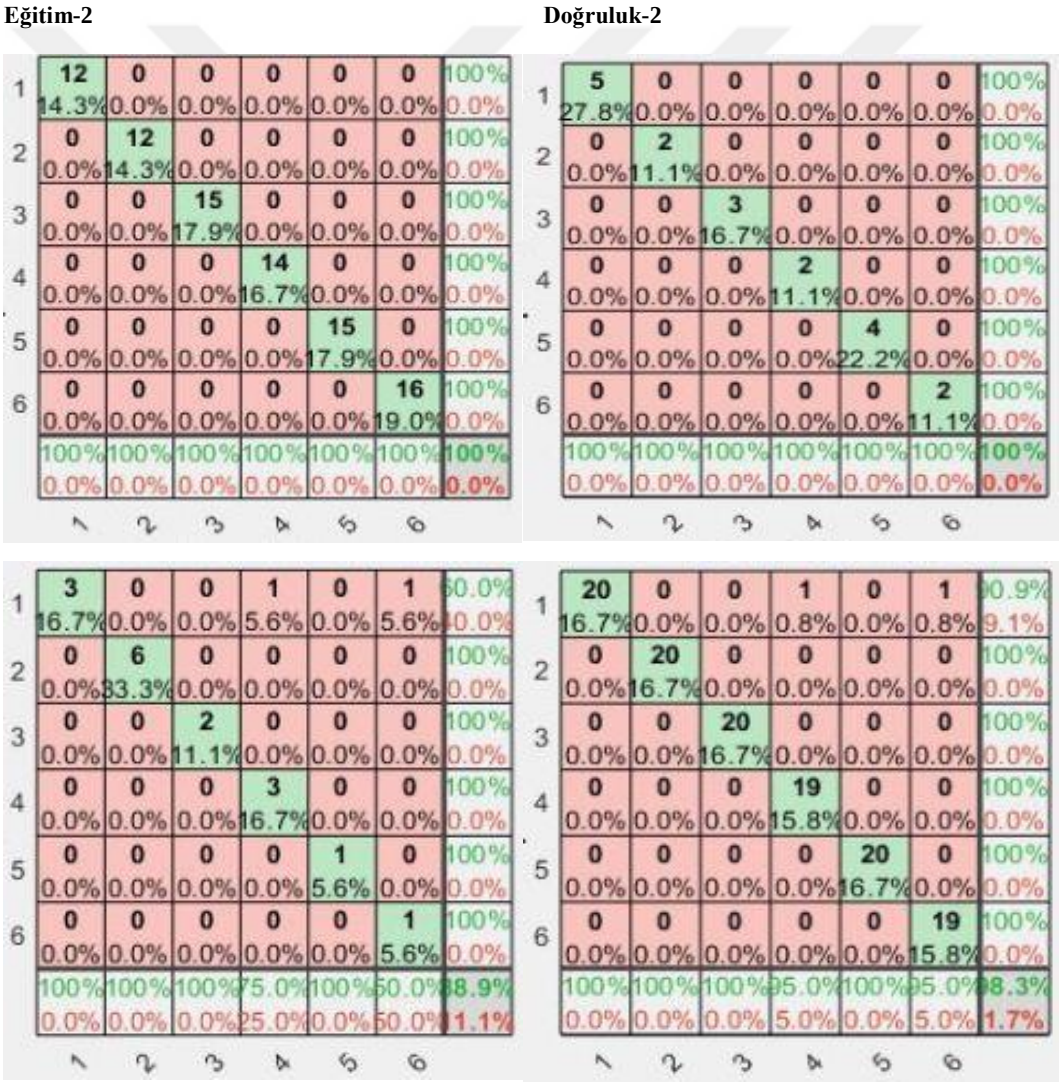
Sınıflandırma işlemi yapılırken; sınıf-1 sağlam durum, sınıf-2 dış bilezik arızası, sınıf-3 iç bilezik arızası, sınıf-4 kafes arızası, sınıf-5 bilya arızası ve sınıf-6 termal-kimyasal arızayı temsil edecek şekilde giriş verileri yerleştirilmiştir ve hedef matris bu sıraya göre ayarlanmıştır. Karışıklık matrisi incelendiğinde akım sinyalinin zaman boyutundan çıkarılan özelliklerinin hata teşhisinde güçlü yöntem olduğu görülmektedir.

