

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ KULLANARAK RULMAN HATA  
BOYUTUNUN TESPİTİ**

**KAPLAN KAPLAN**

**KOCAELİ 2015**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

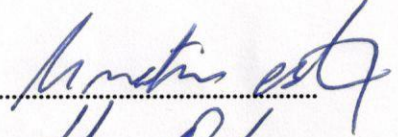

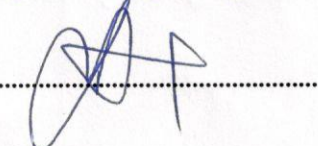
**YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ KULLANARAK RULMAN HATA  
BOYUTUNUN TESPİTİ**

**KAPLAN KAPLAN**

**Prof. Dr. H. Metin ERTUNÇ**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

**Prof. Dr. Hasan OCAK**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Doç. Dr. Hasari ÇELEBİ**  
Jüri Üyesi, Gebze Tek. Üniv.

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 15.06.2015**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Rulmanlar makinelerde çok sık olarak kullanılan ve mekanizmalar arasında sürekli sürtünmelere maruz kalan makine parçalarından biridir. Rulmanlarda oluşabilecek arızalar, tüm sistemin düzenli çalışması ve aksamalara maruz kalmaması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada rulmanlar üzerinde oluşan hataların boyutu farklı yapay zekâ yöntemleri ile sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Sınıflandırmada kullanılmak üzere yapay hatalı denek rulmanlar oluşturulmuş ve rulman üzerindeki hatalar küçük, orta ve büyük olarak sınıflandırılmaya çalışılmıştır.

Bu projenin gerçekleştirilmesinde beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. H. Metin Ertunç'a, Prof. Dr. Hasan Ocak'a, desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşım Arş. Gör. Melih Kuncan'a ve vermiş olduğu değerli bilgi ve tecrübelerinden dolayı Samet Bayram'a teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve beni bugünlere getiren annem, babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2015

Kaplan KAPLAN

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vi
ÖZET.....	vii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Rulmanlarda Kestirimci Bakım ve Önemi .....	5
1.2. Rulmanlarda Titreşim Analizi ve Yöntemleri.....	8
1.2.1. Frekans tanım bölgesi titreşim analizi.....	9
1.2.2. Zaman - frekans tanım bölgesi titreşim analizi .....	15
1.2.3. Yapay zekâ analiz yöntemleri .....	20
2. RULMANLAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	23
2.1. Rulmanların Yapısı.....	29
2.1.1. İç bilezik .....	29
2.1.2. Dış bilezik .....	29
2.1.3. Yuvarlanma elemanları .....	29
2.1.4. Kafes.....	29
2.1.5. Kapaklar .....	30
2.1.6. Kılavuz ringi.....	30
3. FARKLI TİTREŞİM ANALİZİ YÖNTEMLERİ KULLANARAK RULMANLARDA HATA BOYUTUNUN SINIFLANDIRILMASI.....	31
3.1. Rulmanlarda Titreşim Verisinin Elde Edilmesi ve Ham Titreşim Verisinden İstatiksel Parametrelerin Çıkartımı .....	32
3.2. Yapay Sinir Ağları (YSA) Sınıflandırma Yöntemi.....	37
3.3. Uyarlanabilir Sinirsel Bulanık Çıkarm Sistemi (ANFIS) ile Sınıflandırma Yöntemi .....	39
3.4. Destek Vektör Makineleri (SVM) Yöntemi ile Sınıflandırma.....	43
3.5. k - En Yakın Komşuluk Yöntemi (k-NN) ile Sınıflandırma .....	47
4. RULMAN DENEY DÜZENEGİ.....	49
4.1. AC Senkron Servo Motor.....	49
4.1.1. AC senkron servo motorun yapısı.....	50
4.1.2. AC senkron servo motorun çalışması.....	50
4.2. Senkron Servo Motor Sürücüsü.....	51
4.3. Titreşim Sensörü.....	52
4.4. Sinyal Şartlandırıcı.....	53
4.5. NI-DAQ Veri Toplama Kartı .....	53
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	57
5.1. Laboratuvar Çalışması Sonuçları .....	58
5.2. Karşılaştırmalı Başarı Oranları.....	66
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	67
KAYNAKLAR.....	69

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	73
ÖZGEÇMİŞ .....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Rulman hata kaynakları .....	5
Şekil 1.2.	Asenkron motorlarda en sık karşılaşılan hatalar ve yüzdeleri .....	6
Şekil 1.3.	Rulman hata aşamaları .....	7
Şekil 1.4.	Titreşim verisi toplama şeması .....	12
Şekil 1.5.	Bir sinyalin ikinci seviye dalgacık paket ayrışımı .....	17
Şekil 1.6.	Bir sinyalin yaklaşım ve ayrıntı sinyalleri .....	17
Şekil 1.7.	Geliştirilmiş termal hata analiz sistemi .....	22
Şekil 2.1.	Rulman ve bölümleri.....	23
Şekil 2.2.	Temas açısı $0^0$ , bilya sayısı $N=9$ olan rulmana ait temel özellikler .....	28
Şekil 3.1.	Lazerle oluşturulmuş yapay hatalar .....	32
Şekil 3.2.	Lazer ile oluşturulmuş yapay hatanın mikroskobik görüntüsü .....	33
Şekil 3.3.	Örnek ham titreşim verisi.....	33
Şekil 3.4.	Örnek çarpıklık ve basıklık grafiği .....	37
Şekil 3.5.	Tanjant-Sigmoid(tansig) ve purelin transfer fonksiyonu.....	38
Şekil 3.6.	Sinir hücreleri ve katmanlar .....	39
Şekil 3.7.	ANFIS Mimarisi ve Katmanları.....	40
Şekil 3.8.	Gaussian Üyelik Fonksiyonu .....	42
Şekil 3.9.	Optimum hiperdüzlem ve destek vektörleri.....	45
Şekil 3.10.	k-NN Sınıflandırma Algoritması .....	48
Şekil 4.1.	Tezde kullanılan deney düzeneği.....	49
Şekil 4.2.	AC servo motor kesiti .....	50
Şekil 4.3.	LVD servo motor sürücüsü.....	52
Şekil 4.4.	Titreşim sensörü ve yapısı.....	52
Şekil 4.5.	Sinyal yükseltici .....	53
Şekil 4.6.	NI-DAQ - 6211 veri toplama kartı.....	55
Şekil 4.7.	NI-DAQ programı ön görüntüsü.....	55
Şekil 5.1.	Rulman sınıflandırma modeli.....	57
Şekil 5.2.	YSA matlab öğrenme aracı.....	59
Şekil 5.3.	YSA en iyi öğrenme performansı .....	60
Şekil 5.4.	YSA tahmin sonuçları.....	60
Şekil 5.5.	ANFIS tahmin sonuçları .....	61
Şekil 5.6.	3, 5, 7, 8 komşuluk değerleri için k-NN sınıflandırma sonuçları.....	62
Şekil 5.7.	k-NN komşuluk başarı oranları.....	63
Şekil 5.8.	SVM sınıflandırma sonuçları .....	64
Şekil 5.9.	SVM sınıflandırma modeli aşamaları .....	65
Şekil 5.10.	Dört karşılaştırma metodu sınıflandırma sonuçları.....	65
Şekil 5.11.	Karşılaştırmalı sınıflandırma modelleri başarı oranları .....	66

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Kullanılan rulmana ait temel ölçüler.....	28
Tablo 2.2. Rulman döner elemanlarına ait dönme frekansları.....	29
Tablo 4.1. Titreşim sensörünün özellikleri.....	53
Tablo 5.1. Hata tipleri ve karşılıkları .....	58
Tablo 5.2. YSA simülasyon parametreleri.....	59
Tablo 5.3. ANFIS simülasyon parametreleri .....	61

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Ayrıntı sinyali
b	: Bias değeri
C	: Crest faktör
d	: İki nokta arasındaki uzaklık
e	: Euler sayısı
f	: Aktivasyon fonksiyonu
$h_j$	: YSA çıkışları
k	: Basıklık
k	: Boyut
n	: Örnek sayısı
s	: Çarpıklık
w	: Ağırlık değeri
X(k)	: k noktalı ayrık sinyal
$x_j$	: YSA girişleri
Y	: Yaklaşım sinyali
$\mu$	: Bulanıklaştırılmış değer
$\sigma$	: Standart sapma

### Kısaltmalar

AA	: Ayrıntının Ayrıntısı
ANFIS	: Adaptive Neuro - Fuzzy Inference System (Uyarlanabilir Sinirsel - Bulanık Çıkarım Sistemi)
ANN	: Artificial Neural Networks (Yapay Sinir Ağları)
AY	: Ayrıntının Yaklaşımı
AZFD	: Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü
DVM	: Destek Vektör Makineleri
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
KKT	: Karush - Khun - Tucker
k-NN	: k-Nearest Neighbour (k-En Yakın Komşu)
KSFD	: Kısa Süreli Fourier Dönüşümü
LVD	: Low Voltage Directive (Düşük Voltaj Direktifi)
RMS	: Root Mean Square (Karelerin Ortalamasının Karekökü)
SVM	: Support Vector Machine (Destek Vektör Makineleri)
YA	: Yaklaşımın Ayrıntısı
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YY	: Yaklaşımın Yaklaşımı



## YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ KULLANARAK RULMAN HATA BOYUTUNUN TESPİTİ

### ÖZET

Rulmanlar genellikle yataklama veya dönme elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Rulmanlar büyük yükler ve yüksek devir koşulları altında çalışmaktadır. Ayrıca, rulman içerisindeki metal metale temas rulmanları hassaslaştırmaktadır. Günümüz makinelerinde rulman arızaları sistemin çalışmasında aksamaya neden olmakta veya tamamen sistemi durdurmaktadır. Oluşabilecek rulman arızaları tüm sisteme çok büyük miktarlarda hasar verebilir. Bu yüzden rulman arızalarının önceden kestirilmesi ve düzenli olarak arıza teşhis incelemesi yapılması gerekmektedir. Arıza teşhisi için çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında projede kullanılmak üzere rulman iç bileziklerinde lazer ışını ile yapay hatalar oluşturulmuş ve bir ivmeölçer sensörü ile titreşim sinyalleri toplanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, rulmanlarda meydana gelen arızaların boyutunu, yapay zekâ metotları kullanarak teşhis etmektir. Elde edilen ham titreşim verilerinin gerçek zamanda istatistiksel parametreleri çıkarılarak belirli ağırlıklarla çarpılmış ve oluşturulan yapay zekâ modellerine giriş olarak verilmiştir. Bu parametreler ile yapay zekâ teknikleri rulmanlarda meydana gelen arızaların boyutu başarı bir şekilde sınıflandırmış ve oluşturulan hata bandı ile tahmin sonuçlarında oluşan ufak hatalar giderilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Arıza Teşhisi, Hata Boyutu Sınıflandırma, Kestirimci Bakım, Sinyal İşleme, Yapay Zeka Teknikleri.

# **BEARING FAULT SIZE DETECTION BY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES**

## **ABSTRACT**

Bearings generally employed as bearing or rolling elements. Bearings operate often under high load and high running speed conditions. Also, metal to metal contact in the bearings makes them vulnerable. In today's machines, bearing faults cause downtime in system operation or stop completely the system. Bearing faults can cause huge damage in the whole system. Therefore, the prediction of bearing faults and regularly fault diagnosis examination should be done. Various systems have been developed for bearing fault diagnosis. In this study, artificial faults are created on bearing inner rings by a laser beam and vibration signals are collected by an accelerometer sensor.

The purpose of this study is to diagnose the size of the faults occurring on the bearings by using artificial intelligence methods. After real-time statistical parameters of the obtained raw vibration data are extracted, they are multiplied by specific weight and they are given as input to the artificial intelligence models. Artificial intelligence techniques have classified the size of bearings faults successfully with these parameters. Minor bugs occurred as a result of prediction have been fixed by the generated error band.

**Keywords:** Fault Diagnosis, Fault Size Classification, Predictive Maintenance, Signal Processing, Artificial Intelligence Techniques.

## GİRİŞ

Endüstrinin hızlı gelişimi, sanayide insan müdahalesini azaltarak otomasyon sürecini hızlandırmış ve modern makine ve donanımlara olan ihtiyacı artırmıştır. Otomasyon sistemleri, insan gücüyle yapılan işlemleri daha kısa sürede ve daha stabil olarak gerçekleştirmektedir. Otomasyon sistemlerinin artması, bu makinelerde kullanılan yedek parça endüstrisini hem de bu parçaların bakım ve onarım ihtiyaçlarını da artırmıştır. Böylelikle bakım-onarım hizmeti endüstride otomasyon sistemleri için önemli hale gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılarak makinelerin en önemli parçalarından biri olan rulmanlarda meydana gelen hatanın boyutu kestirilmiştir. Bu işlem için daha önce TUBİTAK projesi kapsamında yapılan bir rulman-mil düzeneği kullanılmıştır. Ayrıca rulman üzerinde lazer ışını ile yapay hatalar tez çalışması için oluşturulmuştur. Hatalı rulmanlardan toplanan veriler analiz edilerek geçerli sonuçlar elde edilmiştir.

Bölüm 1’de rulmanlar hakkında genel bilgiler ve endüstrideki önemi ve kestirimci bakımdan bahsedilmiştir. Ayrıca çeşitli titreşim analiz yöntemlerinden bahsedilerek bu yöntemler ile ilgili yapılan çalışmalara değinilmiştir.

Bölüm 2’de rulman ve yapısı hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’de titreşim verisi elde edilişi, gerçek zamanda istatistiksel parametre çıkartımı ve hata boyutu sınıflandırmada kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Bölüm 4’de bu tez çalışması için geliştirilen rulman-mil düzeneği incelenmiştir. Kullanılan servo motor ve sürücüsünün kullanımı ve düzeneğin çalışması hakkında geniş bilgi verilmiştir.

Bölüm 5’de bu tez çalışması kapsamı oluşturulan yapay hatalı rulmanlardaki hataların sınıflandırmasında kullanılan algoritmalarından elde edilen deneysel sonuçlar

ve bu sonuçların karşılaştırmaları gösterilmiştir ve bu algoritmalarının birbirlerine olan üstünlükleri gösterilmiştir.

Bölüm 6'de bu tez çalışması kapsamında elde edilen tüm sonuçlar özet şeklinde anlatılarak genel bir sonuç elde edilmiştir. İlerde yapılabilecek iyileştirmeler ve bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar hakkında fikirler sunulmuştur.

Çalışmada rulman hata boyutunun kritik değerlere ulaşmadan saptanması amaçlanmıştır. Böylelikle imalat sektöründe aksama olmaması ve maliyet kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır.

## 1. GENEL BİLGİLER

Rulmanlar, iç ve dış bilezik olmak üzere iki bilezik ve arasında yuvarlanan çeşitli tiplerdeki bilyeden oluşan ayrıca mümkün olduğu kadar en az sürtünmeyle dönme hareketi yapan motor-şaft gibi mekanizmaların en önemli elemanlarından birisidir. Bugün gelinen noktada tekerleğin ve dönen her şeyin göbeğinde genellikle rulman vardır. Rulmanların ilk üreticisi FAG şirkettir ve kurucusu Friedrich Fisher 1883'te yaptığı çalışmalar ile ilk rulmanı icat etmiştir. Üç yüz bin adet rulman çeşidi vardır. Rulmanların kullanım alanları oldukça fazladır. Uçaklarda, metrolarda, arabalarda, otobüslerde, trenlerde, motorlarda, konveyör hatlarında, dişçilerde, patenlerde, çamaşır makinelerinde, mikroskoplarda, teleskoplarda, rüzgâr santrallerinde, pompalarda, mekanizmalar arası geçiş elemanı olarak birçok farklı alanda ve sektörde kullanılmaktadır [1]. Rulmanların yapısında iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanma elemanı ve kafes bulunmaktadır. Rulmanlar çok güçlü mekanik zorlamalara dayanabilecek şekilde üretilmektedirler. Bazı durumlar vardır ki rulman zarar görür ve bu durumdan tüm sistem olumsuz etkilenir. Rulmanda meydana gelebilecek bir arıza, sistemde aksamalara neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda otomasyon sistemlerinde maddi olarak çok büyük kayıplar yaşanmaktadır. Bu nedenle rulmanların arızasının olup olmadığı doğru olarak ve önceden teşhis edilmesi gerekmektedir. Rulmanların arızasız çalışmaları, makinelerin arızasız çalışmaları ve ömürleri açısından büyük önem taşımaktadır. Avrupa'da yapılan araştırmada rulmanlarının %34'ünün ömrünü tamamlayabildiği, %66'sının çeşitli nedenlerle erken değiştirildiği tespiti yapılmıştır. Erken değiştirilmiş ise; %16'sı montaj ve demontaj hatalarından ömrünü tamamlayamadığı, %36'sı yağlama hatalarından ömrünü tamamlayamadığı ve %14'ü kötü çalışma şartları ve kirlilikten ömrünü tamamlayamadığı görülmüştür [2].

Rulmanlarda meydana gelebilecek bir arıza rulmanın bağlı olduğu ekipmanlarda hasara, bu ekipmanlardaki hasar ise daha büyük boyutlara ulaşarak tüm sistemde meydana gelebilecek maliyetli bir arızaya sebebiyet verebilecektir. Bu nedenle

rulmanlar periyodik aralıklarla kontrol edilmeli ve arıza vermeden önce tamiri veya değişimi yapılmalıdır.

Bir makinanın durumu, mekanik kalitesini, pratik ve ekonomik özelliklerini, sağlamlığını ve güvenilirliğini artırmak için aralıklarla incelenmelidir. Makine arıza inceleme titreşim analizi, dinamik yük analizi, gürültü, sürtünme, aşınma, ısınma, dinleme, dokunma, gözleme, performans izleme, termal izleme, yağ izleme, akustik ve akustik yayılımı izlemesi vb. makine koşullarının incelenmesi ile tayin edilebilmektedir.

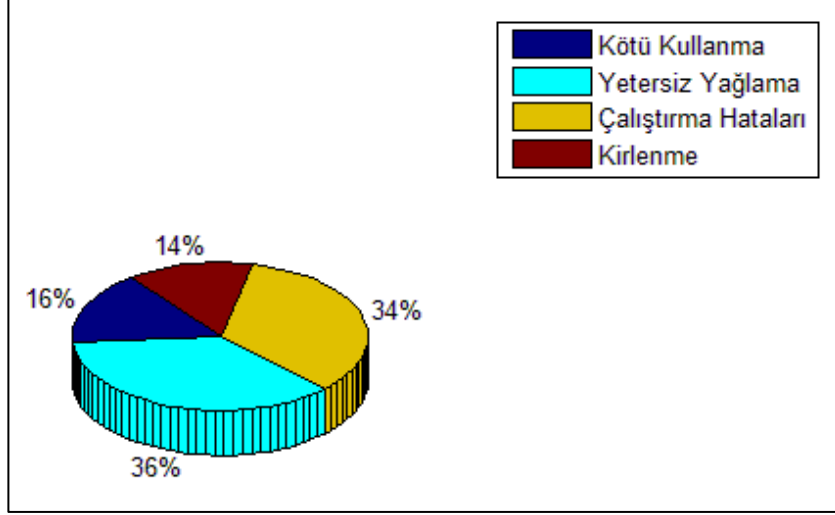
Hareket eden sistemler titreşim meydana getirmektedirler. Bu sebepten dolayı rulmanlar dönerken titreşirler. Her sistemin doğal bir çalışma frekansının olduğu bilinmektedir. Rulmanlarda oluşabilecek bir hatanın meydana getirdiği titreşim sistemin karakteristik titreşimini de etkileyecektir. Değişen titreşim verilerini analiz ederek hata analizi yapılabilmektedir. Sınıflandırma işlemleri, çeşitli algoritmalar ile insan hatasını en aza indirerek rulmanlardaki hata değişimleri önceden ayırt edilebilmekte ve rulman arıza-durum izlemesi yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında rulman hata boyutlarının sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırma işlemi için farklı algoritmalar kullanılarak bunların karşılaştırılması yapılmıştır. Sınıflandırma işlemleri için rulmana ait istatistiksel parametreler elde edilmiştir. Rulman hata boyutu sınıflandırma aşağıdaki işlemler sırasıyla gerçekleştirilerek yapılmıştır:

- Rulman yapay hatalarının oluşturulması,
- Yapay hatalı rulmanların deney düzeneğine yerleştirilmesi ve sabitlenmesi,
- Servo motor çalıştırılarak rulmandan operasyonel modda ham titreşim verisinin toplanması,
- Toplanan ham titreşim işaretlerinin sinyal kondisyonlayıcılar ile yükseltilmesi,
- Sinyallere belirli bir örnekleme frekansında ADC (analog-dijital) dönüşüm uygulanması,
- Sinyallere özgü istatistiksel parametreler elde edilerek, sınıflandırma modellerine giriş olarak verilmesi gerçekleştirilmiştir.

## 1.1. Rulmanlarda Kestirimci Bakım ve Önemi

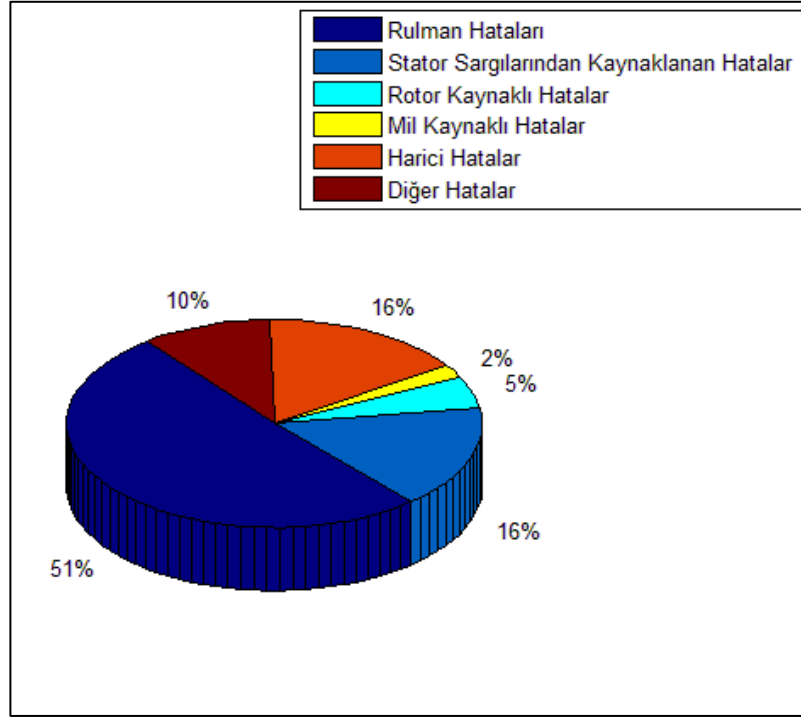
Rulman hataları büyük rulman üreticilerinin tahminleri doğrultusunda Şekil 1.1'deki gibi nedenlerden dolayı kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.1. Rulman hata kaynakları [3]

Kötü kullanım nedenleri arasında; yanlış depolama, taşıma veya yatakların montajı gibi sebepler yer almaktadır. Eğer rulman arızası ilk çalışma sırasında oluşmuş ise, bu arıza genellikle yatak şekli veya montaj sorunudur. Yağlamadan kaynaklanan arıza nedenleri ise, zayıf veya aşırı yağlama, genellikle aşırı titreşimli shaft hareketi, çok ince yağ filmi, karıştırma yağlar, yanlış yağ kullanımı gibi sebeplerdir. Çalıştırma sonucunda oluşan hatalar ise dengesizlik, yanlış hizalanma ve rulmanların yerlerinin çeşitli bakım sebepleri gibi nedenlerden dolayı değiştirilmesidir. En düşük orana sahip olan arıza kaynağı ise rulmanlarda kirlenmeden dolayı kaynaklanan arızalardır [3].

Rulmanlar buldukları bölgelerde de hatalara neden olmaktadır. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi asenkron motorlarda rulman hataları en sık karşılaşılan sorun iken, bunu stator sargılarından kaynaklanan sorunlar, harici hatalar takip etmektedir.



Şekil 1.2. Asenkron motorlarda en sık karşılaşılan hatalar ve yüzdeleri [4]

Rulman arızalarını daha iyi anlamak için rulman üreticileri rulman arızalarının neden kaynaklandığını belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Araştırmalar rulmanların yaklaşık %80'inin ömürlerini hatasız geçirdiklerini göstermiştir. Rulman hataları dört aşama şeklinde oluşmaktadır:

1.aşama: Rulman arızaları normal yüzeyin altında meydana gelir. Hatalar normal olarak yüzeyin 0,1-0,125 mm altında başlar. Bu noktada rulmanın %10-20 dayanma ömrü kaldığı kestirilmektedir.

