



**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RULMAN ARIZALARININ MAKİNE ÖĞRENMESİ
TEKNİKLERİ KULLANILARAK
SINIFLANDIRILMASI**

Ayhan DÜKKANCI

BURDUR, 2019

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RULMAN ARIZALARININ MAKİNE ÖĞRENMESİ
TEKNİKLERİ KULLANILARAK
SINIFLANDIRILMASI**

Ayhan DÜKKANCI

Danışman: Doç. Dr. İsmail KIRBAŞ

BURDUR, 2019

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Ayhan DÜKKANCI tarafından Doç. Dr. İsmail KIRBAŞ yönetiminde hazırlanan “Rulman Arızalarının Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 28/08/2019

Doç. Dr. İsmail KIRBAŞ

(Başkan)

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi.....(İmza)

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt KARAÇOR

(Jüri Üyesi)

Manisa Celal Bayar Üniversitesi.....(İmza)

Dr. Öğr. Üyesi Gültekin BASMACI

(Jüri Üyesi)

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi(İmza)

ONAY

Bu Tez, Enstitü Yönetim Kurulu'nun _____ Tarih ve _____ Sayılı Kararı ile Kabul Edilmiştir.

(İmza)

Prof. Dr. Ayşe Gül MUTLU GÜLMEMİŞ

Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“Rulman Arızalarının Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması”** başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

28 / 08 / 2019

(İmza)

Ayhan DÜKKANCI

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan ve çalışmalarımın her aşamasında yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. İsmail KIRBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Das Lager Rulman Oto. San. ve Tic. A.Ş. yetkililerine ve özellikle Ar-Ge yetkilisi Yılmaz ALTUN'a, Laboratuvar yetkilisi Rasim UYSAL'a ve İnsan Kaynakları yetkilisi Gamze GÜNER'e teşekkür ederim.

Deney düzeneklerini hazırlamamda bana yardımcı olan meslektaşlarım Erkan BAŞAK ve Bülent Rahmi ÜNAL'a teşekkür ederim.

Araştırmalarım sırasında bana malzeme konusunda yardımcı olan ve sektör ile iletişimimi arttıran Adnan ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

0569-YL-19 No`lu ve 'Rulman Hatalarının Makine Öğrenmesi Teknikleri Kullanılarak Sınıflandırılması' isimli Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında beni her anlamda destekleyen aileme ve eşime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ağustos, 2019

Ayhan DÜKKANCI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGE DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. RULMAN ARIZALARI.....	5
2.1. Rulmanın Yapısı.....	5
2.2. Temel Rulman Tipleri	6
2.2.1. Bilyeli Rulmanlar	6
2.2.2. Makaralı Rulmanlar.....	7
2.3. Rulman Arıza Süreci	8
2.4. Rulman Arıza Modları.....	11
2.4.1. Yuvarlanma Temas Yorgunluğu	11
2.4.2. Aşınma.....	15
2.4.3. Korozyon	19
2.4.4. Elektrik Erozyonu.....	22
2.4.5. Plastik Deformasyon	24
2.4.6. Çatlama ve Kırılma.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Rulman Arızalarının Oluşturulması	31
3.2. Deney Düzeneği ve Akustik Verinin Toplanması.....	33
3.3. Makine Öğrenmesi Teknikleri.....	35
3.3.1. Bayes Ağları (Bayesian Network).....	38
3.3.2. K-En Yakın Komşu Algoritması (K Nearest Neighbor-KNN)	39
3.3.3. Karar Ağacı Algoritmaları (Decision Tree).....	40
3.3.4. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron)	41

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	43
4.1. Akustik Verinin Analizi ve Öznitelik Çıkartımı	44
4.2. Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Arıza Sınıflandırması	49
4.3. Sonuçların Karşılaştırılması	51
5. SONUÇ.....	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	58



ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Asurluların insan başlı bir boğayı yerleştirmek için kütükleri kullandıklarını gösteren kabartma.....	1
Şekil 1.2. Nemi gölünde bulunan ahşap döner tablanın parçası.....	1
Şekil 1.3. Leonardo Da Vinci'nin rulman çizimi	2
Şekil 1.4. Philip Vaughan'ın hafif dingil tekerlekli at arabaları için rulman tasarımı.....	2
Şekil 2.1. Tek sıralı bilyeli rulmanın yapısı	5
Şekil 2.2. Bilyeli rulman tipleri	7
Şekil 2.3. Makaralı rulman tipleri	8
Şekil 2.4. Rulman erken arıza nedenleri.....	9
Şekil 2.5. Rulman arıza oluşum süreci	9
Şekil 2.6. Rulman arıza oluşum sürecinin rulman titreşimine etkisi.....	10
Şekil 2.7. Alt yüzey kaynaklı yorgunluk hasarının oluşum süreci	12
Şekil 2.8. Bilyeli rulman alt yüzey kaynaklı yorgunluk hasarı	12
Şekil 2.9. Alt yüzey kaynaklı çatlağın büyütülmüş hali.....	13
Şekil 2.10. Üst yüzey yorgunluğunun oluşum süreci.....	14
Şekil 2.11. İç bilezikte üst yüzey yorgunluğu	14
Şekil 2.12. Pirinç kafes içinde cepten aşınma	15
Şekil 2.13. Parlatma Mekanizması	16
Şekil 2.14. Parlatma aşınması oluşmuş rulman bilezikleri.....	17
Şekil 2.15. Yük bölgesi ivmelenme mekanizması	18
Şekil 2.16. İki yüzeyin birbirine kaynaması.....	19
Şekil 2.17. Korozyon oluşumu mekanizması.....	19
Şekil 2.18. Rutubete bağlı korozyon oluşmuş oynak makaralı rulman.....	20
Şekil 2.19. Aşınma (titreşim) korozyonu oluşum mekanizması	21
Şekil 2.20. Dış bilezikte korozyonu örnekleri.....	21
Şekil 2.21. Dış bilezikte çukurlanma.....	22
Şekil 2.22. Aşırı akım erozyonu oluşum mekanizması.....	23
Şekil 2.23. Aşırı akım erozyonu sunucu dış bilezik ve bilyede oluşan kraterler	23
Şekil 2.24. İç bilezikte akım sızma erozyonu izleri	24
Şekil 2.25. Yüzey sertlik şekillenmesi	24
Şekil 2.26. Yanlış montajdan kaynaklanan deformasyonların oluşum mekanizması	25

Şekil 2.27. Yanlış taşımadan kaynaklanan kafeste plastik deformasyon	25
Şekil 2.28. Yanlış montajdan kaynaklanan iç bilezikte plastik deformasyon	26
Şekil 2.29. Partikül kaynaklı çentiklenme mekanizması.....	26
Şekil 2.30. Bilezikte partikül kaynaklı çentiklenme.....	27
Şekil 2.31. Darbe kaynaklı yüke bağlı kırılma	28
Şekil 2.32. Akım Sızma Erozyonu	28
Şekil 2.33. Büyük şafta montaj sonucu kırılmış silindirik rulman iç bileziği.....	29
Şekil 2.34. Ardışık yüklemeler sonucu çok yoğun döküntü ve yorgunluk kaynaklı kırılma	29
Şekil 2.35. Oynak makaralı rulmanın dış bileziğinin yorgunluk kaynaklı kırılması	30
Şekil 2.36. Yetersiz Yağmala Sonucu Dış Bilezikte Oluşan Termal Çatlamalar.....	30
Şekil 3.1. 6203 Kodlu rulmanın boyut parametrelerinin gösterimi.....	31
Şekil 3.2. Plastik deformasyon oluşturulma prensibi	32
Şekil 3.3. Yapay korozyon oluşumu	32
Şekil 3.4. Deney düzeneği prensip şeması	33
Şekil 3.5. Deney düzeneği.....	34
Şekil 3.6. Zoom H1 Akustik ses kayıt cihazı	34
Şekil 3.7. Makine öğrenmesi türleri	35
Şekil 3.8. k-En yakın komşu algoritması	40
Şekil 3.9. Basit karar ağacı algoritması.....	41
Şekil 3.10. Çok katmanlı algılayıcı yapısı.....	42
Şekil 4.2. Plastik deformasyon hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali	44
Şekil 4.3. Aşırı akım erozyonu hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali	45
Şekil 4.4. Rutubete bağlı korozyon hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali	45
Şekil 4.5. Sağlam rulman 0,4s akustik sinyali.....	45
Şekil 4.6. Plastik deformasyon hasarlı rulman FFT sinyali	47
Şekil 4.7. Aşırı akım erozyonu hasarlı rulman FFT sinyali	47
Şekil 4.8. Rutubete bağlı korozyon hasarlı rulman FFT sinyali.....	48
Şekil 4.9. Sağlam rulman FFT sinyali	48
Şekil 4.10. Algoritmaların başarımları oranları grafiği	52

ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Kullanılan rulmanın temel ölçüleri.....	31
Tablo 5.1. Bayes ağları algoritması başarımları	49
Tablo 5.2. K-En yakın komşu algoritması başarımları.....	49
Tablo 5.3. Karar ağacı algoritması başarımları	50
Tablo 5.4. Çok katmanlı algılayıcı algoritması başarımları	50
Tablo 5.5. Bayes ağları algoritması karışıklık matrisi	50
Tablo 5.6. K-En yakın komşu algoritması karışıklık matrisi.....	51
Tablo 5.7. Karar ağacı algoritması karışıklık matrisi	51
Tablo 5.8. Çok katmanlı algılayıcı algoritması karışıklık matrisi	51
Tablo 5.9. Kullanılan algoritmaların karşılaştırmalı başarımları	52
Tablo 5.10. Dört algoritmanın kombine karışıklık matrisi	53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AAE	: Aşırı akım erozyonu
AB	: Aşırı basınç
BA	: Bayes ağları
ÇKA	: Çok katmanlı algılayıcı
DA	: Doğru akım
DFT	: Ayrık Fourier dönüşümü
IOT	: Nesnelerin interneti
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü
KA	: Karar ağacı
K-EYK	: K-En yakın komşu
PD	: Plastik deformasyon
RBK	: Rutubete bağlı korozyon
SG	: Sağlam
YSA	: Yapay sinir ağları
XOR	: Özel veya kapısı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Rulman Arızalarının Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Sınıflandırılması

Ayhan DÜKKANCI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail KIRBAŞ

Ağustos, 2019

Makine sağlığı ve performansı makinedeki rulmanlar ile doğrudan ilintilidir. Makinelerin elzem parçaları olan rulmanların performansı makine performansını doğrudan etkilemektedir. Rulman arızası makinenin verimini düşürebilir, istendiği gibi çalışmasını engelleyebilir hatta durmasına sebep olabilmektedir. Bütün bunlar sadece maddi değil zaman, işgücü ve iş sağlığı kayıpları anlamına da gelmektedir. Bu kayıplardan dolayı rulman kondisyonunu izlemek ve rulman arızasını önceden tespit etmek çok önemlidir. Rulman arızasının nedenini bulmak arızanın tekrar etmemesi için alınacak önlemler bakımından büyük önem taşımaktadır. Rulman arıza nedenleri Arıza Modları ile doğrudan ilişkilidir. Rulman Arıza Modunu tespit etmek arıza nedeninin tespiti için çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında, farklı arızalara sahip bilyeli rulmanların akustik sinyalleri analiz edilerek farklı makine öğrenmesi teknikleri sayesinde arıza modları sınıflandırılmıştır. Akustik sinyallerin toplanması için, bir AC motor, yük oluşturucu rotor ve 90 derece faz farkı ile stereo ses kaydı yapabilen, bir kayıt cihazından oluşan bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Aynı tipte bilyeli rulmanlar kullanılarak, bunların üzerinde ISO15243 standardına uygun farklı tipte yapay arızalar meydana getirilmiştir. Deney düzeneği kullanılarak arızalı rulmanların akustik verileri toplanmış ve bir veri seti oluşturulmuştur. Matlab programı kullanılarak Hızlı Fourier Dönüşümü ile akustik verilerin Zaman Domeninden Frekans domenine dönüşümü gerçekleştirilmiş ve Frekans Domenindeki verilerden işlevsel olabilecek öznitelik çıkarımı için bir yazılım geliştirilmiştir. Elde edilen özellikler kullanılarak farklı Makine Öğrenmesi Teknikleri uygulanarak rulman arıza sınıflandırmaları yapılmış ve başarı oranları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: arıza teşhisi, makine öğrenmesi, rulman arızaları, sınıflandırma

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 0569-YL-19 proje numarası ile desteklenmiştir.