Frekans boyutundan elde edilen spektral özellikler kullanılarak YSA modelinin eğitilmesi sonucunda gizli katman sayısına göre ortaya çıkan sınıflandırma hataları çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Spektral verilerin hata oranları(%)

Gizli Katman Sayısı	Eğitim Hatası(%)	Test Hatası(%)	Doğruluk Hatası(%)	Teşhis Hatası(%)
20	2,4	11,1	0	3,3
40	2,4	0	5,6	2,4
50	3,6	11,1	5,6	5
80	3,6	5,6	5,6	4,2
120	**0**	**11,1**	**0**	**1,7**
300	4,8	5,6	11,1	5,8

Spektral verilerin YSA eğitim sonuçlarına bakıldığında 120 gizli katmana sahip olan ağda hatanın en düşük olduğu görülmüştür. Bu eğitime ait karışıklık matrisi tahmin sonuçları şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Spektral verilerin karışıklık matrisi ile sınıflandırılması

Sınıflandırma işlemi yapılırken; sınıf-1 sağlam durum, sınıf-2 dış bilezik arızası, sınıf-3 iç bilezik arızası, sınıf-4 kafes arızası, sınıf-5 bilya arızası ve sınıf-6 termal-kimyasal arızayı temsil edecek şekilde giriş verileri yerleştirilmiştir ve hedef matris bu sıraya göre ayarlanmıştır. Karışıklık matrisi incelendiğinde akım sinyalinin frekans boyutundan çıkarılan özelliklerinin hata teşhisinde güçlü yöntem olduğu görülmektedir.

Akım sinyalinin hem istatiksel özellikleri hem de spektral özelliklerinin rulman arızalarının teşhisinde kullanılmasıyla arıza tespiti gerçekleştirilmiştir. YSA çıkış sonuçlarına bakıldığında iki yönteminde etkili bir enstrüman oldukları görülmüştür. Sağlam durum ve hatalı durumların karışıklık matrisi ile yapılan sınıflandırma sonuçlarından elde edilen çıkarımlar çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 İstatiksel ve spektral verilerin sınıflandırma sonuçları

Hata Sınıflandırma Sonuçları	**İstatiksel Analiz Doğruluk(%)**	**Spektral Analiz Doğruluk(%)**
Sağlam Durum	100	100
Dış Bilezik Arızası	100	100
İç Bilezik Arızası	90	100
Kafes Arızası	100	95
Bilya Arızası	100	100
Termal-Kimyasal A.	91,7	95
Teşhis Doğruluğu(%)	**96,7**	**98,3**

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında endüstriyel süreçte yoğun olarak kullanılan asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti ve sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. ASM'ler üzerinde yapılan arıza tespit çalışmaları incelendiğinde rulman arızaları tüm asenkron motor arızaların %41'ini oluşturmaktadır. Zorlu üretim şartlarında birçok zorlayıcı kuvvete maruz kalan rulmanlarda oluşacak bir hata sistemde zamansız kesintilere, üretim kaybına ve onarılamayacak arızalara neden olur. Bu bağlamda öngörülü bakım çalışmaları sistemin sağlıklı işleyişi açısından son derece önemlidir. Hazırlanan deney setinde öngörülü bakım amaçlanmıştır ve yapay olarak arızalandırılan rulmanlar sağlam durum ile hatalı durumu ayırt etmek için performans testine tutularak akım sinyallerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Rulmanın dış bileziği, iç bileziği, kafesi ve bilyası arızalandırılıp bölgesel hatalar; termal ve kimyasal eskimeye maruz bırakılarak tüm parçalarda oluşan korozyon hataları incelenmiştir. Deneyde her bir durum için toplamda 6 rulman kullanılmıştır.