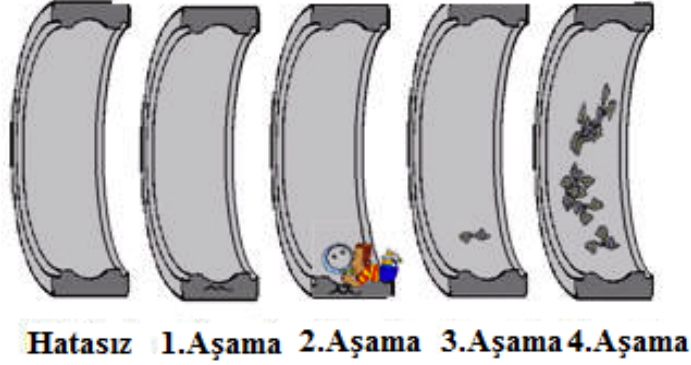
2.aşama: Arıza mikroskobik olarak ilerledikçe, çukurlar (<40 mikron) hatalı bileşenin yüzeyi üzerinde oluşmaktadır. Bu durumda ise, rulmanın %5-10 dayanma ömrü kaldığı düşünülmektedir.

3.aşama: Arızalar ilerledikçe dökülmeler, çatlama, pullanmalar meydana gelmektedir. Dayanma ömrü bu noktadan sonra %1-5 kalmaktadır.

4.aşama: Arızalar aşırı ilerlemesiyle dökülmeler, çatlama, pullanmalar aşırı derecede artmaya başlamaktadır. Dayanma ömrü bu noktadan sonra %1 kalmaktadır.



### Rulman Hatalarının 4 Aşaması



Şekil 1.3. Rulman hata aşamaları

Şekil 1.3'te rulmanın hata aşamalarındaki durumu gösterilmektedir [3]. Aşama 1 ve aşama 2'deki hatalar çok ufak olduklarından ancak mikroskop veya büyüteç ile görülebilir. Çoğu bakım servisleri rulmanları 3.aşamada değiştirmeyi tercih etmektedir. Aşama 4'e geçen arızalar makinelerde önemli hasarlara sebebiyet verebilir. Bu yüzden hemen değiştirilmesi gerekmektedir.

Genellikle, rulmanlar doğru şekilde kullanılırsa, yorulma ömürleri öngörüldüğü gibi olacaktır. Rulmanlar çeşitli öngörülmeyen hatalar nedeniyle çoğunlukla vaktinden önce arızalanırlar. Vaktinden önce arızalanmanın nedenleri arasında pullanma, soyulma, kazınma, sıvanma, kırılma, çatlaklar, kafes hasarı, çentiklenme, çukurcuklanma, aşınma, sürtme, çiziklenme, sürünme, krepaj (ısınma), elektriksel korozyon, pas ve korozyon, montaj kusurları, renk bozulması, hatalı kullanım, kötü yağlama, yabancı madde girişi ya da anormal ısı oluşumu yer almaktadır [5].

Rulman arızalarını önlemek için;

- Kestirimci bakım ve durum izleme işlemleri rulmanlarda periyodik yapılmalı,
- Kaliteli rulman ve gres yağı kullanılmalı,
- Rulmanın montaj ve demontajı işlemleri sırasında hata yapılmamalı,
- Rulmanların temizliğine, sızdırmazlığına dikkat edilmeli,
- Rulmanın bulunduğu ekipmanların bakımına ve düzenli çalışıp çalışmadığına dikkat edilmelidir.

Kestirimci bakım üç basamakta uygulanır. Bunlar aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir.

Ölçüm: Amaç arıza çıkmadan arızanın önüne geçmektir. Bu sebeple analiz ve ölçme işleminin yapılacağı kritik noktalar belirlenir. Gerekli ölçümler yapılır.

Analiz: Makina sağlığı açısından belirlenen kritik noktalardaki ölçüm sonuçları analiz edilir. Kritik noktanın tüm frekans tabanındaki genlik grafikleri alınır ve titreşim genliğindeki artış nedeni, başka bir deyişle arızanın nereden kaynaklanmakta olduğu incelenir.

Onarım: Analiz basamağında tespit edilen arıza, işletme programına bağlı olarak değerlendirilir ve onarım programa alınır.

Bir rulmanın değiştirilme kararını vermeden önce bakımıcının cevap bulması gereken çeşitli sorular vardır:

1. Bu makinanın önemi nedir?
2. Kapalı durduğu saat başına maliyeti nedir?
3. Rulmanların değiştirilme maliyeti nedir?
4. Rulman hasarı makinanın verimliliğini ve kalite performansını etkiliyor mu?
5. Şimdi değiştirmemeye karar verirsek, oluşabilecek en kötü arızanın sonuçları neler olur?
6. Rulmanın arıza yapmasına sebep olan şey nedir? (Balanssızlık, eksen ayarsızlığı, yağlama sorunları, aşırı sıcaklık vs.)
7. Eğer tahmin edilemeden önce arıza yaparsa bu makinanın işini üstlenebilecek başka bir makina var mı?
8. Şu andaki üretim yükü nedir?
9. Yakınlarda planlanmış bir duruş var mı? Varsa rulman o zamana kadar dayanır mı?
10. Bu rulmanda bir problem olduğundan emin miyim?

Eğer ki bu sorulardan birçoğu olumsuz yanıt alıyorsa rulmanı vakti gelmeden önce değiştirmek makine açısından çok önemlidir [6].

## **1.2. Rulmanlarda Titreşim Analizi ve Yöntemleri**

Literatür bakıldığında en çok kabul gören arıza izleme metotları arasında, titreşim analizi veya akım analizi gibi yöntemler görülmektedir. Yapılan çalışmalarda analiz

sonucu elde edilen veriler, zaman uzayı, frekans uzayı, zaman-frekans uzayı gibi metotlar ile incelendiği ve sonrasında yapay zekâ teknikleri gibi yöntemlerle de desteklendiği görülmektedir [7].

### **1.2.1. Frekans tanım bölgesi titreşim analizi**

Titreşim arıza izlemede kullanılan en sık analiz metotlarından birisidir. Birçok izleme yöntemi, frekans ekseninde analiz ile sınıflandırma yapmaktadır. Piyasada, titreşim sinyali için tasarlanmış çok sayıda spektrum analizörü bulunmaktadır. Frekans uzayı analiziyle, dengelemedeki bozukluklar, yanlış hizalama vb. kusurlardan oluşan sürekli harmonik sinyallerin belirlenmesi oldukça kolay hale gelmektedir.

Hangi hasarın hangi titreşim frekansında oluştuğu bilinmektedir. Elde edilen titreşim değerlerindeki frekanslar analiz edilip bu frekansı oluşturan arızanın bulunması sağlanır. Rulman hasarlarını belirlemede en yaygın kullanılan metot frekans tanım bölgesi veya spektral analizdir. Bir sinyalin belirgin özellikleri frekans tanım bölgesinde zaman tanım bölgesinden çok daha kolay şekilde belirlenebilmektedir [8].

Rulman, üzerinde bir hata oluştuğunda veya sürtünmenin doğal bir etkisi olarak aşındığında, çeşitli frekanslarda titreşim üretir. İç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanları (bilya) üzerinde rulmanın fiziksel ve geometrik yapısına bağlı olarak birbirinden bağımsız frekans bileşenleri oluşmaktadır [9].

Fourier dönüşümü: Çoğu uygulamada elimizde bulunan zaman bilgisini frekans bilgisine çevirme gereksinimini duyarız. 1807 yılında Fransız matematikçisi Joseph Fourier her periyodik fonksiyonun, periyodik karmaşık üstel fonksiyonların sonlu toplamı şeklinde ifade edilebildiğini; diğer bir deyişle her periyodik fonksiyonun, sinüs ve kosinüslerden oluşan yapı bloklarına ayrıştırılabildiğini kanıtlayarak bu problemi çözmüştür [10]. Bundan sonraki süreçlerde, sinyallerin incelenmesi ve frekans analizlerinin yapılmasında etkin olarak yararlanılan Fourier dönüşümleri, sinyallerin zaman ve frekans düzleminde incelenmesini mümkün hale getirmiştir [11].

Ayrık zamanlı fourier dönüşümü: Ayrık zamanlı fourier dönüşümü (AZFD), bir fonksiyonun sonlu sayıdaki örnek noktasından, Fourier dönüşümünü tahmin etmek

ilkesine dayanmaktadır. AZFD hesaplamasında günümüzde kullanılan yaklaşım Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) algoritmalarıdır. 1965 yılında Cooley ve Tukey tarafından kurulan HFD (Fast Fourier Transform – FFT) algoritması; AZFD'den farklı değildir. AZFD'nin hesaplanması için etkili ve mükemmel bir algoritmadır. AZFD'nin sayısal işaret işleme alanında spektrum analizi, konvolüsyon ve korelasyon gibi işlemlerin gerçekleştirilmesinde önemli rol oynamasının nedeni HFD algoritmalarından kaynaklanmaktadır [15]. Sürekli zamanlı bir sinyal için Fourier dönüşümü (F(w)) Denklem (1.1) ve Denklem (1.2) ile hesaplanabilir.

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t) \quad (1.1)$$

$$F(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.2)$$

Titreşim sinyali n örneğe sahip ayrık bir sinyalse Fourier dönüşümü Denklem (1.3) eşitliğiyle hesaplanabilmektedir.

$$X(k) = \sum_{i=1}^n x(i) e^{-i \frac{2\pi(k-1)(i-1)}{n}} \quad 1 < k < n \quad (1.3)$$

Zarf analizi: Zarf analizi titreşim sinyallerini rezonans frekansı civarındaki yüksek frekansları filtreden geçirerek rulmanlardaki hasarların sebep olduğu titreşimlerin spektrumlarını açığa çıkararak analiz yapılmasını sağlar. Ancak yüksek harmoniklerin ayırt edilebilmesi için devir hızının sabit tutulması gereklidir. Çünkü devir hızında oluşabilecek bir değişiklik yüksek dereceli harmoniklerin iç içe girmesine neden olacak ve rulmanın hasarlı olmasına rağmen kritik frekanslar gözlemlenemeyecektir. Ham veri ilk önce demodülasyona uğratılır. Demodülasyon üç aşamada gerçekleştirilmektedir:

- 1.Adım: Bant geçiren filtre
- 2.Adım: Yarım-dalga doğrultmaç
- 3.Adım: Alçak geçiren filtre

Bant geçiren filtrenin merkez frekansı sistemin rezonans frekansı olarak seçilmesi gerekmektedir. Alçak geçiren filtre, yüksek frekanslı bileşenleri eleme ve rulmanın

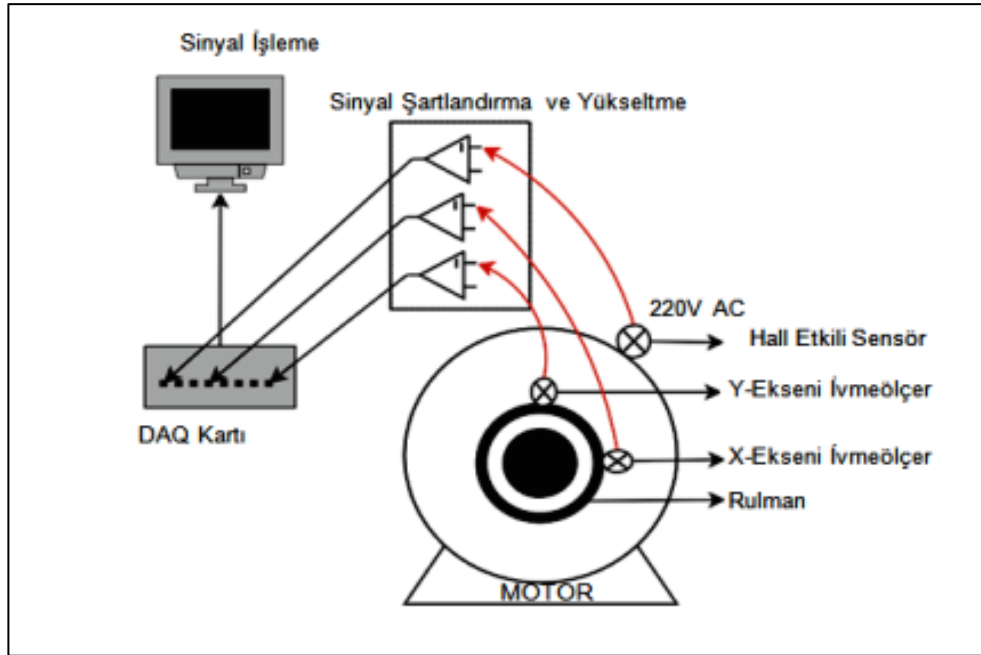
arızası ile ilgili bilgileri taşıyan düşük frekanslı bileşenleri koruma amaçlı olarak icra edilir. Makinanın dönmesiyle meydana gelen ani darbelerin oluşturduğu titreşim verilerine 1. adımda bant geçiren filtre, 2. adımda yarım dalga doğrultmaç ve son olarak 3. adımda alçak geçiren filtre uygulanarak elde edilen işarete zarf analizi denir [12].

Sinyal işleme, düşük frekanslı bileşenlerin temizlendiği bant geçiren filtreleme aşaması ile başlar. Yukarıdaki şekilde yüksek geçiren filtreleme işlemi, sinyal sayısal (dijital) hale dönüştürüldükten hemen sonra gerçekleştirilmiştir. Farklı uygulamalarda sinyal analog haldeyken, analog yüksek geçiren filtreler kullanılarak da bu işlem yapılabilir. Yüksek geçiren filtrelemenin esas amacı rulmana ait olmayan bileşenlerin sinyalden çıkarılmasıdır. Birçok döner mekanizmada çevreden gelen titreşimler düşük frekanslı bileşenler oluşturur. Rulmana ait titreşimler ise yüksek frekanslıdır. Bant geçiren filtreleme ile gürültü-sinyal oranı iyileştirilmiş olur. Pratikte, incelenmek istenen sinyal ile gürültü sinyali aynı frekans üzerinde çakışmış olabilir. Bu nedenle gürültü-sinyal oranı iyileştirilmeye çalışılırken uygun filtrelemenin seçilmesine özen gösterilmelidir. İncelenmek istenen sinyal ile gürültü sinyalinin karakteristikleri hakkında önceden bilgi sahibi olunması oldukça önemlidir. Genelde, yaklaşık karakteristiklerle ilgili bilgiye ulaşmak mümkündür. Fakat çoğu uygulamada sinyal ve gürültü karakteristiğine ait yeterli miktarda istatistiksel bilgi bulunmadığı için optimum filtrenin belirlenmesi olanaksızdır.

Sonraki aşamalar zarf dedektörü ve belirli bir frekans aralığı için spektrum analizidir. Zarf dedektörü ile sinyal, sistemin yapısal özelliklerinden bir miktar arındırılmış olur.

Son aşama ise sınıflandırmadır. Yukarıda belirtilen işlemler sonucunda, sistemdeki belirli kusurlara ait frekans bileşenlerini taşıyan özel bir sinyal elde edilir. Sınıflandırma aşamasında bu özel sinyal değerlendirilir ve rulman üzerinde kusur olup olmadığı, varsa kusurun nitelikleri (konumu v.b.) belirlenir. Elde edilen sinyalin karakteristiği, sağlam kabul edilen bir rulmanın sinyal karakteristiği ile karşılaştırılır veya elde edilen sinyaldeki değişim takip edilerek kritik frekanslarda ciddi bir artış eğilimi olup olmadığı kontrol edilir.

Şekil 1.4'de bir rulmandaki titreşim izlemenin aşamaları gösterilmektedir. Piezoelektrik ivme sensörü tarafından alınan sinyaller öncelikle bir amplifikatörden geçirilerek güçlendirilir [13]. Analog-dijital çevirici ile titreşim verisi dijital hale çevrilerek sinyal işlemeye uygun hale getirilir. Sonrasında yüksek geçirgen (band-pass) filtreden geçirilerek düşük frekanslı bileşenlerinden temizlenir ve zarf (envelope) dedektöre sokulur. İleriki aşamada spektrum analizi gerçekleştirilir ve sensörün takıldığı rulman bileziğine ait titreşimlerin hız bileşenlerine ulaşılır. Bu değerlerin incelenen rulman için kabul edilebilir sınırlar arasında olup olmadığı kontrol edilir. Sonuçta "rulman değiştirilmeli" veya "rulman kullanılmaya devam edilebilir" şeklinde bir karar verilir. Varsayıma dayalı bu sistem, özellikle kritik mekanizmalarda, arıza oluşmadan evvel bakım yapılması amacıyla tasarlanmıştır [14].



Şekil 1.4. Titreşim verisi toplama şeması [13]

Titreşim verileri rulmanlar hakkında çok sayıda bilgi içermektedir. Bu yüzden analiz sonucu belirli frekans değerlerinde oluşan her bir yükselme rulman dönme hızı, oluşan hata bölgesi vb. birçok anlam ifade etmektedir. Rulmanların karakteristik yapısı analiz edilerek ve daha önceden edinilmiş tecrübeler ile rulmana ait bu frekansların yorumu ve anlamı bulunabilmektedir. Rulmanlar dinamik yapısı özellikleri nedeniyle değişime uğrarlar. Birçok yapı oldukça karmaşık karakterdedir ve parametreleri kısmen bilinir. Sinyalleri büyük ölçüde etkileyebilirler. Öyle ki,

kimi durumlarda sinyal ağırlıklı olarak yapısal karakteristiği taşır. Uygun tekniklerle kullanılmadıkça, elde edilen sonuçlar incelenmek istenen kaynağın karakteristiğini değil, yapısal karakteristiği yansıtmaktadır.

Titreşim sinyallerinde değişikliğe neden olan diğer faktör ise algılayıcı (sensör) çeşididir. Bazen bu sensör değişimi kasıtlı olarak oluşturulabilir. Buradaki amaç; ivme, hız veya yer değiştirme bilgilerinden sadece biri uygun sensör ile okunması ve diğer iki bilginin integrali veya türevi alınarak hesaplanabilmesi istenmiş olmasıdır. Gürültü-sinyal oranının iyileştirilmesi için filtre uygulanması da yine kasıtlı olarak yapılan bir sinyal değiştirme yöntemidir.

Ölçüm sırasında geniş frekans aralığının kullanılması algılayıcının dinamik özelliklerinin de ölçüm sinyaline karışmasına neden olabilir. Böyle bir etkinin sinyal üzerinde ne kadar değişikliğe sebep olacağını hesaplamak çoğu zaman güçtür. Bu serbest haldeki ivme algılayıcısının frekans cevabına ve algılayıcının bağlanması için kullanılan yöntemeye bağlı olarak değişir. İvme algılayıcısının frekans cevabı üretici firma tarafından belirtilir. Sinyal üzerindeki, algılayıcıdan kaynaklanan değişimleri kabaca tahmin etmek mümkün olabilir [15].

Tahrik kuvvetleri, mekanizmanın yapısından başlayıp izlemenin gerçekleştirildiği algılayıcı bulunan noktaya doğru ilerleyen titreşim sinyalleri oluşturur. Dolayısıyla daha önceden, incelenen sisteme ait bir sinyal modeli hazırlanmışsa, bu model kuvvetlerin kinematik bileşenlerini ve sistemin yapısal özelliklerini kapsar. İlk aşama olan enstrümantasyon aşaması algılayıcı, sinyal şartlandırıcı ve ikiz yanılması (anti-aliasing) filtre içeren analog/sayısal çeviricinin seçilmesi ve monte edilmesi işlemlerinden oluşur. Sonrasında sinyal işleme ile veriler indirgenir, sinyal içinde aranan karakteristikler belirginleştirilir. Son aşama olan sınıflandırmada, belirginleştirilmiş olan sinyal karakteristikleri önceden edinilmiş bilgilerle karşılaştırılır ve sistemin hangi durumda olduğuna karar verilir.

Sisteme ait sinyal modelinin önceden oluşturulması enstrümantasyon aşamasında yapılacak seçimlere yardımcı olur. Dolayısıyla sinyal işleme aşamasını ve gürültü karakteristiğini etkiler. Örneğin ivme algılayıcısı ve örnekleme süresi ilgilenilen frekans aralığına ve en iyi gürültü-sinyal oranına bağlı olarak seçilir. Ön filtreleme gürültü-sinyal oranını iyileştirir. Sınıflandırma sırasında yapılan karşılaştırma işlemi,

sistemin her bir durumuna ait önceden kaydedilmiş istatistiksel veri gerektirir. Bu veri grupları belirli toleranslar içindedir. Toleransların dar oluşu ve gürültü karakteristiği veri analiz aşamasını (örneğin değerlendirilen veri uzunluğunu) etkileyecektir [14].

FFT, esas olarak istatistik tabanlı matematiksel bir çevrimdir. Karışık titreşim sinyalleri yumağını ayırıştırır ve hangi frekansta ne şiddette bir titreşimin mevcut olduğunu gösterir. Yapılan işlem dalgaform grafiğindeki tekrarlanan sinyallerin frekanslarına göre ayrıştırılarak frekans/genlik grafiğinde gösterilmesidir. Bu sayede, dalgaform grafiğine göre daha kolay anlaşılabilir bir grafik elde edilmiş olur.

Anlaşılacağı gibi FFT tekrarlanmayan sinyalleri dikkate almamakta, onları yok saymaktadır. Bir başka ifade ile karışık bir sinyaller kümesi içinden periyodik olanları belirleyerek onları harmoniklerine ayırmaktadır.

Spektrum grafiğinde görülen her tepeciğin, makinenin dinamik özelliklerinden kaynaklanan bir vericisi vardır. Bu verici noktayı belirleyebilmek, makinenin fiziksel özelliklerini ve mekanik yapısını bilmekle mümkün olabilir. Ancak bu suretle makine üzerindeki hangi elemanın böyle bir titreşim sinyalini üreteceği kestirilebilir.

Titreşim analizi kullanılarak tespit edilen bazı ekipman arızaları şu şekilde listelenebilir:

- Dengesizlik,
- Milin bel vermesi,
- Eksantriklik,
- Ayarsızlık,
- Gevşeklik,
- Kayış kasnak mekanizmasında sorunların olması,
- Dişli arızaları,
- Rulman arızaları,
- Elektriksel arızalar,
- Yağ köpürmesi/anaforu,
- Kavitasyon,
- Milde kırılmaların olması,
- Rotorun ovalaması,



- Rezonans,
- Hidrolik ve aerodinamik kuvvetler [16].

### 1.2.2. Zaman - frekans tanım bölgesi titreşim analizi

Son yıllarda bilgisayarlardaki hızlı gelişimi kullanılan yazılım ve algoritmalara da yansımıştır. İşlemcilerin gücü daha çok verinin işlenebilmesine ve daha karışık algoritmalar kurulmasına imkân sağlamıştır. Böylece spektral yöntemlerde kullanılan veri uzunlukları artmış ve daha yüksek çözünürlüklerde elde edilen grafiklerle daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu hızlı gelişme dinamik sinyallerin zaman/frekans tanım bölgesinde analizi için algoritmaların gelişmesini ve uygulanabilir hale gelmesini de sağlamıştır.

Spektrum analizi ve zaman serileri metodu sinyal işleme tekniği olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Fourier dönüşümü, frekans içeriği ve spektrum bileşenleri hakkında bilgi sağlayan ve yıllardır bilinen en eski sinyal işleme tekniklerinden biridir. Bu dönüşüm tekniği, sinyali karmaşık üstel formda gösterebilen farklı sinüzoid bileşenlerine ayırmaktadır. Bu nedenle, ani sinyal değişimlerine tepkisiz kalmaktadır. Bu dezavantajı yenmek için, sinyal belirli parçalara ayırarak her bir parçanın Fourier dönüşümünü alan Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (KSFD) isimli bir teknik geliştirilmiştir. KSFD’de, fonksiyon,  $x(t)$ , bir pencere fonksiyonu olan  $w(t)$  ile çarpılır ve Fourier dönüşümü hesaplanır. Pencere fonksiyonu  $\tau$  kadar ötelenir ve Fourier dönüşümü tekrar hesaplanır.

KSFD’nin dezavantajı, belirli bir pencere boyutu seçme gerekliliğidir. Bu nedenle sinyalin zaman-frekans uzayı gösterimi bilinmemektedir ve spektrum bileşenlerindeki ani değişim hala gözlenememektedir.