SUMMARY

M. Sc. Thesis

Classification of Bearing Faults Using Machine Learning Techniques

Ayhan DÜKKANCI

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Engineering in Material Technologies**

Supervisor: İsmail KIRBAS

August, 2019

Machine health and performance are directly related to the bearings in the machine. The performance of the bearings, which are essential parts of the machines, directly affect the performance of the machine. Failure of the bearing can reduce the efficiency of the machine. All this means not only financial, but also time, labor and occupational health losses. Due to these losses, it is very important to monitor the bearing condition and to determine the bearing failure in advance. Finding the cause of bearing failure is of great importance. The bearing failure is directly related to the Fault Modes. Determining the Bearing Failure Mode is very important for determining the cause of the fault.

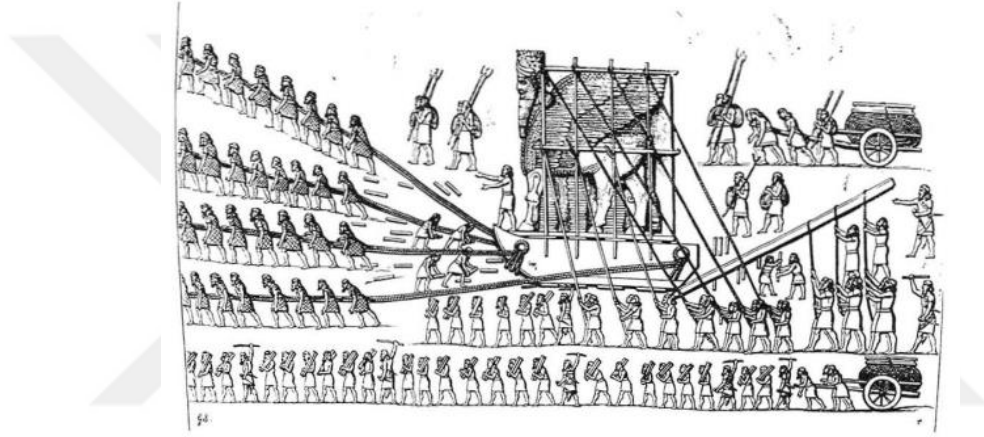
In this thesis, acoustic signals of ball bearings with different faults are analyzed and fault modes are classified with different machine learning techniques. In order to collect the acoustic signals, an experimental test rig was designed consisting of a motor, a load generating rotor and a recording device capable of recording stereo sound with a phase difference of 90 degrees. By using the same type of ball bearings, different types of artificial errors in accordance with the ISO15243 standard have been created on them. Acoustic data of faulty bearings were collected using a test set and a data set was formed. Transformation of acoustic data from Time Domain to Frequency domain was realized by Fast Fourier Transform using Matlab program and a software was developed to extract functional features from data in Frequency Domain. Using the obtained features, bearing failure classifications were made by applying different Machine Learning Techniques and their performance rates were compared.

Keywords: bearing faults, classification, fault diagnosis, machine learning

The present M.Sc. Thesis was supported by Burdur Mehmet Akif Ersoy University Scientific Research Projects Coordination Unit Under the Project number of 0569-YL-19.