Akım sensörü yardımıyla rulmanlardan alınan akım sinyalleri 20 kHz örnekleme hızında Labview programına aktarılmıştır. Alçak geçiren filtre uygulanarak sinyalde gürültüler önlenmiştir. Elde edilen sinyalin zaman düzleminde istatiksel özellikleri belirlenmiştir ve kaydedilmiştir. Aynı anda frekans düzleminde spektral özellikleri de belirlenmiştir ve etkin değer yöntemi ile normalize edilerek kaydedilmiştir. HFD analiz yardımıyla frekans düzlemine aktarılan akım sinyalinin spektrum grafiği incelendiğinde hatalı rulmana ait karakteristik frekansların ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak sürücüden kaynaklanan harmoniklerden dolayı hatalı rulmana ait karakteristik frekanslar hesaplanan her frekansın harmonikleri spektrum grafiğine bakılarak belirlenememiştir. Karakteristik hata frekanslarının 500-2000 Hz frekans bandında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu frekans bandında farklı rulman hatalarına ait karakteristik frekanslar arasında da benzerlikler görülmüştür ve hesaplanan hata frekansları bu gözlemi doğrulamaktadır. Deney sonuçlarına göre HFD analiz yönteminin hata tespitinde tek başına yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca değişken hızlarda sürülen motorlarda hem şebeke frekansının harmonikleri hem de motora uygulanan sürme frekansının harmonikleri nedeniyle rulman karakteristik hata frekanslarını belirlemek daha da zorlaşmıştır. Akım sinyalinden çıkarılan istatiksel ve spektral özellikler

incelendiğinde sağlam durum ve hatalı durum arasında belirgin farklar görülmüştür. Özellikle hesaplanan etkin değer, çarpıklık, basıklık gibi istatiksel özelliklerde sağlam rulmana göre hatalı rulmanda belirgin değişimler gözlenmiştir. Spektral özellikler incelendiğinde hesaplanan 10000 noktalı HFD'nin her bir durum için farklı olduğu da görülmüştür.

Genellikle bir arıza teşhis sistemi veri toplama, sinyal analiz, özellik çıkarma ve arıza tespit algoritmasından oluşmaktadır. Bu çalışmada motor akım işaret analizi kullanılarak akım sinyalleri toplanmıştır ve sinyal işleme teknikleri yardımıyla sinyal düzgünleştirilerek istenilen özelliğe uygun hale getirilmiştir. Bu sinyalin istatiksel ve spektral özellikleri belirlenerek özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Arıza tespit algoritması olarak yapay sinir ağlarından faydalanılmıştır. Zaman ve frekans boyutunda belirlenen özellikler YSA giriş verisi olarak kullanılarak arıza teşhis ve sınıflandırma işlemleri yapılmıştır. İstatiksel ve spektral veriler YSA ile eğitildiğinde güçlü bir arıza tespit yöntemi olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak sürücü ile beslenen asenkron motorlarda akım işaretlerinin analizi yapılarak rulman arızalarının tespit edilebileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Ancak akım sinyalinin istatiksel ve spektral analizi arızayı tespit etmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu yüzden hatayı tespit etmek ve sınıflandırmak için yapay sinir ağına ihtiyaç duyulmuştur. Sağlam durum ve hatalı rulmanın akım işaretleri arasındaki farklar tespit edilip YSA ile eğitilmesi ve sınıflandırılması sonucunda arıza tespiti yapmak mümkündür.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada bir motor üzerine yerleştirilen 5 hatalı rulmanın özellikleri belirlenmiştir sağlam durumla kıyaslama işlemi yapılarak hata tespiti yapılmıştır. Farklı güçlere sahip asenkron motorlarında akım sinyalinde değişim olacağı ve motor gücüne göre akım harmoniklerinde meydana gelen farklardan dolayı YSA modelinin ayrı ayrı eğitilmesi gerekmektedir. Aynı güce sahip motorların bulunduğu endüstriyel üretim tesislerinde aynı anda motor akım işaretlerini izleyerek ve YSA kullanılarak hata sınıflandırması ve tespiti yapmak deneysel sonuçlara göre mümkündür. Ayrıca motor akım işaret analizi kullanılarak asenkron motorlarda rotor arızaları, stator arızaları, yataklama arızaları ve rulman arızalarını kapsayacak tümleşik bir arıza tespiti yapılabilir.