Dalgacık tekniği (wavelet techniques) 1910 yılında Haar tarafından ortaya atılmış ve fonksiyonların zaman/frekans tanım bölgesinde incelenmesi için kullanılmıştır. Fakat bu konunun ilgi çekmesi ve daha geniş kitleler tarafından kullanılması Daubechies’in ortogonal dalgacık teorisini ortaya atması ile başlamıştır. Zaman/frekans tanım bölgesinde sinyallerin gösterilmesine olanak sağlayan bu yöntem birçok alanda kullanıldığı gibi özellikle gelişigüzel ve durağan olmayan titreşim sinyallerinin analizinde de iyi sonuçlar vermektedir. Bu yeni yöntem ve titreşim verilerine

uygulanışı konusundaki temel bilgiler Newland tarafından özetlenmiş ve pratik uygulamaları da Torrence ve Compo tarafından bir çalışmayla gösterilmiştir [17].

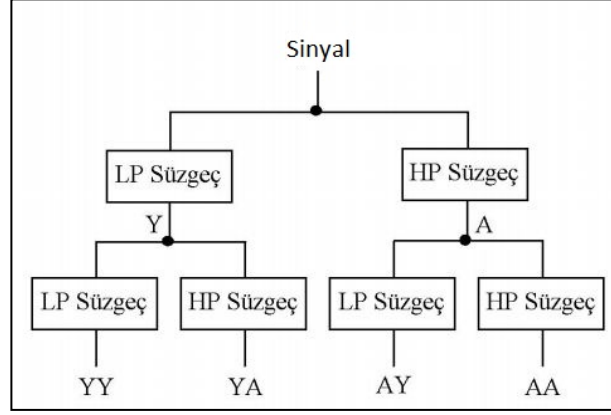
Bu yaklaşıma alternatif olarak sabit olmayan sinyallerin analizinde iyi bir sinyal süreksizlik lokalizasyonu sağlamak için dalgacık dönüşümü yöntemi geliştirilmiştir. Bir sinyale dalgacık dönüşümü uygulanırken, pencere boyutu ani değişiklikleri belirlemek için yüksek frekanslarda kısa, düşük frekanslarda uzun olarak seçilmektedir. Böylelikle frekans uzayında, spektrum bileşenleri ile sinyalin geçici karakteristiğini göstermek mümkün olmaktadır.

Dalgacık dönüşümü, KSFD de olduğu gibi sinyal dalgacık fonksiyonu ile çarpılmaktadır. Dönüşüm zaman-frekans sinyalinin farklı parçaları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Dalgacık dönüşümünün temel amacı sinyali bir ölçek parametresi ile etiketlenebilen bir takım temel fonksiyonlara ayırmaktır. Böylelikle daha büyük sinyallerin sınırlı bir alanda analizi mümkün hale gelmektedir. Temel fonksiyon özgün ana dalgacık fonksiyonunun genişlemesi, daralması, ötelenmesi ile elde edilir. Diğer bir deyişle dalgacık analizi, ana dalgacık fonksiyonunun ötelenmiş ve ölçeklenmiş versiyonlara bölünmesidir [18].

Dalgacık analizi, sürekli dalgacık analizi ve ayrık dalgacık analizi olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrık dalgacık analizi daha kısa zaman alması ve bilgisayar ortamında analizlerin ayrık sinyaller ile yapılabileceğinden tercih edilmektedir. Dalgacık dönüşümünü gerçekleştiren en önemli faktör ayrışmanın seviyesini belirlemektir. Ayrışma seviyesi, orijinal sinyalin örnekleme frekansı ile ayarlanmaktadır. Ayrık dalgacık dönüşümünün temel prensibi, dijital sinyalin zaman ölçekli dijital filtre teknikleri kullanılarak elde edilmesidir.

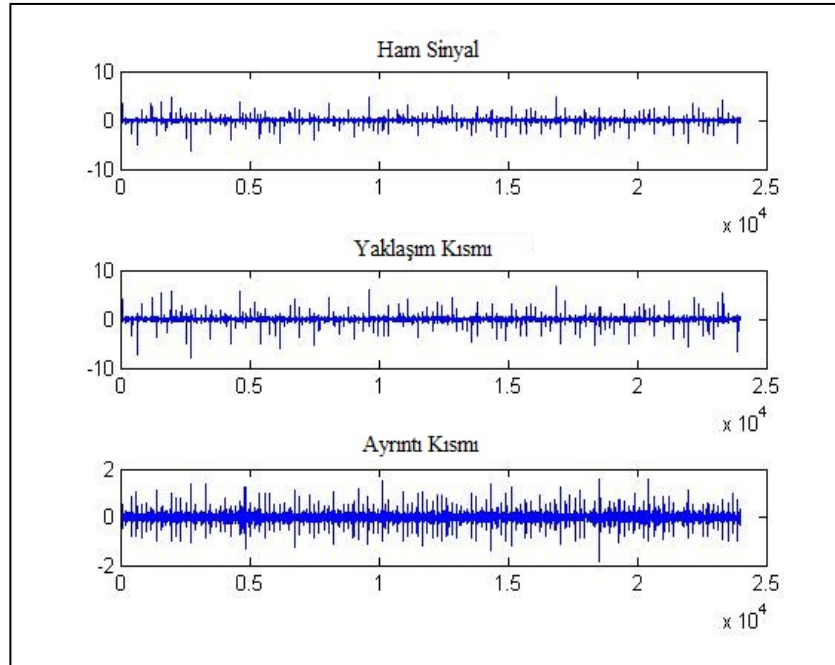
Ayrık dalgacık dönüşümünde sinyal, aynı anda alçak ve yüksek geçiren iki süzgeçten geçirilmektedir. Bu süzgeçlerin kesim frekansları, sinyalin örnekleme frekansının dörtte biri olarak tasarlanmaktadır. Alçak geçiren süzgecin çıkışı yaklaşım (Y), yüksek geçiren süzgecin çıkışı ise ayrıntı (A) sinyali olarak adlandırılmaktadır. Yaklaşım ve ayrıntı sinyalleri, başlangıçtaki sinyalin yarısı kadar örnek içermekte ve sırasıyla sinyalin alçak ve yüksek frekans bilgisini içermektedir. Elde edilen sinyale tekrar bu süzgeçleme işlemi yapılırsa, başlangıçtaki sinyalin örnek sayısının dörtte biri kadar örnek içeren dört ayrı sinyal elde edilmektedir. Dalgacık paket

dönüşümünün ikinci seviyesini oluşturan bu sinyaller yaklaşımın yaklaşımı (YY), yaklaşımın ayrıntısı (YA), ayrıntının yaklaşımı (AY) ve ayrıntının ayrıntısı (AA) olarak bilinmektedir. Şekil 1.5'te bu dönüşüm yapısı gösterilmektedir [19].



Şekil 1.5. Bir sinyalin ikinci seviye dalgacık paket ayrışımı

Örnek olmak üzere, bu bildirinin deneysel çalışmaları kapsamında, bir rulmanın testi esnasında alınmış ham titreşim sinyali ile yaklaşım ve ayrıntısı Şekil 1.6'da çizdirilmiştir.



Şekil 1.6. Bir sinyalin yaklaşım ve ayrıntı sinyalleri

Rulmanlardaki hasarların titreşimlerin dalgacık yöntemiyle analiz edilerek tespiti konusundaki ilk çalışmalardan biri Mori ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir [20]. Çalışmada deneysel yolla elde edilmiş titreşim verilerine ayrık dalgacık dönüşümü

uygulanmış ve dalgacık katsayılarındaki artış eğiliminin rulmanda hataların oluşmasıyla doğru orantılı olduğu görülmüştür. Li ve Ma tarafından yapılan çalışmada ise sürekli dalgacık dönüşümü kullanılarak analizler yapılmıştır [21]. Deney düzeneği üzerinden çeşitli çalışma parametreleri ayarlanarak alınan titreşim sinyalleri üzerinde yapılan analizlerde katsayıların eğilimi yerine belirli frekans bantlarındaki katsayıların artışı izlenmiş ve bu artışa göre rulmanın hangi bölgesinde hata oluştuğu da tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki yöntem dalgacık dönüşümünün kısa-zamanlı Fourier transformuna göre üstünlüklerini göstermekle birlikte sürekli dalgacık dönüşümünü kullandığı için daha fazla işlemci zamanı gerektirdiği konusunda eleştirilmektedir, ayrıca yöntemin gerçek zamanlı takip için de uygun olmadığı, titreşim sinyalleri alındıktan sonra incelenmesi için daha uygun olduğu belirtilmektedir.

Rubini ve Meneghetti çalışmasında dalgacık metodunun rulmanlarda oluşan bölgesel hataları tespit etmedeki yeterliğinin sınırlarını araştırmışlardır [22]. Çalışmada bir deney düzeneğindeki rulmanlar üzerinde çeşitli hatalar oluşturarak titreşim sinyalleri toplanmış ve bu sinyaller klasik spektral ve zarf analizi yöntemlerinin yanı sıra dalgacık dönüşümü yöntemiyle de incelenmiştir. Araştırmada rulmanlarla yataklanmış şaft üzerine uygulanan radyal yük az olduğu için spektral yöntemin hatayı çoğu durumda yeterli doğrulukta tespit edemediği, zarf analizi yönteminin ise hatanın gelişimi sürecinde oluşan düzleşmeden dolayı hassasiyeti kaybettiği buna karşın dalgacık dönüşümü yönteminin çok daha önce hatayı tespit edebildiği sonuçlarla gösterilmiştir.

Rulmanlı sistemlerin titreşim sinyallerini incelemedeki büyük problemlerden birisi de hata oluşumunun erken safhalarında sinyallerin gürültü bandı içerisine gömülmesi ve tespit edilememesidir. Sun ve Tang bu problemin üstesinden gelerek hata sinyallerinin zamanda gösterdikleri şekli ortaya çıkarmak için dalgacık dönüşümünü kullanmışlardır [23]. Çalışmada titreşim sinyallerine dalgacık dönüşümü uygulanmış ve dalgacık katsayılarına belirli eşik değerleri uygulanarak ters dalgacık dönüşümüyle titreşim sinyali yeniden elde edilmiştir. Bu sinyaller gürültüden arındırılmış olduğundan hataların oluşturduğu darbeleri açıkça göstermekte ve bu sinyallere tekrar uygulanan klasik spektral yöntemler hataların daha kesin olarak

incelenmesine imkân sağlamaktadır. Bu yöntemin otomatik hata tespiti için istenen özelliklere sahip olduğu da iddia edilmiştir.

Rulmanlarda oluşan bölgesel hatalar küçük şoklar oluşturduğundan bu karakteristik davranışın belirlenmesi de rulman hatalarının tespitini kolaylaştırır. Nikolaou ve Antoniadis bu davranışı ortaya çıkarmak için dalgacık paketlerini kullanmışlardır [24]. Bu metodu kullanırken de seçilmesi gereken kritik parametrelerini fiziksel sistemin parametrelerine göre seçecek bir yöntem geliştirerek otomatik olarak kullanılabilmesini sağlamışlardır. Yazarlar aynı karakteristiği ortaya çıkarmak için başka bir çalışmada karmaşık Morlet dalgacıklarını da kullanmışlardır

Rulmanlarda oluşan bölgesel hatalar birden fazla konumda olduğunda tespiti ve ortaya çıkan titreşim sinyalinin yorumlanması zorlaşmaktadır. Dalgacık dönüşümü hatanın frekansı ile birlikte zaman tanım bölgesindeki yerini de verdiği için bu tip problemlerde avantaj sağlayabilmektedir.

Dalgacık dönüşümleri yapıların doğrusal ve durağan olmayan karakteristiklerinin ortaya çıkartılmasında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uygulamalar sadece laboratuvar ortamında değil endüstriyel alanlarda da görülmektedir ve doğru uygulandığında oldukça tatmin edici sonuçlar vermektedir. Şeker ve Ayaz dalgacık analizi ile elektrik motorlarındaki arktan dolayı rulmanlarda oluşan hataları ve yaşanmayı takip etmiş ve değişik frekans bantlarındaki davranışı tespit etmişlerdir [25]. Sheen ve Hung da dalgacık tabanlı bir zarf fonksiyonu oluşturarak rulmanlardaki hataları alçak ve yüksek frekans bantlarında izlemişlerdir [26]. Geliştirilen algoritma bir sayısal sinyal işleyici aracılığıyla arızayı gerçek zamanlı olarak takip etmek için kullanılmış ve titreşim sinyalinin zarfını çıkartmakta etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Dalgacık dönüşümleri rulmanlardaki hataların tespiti için doğrudan kullanılabildiği gibi yapay zekâ veya uzman sistemler için ön işlem aracı olarak da kullanılabilmektedir. Lou ve Loparo dalgacık dönüşümünü ivmeölçerlerden gelen sinyalleri işlemek ve bir sınıflandırıcı yapay sinir ağının özellik vektörlerini oluşturmakta kullanmıştır [27]. Dalgacık dönüşümlerinin makinelerin durum kontrolü ve hata teşhislerinde kullanım uygulamaları Peng ve Chu tarafından yayınlanan geniş bibliyografya ile bulunabilir [28]. Bu konudaki çalışmalar tüm

hızıyla devam etmekte ve zaman/frekans tanım bölgesinde analiz yapan diğer algoritmalar da rulmanlardaki hataların tespiti için kullanılmaktadır.

### **1.2.3. Yapay zeka analiz yöntemleri**

Elektronik ve bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişim rulmanlardaki hata tespiti için yapılan çalışmaların yönünü de oldukça değiştirmiştir. Algılayıcılardaki gelişmeler titreşim sinyallerinin daha üst frekanslarda alınmalarına imkân sağlarken işlemci performansı ve kapasitenin artımı yeni bilgisayar algoritmalarının da gelişimine dolayısıyla bilgisayarların daha etkin kullanımına sebep olmuştur. Liu ve ark. radyal yönde ölçülmüş titreşim sinyallerini inceleyerek hata oluşumundan önce ve hatalı durumu gösterebilen bir uzman sistem geliştirmişlerdir [29]. Bu program kurtosis gibi çeşitli zaman tanım bölgesi özelliklerinin yanı sıra bulanık mantıkla modelleme de yaparak hataları sınıflandırabilmektedir. Yazarlar muayene metotlarının başarısını da ölçmüşler ve bulanık mantık metodunun %100 oranında başarı ile hata tespitini yapabildiğini iddia etmektedirler. Yapay zekâ ile hata teşhisi konusundaki gelişmeler ve bulanık mantık uygulama stratejileri Frank ve Köppen-Seliger tarafından özetlenmiş, hata teşhisinin kontrolünde analitik yöntemlerle birlikte önemli rol oynadığını belirtmiştir [30].

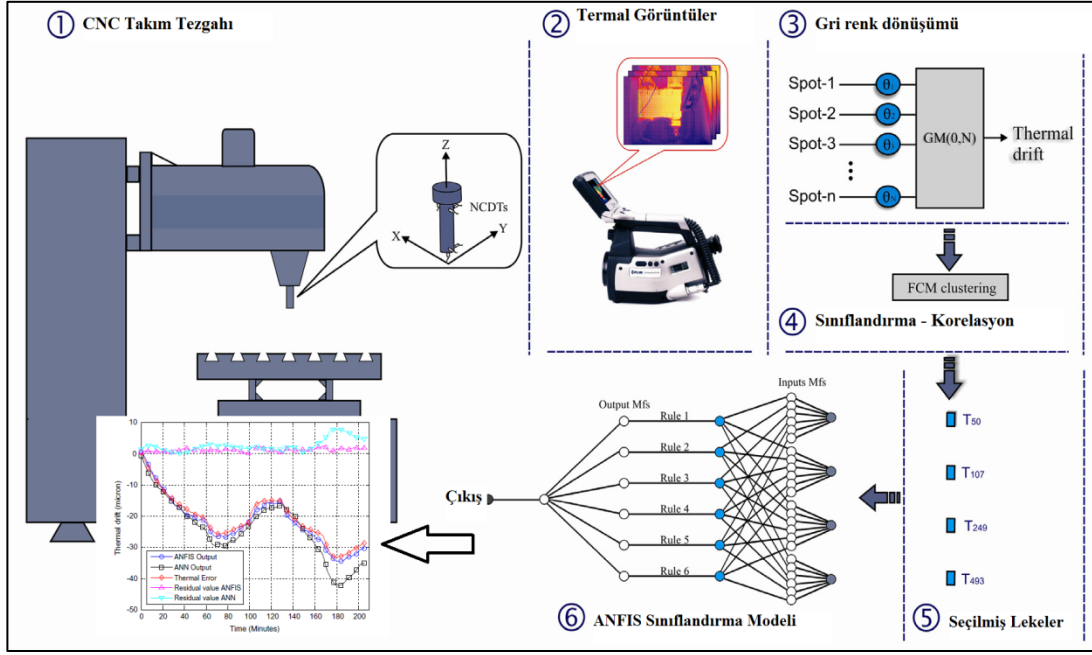
Yapay sinir ağları kullanılarak bölgesel hataların tespiti amacıyla yaptıkları çalışmada Subrahmanyam ve Sujatha iki farklı algoritmaya yapay sinir ağı kullanmıştır [31]. Çalışmada kullanılmak üzere bir deney düzeneği tasarlanmış ve öncelikle hatasız rulmanlar farklı çalışma parametrelerinde denenerek elde edilen titreşim sinyalleri yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır. Daha sonra hatalı rulmanlar deney düzeneğinde çalıştırılarak tasarlanmış yapay sinir ağı ile gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre tasarlanan yapay zeka mevcut takip yöntemlerinin çoğundan daha iyi sonuçlar vererek %100 güvenilirlikte ayırım yapmıştır. Samanta ve Al-Balushi çalışması ise hataları sadece zaman tanım bölgesi özelliklerini kullanarak YSA'larla hata teşhisi yapmak üzerinedir [32]. Titreşim sinyallerinin zaman tanım bölgesinde analizleri ağır işlemci yükü getirmediğinden tasarlanan YSA'nın eğitilmesinin oldukça kolay olduğu ve gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygun olabileceği de yazarlar tarafından belirtilmiştir. Çalışmada sadece zaman tanım

bölgesi analiz yöntemleri kullanılmasına rağmen YSA ayırımı büyük bir başarı ile gerçekleştirmiştir.

Rulmanlardaki hataların zeki sistemlerle tespiti için sadece zaman ve frekans tanım bölgesi özelliklerinin yanı sıra daha karmaşık yöntemlerde kullanılmıştır. Li ve ark. rulmanların durum takibi için bikoherense analizine dayalı bir desen tanımlama tasarlamış ve deneysel bir çalışmayla da yöntemin başarısını kanıtlamıştır [33]. Bikoherense analizi sinyalin anlaşılabilir olması için mekanik rezonans özelliğine bağlı olmadığı için rulmanın yapısal rezonansları hakkında bilgiye gerek yoktur, bu da yöntemin her türlü rulmana uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemle rulmandaki hatanın konumu da tespit edilebilmektedir.

Son yıllarda hata tespiti için zaman-frekans dağılımlarının sıklıkla kullanılması zeki sistemlere de yansımıştır. Paya ve ark. çalışması aynı yöntemi kullanmasına karşın daha geneldir ve bütün dönel parçalardaki hataları tespit etmeye yöneliktir [34]. Bu çalışmada da dalgacıkların sinyalleri işlemede bir araç olarak kullanılması ve YSA ile sınıflandırma yapmanın oldukça iyi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

İlerleyen sınıflandırma methodları ile beraber Abdulshahed ve ark. CNC takım tezgahlarında spindle motor dönmesi sırasında oluşan termal hataları kaydetmişler ve bu noktaları belirlemek için ANN ve ANFIS modelini kullanarak karşılaştırmalarını yapmışlardır [35]. Deformasyona neden olan bu termal hataların konumlandırmasının doğruluğu makine sağlamlığı açısından çok önemli olduğu görülmüştür.



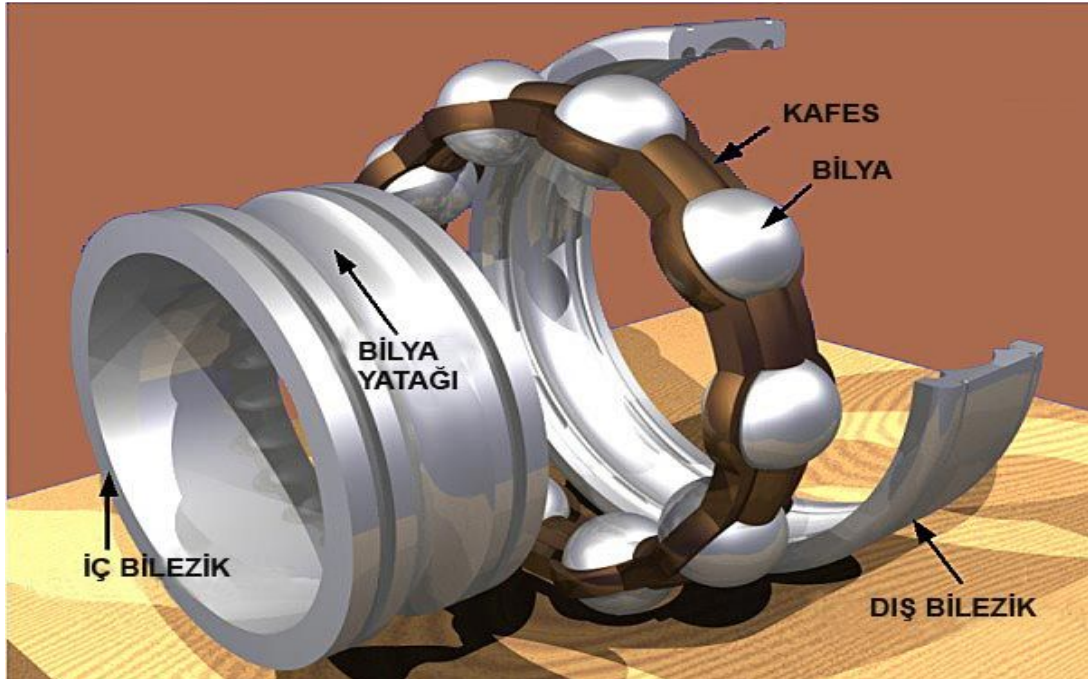
Şekil 1.7. Geliştirilmiş termal hata analiz sistemi [35].

Şekil 1.7’ de görüldüğü gibi yazarlar CNC spindle motordan elde ettikleri verileri incelemiş ANN ve gelişmiş bulanık c-ortalamalar ANFIS modeli sınıflandırma sonuçlarında geçerli veriler elde etmişlerdir. Farklı çalışma koşulları altında ANFIS modeli başarısını %98,6 olarak bulmuşlardır.



## 2. RULMANLAR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Rulmanlar makinelerde dönel hareketleri sağlamak için kullanılan elemanlardır. Tasarım şekline göre radyal yüklerin yanı sıra aksel ve moment yüklerini de taşıyabilirler. Rulmanlar Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bu bileşik yükleri taşımak için genellikle iki bilezik, belirli sayıda yuvarlanma elemanı ve bu elemanları ayıran ve aralarındaki mesafeyi koruyan kafesten oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Rulman ve bölümleri [36]

Mükemmel bir rulman mükemmel bir mekanizma oluştururlar. Endüstriyel alanda rotasyon fonksiyonu olan her mekanik üniteye rulmanlar kullanılır. Yani rulmanlar dönen her mekanizmanın ana elemanıdır. Rulmanların üretiminde genelde hammadde olarak 100 Cr 6 çeliği kullanılır. Ham rulman çeliği bilezik biçiminde ilk üretim aşamasına girer. Üretimin ilk aşamasında sıcak dövme ve soğuk ovalama işlemlerinden geçer. Sıcak dövme operasyonunda çubuk şeklindeki malzeme önce 1200°C’ye kadar indüksiyonla ısıtılır ve yüksek hızlı özel sıcak dövme presinde bilezik çapına bağlı olarak 100 ton ile 320 ton arasında kuvvet uygulanarak parçalar şekillendirilir. Dövme bilezikler küreselleştirme tavlamasından geçirilerek yapısı

homojen ve sertliği talaşlı isleme uygun hale getirilir. Belli çaplara kadar dövülmüş ısıll işlem görmüş bilezikler soğuk ovalama operasyonundan geçirilip şekillendirilir ve kalibre edilerek büyütülür. Bu operasyon esnasında malzeme yapısı kontrollü olarak deforme edilerek, bilezik boyunca homojen bir genleşme sağlanır ve malzeme yapısı belli oranda iyileştirilir.

Rulmanlar, yuvarlanma elemanının geometrisine göre; bilyeli, silindirik, makaralı, masuralı (fii makara), iğneli rulman olarak sınıflandırılırlar. İlettikleri kuvvetin yönüne göre de radyal, aksenal rulman olarak iki grupta incelenirler. Bazı yataklar da hem radyal hem de aksenal kuvvet iletmek mümkündür.