KAYNAKLAR

Agarwal A., Misra R., "*Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor: Case Study*", International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering **(2015)**, 5(1), 30-35.

Akar, M.; Çankaya, İ.: "Evirici ile Sürülen Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Tespiti", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs **(2009).**

Akar, M.: "*Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Yapay Zeka Yöntemleri ile Mekanik Arızaların Teşhisi*", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye **(2009)** 1-15.

Aktürk N., Eroğlu, M., Karaçay, T., "*Rulmanların titreşimlerinin incelenmesiyle rulmanlarda sağlık kontrollerinin yapılması*", G.Ü. DPT Projesi Son Raporu, DPT 95 K 120370, Ankara **(2002)**.

Arslan, H., Orhan, S., Aktürk N., "*Titreşim analiziyle rulman arızalarının belirlenmesi*", G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi, Cilt 18, No 2, 39-48 **(2003)**.

Arslan, H.; Aslan, E.; Aktürk, N.: "*Bilyalı Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi Yöntemiyle İncelenmesi*", Gazi University, Journal of Engineering and Architecture, 21, 3, **(2006)** 541-552.

Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Ders Notları.

Arabacı, H.; Bilgin, O.; Ceylan, M.; Ceylan, R.: "*Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhisi*", ELECO'2004 Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, **(2004)**.

Ateş M.C; https://www.voltimum.com.tr/haberler/akim-imza-analizi-nedir, **(2016)**

Ayaz, E., "*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 **(2002)**.

Başaran, M.; Ece, D. G.: "*Detection of Mechanical Faults in Induction Motors Supplied with Adjustable Speed Drives*", Electric Machines and Drives Conference, IEEE International, 3-6 May **(2009)** 1414-1419.

Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G-A.: "*Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines*", IEEE Transactions on Industrial Electronıcs, Vol. 55, No. 12, Dec., **(2008)** 4109-4126.

Benbouzid, M.E.H.:"A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, Issue 5, Oct. **(2000)** 984-993.

C. Aliustaoğlu, "*Rulman arızalarının gerçek zamanda analizi ve arıza kaynaklarının tespit edilmesi*," Fen Bilimleri Enstitüsü Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi, **(2008)**.

Çayıroğlu, İ. : "*Yapay Sinir Ağları, İleri Algoritma Analizi-5*", Karabük Üniversitesi, Karabük **(2019)**

Doç. Dr. Ünal Küçük, Telekom Devreleri Ders Notları **(2019)**, http://www.yildiz.edu.tr/~kunal/telekom_devre.htm

Doğan, Z.: "*Ayrıklaştırma Yöntemi ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi*", Doktora Tezi, İstanbul Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül **(2012)**.

Ece, D. G., Ünsal, A., Çanakoğlu, A.İ., Tunaboylu, S.N., Elektrik Makinaları, TC Anadolu Üniversitesi Yayını No:2619, Açıköğretim Fakültesi Yayını No:1587, 198 s **(2012)**.

Elhoussin Elbouchikhi, Vincent Choqueuse, Yassine Amirat, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Sylvie Turri, "*An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines*" IEEE Transactions on Energy Conversion **(2017)**.

Ergin, S., Uzuntas, A., Gulmezoglu, M. B., "*Detection of stator, bearing and rotor faults in induction motors*". Procedia Engineering, 30, 1103-1109 **(2012)**.

Gaeid, K.S.; Mohammed, H.A.F.: "*Diagnosis and Fault Tolerant Control of the Induction Motors Techniques a Review*", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(2), **(2010)** 227-246.

Ghate, V. N.; Dudul, S. V.: "*Optimal MLP neural network classifier for fault detection of three phase induction motor*", Expert Systems with Applications, 37 **(2010)**

Gökhan,H.;https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/16376/mod_resource/content/1/HAFTA11_AcikDers.pdf **(2019)**.

Haddad, R. Z., Lopez, C. A., Pons-Llinares, J., Antonino-Daviu, J., Strangas, E. G., "*Outer race bearing fault detection in induction machines using stator current signals*". In Industrial Informatics (INDIN), **(2015)** IEEE 13th International Conference on (pp. 801-808).