Kullanım yerine ve amacına göre rulmanlar değişik tasarımlara sahiptir. Açısal temaslı rulmanlar, radyal aksenal ve moment yüklerinden oluşan bileşik kuvvetleri taşımak için yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasındaki temas belirli bir nominal açıda gerçekleşecek şekilde tasarlanırlar. Bu teması korumak ve kullanım yerine göre temas açısını değiştirmek için açısal temaslı rulmanların montajı sabit bir aksenal n yükleme ile yapılır. n yükleme sonucu oluşan temas açısı nominal temas açısından farklıdır. Ayrıca alışma sırasında rulman üzerindeki yük dağılımından dolayı her bir yuvarlanma elemanı ile bilezikler arasındaki temas açısı da birbirinden farklıdır. Bu sebeple açısal temaslı rulmanların dinamiği n yükleme miktarına göre farklılıklar göstermektedir.

Rulmanların kaymalı yataklara alternatif olarak kullanılmasının en önemli sebebi sürtünme kayıplarının oldukça düşük olmasıdır. Bunun yanı sıra çeşitlilik, kolay yağlama ve bakım, bileşik yk taşıyabilme, dar aksenal uzunluklarda retilibilme ve iyi düzenlenmiş uluslararası standartlara sahip olma gibi özellikleri de yaygın kullanımlarının sebeplerindedir. Diğer taraftan radyal uzunluklarının büyük olması, çalışma şartlarına göre ömürlerinin kısa olması, göreceli olarak daha fazla gürültü ve titreşime neden olmaları rulmanların istenmeyen karakteristik özellikleridir. Bu zellikler birbirleriyle bağlantılı olduğu için rulmanların çalışmasını etkileyen faktörlerin dikkatli bir biçimde incelenmesi servis ömürlerinin artırılmasını, gürültü ve titreşim seviyelerinin azaltılmasını sağlayabilir.

Açısal temaslı rulmanlarda küresel yuvarlanma elemanları kullanılmaktadır. Bu yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasındaki temas noktasal olarak oluşmaktadır

ve yük altında oluşan ezilmeden dolayı bu temas noktalar etrafında eliptik bir alanda gerçekleşmektedir. Açısal temaslı rulmanda oluşan bu noktasal temasa Hertz tipi temas adı verilir ve yük ile yuvarlanma elemanı ezilmesi arasındaki ilişki doğrusal değildir. Dolayısıyla açısal temaslı rulmanların dinamik davranışı da doğrusal değildir [37].

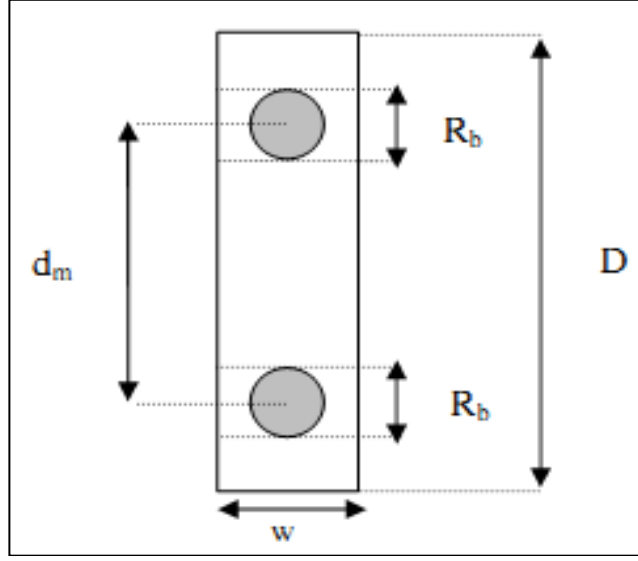
Rulmanlarda yük, bilezikler ve yuvarlanma elemanlarındaki ezilmelerle taşınmaktadır. Dolayısıyla yükün kaç adet yuvarlanma elemanı tarafından taşındığı oldukça önemlidir, çünkü rulman yük taşıırken aynı zamanda dönmektedir ve yüklenmiş bölgedeki yuvarlanma elemanı sayısı değişmektedir. Bu sebeple dönüşü sırasında rulmanın toplam katılığı periyodik olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle rulmanlar geometrik olarak kusursuz olsalar bile titreşim üretmektedirler ve bu titreşimler doğrusal olmayan bir karakteristik gösterirler.

Yuvarlanma elemanları kafesle birlikte sürekli döndükleri için bilezikler ile yuvarlanma elemanları arasındaki kuvvetler değişkendir. Değişken yükler altında rulmanı oluşturan parçaların malzemelerinde yorulmalar oluşur ve bu yorulmalar yuvarlanma yüzeylerinde bölgesel bozulmalar olarak ortaya çıkarlar. Yuvarlanma elemanları oluşan bu bölgesel hatalar üzerinden geçtiklerinde küçük darbeler üretirler ve buldukları konum ve hatanın büyüklüğüne göre farklı karakteristik titreşimler üretirler. Bu karakteristik titreşimlerin frekansları ayrı ayrı tespit edilebilir. Rulmanlarda yorulma sonucu karşılaşılan bölgesel hataların yanı sıra üretim veya montajdan oluşan hatalar da olabilir. Örneğin yuvarlanma elemanlarının boyutlarının farklı olması rulman içerisindeki ezilme bölgesinin şeklini değiştirebileceği gibi rulmanın montajı yapıldığı şafttaki dengesizlik sistemin dinamik davranışını oldukça etkiler, çünkü rulmanlarda yük ile ezilme arasındaki ilişki doğrusal değildir. Makine tasarımı için rulmanların dinamik davranışlarının iyi bilinmesi hassas çalışan sistemlerin oluşturulmasına yardımcı olduğu gibi rulmanların, dolayısıyla da makinelerin servis ömürlerini artırmakta ve bakım giderlerini de düşürmektedir. Son yıllarda uygulanmaya başlanan kestirimci bakım teknikleri ve gerçek zamanlı parametre izleme sistemleri, makinelerin durum kontrolü için gürültü ve titreşimin etkili izleme parametreleri olduğunu ispatlamıştır. Bu nedenle çeşitli çalışma şartlarında rulmanların dinamik tepkilerinin iyi bilinmesi bu tür bakım stratejilerinin uygulama başarısını da artıracaktır. Makinelerde üç çeşit bakım tekniği

uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi makine arıza yaptığında arızalanmış parçanın değiştirilmesi, ikincisi makine elemanlarının çalışma ömürleri parametrik formüllerle hesaplanarak bu ömrü tamamladıklarında değiştirilmesi yani periyodik bakım yapılması ve üçüncüsü ise titreşim, gürültü, yağ kalitesi, elektrik akımı gibi parametreleri takip ederek makine elemanlarındaki bozulmanın tahmin edilip gerektiğinde değiştirilmesi şeklindedir. Seri üretim yapan sistemlerde birinci tekniğin uygulanması imkânsızdır, çünkü hattın sürekli durmasına sebep olacaktır. Periyodik bakım yapılması seri üretim sisteminin belirli zamanlar dışında sürekli olarak çalışır durumda tutulmasını sağlamaktadır, fakat makine elemanları bazen hesaplanan çalışma ömründen önce bozulmakta bazen de değiştirilmiş parçaların daha uzun süre çalışma potansiyelleri olduğu görülmektedir. Dolayısıyla makine elemanlarının çalışma ömürlerinin kesin olarak hesaplanamamasından kaynaklanan periyodik bakım da ekonomik olarak yük getirmektedir. Seri üretim sistemlerinin sürekli olarak çalışır durumda tutulması ve aynı zamanda bakım maliyetlerinin en aza indirilmesi için son yıllarda kestirimci bakım veya makine durumunun takip edilmesi ismi verilen bakım tekniği uygulanmaktadır. Bu teknikte makine üzerinden ve/veya çevresinden titreşim, gürültü, sıcaklık, yağ kalitesi gibi parametrelerin takibi yapılarak arıza meydana gelebilecek parça tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Rulmanlar gibi her bir bozulma durumunda farklı titreşimler üreten makine elemanlarının takibinde kestirimci bakım tekniğinin uygulanması iyi sonuçlar vermektedir. Son çeyrek yüzyılda teknolojik alanda yaşanan hızlı gelişmeden dolayı algılayıcılar, bilgisayar sistemleri ve kullanılan algoritmalarda büyük bir ucuzlama ve çeşitlilik yaşanmaktadır. Bu sebeple kestirimci bakım tekniklerinin uygulanma sayısı da hızla artmaktadır. Bu uygulamaların rulmanlardaki arızaların tespitinde istenilen başarıya ulaşabilmesi için rulmanların dinamiğinin çok iyi bilinmesi gereklidir. Ayrıca her bir hata durumunda karşılaşılan titreşimlerin de iyi incelenmesi gereklidir. Bu çalışmada bir çift açısız temaslı rulmanla yataklanmış şaftın dinamik davranışını incelemek amacıyla radyal, aksenel ve yuvarlanma yönlerinde titreşimler yapan 5 serbestlik dereceli bir model oluşturulmuştur. Özellikle rulmanlardan kaynaklanan davranışın gözlemlenmesi ve modelin basitleştirilmesi için şaft rijit kabul edilmiştir. Elde edilen doğrusal olmayan hareket denklemlerinin çözümü için MATLAB yazılımı ile bir program geliştirilmiştir. Geometrik olarak kusursuz rulmanın karakteristik titreşimlerini incelemek amacıyla geliştirilen bu program

farklı ön yükleme, yuvarlanma elemanı sayısı, bilye konumu ve şaft dönüş hızlarında çalıştırılmış ve sonuçlar zaman, frekans ve zaman/frekans tanım bölgesinde gösterilmiştir [25].

Kestirimci bakım tekniklerini uygulamak için farklı hata durumlarına karşılık gelen oluşan titreşimlerin bilinmesi de gereklidir. Bu amaçla, elde edilen rulman modeline ve bilgisayar programına bölgesel hatalardan iç bilezik hatası, dış bilezik hatası ve yuvarlanma elemanı hatası ile dağınık hatalardan bilye boyutu farklılığı ve dengesizlik eklenmiştir. Her bir durumdaki titreşimleri inceleyebilmek için program belirli rulman parametrelerinde ve farklı şaft dönüş hızlarında çalıştırılmış ve sonuçlar yine zaman, frekans ve zaman/frekans tanım bölgesi için verilmiştir. Elde edilen sonuçların ve kestirimci bakımda kullanılan analiz ve takip tekniklerinin uygulamadaki başarısını görebilmek için bir deney düzeneği de tasarlanmış ve düzener belirlenmiş bir şaft devrinde çeşitli hatalar oluşana kadar çalıştırılmıştır. Deney düzeneğinin çalışması süresince önceden belirlenmiş dört ayrı noktada periyodik olarak titreşim ölçümleri alınmış ve ölçümler literatürde kullanılan zaman, frekans ve zaman/frekans tanım bölgesi teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca titreşim analizleri sonucu tespit edilen hataların muayenesi için rulmanlar deney sonrası sökülmüş ve parçalarına ayrılarak mikroskop altında incelenmiştir. Modelleme sonuçları, rulmanların kusursuz olsalar bile titreşim ürettiklerini ve bu titreşimlerin açışal temaslı rulmanlarda ön yükleme ve bilye sayısı gibi parametrelere bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca rulmanlarda kusur olması durumunda ortaya çıkan titreşimlerin belirli bir karakteristiğe sahip olduğu ve bu karakteristik titreşimler incelenerek rulmanların sağlık kontrolünün çalışma sırasında izlenebileceğini göstermiştir. Deneysel çalışma sonuçları da bunu doğrulamıştır ve kullanılan rulmanlarda oluşan hatalar titreşim analizleri ile tespit edilmiştir [38]. Şekil 2.2.'de tez çalışmaları için kullanılan ORS 6206 markalı bir rulmana ait temel yapı gösterilmiştir ve Tablo 2.1' de bu rulmana ait özellikler verilmiştir [12].



Şekil 2.2. Temas açısı  $0^0$ , bilya sayısı  $N=9$  olan rulmana ait temel özellikler

Tablo 2.1. Kullanılan rulmana ait temel ölçüler

Parametre	Değer(mm)
D	52
$R_b$	7,895
$d_m$	38,95
w	15
N	9

$$\text{Temel Frekans (TF)} = \frac{f_s}{2} \left[ 1 - \frac{d_b}{d_m} \right] \quad (2.1)$$

$$\text{Bilya dönme frekansı (BD)} = \frac{f_s \times d_m}{2d_b} \left[ 1 - \left( \frac{d_b}{d_m} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

$$\text{Dış bilezik frekansı (DB)} = N(\text{TF}) \quad (2.3)$$

$$\text{İç bilezik frekansı (İB)} = N(f_s - \text{TF}) \quad (2.4)$$

Denklem (2.1) – (2.4)'deki formüllerde rulmanlara ait değerler girilerek rulmanın döner parçalarının yani iç bilezik, bilya ve dış bileziğe ait dönme frekansları elde edilir. Tablo 2.2'de bu hesaplar sonucu oluşturulmuş dönme frekansları görülmektedir [25].

Tablo 2.2. Rulman döner elemanlarına ait dönme frekansları

Hata Tipi	Çalıştırma Hızı (devir/dk)		
	1200 Hz	1600 Hz	2400 Hz
İç Bilezik	108 Hz	144 Hz	216 Hz
Dış Bilezik	72 Hz	96 Hz	144 Hz
Bilya	94,5 Hz	126 Hz	189 Hz

## 2.1. Rulmanların Yapısı

Rulman ana parçaları iç bilezik, dış bilezik, kafes, yuvarlanma elemanları ve sızdırmazlık kapağıdır. Rulmanların bazılarında ilave parçalar vardır. Kılavuz ringi oynak makaralı rulmanlarda kullanılan ilave parçaya örnektir.

### 2.1.1. İç bilezik

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

### 2.1.2. Dış bilezik

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

### 2.1.3. Yuvarlanma elemanları

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

### 2.1.4. Kafes

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

### **2.1.5. Kapaklar**

Kapaklar veya keçeler rulman ömrünün uzun olması için gereklidir. Kapaklar rulmanları pislikten korur, kendisinden kapaklı rulmanların tercihi günden güne artmaktadır.

### **2.1.6. Kılavuz ringi**

Kılavuz ringi kullanılmasının amacı; rulmanda yuvarlanma elemanlarına kılavuzluk yaparak mil ile paralel dönmesini sağlamak ve yükleri eşit dağıtmaktır [30].



### **3. FARKLI TİTREŞİM ANALİZİ YÖNTEMLERİ KULLANARAK RULMANLARDA HATA BOYUTUNUN SINIFLANDIRILMASI**

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 bilgi elde edilir ve sistemin güvenilirliğinin artırılması sağlanır. Frekans düzlemini esas alan çalışmalar, makina titreşimlerinin rulman geometrisi ve motor hızına bağlı olarak rulman bölgesel hata karakteristiklerini incelemeye yönelik biçimde gerçekleştirilirken, zaman düzleminde yapılan çalışmalar genel olarak titreşimlerin istatistiksel analizi üzerinde durur. Dalgacık dönüşümü gibi hem zaman hem frekans bilgilerini içeren çeşitli teknikler de sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir.

Rulman hatalarını büyük ölçüde tespit eden yöntemlerden birisi frekans analizidir. FFT (Fast Fourier Transform) ise frekans analizi tekniklerinden en temel olanıdır. Titreşim verilerini FFT ve zarf analizi olarak da bilinen yüksek frekans demodülasyonu yöntemi ile izlemek endüstride yaygın olarak kullanılan bir uygulamadır. Rulman, üzerinde oluşan hatalardan dolayı belirli frekanslarda titreşim üretir. Ancak, bu frekanslardaki titreşimler gürültü ya da makinanın mekanik özelliklerinden dolayı oluşan çeşitli frekans bileşenleri ile bastırılabilir. Bu nedenle yalnızca FFT yöntemi ile rulman hatalarını tespit etmek oldukça güçtür. Bu durum da araştırmacıları, zaman ve frekans analizi yöntemlerini daha etkili kullanacak yöntemler geliştirmeye yönlendirmiştir.

Son yıllarda yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritmalar gibi yapay zekâ tabanlı gerek zaman gerekse de frekans düzleminde uygulanan yöntemler giderek önem kazanmaktadır.

Literatürde bulunan yöntemler oldukça etkili olsalar da gerek kullanılan parametrelerin elde edilmiş yöntemlerinin gerekse de uygulama yöntemlerinin sisteme getirdiği hesapsal yükler oldukça fazladır. Yapılan çalışmaların yoğunluğu göz

önünde bulundurulduğunda, etkinlik ve uygulanabilirlik arasındaki optimum oranım gerçekleştirebilenlerin sayısı çok fazla değildir. Bu durum gerçek zamanda çevrimiçi hata tespitini olumsuz yönde etkilemekte hatta bazı durumlar için imkânsız kılmaktadır.

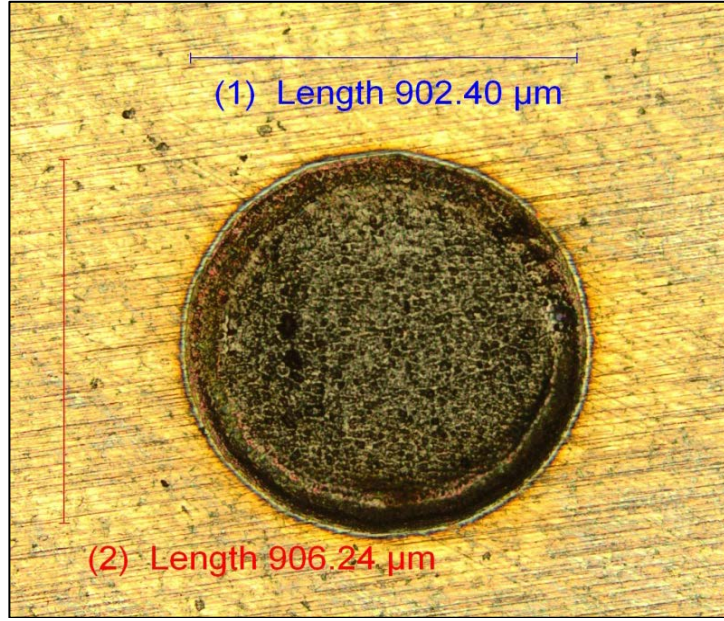
Bu tez çalışmasında rulmanlarda hata boyutu tespitine yönelik dört farklı danışmanlı sınıflandırma yöntemi incelenmiş ve birbirlerine olan üstünlükleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu amaçla bir mil-rulman düzeneğinden veri toplanmış ve bu veriler sınıflandırma işleminde de kullanılmıştır. Çalışmanın amacı hatalı rulmanların gözlemlenerek arızaların kritik boyutlara ulaşmadan gerekli önlemlerin alınmasını sağlamaktır.

### **3.1. Rulmanlarda Titreşim Verisinin Elde Edilmesi ve Ham Titreşim Verisinden İstatiksel Parametrelerin Çıkartımı**

Rulmanda hata boyutunu sınıflandırmak için belirli çaplarda yapay hatalar oluşturulmuştur. Rulmanda yapay hatalar dışında ekstra bir titreşimin olmaması için yapay hataların özenle açılması gerekmektedir. Bunun için lazer delme yöntemi ile mikron hassasiyetinde iç bilezik üzerine 0,15 mm 0,5 mm ve 0,9 mm çapında delikler açılmıştır. Şekil 3.1'de lazerle oluşturulmuş yapay hatalar ve Şekil 3.2'de ise örnek olarak iç bilezik 0,9 mm hatalı rulmanın mikroskobik görüntüsü görülmektedir.

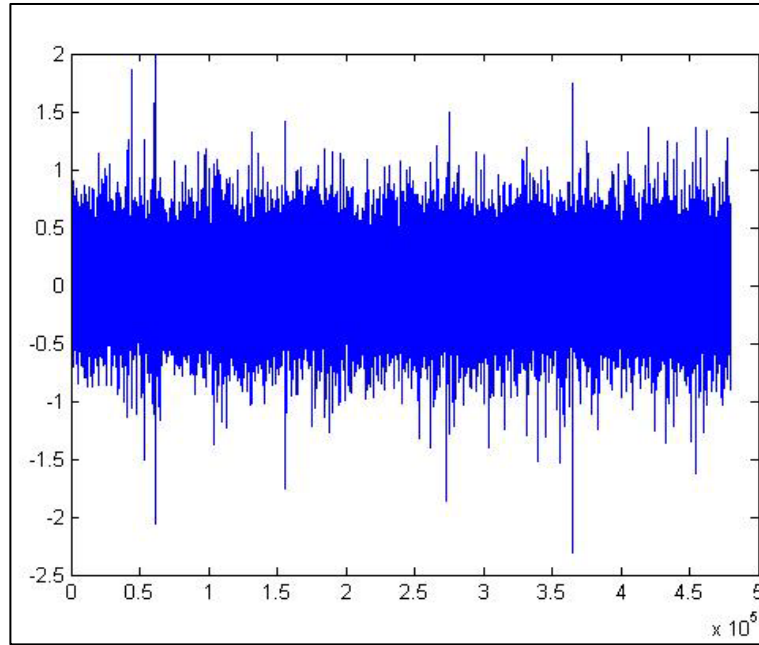


Şekil 3.1. Lazerle oluşturulmuş yapay hatalar



Şekil 3.2. Lazer ile oluşturulmuş yapay hatanın mikroskopik görüntüsü

Titreşim verileri 24 KHz örnekleme frekansında ve 2100 rpm hızda toplanmış, 1'er saniyelik kısımlara ayrılarak 20 adet veri paketi şeklinde bilgisayar ortamında saklanmıştır. Şekil 3.3'te toplanmış ham titreşim verisi örneği görülmektedir.



Şekil 3.3. Örnek ham titreşim verisi

Hata boyutu değiştikçe titreşim verisi üzerinde çeşitli değişiklikler olacaktır. Bu değişiklikleri elde etmek için titreşim verisinin zaman uzayında özellik çıkarımı yapılmıştır. Bu parametreler aşağıda verilmiştir:

- Standart sapma ve Karelerin ortalamasının karekoku (Root mean square - RMS)

Tek değişkenli veri dağılımının değişkenliğini ve dağılımını incelemek için kullanılan lut “standart sapma”dır.

Buna göre “sapma”, ortalama değere olan uzaklığın karesinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır ve  $\sigma^2$  ile gösterilir. Bunun yanında “standart sapma” ise sapma değerinin karekoku olarak ifade edilir ve  $\sigma$  ile gösterilir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3.1)$$

standart sapma ( $\sigma$ ) değeri Denklem (3.1) bağıntısı gibi hesaplanır ve bu değer aslında veri dağılım eğrisinin merkez ve kenarlarındaki değişim değerini göstermek için kullanılmaktadır.

Karelerin ortalamasının karekoku (RMS) ortalaması sıfır olan bir salının standart sapması anlamına gelir. Bir sinüs fonksiyonunun ortalaması 0 iken, RMS değeri en büyük genliğin  $\sqrt{2}/2 \cong 0,707$  katı kadardır. Ancak, rastgele işaretlerde bu durumun gözlenmesi mümkün değildir. Bu deneyde kullanılan titreşim işaretleri 0 etrafında salınım yaptığı için genliklerinin büyüklükleri ne olursa olsun ortalamalarının 0’a yakın bir değer olması beklenir. Bu nedenle RMS ve standart sapma sisteme giriş olarak verilirse olumlu sonuçlar getirir.

Ortalama değerin sıfır olması durumunda ( $\mu=0$ ); standart sapma etkin değer (RMS – Root Mean Square) adını alır ve

$$\text{RMS}(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)’deki bağıntı ile hesaplanır. RMS değeri de sıfır ortalamadan sapmanın bir ölçüsü olarak tanımlanabilir.

- Maksimum

$$\text{maks} = \text{Maks}(x_i) \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) ile titreşim verisi arasından maksimum genlikli bileşen elde edilir.

- Minimum

$$\text{min} = \text{Min}(x_i) \quad (3.4)$$

Denklem (3.4) ile titreşim verisi arasından minimum genlikli bileşen elde edilir.

- Ortalama Değer

Buna göre ölçülen işaret genliklerinin aritmetik ortalaması yöntemi ile Denklem (3.5) ile hesaplanır.

$$\text{Ortalama Değer} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

$x_i$  değeri ortalaması alınan titreşim sinyallerinin genlik değerini göstermektedir.

- Medyan

Medyan, bir sayısal veri serisi sıralandığında ortada kalan sayıyı göstermektedir.

- Crest faktör

Crest faktörü, akım veya ses alternatif etkin değere en büyük dizi değerinin oranı olarak gösteren bir dalga formu ölçütüdür. Bir başka deyişle crest faktör en büyük değer dalganın dalga formundan ne kadar aştığını göstermektedir. Genelde desibel cinsinden ölçülmektedir. Denklem (3.6)'da crest faktör formülü edilmiştir.

$$C = \frac{|x|_{\text{tepe}}}{x_{\text{RMS}}} \quad (3.6)$$

- Skewness (Çarpıklık) ve Kurtosis (Basıklık)

Bir veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisinden (Gauss formundan) farklılaşma ölçüsünü belirleyen parametreler “çarpıklık” ve “basıklık” olarak ifade edilir.

Çarpıklık (s) veri dağılım eğrisindeki simetri kaybının ölçüsüdür. Bir veri kümesinin simetrik olması veri dağılımının merkez noktasına göre sağ ve sol kısmının benzer olması anlamına gelir. Buna göre çarpıklık,

$$s = \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (3.7)$$

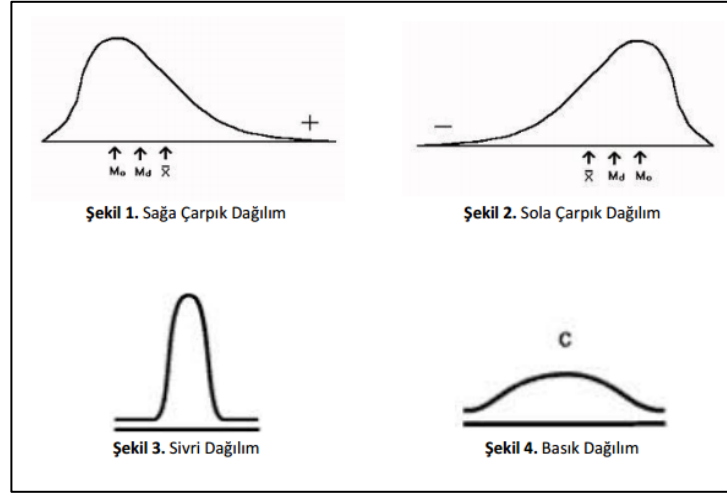
Denklem (3.7) ile ifade edilebilir.

Basıklık (k) ise veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisine göre daha dik ya da daha basık olma durumunun ölçüsüdür ve

$$k = \frac{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8) ile ifade edilebilir. Buna göre ilgili veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisine eşit (Gauss formunda) olması durumunda yukarıda incelenen istatistiksel parametreler; ortalama değer ( $\mu=0$ ), standart sapma ( $\sigma=1$ ), çarpıklık ( $s=0$ ) ve basıklık ( $k=3$ ) değerlerini alacaktır.

Dolayısıyla bu parametreler bir rastlantı işaretinin istatistiksel davranışındaki değişimleri algılamak üzere kullanılabilir. Bu incelemeyi gerçekleştirirken kullanılacak Histogram çizimi tüm parametreleri beraber takip edebilmek bakımından etkili bir grafik analiz yöntemi olacaktır [39].



Şekil 3.4. Örnek çarpıklık ve basıklık grafiği [40]

Şekil 3.4'te çarpıklık ve basıklık kavramları gauss dağılımı üzerinde görsel olarak gösterilmiştir [40].

### 3.2. Yapay Sinir Ağları (YSA) Sınıflandırma Yöntemi

İlk yapay sinir ağı modeli 1943 yılında, bir sinir hekimi olan Warren McCulloch ile bir matematikçi olan Walter Pitts tarafından gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts, insan beyninin hesaplama yeteneğinden esinlenerek, elektrik devreleriyle basit bir sinir ağı modellemişlerdir [41].

Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sisteminin simülasyonu olarak ortaya çıkmıştır. Bir bilgisayarın çalışma şeklini beyin çalışmasına benzeterek yapay sinir ağları modeli geliştirilmiştir. Yapay sinir ağları algoritmalarında öğrenme, daha önce edinilen tecrübelerle bağlıdır. Bir sistemin özelliklerinin çıkarıldıktan sonra sistemin çözümüne dayalı bir algoritma olmasa veya karmaşık bir çözüm algoritması olsa dahi, yapay sinir ağları bu sisteme uygulanabilir. Yapay sinir ağları nöronlardan oluşmaktadır. Bu nöronlar gerçek sinir sistemindeki gibi bir birlerine çok karmaşık bir şekilde dahi bağlanabilmektedirler. Her bir nöronun farklı ağırlıkta girişleri ve bir tane çıkışı bulunmaktadır. Bu amaçla farklı ağırlıktaki girişlerin toplamı Denklem (3.9)'daki gibi ifade edilir [42]:

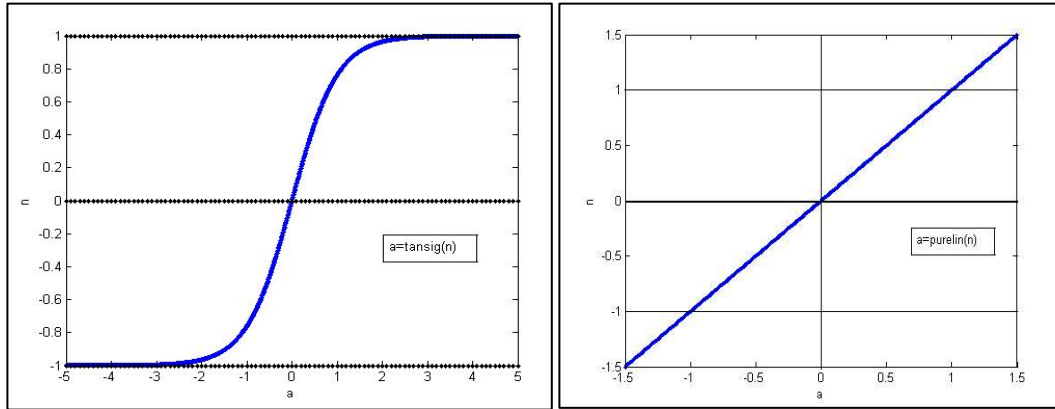
$$n = \sum_{i=1}^P (w_i \cdot x_i + b) \quad (3.9)$$

Burada P giriş sayısı, w girişin ağırlığı, x giriş ve b biasdır. Ağırlıklandırılmış girişler ve her nöronun biasıyla beraber toplamları, aktivasyon fonksiyonundan geçirilir ve bunun sonucunda o nörona bağlı çıkış elde edilir. Aktivasyon fonksiyonunu "f" ile gösterirsek:

$$f(n) = f\left(\sum_{i=1}^P (w_i x_i + b)\right) \quad (3.10)$$

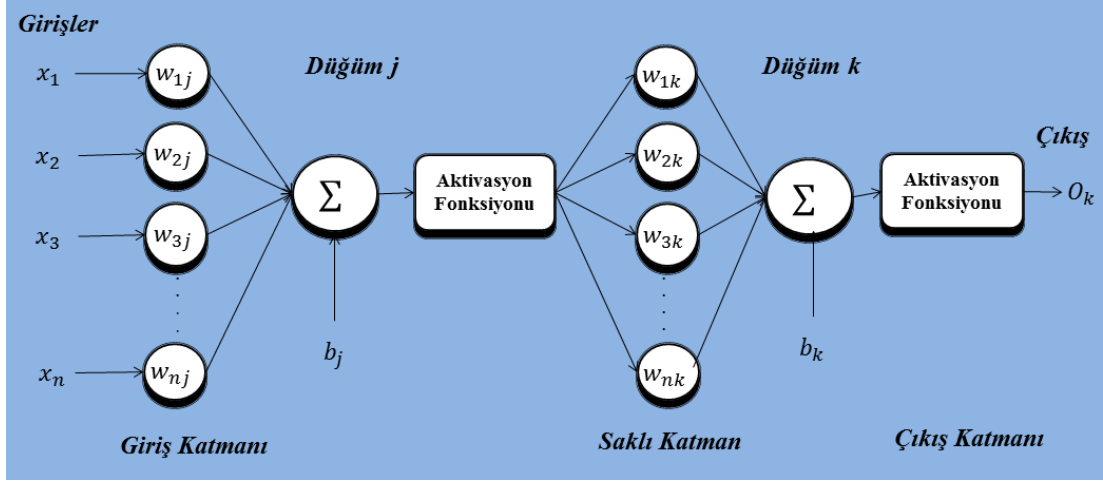
Denklem (3.10) bağıntısı ile ifade edilir. Aktivasyon fonksiyonu sistemin yapısına uygun olarak sigmoid fonksiyonu, eşik (treshold) fonksiyonu veya hiperbolik tanjant fonksiyonu olabilir. Çıkış elde edildikten sonra eğer sistem çok katmanlıysa, bir nöronun çıkışı diğer bir nöronun girişi olabilir. Bu şekilde çok katmanlı bir yapay sinir ağı modeli oluşturulur [43].

Tanjant-Sigmoid (tansig) transfer fonksiyonu çok katmanlı yapay sinir ağlarında kullanılan bir transfer fonksiyonudur. Bu fonksiyon sistemde giriş katmanı ile saklı katman arasında transfer fonksiyonu olarak kullanılmıştır. tansig fonksiyonu sistemin çıkışını -1 ile +1 arasında düzenlemektedir. purelin fonksiyonu ise saklı katman ile çıkış katmanı arasında kullanılan transfer fonksiyonudur. Bu transfer fonksiyonu ile çıkış -1 ile +1 arasında lineer olarak düzenlemektedir. Şekil 3.5'te tansig ve purelin fonksiyonu grafikleri çizdirilmiştir.



Şekil 3.5. Tanjant-Sigmoid(tansig) ve purelin transfer fonksiyonu





Şekil 3.6. Sinir hücreleri ve katmanlar

Yapay sinir ağları modeli genelde Şekil 3.6'daki gibi giriş katmanı, saklı katman ve çıkış katmanı olmak üzere 3 katmandan oluşur. Her katman çok fazla nörondan oluşabilir. Bilgi giriş katmanından yapıldıktan sonra aktivasyon fonksiyonlarından geçer. Giriş katmanın çıkışları saklı katmanın girişleri olarak devam eder. Bu aşamadan sonra sonuç katmanında son bir defa daha aktivasyon fonksiyonları saklı katman çıkışlarını değerlendirerek nihai çıkış elde edilir. Şekil 3.6'da giriş katmanının girişleri  $x_j$ , çıkışı  $h_j$  ile gösterilmiştir.  $h_j$ , aynı zamanda saklı katmanın girişi olarak gösterilmiştir.

Yapay sinir ağlarında öğrenmenin ilk adımı aktivasyon olarak nitelendirilebilir. Sinir hücresine giren sinyallerin toplamı o hücreyi aktif hale getirebilecek bir değere sahip olup olmamasına göre çıkış değeri değişmektedir. Eğer toplam sinyal hücreyi ateşleyebilecek, eşik değerini atatabilecek kadar yüksek ise o hücre aktiftir, aksi durumda ise o hücre pasiftir. Sinir hücresinin aktif veya pasif durumda olmasına göre sınıflandırma yapıp yapamadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Örneğin, girdi örüntülerine 1 ya da 0 cevabını vererek sınıflandırma yapabilen bir yapay sinir ağı hücresi, örüntüye 1 veya 0 değerini atayarak karar vermiş sayılmaktadır. “Karar vermek” ve “sınıflandırmak”, öğrenme sürecinin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır [44].

### 3.3. Uyarlanabilir Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ile Sınıflandırma Yöntemi

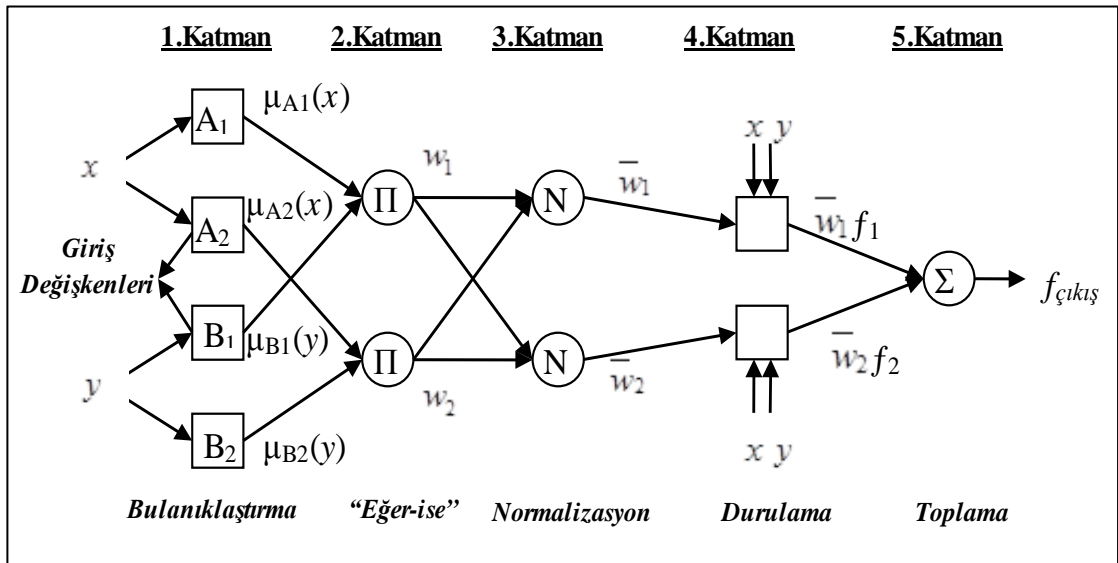
Kestirim ile sınıflandırmada yapay sinir ağları kullanmak, YSA mantığının sadece giriş ve çıkışa bağlı olmasından dolayı ana sistem bileşenleri arasındaki ilişkiyi

göstermemek gibi dezavantajları ortaya çıkarmaktadır. Bunun gibi zor şartlarda daha iyi sonuçlar elde etmek için Jang tarafından 1993'te ANFIS yöntemi geliştirilmiştir [45].

ANFIS verilen bir girişi hedef çıkışa dönüştürmek için, bulanık çıkarım sistem modelini temel alan basit bir veri öğrenme tekniğidir. Bu metot üyelik fonksiyonları, bulanık mantık operatörleri ve koşullu kurallar içerir. ANFIS bulanık çıkarım sisteminin geliştirilmesinden oluşan bir Sugeno-tip bulanık çıkarım modelidir. Sugeno-tip ANFIS Sugeno bulanık çıkarım sisteminde sıfıncı derece ile yer değiştirmek için çıkış sistemine birinci dereceden polinom uygular [46].

ANFIS metodu, insan düşünce sistematığında çok kullanılan eğer-ise (IF-THEN) kurallarından yararlanarak oluşturulmuş bir sinirsel-bulanık sistemdir. Bu bağlamda, sistem için giriş üyelik fonksiyonlarını daha iyi tanımlamak, öğrenmek ve temsil etmek için uygundur. Bu özelliğinden dolayı ANFIS, hem YSA hem de bulanık çıkarım sisteminin avantajlarını almaktadır. YSA tekniğine bir bulanık modelin parametrelerini geliştirmek için uygulamak, eğitim verilerinin öğrenilmesini sağlar [47].

ANFIS mimarisi, bulanıklaştırma katmanı, kural katmanı, normalizasyon katmanı, durulama katmanı ve toplama katmanı olan üzere 5 katmanlıdır. Şekil 3.7'de ANFIS mimarisi ve katmanları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. ANFIS Mimarisi ve Katmanları

1.Katman: Bu katmandaki her bir  $i$  düğümü çıkışı Denklem (3.11) ve Denklem (3.12)'deki gibi uyarlanabilir bir düğümdür.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \quad i=1,2 \quad (3.11)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \quad i=3,4 \quad (3.12)$$

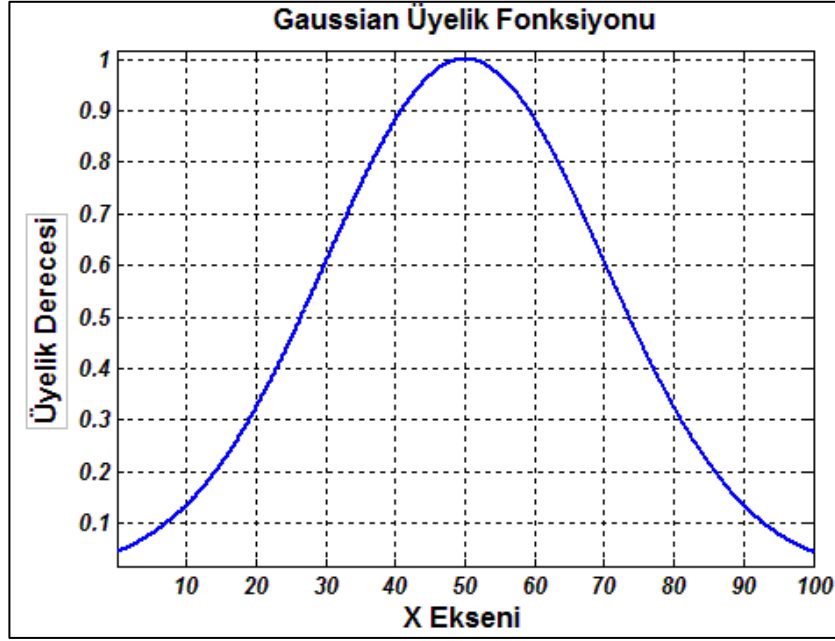
Burada  $x$  (ya da  $y$ ) düğümün girişi,  $A_i$  (ya da  $B_{i-2}$ ) ise söz konusu düğüme ait bulanık kümeyi ifade etmektedir.

Bir başka deyişle, bu katmanın çıkışları, kuralların şart ya da öncül kısımlarına ait üyelik derecelerini belirlerler. Burada  $A_i$  ve  $B_i$  için söz konusu üyelik fonksiyonları, uygun bir biçimde parametreleri seçilmiş herhangi bir üyelik fonksiyonu olabilir.

Örneğin  $A_i$  Denklem (3.13)'de belirtilen genelleştirilmiş Gaussian fonksiyonu ile ifade edilebilir.

$$\mu_{A_i} = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

Burada  $c$ , Gauss eğrisinin merkezini,  $\sigma$  ise genişliğini ayarlayan parametrelerdir. Bulanıklaştırılmış değer  $\mu_{A_i}(x)$  olarak gösterilmiştir. Şekil 3.8'de örnek bir Gaussian üyelik fonksiyonu bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Gaussian Üyelik Fonksiyonu

2.Katman: Bu katmandaki her bir düğüm, kendisine gelen sinyallerin çarpımını çıkış olarak üretir ve  $\Pi$  ile etiketlenmiş sabit bir düğümdür. Örneğin;

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2 \quad (3.14)$$

Her bir düğümün çıkışında, her bir durum-koşul kuralı için gerçekleştirme derecesi oluşturur. Denklem (3.14)'te çarpma işlemi (VE) yerine bunun aynısını gerçekleştiren T-norm işlemleri de düğüm fonksiyonu olarak kullanılabilirler.

3.Katman: 3. katmandaki her bir düğüm, N ile etiketlenmiş ve sabit bir düğümdür. Katmandaki i.düğüm, i.kuralın gerçekleştirme derecesinin, bütün kuralların gerçekleştirme dereceleri toplamına oranını hesaplamaktadır. Burada  $w_i$  kuralların ateşleme gücünü göstermektedir.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'te  $\bar{w}_i$  ateşleme güçlerinin normalizasyon yapılmış halini göstermektedir.

4.Katman: Bu katmandaki her  $i$  düğümü, düğüm fonksiyonu aşağıdaki gibi olan, uyarlanabilir bir düğümdür.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \times f_i \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da  $f_1, f_2$  aşağıda gösterildiği gibi bulanık eğer-ise kurallarıdır:

1. Kural: Eğer  $x \in A_1$  ise ve  $y \in B_1$  ise O Halde  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$
2. Kural: Eğer  $x \in A_2$  ise ve  $y \in B_2$  ise O Halde  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Burada  $p_i, q_i, r_i$  lineer sonuç parametreleri olarak ifade edilir.

5.katman: Bu katmandaki her  $i$  bağlantı, bağlantı işlevi ile uyarlamalı bir bağlantıdır. Her  $i$  bağlantı sonuç ağırlıkları değerlerini hesaplamaktadır. Bağlantı çıkışı Denklem (3.17) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$O_{5,i} = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{w_i} = f_{\text{çıkış}} = \text{Toplam çıkış} \quad (3.17)$$

Böylelikle Sugeno bulanık çıkarım modeline işlevsel olarak eşdeğer olan, örnek bir ANFIS yapısı tanımlanmıştır. Ağın yapısı tamamen sabit olmamaktadır. Ağın oluşturulması ve bağlantı işlevlerinin görevlerine göre ayrılması, her katmandaki her bir bağlantının sağladıklarına ve modüler işlevselliğine göre keyfi olarak seçilebilir. Sonuç ve üyelik fonksiyonlarına ait değişkenlerin hesaplanmasında geri yayımlı öğrenme algoritması kullanılabilir.

### 3.4. Destek Vektör Makineleri (SVM) Yöntemi ile Sınıflandırma

İstatistiksel öğrenme teorisi, gözlenen verilerden makine öğrenmesi yardımıyla verinin istikrarlı yapısını ifade eden bir matematiksel model oluşturup bir sınıflandırma fonksiyonu bulmayı amaçlamaktadır. İstatistiksel Öğrenme Teorisi, girdilerle belirlenen çıktıları eşleyerek sınıflandırmayı esas almaktadır. Bu yapıyı oluşturmak için, öğrenme işlemini gerçekleştirmek için eğitim algoritması, sonra da test için oluşacak olan model kurulmalıdır.

Vapnik tarafından geliştirilen Destek Vektör Makineleri (DVM), temeli istatistiksel öğrenme teorisi ve yapısal risk minimizasyonu ilkelerine dayanan, öğrenme,

sınıflandırma ya da kümeleme, yoğunluk tahmini ve regresyon problemlerinin çözümünde kullanılabilen güçlü bir makine öğrenmesi tekniğidir.

Destek Vektör Makinelerinde amaç, ikili sınıflandırma mantığı çerçevesinde, veriyi daha yüksek bir boyuta aktararak oluşturacağı bir en uygun hiperdüzlem yardımıyla iki sınıfı birbirinden ayırmak için en uygun fonksiyonun tahmin edilmesidir. Veriler sınıflandırılırken birden çok düzlem elde edilebileceğinden, gerekli olan en uygun hiperdüzlemin elde edilmesidir. En uygun hiperdüzlem, ilgilenilen durum bir tarafta diğer durumlar bir tarafta olmak üzere, farklı sınıflara ait destek vektörleri arasındaki uzaklığın en büyüklenmesi yoluyla elde edilir. Destek Vektörleri ise, hiperdüzlemin iki tarafındaki en yakın vektörlerdir.

DVM, iki sınıfı, sınıfların en yakın iki örneği arasındaki mesafeyi maksimize edecek hiperdüzlem ile ayırmaya çalışırken ampirik sınıflandırma hatasını minimize eder. İki sınıfı, sınırlara en yakın iki örnek arasındaki mesafeyi maksimize edecek hiperdüzlemin sınırlarına en yakın örnek vektörlere, destek vektörleri denir.

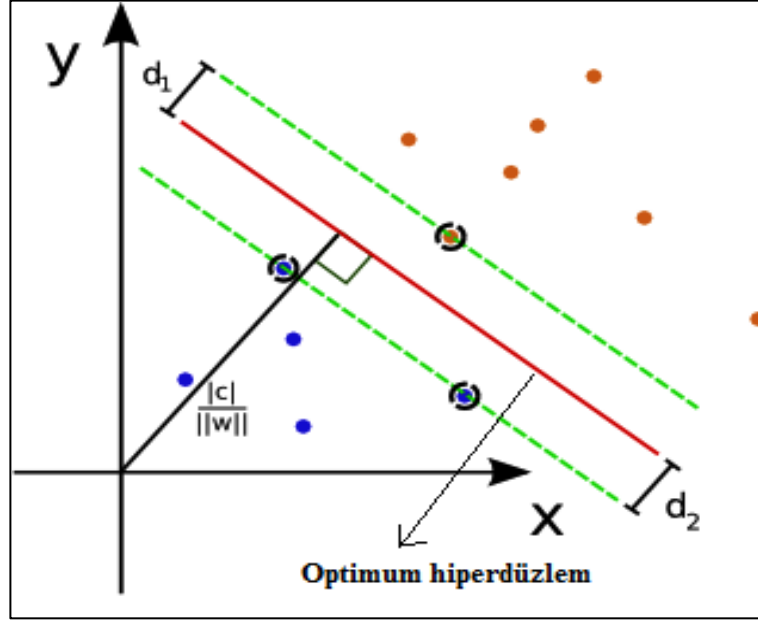
Burges yaptığı çalışmalarda iyi bir sınıflandırma için yapılabilmesi için gerekli olan temel olgunun, sınıflandırılacak iki sınıfın arasından geçirilecek hiperdüzlemin sınırlara olan uzaklığının maksimize gerekliliğini belirtmiştir. DVM Sınıflandırıcıları, veri setinin doğrusal olarak ayrılıp ayrılamama durumuna göre temel olarak ikiye ayrılmaktadır.