Haji, M.; Toliyat, H. A.: "Pattern Recognition-A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 16, No. 4, December, **(2001)** 312-317.

Hulugappa B., Pashab T., Ramakrishnac K. M., "*Condition Monitoring of Induction Motor Ball Bearing Using Monitoring Techniques*", International Journal of Scientific and Research Publications **(2012)**, 2(11), 406-413.

K.C. Deekshit Kompella, Venu Gopala Rao Mannam and Srinivasa Rao Rayapudi, "*Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques*", Department of EEE, PVPSIT, Vijayawada, AP, India **(2017)**.

Köse, R.K., Makine arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi, Mühendis ve Makine, Cilt: 45, Sayı: 538.

Li, K., Zhou, J., Zhao, Q., Chen X., "*Research on Fault Diagnosis Method of Bearing Based on Second Generation Wavelet Packets*", IEEE International Conference on Computer Science and Information Processing **(2012)**.

Maru, B., Zotos, P.A., "*Anti-friction bearing temperature rise for NEMA frame motors*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 5 **(1989)**.

McCormick, A.C.; Nandi, A.K.: "*Bispectral and trispectral features for machine condition diagnosis*", IEE Proceedings-Vision Image and Signal Processing, 146(5), **(1999)** 229–234.

Morrison, N.: *Introduction to Fourier Analysis*, John Wiley, New York, USA,**(1994)**.

Orhan, S., "*Dönen makinelerde oluşan arızalar ve titreşim ilişkisi*", Teknoloji, Yıl 6, Sayı 3-4, 41-48 **(2003)**.

Orhan, U.: EEG İşaretlerinden Epilepsi Hastalığının Teşhisi İçin Yeni Yaklaşımlar", *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül **(2011)** 20-70.

Öztemel, E. : "*Yapay Sinir Ağları"*, Papatya Yayıncılık, İstanbul, (**2003**).

Proakis, J. G.and Manolakis, D.: "*Digital Signal Processing*", Prentice Hall, New Jersey **(2007)**.

Sağıroğlu, S.: "*Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları"*, Ufuk Kitabevi, 32, Kayseri, **(2003)**.

Samanta, B.; Al-balushi, K.R.: "*Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features*", Mechanical Systems and Signal Processing, 17(2), **(2003)** 317–328.

Senguler, T.; Karatoprak, E.; Ayaz E.; Gullulu S.; Seker S.: "*Entropy Approach Using PCA for Sequential Accelerated Aging Processes in Electrical Motors*", The 6th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Cracow, Poland **(2007)** 501-505.

Shrinathan Esakimuthu Pandarakone, Yukio Mizuno, Hisahide Nakamura, "*Distinct Fault Analysis of Induction Motor Bearing Using Frequency Spectrum Determination and Support Vector Machine*" IEEE Transactions on Industry Applications **(2017)**.

Silva, J.L.H., Cardoso, A.J.M., "*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 **(2006)**.

Taner, E., "*Makine parçalarında yeni ıslah yöntemleri*", Roketsan A.Ş **(1991)**.

V. C. M. N. Leite et al., "*Detection of localized bearing faults in induction machines by spectral kurtosis and envelope analysis of stator current*", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1855-1865, Mar. **2015**.

X. Zhang, X. Chen ve Z. He, "*Fault diagnosis based on support vector machines with parameter optimization by an ant colony algorithm*," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 224, pp. 217-229, **(2010)**