Destek Vektör Makinelerinin eğitimi için kullanılacak  $N$  elemanlı veri kümesi  $\{x_i, y_i\}$   $i=1,2,\dots,N$  olsun. Burada  $x_i \in \mathbb{R}^p$   $p$  adet niteliğe sahip girdi vektörü ve  $y_i \in \{-1,1\}$  çıktı değerleridir. Doğrusal olarak ayrılabilme durumunda, iki değer alan çıktı değerleri doğrudan bir hiperdüzlem ile ayrılabilir.

$\{x_i, y_i\}$  ikililerinden oluşan eğitim kümesi  $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$  verildiğinde, bu eğitim kümesi için uygun ağırlık vektörü  $w$  ve eşik değeri  $b$  olmak üzere aşağıdaki denklem, eğitim kümesinin doğrusal olarak ayrılıp ayrılmamasına karar verecektir.

$$Y_i (wx_i + b) \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.18)$$

Denklem (3.18) genelleştirilirse  $wx+b=0$  eşitliği elde edilir ve bu eşitlik yardımıyla iki vektör arasındaki en uygun hiperdüzlem için elde edilmesi gereken sınırlar oluşturulur.



Şekil 3.9. Optimum hiperdüzlem ve destek vektörleri [48]

Şekil 3.9'da yeşil çizgiler sınırları, kırmızı çizgi en uygun hiperdüzlemi ve yeşil çizgilerin üzerinde yer alan işaretli noktalar ise destek vektörleri göstermektedir. En uygun hiperdüzlem sınır çizgilerinin orta noktasında yer almaktadır ve bu sınır çizgileri arasındaki mesafe  $d$  uzaklığı olarak adlandırılmaktadır [48].

Destek Vektör Makinelerinin ana felsefesi  $d$  uzaklığını maksimum yapmaktır. İki örnek kümesi arasındaki uzaklık yani, sınırlar arası uzaklık  $d = 2/\|w\|$  kadardır. Bu iki sınır arasındaki maksimum uzaklık,  $\|w\|^2$  değerinin minimize edilmesiyle elde edilir.

$$\text{Amaç Fonksiyonu : } \text{Min } \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (3.19)$$

$$\text{Kısıt : } y_i (wx_i + b) \geq 1 \quad (3.20)$$

Maksimum sınırın bulunması için, Denklem (3.19)'de yer alan amaç fonksiyonu ve Denklem (3.20)'de yer alan kısıt ile doğrusal olmayan optimizasyon probleminin

çözülmesi gerekir. Bu problemin çözülebilmesi için Lagrange Çarpanları yöntemi kullanılmalıdır.

Problemin çözümünde kullanılan Cortes, Vapnik ve daha sonra Burges'in çalışmaları sonucunda bulunan Lagrange fonksiyonu Denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$L_p(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (w \cdot x_i) + b] + \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (3.21)$$

Bu eşitliklerde her bir  $\alpha_i \geq 0$  Lagrange Çarpanlarıdır.  $L_p$ , Lagrange çarpanlarını en büyükleyen,  $w$  ağırlık vektörü ve  $b$  sabitini en küçükleyen bir fonksiyondur. Bu yöntem gereği fonksiyonun  $w$  ve  $b$  değerlerine göre türevleri alınıp sifıra eşitlenir ve Denklem (3.22) ve Denklem (3.23)'teki Karush-Khun-Tucker (KKT) koşulları elde edilir.

$$w = \sum_{i=1}^n y_i \alpha_i x_i \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0 \quad (3.23)$$

Elde edilen KKT koşulları (3.21)'de yerine yazılır ve optimizasyon problemi en büyükleme tipindeki dual probleme dönüşür.

$$L_D(w, \alpha, b) = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (3.24)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (3.25)$$

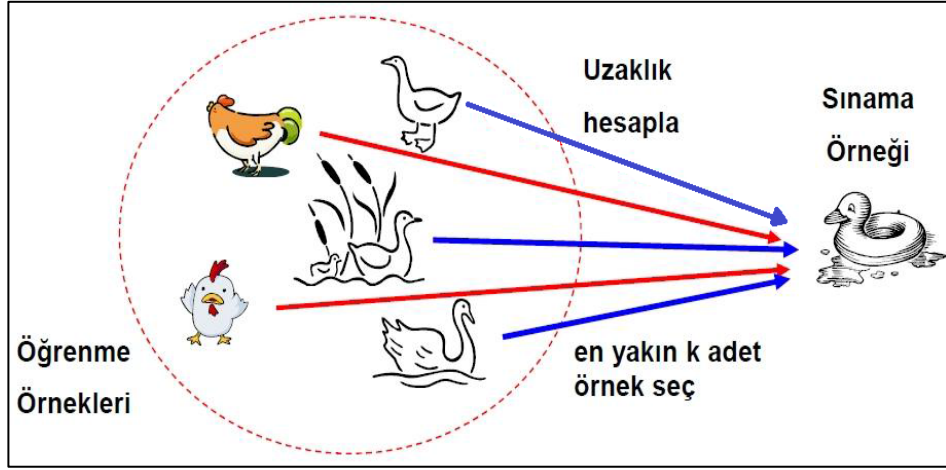
Denklem (3.24) eşitliğindeki model, Denklem (3.25) eşitliğinde verilen kısıt altında çözüldüğünde, her eğitim verisi için bir tane Lagrange çarpanı elde edilir. Gunn 1998 yılında yaptığı çalışmalar ile çözümde elde edilen Lagrange çarpanlarından, sıfırdan büyük değer alanlar destek vektörleri olarak adlandırmıştır. Bu sıfırdan farklı olanlar sınırların üzerinde yer alanlar, sifıra eşit olanlar ise sınırların diğer tarafında kalanlardır.



### 3.5. k - En Yakın Komşuluk Yöntemi (k-NN) ile Sınıflandırma

K en yakın komşuluk sınıflandırma yöntemi sınıflandırmada kullanılan en temel ve basit yöntemlerden birisidir. Bu yöntem güvenilir parametrik tahminlerin olasılıksal yoğunluklarının bilinmediği veya belirlemenin zor olduğu durumlarda ayırma analizini gerçekleştirmek için geliştirilmiştir. ABD Hava Kuvvetleri Havacılık Tıp Fakültesi'nin 1951 yılındaki yayınlanmamış bir raporunda Fix ve Hodges tarafından örüntü sınıflandırma alanında kullanılmak üzere parametrik olmayan bir yöntem tanıtılmış ve o zamandan itibaren bu yöntem k-Nearest Neighbor algoritması, kısaca k-NN olarak adlandırılmıştır. k-Nearest Neighbor algoritması daha sonra 1967'de Cover ve Hart tarafından biçimsel özellikleri üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmalarda  $k=1$  ve  $n \rightarrow \infty$  k en yakın komşu sınıflandırma hatası iki Bayes hata oranı ile sınırlandırılmıştır. Geliştirilen sınıflandırma algoritması ile yeni kabul yaklaşımları 1970'te Hellman, Bayes hata oranının iyileştirilmesi 1975'te Fukunaga ve Hostetler tarafından, uzaklık ağırlıklı yaklaşımlar 1976'da Dudani ile, 1978'te Bailey ve Jain, bulanık yöntemler 1983'te Jozwik tarafından, 1985'te Keller vd. tarafından, esnek hesaplama yöntemlerini 2000'de Bermejo ve Cabestany tarafından araştırılmış ve ortaya çıkarılmıştır [49].

k - En Yakın Komşu sınıflandırma algoritması birbirine yakın olan nesnelerin muhtemel aynı kategoriye alarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir. Algoritma bellek tabanlı danışmanlı sınıflandırma yöntemlerinden bir tanesidir. Test verileri en yakınlarındaki k adet komşularının sınıf etiketlerine bakılarak sınıflandırılır. k-NN algoritmasında denek örneğin diğer örneklere olan uzaklıkları hesaplanır ve bellekte kaydedilir. Daha sonra en yakınındaki k adet örnek çoğunluk olarak hangi sınıfa ait ise denek örneğinin de o sınıfa ait olarak alınır ve o sınıf etiketi bu denek örneğine verilir. k-NN algoritmasının avantajları, uygulanması basit, gürültülü verilerine karşı etkili, eğitim dökümanlarının sayısı fazla ise algoritmanın daha etkin olmasıdır. Dezavantajları ise, algoritma başlangıçta k parametresine ihtiyaç duymakta ve en iyi sonucun alınabilmesi için hangi uzaklık ölçümünün uygulanacağı ve hangi özelliklerin alınacağı bilgisi açık olmaması ve hesaplama maliyeti yüksek olmasıdır



Şekil 3.10. k-NN Sınıflandırma Algoritması [50]

Şekil 3.10'da k-NN algoritmasının uygulama aşamaları görsel bir örnek gösterilmiştir. Temel yaklaşım burada sınıflandırılmak istenen örneğe en yakın örnekleri bulmaktır. Örnekte ise ördek gibi yürüyor, ördek gibi bağıyor, ördek gibi yüzüyor ve bu hayvanın büyük olasılıkla ördek olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. K algoritması uygulama aşamaları aşağıdaki gibidir:

- k parametresi belirlenir.
- Bu parametre verilen bir noktaya en yakın komşuların sayısıdır.
- Söz konusu nokta ile diğer tüm noktalar arasındaki uzaklıklar tek tek hesaplanır.
- Uzaklık hesaplanmasında, n boyutlu Öklid uzayında  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ve  $M=(m_1, m_2, \dots, m_n)$  noktaları arasındaki Öklid uzaklığı Denklem (3.26)'daki gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [50].

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_i)^2} = \sqrt{(x_1 - m_1)^2 + (x_2 - m_2)^2 + \dots + (x_n - m_n)^2} \quad (3.26)$$

- Denklem (3.26)'da hesaplanan uzaklıklara göre satırlar sıralanır ve bunlar arasından en küçük olan k tanesi seçilir.
- Seçilen satırların hangi kategoriye ait oldukları belirlenir ve en çok tekrar eden kategori değeri seçilir.
- Seçilen kategori, tahmin edilmesi beklenen gözlem değerinin kategorisi olarak kabul edilir [51].

#### 4. RULMAN DENEY DÜZENEĞİ

Şekil 4.1’de verilen deney düzeneği bir Tubitak projesi kapsamında oluşturulmuştur. Deney düzeneği AC servo motor, LVD sürücü, iki eksene konulmuş titreşim sensörü, radyal ve aksenal yönde basınç sağlayan iki adet valf, NIDAQ 6211 veri toplama kartı ve sinyal şartlandırıcılardan oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Tezde kullanılan deney düzeneği

##### 4.1. AC Senkron Servo Motor

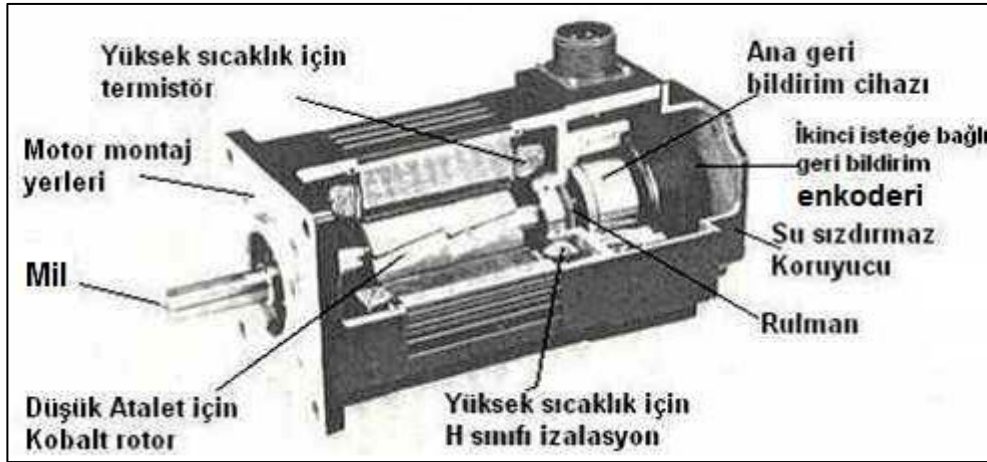
Bu tip servo motorlar, genellikle iki fazlı sincap kafesli asenkron tipi motorlardır. İki fazlı asenkron motorlar, büyük güçlü yapılmakla birlikte çoğunlukla otomatik kontrol sistemlerinde servo motorlar olarak kullanılmak amacı ile küçük güçlü

yapılır. Fırça ve kollektör olmadığından arıza yapma ihtimalleri az, bakımları kolaydır.

#### 4.1.1. AC senkron servo motorun yapısı

Büyük güçlü AC servo motorlar iki ya da üç fazlı olarak üretilmektedir. Bu tip motorların rotorları, doğal mıknatıslı ya da kısa devre çubuklu olmaktadır. İki ya da üç fazlı servo motorların çalışma prensibi, senkron ya da klasik asenkron tip motorlara çok benzemektedir. Üç fazlı servo motorların hız kontrolü, darbe frekans çevirici devresi üzerinden darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile yapılmaktadır. Küçük güçlü (1–10 W) AC servo motorlar ise minik boyutlu olarak iki faz ile çalışabilecek şekilde üretilirler. Bunların iç yapısında aralarında, 90° elektriksel açı yapacak şekilde yerleştirilmiş iki bobin ve sincap kafesine benzer rotor vardır. Servo motorların rotorları, savrulma ve atalet momentlerinin küçük olabilmesi için uzun; çapları ise küçük yapılır. Stator sargılarına uygulanan gerilimlerin frekansı 50–60–400–1000 Hz. Olabilir.

AC servo motorlarda rotor devresi, oldukça yüksek dirence sahip olacak şekilde imal edilir. Bu işlem ya sincap kafes çubuklarında ya da çubukların bağlantı noktalarında yüksek dirençli maddeler kullanılarak yapılır. Sekil 4.13’ de komple AC servo motor kesiti ve parçaları, Sekil 4.2’de ise AC servo motorun iç yapısı görülmektedir.



Şekil 4.2. AC servo motor kesiti [52]

#### 4.1.2. AC senkron servo motorun çalışması

AC servo motorların çoğu ya iki fazlı ya da bölünmüş fazlı asenkron motor tipindedir. Temel olarak her ne kadar gerilimin genliğini belirli sınırlar içinde değiştirmek suretiyle hızı değiştirilebilse de bu motorlar sabit hızlı motorlardır [52].

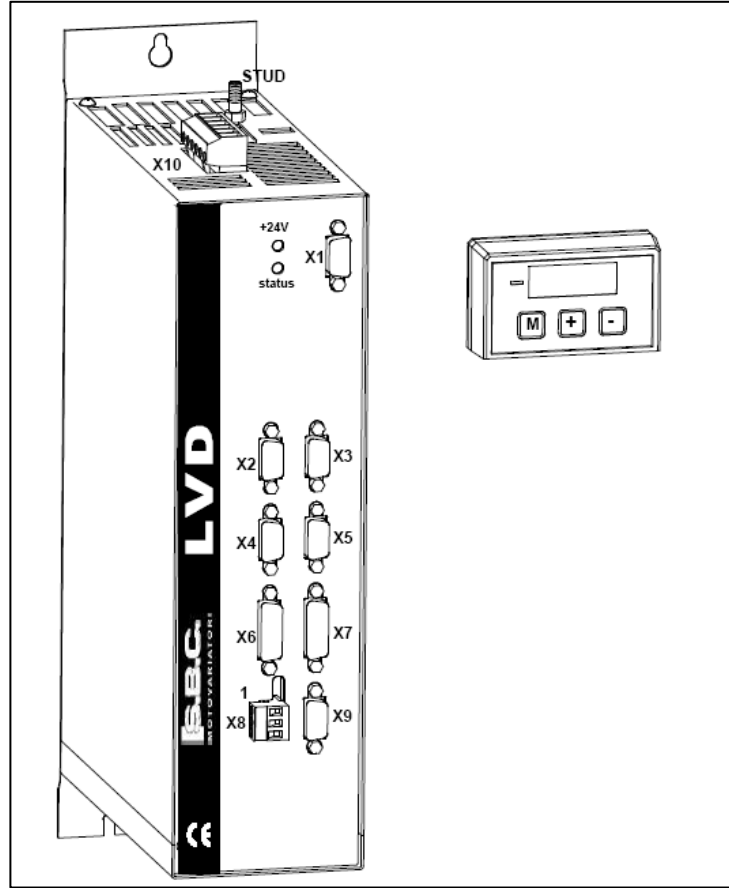
#### 4.2. Senkron Servo Motor Sürücüsü

Servo Motor sürücüsü olarak projede LVD (Low Voltage Directive) kullanılmıştır.

Bu motor ile ilgili özellikler aşağıdaki gibidir:

- Hız kontrol
- Gelişmiş tork sınırlama yönetimi
- Hız penceresi yönetimi
- Trapezoidal hız profili ile pozisyonlama
- Değişken oransal ve faz kaymalı senkronisasyon fonksiyonu
- Mil yönlendirme
- Step motor simulasyonu
- Hız kontrollü tork kontrolü
- Hız kontrollü ivme kontrolü
- Basitleştirilmiş bakım, test ve devreye alma modu
- Gelişmiş input/output programlama fonksiyonları için dahili PLC

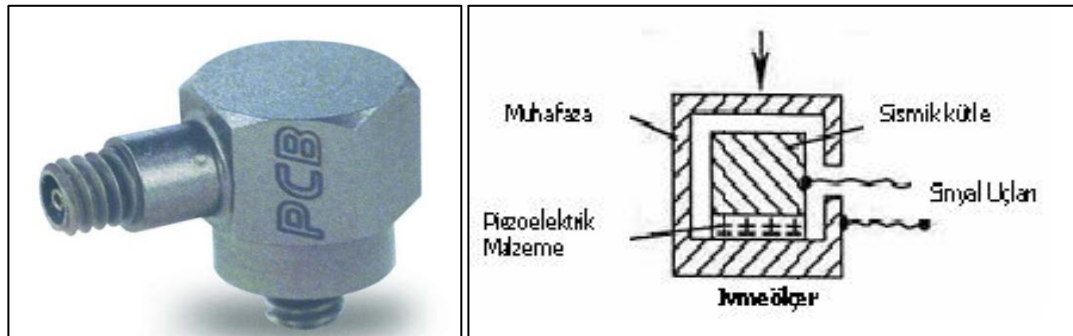
Şekil 4.3'te LVD motor sürücüsü gösterilmektedir [53].



Şekil 4.3. LVD servo motor sürücüsü [53]

### 4.3. Titreşim Sensörü

Titreşimleri sense etmek için PCB 352 C65 SN 77267 sensörü kullanılmıştır. Şekil 4.4'de titreşim sensörü ve yapısı görülmektedir. Bu sensörler yerçekime göre çalışmakta ve meydana gelen titreşimlerle piezoelektrik malzeme sayesinde çok küçük sinyaller elde edilmektedir. Sensör aracılığıyla toplanılan veriler yükselteçten geçip NIDAQ kartına gönderilmiştir.



Şekil 4.4. Titreşim sensörü ve yapısı

Tablo 4.1. Titreşim sensörünün özellikleri

Parametreler	Değerler(SI)
Hassasiyet ( $\pm 10\%$ )	10,2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Ölçüm aralığı	$\pm 491$ m/s <sup>2</sup> pk
Resonans frekansı	$\geq 35$ kHz
Doğrusalsızlık	$\leq 1\%$

Tablo 4.1’de ise titreşim verilerini elde etmede kullanılan sensörün özellikleri gösterilmiştir.

#### 4.4. Sinyal Şartlandırıcı

Şekil 4.5’te gösterilen cihaz titreşim sensöründen gelen veriyi elektriksel sinyale çevirerek yükseltme amacı ile kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Sinyal yükseltici

1 Kanal çıkışı olan kondisyoner 200khz’e kadar sinyal yükseltebilmektedir. Ayrıca 2mA den 20 mA e kadar 24volt sensör çıkışı verebilmektedir.

#### 4.5. NI-DAQ Veri Toplama Kartı

DAQ, Data Acquisition kelimelerinin kısaltılmış halidir ve Türkçe’ye veri toplama olarak çevrilebilir. Veri toplama kartları doğada bulunan verileri toplayıp bilgisayarda işlenebilecek hale çevirirler. Bu işlem üç aşamada özetlenebilir. Birinci safhada fiziksel ortamdaki özelliklerin gerilim, akım gibi elektriksel halde ifade

edilebilecek şekle getirmelidirler. Bu işlem sensörler aracılığı ile yapılır. Sensörlere örnek olarak; mikrofon, fotosel, gerilimölçer, termistör gibi yapılar verilebilir. İkinci safhada sensörlerden gelen ve analog olan sinyallerin yükseltip veya alçaltılıp örneklenerek bilgisayara gönderilmesidir. Yükseltme ve alçaltma işlemi sensörden sonra gelen bir elektronik devre ile gerçekleştirilebileceği gibi DAQ kartı yardımı ile de izin verilen ölçüde gerçekleştirilebilir. Örnekleme işlemi ise DAQ kartının içindeki ADC (Analog Digital Converter – Analog Dijital Çevirici) yardımıyla gerçekleştirilir. Üçüncü safhada toplanan dijital verinin içinden istenen özelliklerinin çıkarılmasıdır. Bu işlem dijital veri üstünde çalışan yazılımların yardımı ile olabileceği gibi ikinci safhada olan DAQ kartının programlanarak istenen özellikte (belirli zaman aralıklarıyla, belirli frekans altında/üstünde...gibi) verilerin elde edilmesi ile de gerçekleştirilebilir. DAQ kartı ile ilgili buraya kadar bahsedilenler daha çok analog verinin alımı ile ilgili olan kısımlardır. Bu tür kartlar sadece analog veri alımı ile sınırlı kalmazlar. Dijital veri alımı/gönderimi ve analog veri gönderimi işlemlerini de yapabilirler. Ayrıca barındırdıkları zamanlayıcı (timer), sayıcı (counter) gibi yapıları da veri almada ve vermede kolaylıklar sağlamaktadırlar. Bu tür kartlarda toplanan verinin aktarımı için gerekli süre bekletilmesi ve/veya kartın programlanması için yeterli miktarda bellek bulunur. Bilgisayar işlemcisi ya da veri yolu ile haberleşirken kesme yönetimli (interrupt), programlanmış giriş/çıkış (programmed I/O) veya doğrudan bellek erişimi (DMA) yöntemleri kullanılarak sürekli gelen verinin sürekli (realtime) çalışmayan bilgisayar mimarisi ile en verimli şekilde çalışması sağlanır. Kartlar üzerindeki mikrokontrolörleri programlamada ve/veya bilgisayarda çalışan işletim sistemi ile cihazdan veri alımı esnasında yapılan programlamada, üreticiler programlama arabirimleri (API) sunarlar. Sağlanan bu arabirimler sayesinde programlama işlemi kolaylaştırılır.

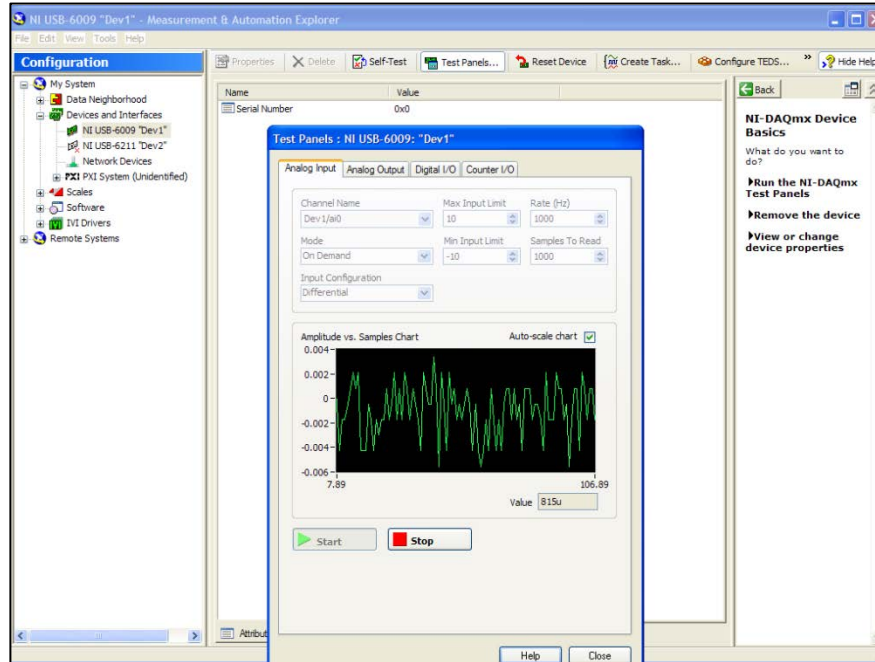
DAQ kartları veri toplama için tek yol değildirler. Daha çok otomasyonda kullanılan PLC (Programmable Logic Controller Programlanabilir Lojik Kontrolcü) ve mikrokontrolörler de (PIC, AVR, vs) veri toplama işlemi için kullanılabilir. Sanayide çokça kullanılan PLC, manyetik alan, büyük sıcaklık farkları ve tozlu ortamlar gibi zor koşullara dayanıklı ürünlerdir. İçerisinde ADC, ağ modülleri barındıran PLC modülleri bilgisayara bağlanarak veri toplama işlemi yapabilmesine rağmen DAQ kartlarından düşük olan örnekleme hızları ve esnek olmayan programlama olanakları



sebebiyle tercih edilmemiştir. Alt düzey programlama ve örnekleme için özel olarak devre tasarımı gerektiren mikrokontrolörlerin programlama ve özel devre gereksinimi sebebiyle tercih edilmemişlerdir. Test ve ölçme işlemlerini kolaylaştıran DAQ kartları veri toplama için en uygun sistemlerdir [54]. Şekil 4.6’da rulman veri toplama sisteminde kullanılan NIDAQ - 6211 kartı gösterilmiştir.