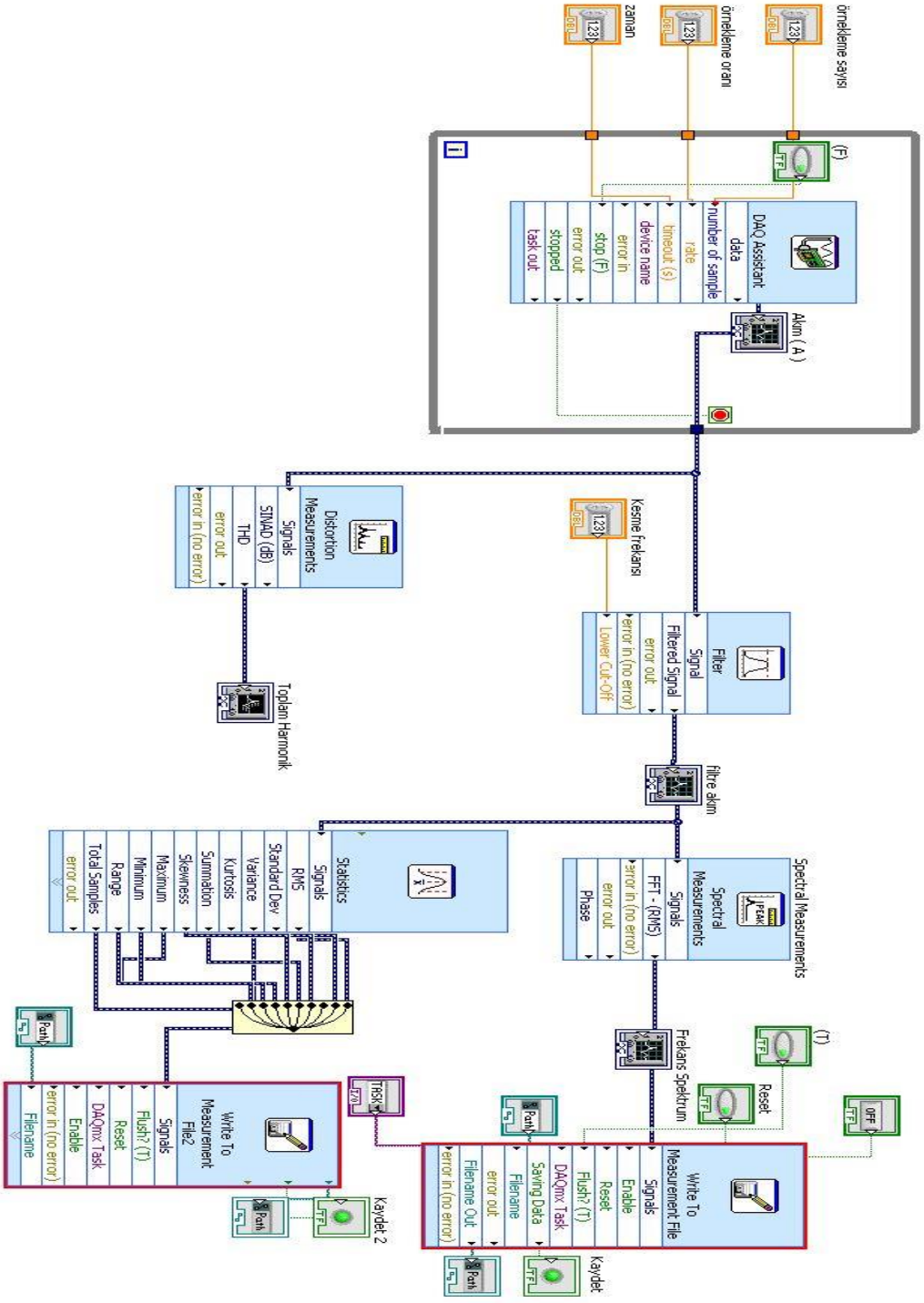
Yapay Sinir Ağları Seminer-1, 2016, http://www.elektrik.gen.tr/wp-content/uploads/2016/05/yapaysiniraglari.pdf.

Yılmaz, "*Asenkron motorlarda akım, sıcaklık, titreşim verilerinin analizi ve ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi uygulaması*", Yüksek lisans tezi, İstanbul **(2008)**