Şekil 4.6. NI-DAQ - 6211 veri toplama kartı

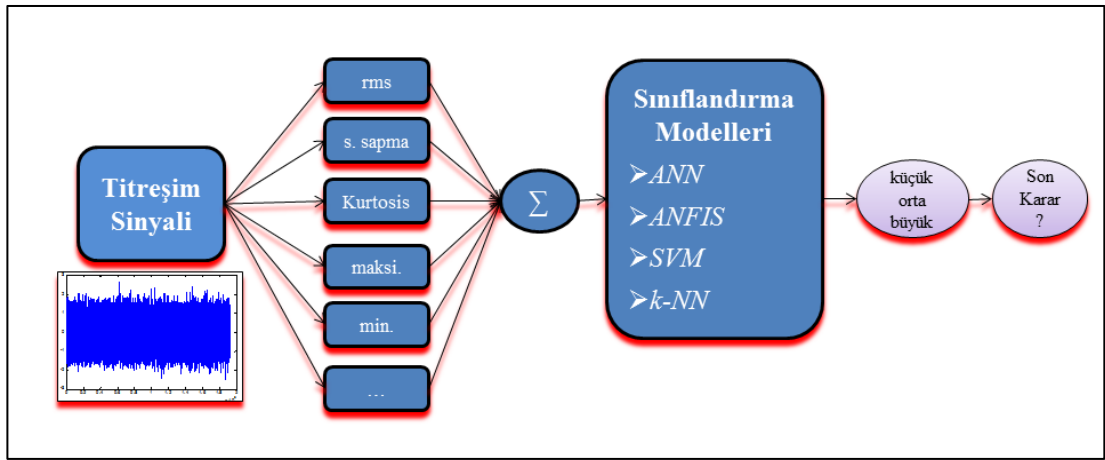


Şekil 4.7. NI-DAQ programı ön görüntüsü

Şekil 4.7’de titreşim verilerinin toplandığını gösteren NI-DAQ programı arayüzü gösterilmiştir.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında rulman deney düzeneğinden elde edilen titreşim verileri özellikleri çıkartılarak sınıflandırma modeline giriş olarak verilmiştir. Tez kapsamında dört farklı sınıflandırma modeli kullanılmıştır. Şekil 5.1’de kısaca tez kapsamında yapılan çalışmalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Rulman sınıflandırma modeli

Elde edilen sonuçlar iki farklı sonuç elde edilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken Denklem (5.1) ve Denklem (5.2) göz önünden bulundurulmuştur.

$$\text{Gerçek Hata (\%)} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \left| 100 \frac{(a_i - p_i)}{a_i} \right| \quad (5.1)$$

$$\text{Hata Bandı Başarısı (\%)} = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^n \left| \left( (a_i - p_i) > 0,1 \right) \right| \right) \times 100 \quad (5.2)$$

$a$  ve  $p$  değerleri, sırasıyla gerçek ve kestirilen değerlerdir.  $n$  değeri ise hata bandı içerisinde yer almayan çıkış değer sayısı,  $N$  ise kullanılan toplam giriş sayısıdır. Gerçek hata denklemi, sınıflandırma modellerinin tahmin sonuçlarının gerçek test verilerinden ne kadar oranda sapma gösterdiğini belirtmektedir. Oluşturulan 0,1 mm hata bandı ile gerçek verilerden sapma gösteren tahminsel verilerin oluşturduğu ufak

hatalar göz ardı edilerek, rulman hata boyutunun daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Titreşim verisi hatalı rulmandan alındıktan sonra, Titreşim verileri 24 KHz örnekleme frekansında toplanmış, 1'er saniyelik kısımlara ayrılarak 20 adet veri paketi şeklinde bilgisayar ortamında saklanmıştır. 20'şer adet üç hata tipinde veri paketleri ve 9 adet zaman uzayında istatistiksel özellikler ile beraber 9×60 boyutunda özellik matrisi oluşturulmuştur. Özellik çıkarımından sonra, sınıflandırma modelinin girişi için ağırlıklar belirlenmiştir. Hatanın değişimine hangi özelliklerin tepkisi daha belirgin ise o girişe ait ağırlık daha büyük belirlenmiştir. Örneğin; hata miktarı arttıkça kurtosis özelliğinin belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle bu özelliğe ait ağırlık büyük seçilmiştir. Ağırlıklar deneme-yanılma yöntemiyle bulunmuştur. Tüm girişlere ait ağırlıklar bu şekilde belirlendikten sonra sınıflandırma modeli oluşturulmuştur.

Girişler belirlendikten sonra, hedef çıkış matrisi belirlenir. 9×60'lık giriş matrisine karşılık, 1×60'lık hedef çıkış vektörü belirlenmiştir. Küçük boyutlu hatalar için 0,15 mm, orta boyuttaki hatalar için 0,5 mm ve büyük boyuttaki hatalar için 0,9 mm değeri verilmiştir. Verilen arızanın büyüklüğünü belirtmek için verilmiştir. Rulmanlar güvenilir bir yöntemle hata frekans genlikleri ölçülmüş ve hata genliklerine göre sınıflandırılmışlardır. Bu büyüklükleri ve hedef çıkış matrisindeki karşılığını belirten değerler Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Hata tipleri ve karşılıkları

Hata Tipi	Hata Boyutu	Hedef Çıkış
Küçük	0-200 db	0,15 mm
Orta	201-349 db	0,5 mm
Büyük	≥350 db	0,9 mm

### 5.1. Laboratuvar Çalışması Sonuçları

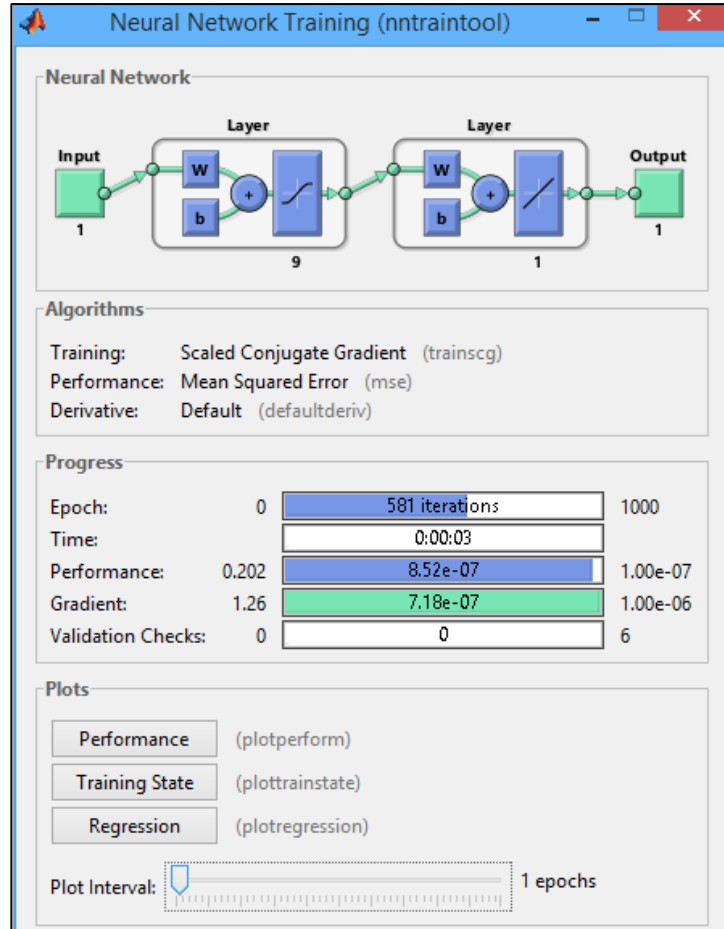
Rulman verisi toplamak için tasarlanan sistemden alınan veriler dört farklı sınıflandırma algoritması kullanılarak rulmanda oluşturulan yapay hata boyutu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Uygulanan sınıflandırma modelleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

İlk uygulama olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli sistemde sınıflandırma modeli olarak kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modeli Matlab üzerinde yazılan kodlarla simülasyon edilmiştir. YSA simülasyon parametreleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

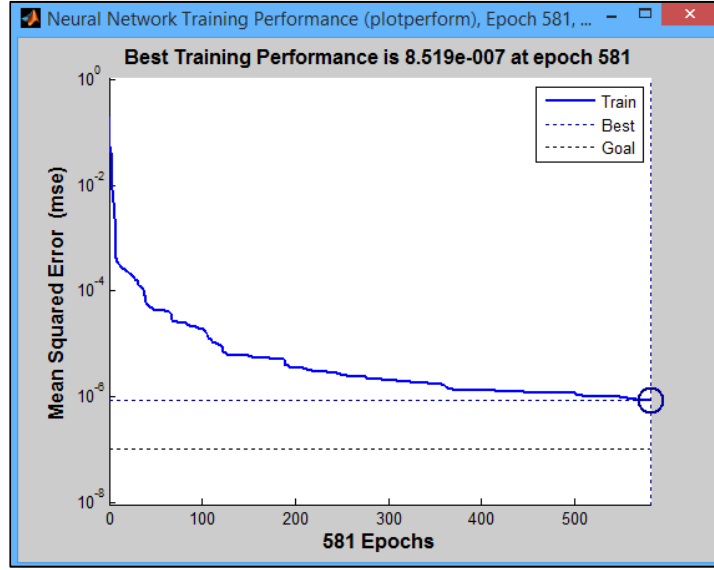
Tablo 5.2. YSA simülasyon parametreleri

YSA Parametreler	Değerler(SI)
Transfer fonksiyonu	Tansig, purelin
Öğrenme oranı	0,55
Max Epochs	600
Hedef hata	1e-7
Eğitim algoritması	scg

Öğrenme oranı, elde edilen en iyi sonuca göre 0,55 olarak belirlenmiştir. Küçük, orta ve büyük hataya sahip rulmanlardan alınan 20'ser adet titreşim verisi olmak üzere 60 adet titreşim verisi kullanılmıştır. Buna göre bu verilerin %50'i yapay sinir ağını eğitmek için, %50'i test için kullanılmıştır. Yüzde oranları deneme-yanılma ile bulunmuş en iyi değerlerdir.

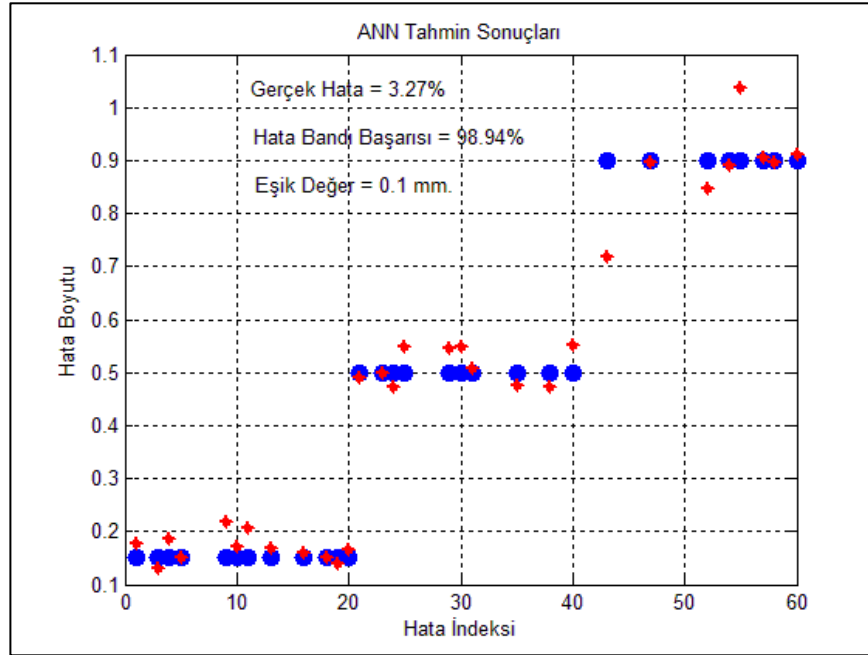


Şekil 5.2. YSA matlab öğrenme aracı



Şekil 5.3. YSA en iyi öğrenme performansı

Şekil 5.2'de görülen matlab eğitim aracı ile YSA öğrenme performansı Şekil 5.3'teki gibi görülebilmektedir.  $10^{-7}$  karesel ortalama hata değerine 3 sn'de ve 581 iterasyon sonucunda ulaşabildiği gözükmektedir.



Şekil 5.4. YSA tahmin sonuçları

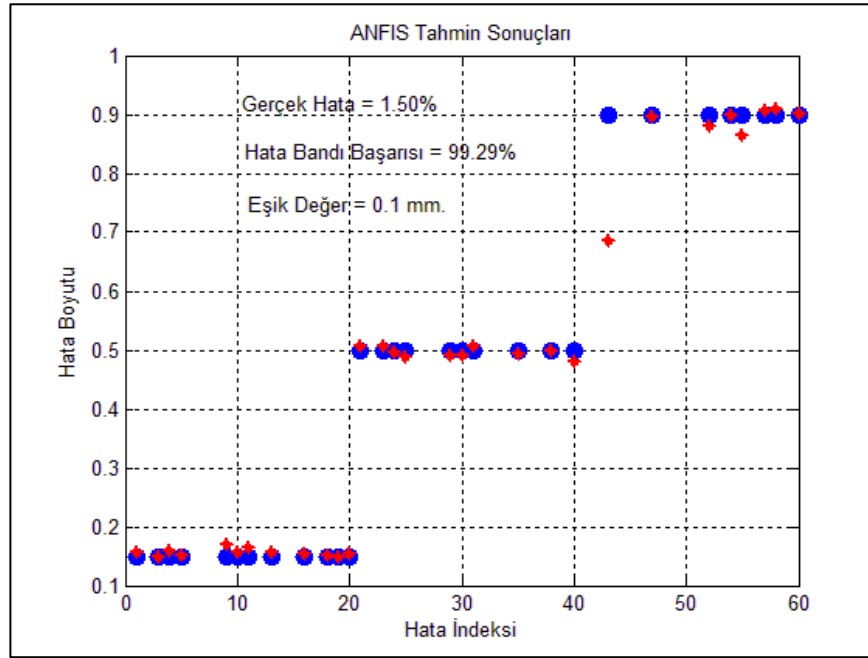
Şekil 5.4'deki mavi yuvarlak değerler hedef çıkışı, kırmızı yıldız biçimindeki değerler ise yapay sinir ağı modeli ile kestirilen sonuçları göstermektedir. Görüldüğü gibi YSA girilen parametreler ile hata boyutlarını %3,27 gerçek ortalama hata ile ve

oluşturulan hata bandı ile bu hata oranı daha aza indirilerek %98.94 başarı oranı elde edilmiştir.

İkinci uygulama olarak YSA modeline katkı sağlayan ANFIS modeli kullanılmıştır. Verilerin %50'i ANFIS ağını eğitmek için, %50'i de test için kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan ANFIS modeli için simülasyon parametreleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. ANFIS simülasyon parametreleri

ANFIS Parametreler	Değerler(SI)
Üyelik Fonksiyonu	Gaussian ÜF
ÜF Derecesi	0,6
Maksi. İterasyon	200
Eğitim algoritması	Geri Yayımlı(BP)

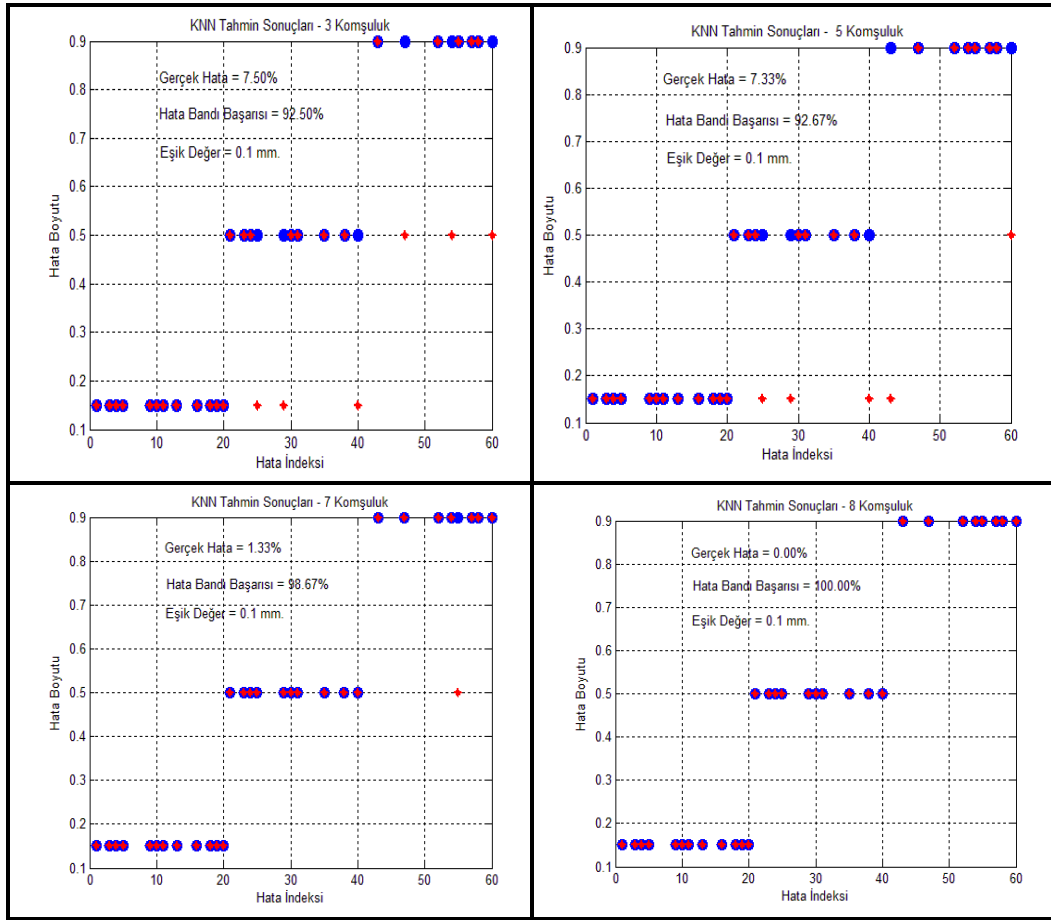


Şekil 5.5. ANFIS tahmin sonuçları

Hedef çıkış ve kestirilen çıkışın beraber çizdirildiğinde Şekil 5.5'teki durum ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.5'teki mavi değerler hedef çıkışı, kırmızı değerler ise ANFIS sınıflandırma modeli ile tahmin edilen sonuçları göstermektedir. Rulmanın iç bileziğinde meydana gelen hatanın boyutu ANFIS sınıflandırmana verilerin öznelikleri giriş olarak verilerek kestirilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere ortalama gerçek hatadan sapma miktarı %1,50 olarak hesaplanmıştır. Grafikten de anlaşılacağı gibi hata boyutunun sınıflandırılması 0,1mm'lik eşik değerli hata

bandı ile %100'lük başarı ile tahmin edilmiştir. Yani bütün hatalar başarılı bir şekilde sınıflandırılmıştır. Grafikte sadece test için rastgele seçilmiş veriler bulunmaktadır. Yani eğitim amaçlı veriler test için kullanılmamıştır.

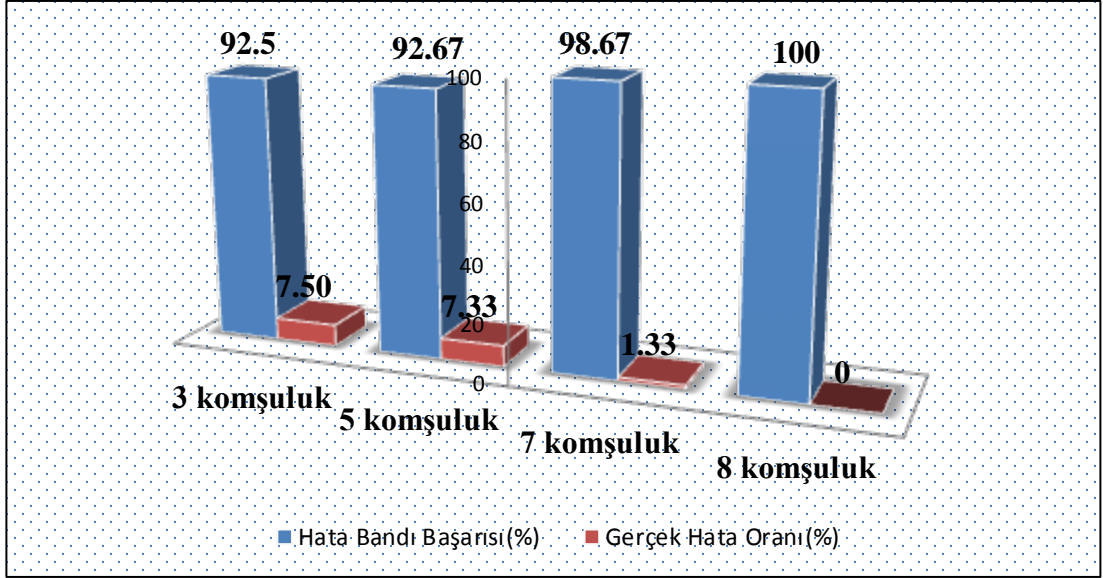
Bir sonraki sınıflandırma modeli olarak kullanımı yaygın ve uygulaması çok basit olan k en yakın komşuluk (k-NN) sınıflandırma modeli seçilmiştir. Verilerin %50'i k-NN algoritmasını eğitmek için, %50'i de test için kullanılmıştır. Modeli performansı komşuluk sayılarına göre değişim göstermiştir.



Şekil 5.6. 3, 5, 7, 8 komşuluk değerleri için k-NN sınıflandırma sonuçları

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi k-NN sınıflandırma modeli komşuluk sayısı artırılarak doğruluk oranı incelenmiştir. k-NN modeli atama tabanlı sınıflandırma yaptığı için sınıflar direk olarak 0,15, 0,5 ve 0,9 mm hatalı rulman sınıflarına atanmıştır. Yapılan analizler sonucunda komşuluk sayısı arttıkça rulman hata boyutunu sınıflandırma doğruluğunun arttığı belirlenmiştir. Komşuluk sayısı arttıkça oy çoğunluğu artmakta ve aynı boyutlu hata sayısı artmaktadır.

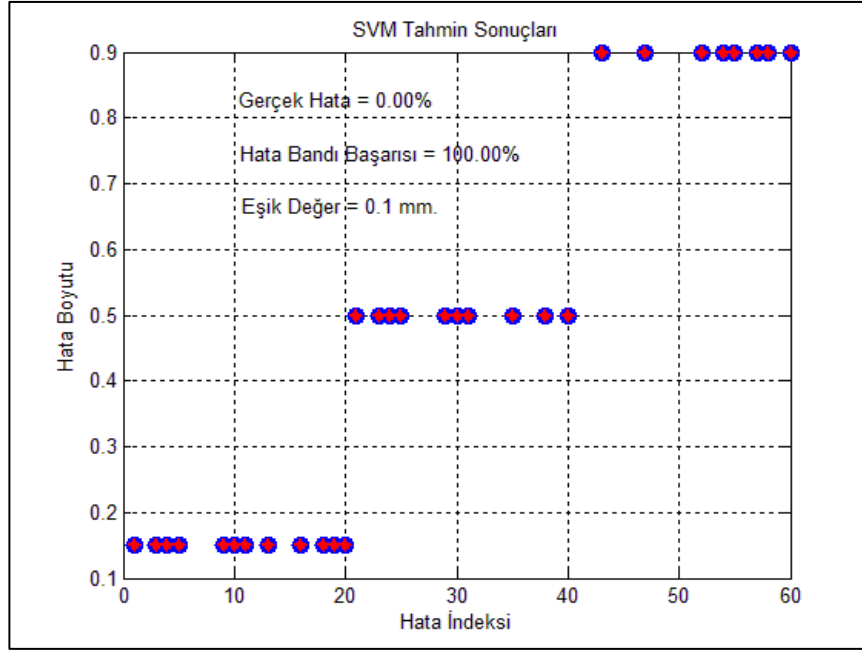




Şekil 5.7. k-NN komşuluk başarı oranları

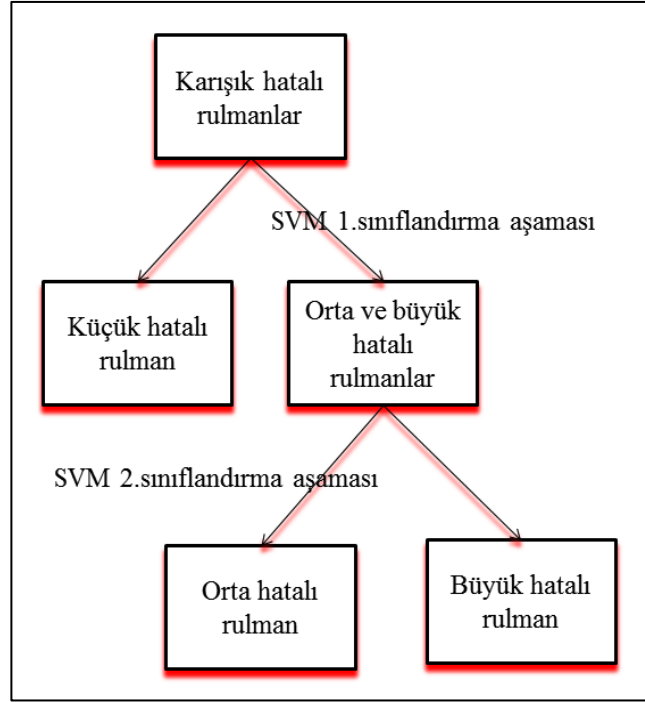
Gerçek hatadan ortalama olarak sapma miktarı sırasıyla %7,50, %7,33, %1,33 ve %0 olarak bulunmuştur. Şekil 5.7’de de görüldüğü gibi 8 komşuluk ile %100 bir başarı elde edilmiştir. Oluşturulan hata bandı eşikleme yaparak komşuluk sayısı az olsa bile başarı oranını artırdığı görülmüştür.

Son sınıflandırma modeli olarak Destek Vektör Makineleri(SVM) kullanılmıştır. Verilerin %50’i SVM ağını eğitmek için, %50’i de test için kullanılmıştır. SVM sınıflandırma sonucunda sınıfları atama işlemi olarak belirlediğinden sınıflandırma işlemi sonucunun tahminleri 0,15, 0,5 ve 0,9mm olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla ortalamadan sapmalar meydana gelmemektedir.

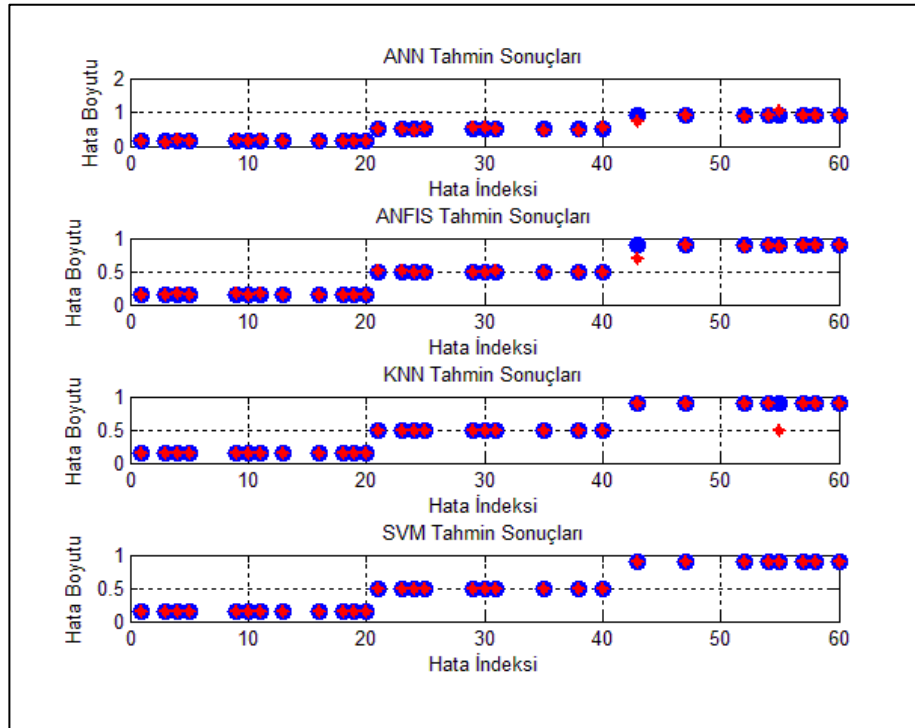


Şekil 5.8. SVM sınıflandırma sonuçları

Şekil 5.8’de sınıflandırma modelleri arasında hiperdüzlem tekniği sayesinde en büyük başarı SVM modelinde elde edilmiştir. Gruplamalar atama işlemi ile yapılarak aralarında oluşturulan kesin hiperdüzlem çizgileri ile oluşturulmuştur. SVM modeli gerçekte sadece nesnelere 2 gruba ayırmaktadır. Bu yüzden sınıflandırma işlemi 2 Şekil 5.9’daki gibi aşama şeklinde yapılmıştır. İlk önce küçük hatalı rulman diğer hatalı rulmanlardan ayırt edilerek alınmıştır. Daha sonra kalan grupta orta ve büyük hatalı rulmanlar 2. aşama sınıflandırma işlemi ile birbirinden ayırt edilmiştir. SVM modeli ile hatasız bir şekilde rulman hata boyutları sınıflandırılmıştır ve eşikleme sonucunda ise de %100 başarı ile rulman hata boyutları belirlenmiştir.



Şekil 5.9. SVM sınıflandırma modeli aşamaları



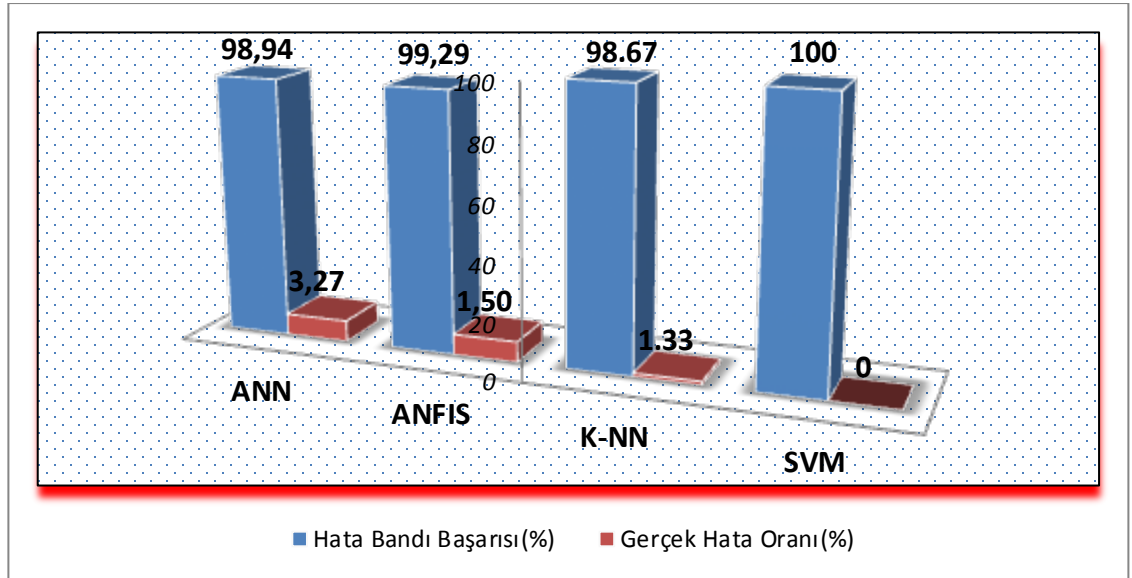
Şekil 5.10. Dört karşılaştırma metodu sınıflandırma sonuçları

Şekil 5.10'da tez kapsamında kullanılan metotlardan elde edilen sonuçlar alt alta çizdirilerek karşılaştırmaları gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği kullanılan

tüm metotlarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. SVM modeli ile rulman hata sınıflandırma da diğer yöntemlerden daha iyi sonuç elde edilmiştir.

## 5.2. Karşılaştırmalı Başarı Oranları

Deney kapsamında yapılan dört farklı yöntem sonucu elde edilen başarı oranları Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, rulman hata boyutu kestirmede SVM metodu en başarılı sınıflandırma metodu olarak tespit edilmiştir. İşlem yükünü artırarak diğer yöntemlerde de başarı elde edilebilmektedir. Fakat hem zaman hem de hesap yükü açısından çok fazla yük getirmektedir. Buna rağmen keskin bir sınır ile hata boyutu tahmin edilememektedir. SVM metodu ile hata boyutu keskin sınırlarla birbirinden ayrt edilebilmekte ve hata boyutları net bir şekilde belirlenmektedir.



Şekil 5.11. Karşılaştırmalı sınıflandırma modelleri başarı oranları

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında bilyalı rulmanlarda, titreşim analizi ile bölgesel hata kaynaklarının yeri ve gelişim durumunun analiz edilmesi için bir deney yapılmıştır. Bu amaçla sağlam rulmanlara yeri ve büyüklüğü önceden belirlenmiş çeşitli yapay hatalar 0,15 mm, 0,5 mm, 0,9 mm boyutlarında lazer ile oluşturulmuştur. Önceden bilinen bu hataların, titreşim işaretlerinin yapay zeka analiz yöntemleri ile analizi sonucunda kestirilen hatalarla örtüşme durumları incelenmiştir ve hata oranları belirlenmiştir.

Yapay zekâ teknikleri tabanlı sınıflandırma modeli tasarlarırken öncelikle giriş parametrelerinin titizlikle seçilmesi gerekmektedir. Gereğinden fazla parametre kullanmak işlem yükünü artırır fakat az parametre ile de sağlıklı ölçümler yapılamaz. Aynı zamanda rulmanların karakteristikleri üzerinde etkili parametreler seçmek rulmanlarda analiz sonucunda elde edilen hata kaynağı doğruluğunu artıracaktır. Kullanılan parametreler arasında en yaygın olanları tepe değeri, standart sapma, etkin değer (rms) ve kurtosis, min., maks., ortalama, medyan değeridir. Kurtosis değeri rulman karakteristiğinde önemli bir yere sahiptir. Titreşim verisinde mevcut olan darbeleri temsil etmektedir. Rulmanda hasarı ile kurtosis değeri doğru orantılıdır. Kurtosis de hasar ile birlikte artma gösterecektir artacaktır. Ancak, hasar büyüdükçe titreşim işaretleri rastgele bir davranış gösterecek ve aradaki orantılı ilişki kaybolacaktır. Bu da zaman uzayı tekniklerinin en önemli eksikliği olarak kendini göstermektedir. Ancak işlem maliyetinin düşüklüğü ve kolay uygulanabilir olması da sık kullanılan yöntemlerden birisi olmasını sağlamaktadır. Deney şartları farklı rulmanlar için aynı koşulda seçilerek farklı nedenlerden dolayı parametrelerin değişmemesinin sağlanması amaçlanmıştır. Deney şartlarını en büyük derecede servo motorun dönme hızı etkilemektedir.

Bu tez kapsamında yapılan analizler sonucunda Yapay Zeka Teknikleri ile geçerli sonuçlar alınmıştır. Yapay zekâ teknikleri parametrelerdeki değişimler ile eğitilerek sonuçta başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. Yapay zekâ teknikleri olarak kullanılan dört farklı yöntemin de birbirlerine olan üstünlükleri rulmanlar üzerinde

görülmüştür. Tez kapsamında yapılan sınıflandırma çalışmasında zaman uzayı parametrelili ile en iyi sonuçlar, ayırt etme ve etiketleme yöntemi kullanan SVM sınıflandırma modelinde elde edilmiştir.

İlerideki çalışmalarda bu tez çalışmasında kullanılan dört yöntem ile bir karar mekanizması kurularak entegre bir çalışma düşünülmektedir. Sonuç olarak elde edilen başarı tek bir yöntem yerine birçok yöntem ile desteklenerek daha üstün bir çalışma olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.teknikport.com/2012/03/rulman-2/> (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2015).
- [2] <http://www.ismakinalari.org.tr/tr/article.asp?id=146> (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2015).
- [3] <http://www.alltestpro.com/documents/RollingElementBearingFailureswithESAandMVA2009.pdf> (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2015).
- [4] <http://www.shunttech.com/endustride-kestirimci-bakim-uygulamasi-ve-onemi/> (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2015).
- [5] [http://www.nskeurope.com.tr/cps/rde/xchg/eu\\_tr/hs.xsl/servisler-sorun-giderme-rulman-tipine-gore-hasarlar.html](http://www.nskeurope.com.tr/cps/rde/xchg/eu_tr/hs.xsl/servisler-sorun-giderme-rulman-tipine-gore-hasarlar.html) (Ziyaret tarihi: 24 Mayıs 2015).
- [6] Kalyoncu M., Titreşim Analizi İle Makina Elemanları Arızalarının Belirlenmesi, *Mühendis ve Makine*, 2006, **47**(552), 28-35.
- [7] Aliustaoğlu C., Ertunç H. M., Ocak H., Arıza Gözlemlemeye Yönelik Rulman Hata Tespit Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi, *Tok'08 Komitesi*, İstanbul, Türkiye, 13-15 Kasım 2008.
- [8] Karahan M. F., Titreşim Analizi ile Makinalarda Arıza Teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2005, 197557.
- [9] Aliustaoğlu C., Ocak H., Ertunç H. M., Rulman Titreşim Analizi ile Bölgesel Hataların İncelenmesi, *Tok'07 Komitesi*, İstanbul, Türkiye, 5-7 Eylül 2007.
- [10] Akıncı T. Ç., Dalgacık (Wavelet) Tabanlı Dağıtım Sistemleri Koruma Algoritması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198297.
- [11] Fidan H., Dalgacık Dönüşümü Tekniği ile Motor Arıza Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2006, 185482.
- [12] Aliustaoğlu C., Rulman Arızalarının Gerçek Zamanda Analizi ve Arıza Kaynaklarının Tespit Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232772.
- [13] Ertunc H. M., Ocak H., Aliustaoğlu C., ANN and ANFIS Based Multi-Staged Decision Algorithm For the Detection and Diagnosis of Bearing Faults, *Neural Computing And Applications*, 2013, **22**(1), 435-446.

- [14] Uygun B., Rulmanlı Yataklarda Hata Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 223338.
- [15] Broch, J. T., *Mechanical Vibrations and Shock Measurements - Brüel & Kjaer Co.*, 2nd ed., Naerum, Denmark, 1984.
- [16] <http://www2.bayar.edu.tr/muhendislik/makine/erdogan.ozkaya/bakim/>, (Ziyaret tarihi: 25 Mayıs 2015).
- [17] Mori K., Kasshima N., Yoshioka T., Ueno Y., Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals, *Wear*, 1996, **195**(1), 162-168.
- [18] Erdil A., Ertunc H. M., Yilmaz T., Decomposition Of Forced Turbulent Jet Flows, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C- Journal of Mechanical Engineering Science, Proc. IMechE*, 2009, **223**(4), 919-933.
- [19] Ocak H, Ertunç H. M., Loparo K. A., Dalgacık Paket Dönüşümü ve Saklı Markov Modelleri Kullanarak Rulman Arızalarının Çevrimiçi İzlenmesi, *IEEE 14. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Antalya, Türkiye, 16-19 Nisan 2006.
- [20] Mori K., Kasashima N., Yoshioka T., Ueno Y., Prediction Of Spalling on a Ball Bearing By Applyingthe Discrete Wavelet Transform To Vibration Signals, *Wear*, 1996, **195**(1), 162-168.
- [21] Li C. J., Ma J., Wavelet Decomposition of Vibrations for Detection of Bearing-Localized Defects, *NDT&E Int.*, 1997, **30**(3), 143-149.
- [22] Rubini R., Meneghetti U., Application of the Envelope and Wavelet Transform Analyses for the Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001, **15**(2), 287-302.
- [23] Sun Q., Tang Y., Singularity Analysis Using Continuous Wavelet Transform for Bearing Fault Diagnosis, *MSSP*, 2002, **16**(6), 1025-1041.
- [24] Nikolaou N. G., Antoniadis A. I., Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Using Wavelet Packets, *NDT & E International*, 2002, **35**(3), 197-205.
- [25] Şeker S., Ayaz E., Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis, *Journal of the Franklin Institute*, 2003, **340**(2), 125-134.
- [26] Sheen Y., Hung C., Construction a Wavelet-Based Envelope Function for Vibration Signal Analysis, *MSSP*, 2004, **18**(1), 119-126.
- [27] Lou X., Loparo K. A., Bearing Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and Fuzzy Inference, *Mechanical Systems And Signal Processing*, 2004, **18**(5), 1077-1095.



- [28] Peng Z. K., Chu F. L., Application of The Wavelet Transform in Machine Condition Monitoring And Fault Diagnostics: A Review With Bibliography, *Mechanical Systems And Signals Processing*, 2003, **18**(2),199–221.
- [29] Li B., Chow M., Tipsuwan Y., Hung J.C., Neural-Network- Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis, *Industrial Electronics*, 2000, **47**(5), 1060-1069.
- [30] Frank P. M., Köppen-Seliger B., Fuzzy Logic and Neural Network Applications to Fault Diagnosis, *International Journal of Approximate Reasoning*, 1997, **16**(67), 67-88.
- [31] Subrahmanyam M., Sujatha C., Using Neural Networks for the Diagnosis of Localized Defects in Ball Bearings, *Tribology Int.*, 1997, **30**(10), 739-752.
- [32] 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*, 2003, **17**(2), 317-328.
- [33] Li C., James J., Ma B., Hwang, Bearing Localized Defect Detection by Bicoherence Analysis of Vibrations, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1995, **117**(4), 625-629.
- [34] Paya B. A., Esat I. I., Badi M. N. M., Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Mahinery Using Wavelet Transforms as a Processor, *MSSP*, 1997, **11**(5), 751-765.
- [35] Abdulshahed A. M., Longstaff A. P., Fletcher S., Myers A., Thermal Error Modelling of Machine Tools Based on ANFIS With Fuzzy C-Means Clustering Using a Thermal İmaging Camera, *Applied Mathematical Modelling*, 2015, **19**(7), 1837-1852.
- [36] Karaçay T., Açısıl Temaslı Rulmanlarla Yataklanmış Şaftların Dinamiği Ve Rulman Hatalarının Deneysel Analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 180425.
- [37] Aktürk N., Üzkurt İ., Yüksel Ş., Titreşim Analiziyle Rulmanların Çalışabilirlik Durumlarının Belirlenmesi, *Mühendis ve Makina*, 1961, **41**(481), 30-33.
- [38] Ypma A., Learning Methods For Machine Vibration Analysis And Health Monitoring, PhD Thesis, Delft University of Technology, Holland, 2001.
- [39] Sönmez D., Asenkron Motor Rulman Arızasının Titreşim İşaretleri Üzerinden Entropi Tabanlı Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 333006.
- [40] [http://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/1382/mod\\_resource/content/2/B9\\_Normal%20Da%C4%9F%C4%B1%C4%B1m.pdf](http://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/1382/mod_resource/content/2/B9_Normal%20Da%C4%9F%C4%B1%C4%B1m.pdf) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).

- [41] [http://iibf.erciyes.edu.tr/dergi/sayi40/ERUJFEAS\\_Jun2012\\_167to187.pdf](http://iibf.erciyes.edu.tr/dergi/sayi40/ERUJFEAS_Jun2012_167to187.pdf) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [42] Haykin S., *Neural networks—A Comprehensive Foundation*, 2nd ed., Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998.
- [43] Ertunc H. M., Ocak H., Aliustaoglu C., ANN-And ANFIS-Based Multi-Staged Decision Algorithm for the Detection and Diagnosis of Bearing Faults, *Neural Computing and Applications*, 2013, **22**(1), 435-446.
- [44] Fausett L., *Fundamentals Of Neural Networks*, 1rd ed., Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1994.
- [45] Rad H. N., Jalali Z., Jalalifar H., Prediction Of Rock Mass Rating System Based On Continuous Functions Using Chaos–ANFIS model, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, **73**, 1-9.
- [46] Barakat S., Eteiba M. B., Wahba W. I., Fault Location In Underground Cables Using ANFIS Nets And Discrete Wavelet Transform, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2014, **1**(3), 198-211.
- [47] Abdulshahed A. M., Longstaff A. P., Fletcher S., The Application Of ANFIS Prediction Models For Thermal Error Compensation On CNC Machine Tools, *Applied Soft Computing*, 2015, **27**, 158-168.
- [48] [www.math.cornell.edu/~numb3rs/kostyuk/num219.htm](http://www.math.cornell.edu/~numb3rs/kostyuk/num219.htm) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [49] [http://www.scholarpedia.org/article/K-nearest\\_neighbor](http://www.scholarpedia.org/article/K-nearest_neighbor) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [50] <http://akademi.itu.edu.tr/kiris/DosyaGetir/92593/09%20Ozkan%202013.pdf> (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [51] [http://bilgisayar.kocaeli.edu.tr/files/49\\_KNN.pptx](http://bilgisayar.kocaeli.edu.tr/files/49_KNN.pptx) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [52] Yılmaz H. F., AC ve DC Servo Sistem Eğitim Setinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008, 178239.
- [53] [http://divapps.parker.com/divapps/eme/EME/Literature\\_List/Dokumentati onen/SBC/Manuals/manLVD\\_GB.pdf](http://divapps.parker.com/divapps/eme/EME/Literature_List/Dokumentati%20onen/SBC/Manuals/manLVD_GB.pdf) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).
- [54] [www.ni.com/dataacquisition/](http://www.ni.com/dataacquisition/) (Ziyaret tarihi: 27 Mayıs 2015).

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Kaplan K.**, Bayram S., Kuncan M., Ertunç H. M., Farklı Rulman Hatalarından Elde Edilen Titreşim Sinyalleri Üzerindeki Radyal Yüklerin Etkisi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2012*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [2] Bayram S., **Kaplan K.**, Kuncan M., Ertunç H. M., Bilyeli Rulmanlarda Zaman Uzayında İstatistiksel Öznitelik Çıkarımı ve Yapay Sinir Ağları Metodu ile Hata Boyutunun Kestirimi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [3] Köse F., **Kaplan K.**, Ertunç H. M., PID ve Bulanık Mantık ile DC Motorun Gerçek Zamanda STM32F407 Tabanlı Hız Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2013*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [4] Bayram S., **Kaplan K.**, Kuncan M., Ertunç H. M., Rulman Hatalarının Dalgacık Dönüşümü Yöntemi Kullanarak Elde Edilen Katsayılara Etkisi, *IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2014*, Trabzon, Türkiye, 23-25 Nisan 2014.
- [5] **Kaplan K.**, Bayram S., Kuncan M., Ertunç H. M., Feature Extraction of Ball Bearings in Time-Space and Estimation of Fault Size with Method of ANN, *Proceedings of the 16th Mechatronika 2014*, Brno, Czech Republic, 3-5 December 2014.
- [6] **Kaplan K.**, Kuncan M., Ertunç H. M., Rulman Hata Boyutunun Uyarlanabilir Sinirsel-Bulanık Çıkarımı, *IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2015*, Malatya, Türkiye, 16-19 Mayıs 2015.
- [7] Çubukçu A., Kuncan M., **Kaplan K.**, Ertunç H. M., Zigbee Modülü Kullanılarak Ses Kontrollü Ev Otomasyonu Geliştirilmesi, *IEEE 23. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı - SIU2015*, Malatya, Türkiye, 16-19 Mayıs 2015.

## ÖZGEÇMİŞ

Ekim 1988'de Yerköy/Yozgat'ta doğmuştur. 2003 yılında ilk ve ortaokulu Ankara - Ahmet Hızal İlköğretim Okulu'nda ve lise öğrenimini ise, Ankara - Öğretmen Necla Kızılbağ Lisesi'nde 2007 yılında tamamlamıştır. 2007 yılında girdiği ÖSS sınavında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünü kazanmıştır ve 2012 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2013 yılı Şubat ayında, Cumhuriyet Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü'nde ÖYP araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır ve halen görevine devam etmektedir. 2013 yılı Şubat ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.