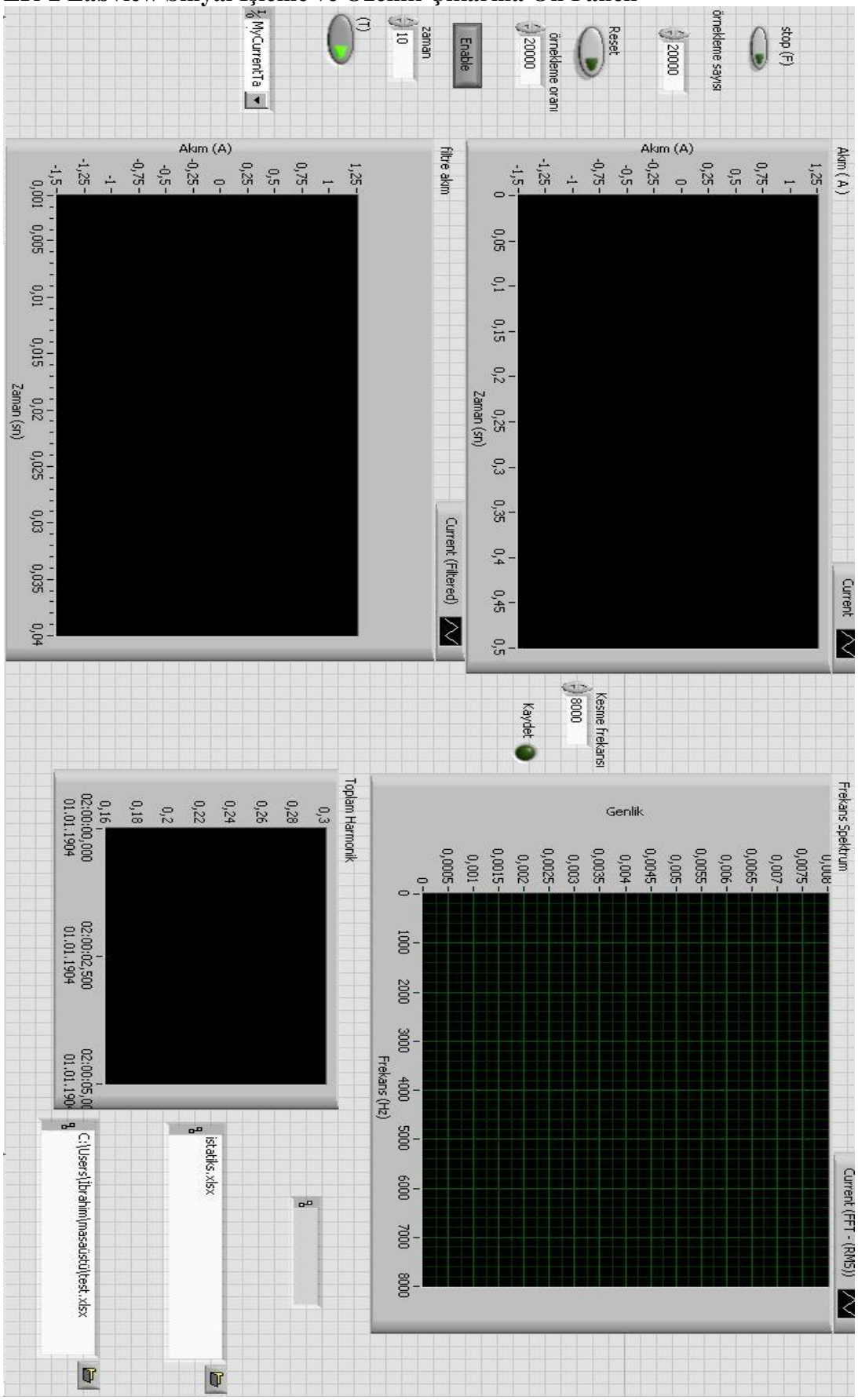
Zarei, J., Poshtan, J., "*Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current*", Tribology International, **(2007)** 40, 763–769.

EKLER

EK-1 Labview Sinyal İşleme ve Özellik Çıkarma Blok Diagramı



EK-2 Labview Sinyal İşleme ve Özellik Çıkarma Ön Paneli



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim Akkurt
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Cihanbeyli/24.03.1991
Telefon : 0554 988 7301
e-mail : akkurt_207@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Cihanbeyli Anadolu Lisesi, Cihanbeyli, Konya	2009
Üniversite	:	KTO Karatay Üniversitesi, Karatay, Konya	2015
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2020
Doktora	:	-	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2016	Panplast Tarımsal Sulama A.Ş.	Üretim mühendisi

YABANCI DİLLER: İNGİLİZCE