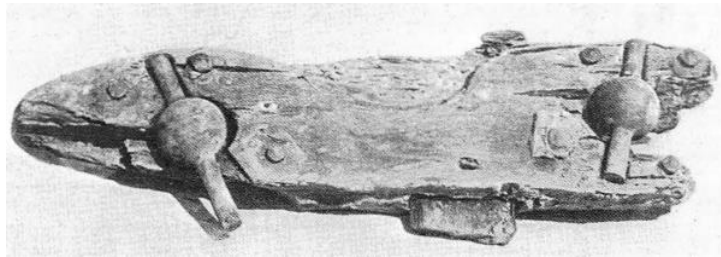
1. GİRİŞ

İnsanlar medeniyetler geliştiremeye başladıkları ilk dönemlerden itibaren sürtünme kuvveti ile yüzleşmek zorunda kalmışlardır. Özellikle büyük ve ağır cisimlerin yer değiştirilmesi gerektiğinde sürtünme kuvveti büyük sorun oluşturmuş ve insanları çözüm aramaya yönlendirmiştir. Bilinen ilk uygulamalar ağır cisimlerin altına kütükler yerleştirerek bunları kütüklerin üzerinde hareket ettirmektir. M.Ö. 700 Yıllarına ait Asur çizimlerinde bu tarz uygulamalar görülmektedir.



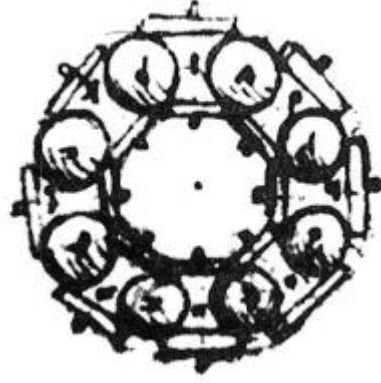
Şekil 1.1. Asurluların insan başlı bir boğayı yerleştirmek için kütükleri kullandıklarını gösteren kabartma

Antik Mısırlıların da yuvarlanan cisimleri ağır yüklerin yer değiştirmesi için kullandıkları bilinmektedir. Günümüz rulmanlarına benzeyen ilk uygulama ise İtalya'da bulunan Nemi gölündeki Roma gemi kalıntılarında bulunmuş olan ve M.S.40'lı yıllara ait bronz bilyeleri olan bir ahşap döner tablanın kalıntılarıdır.



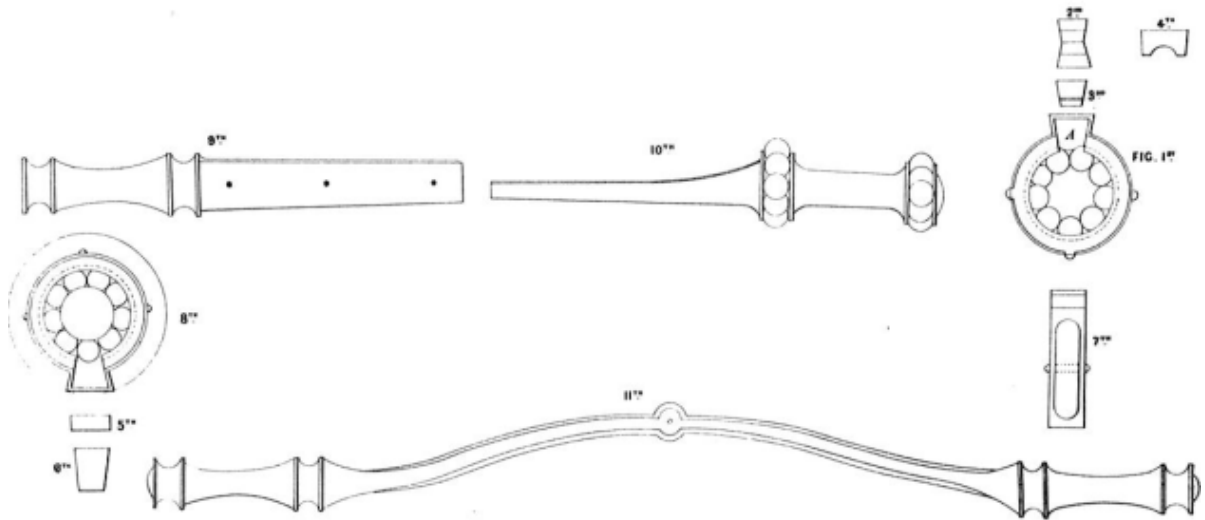
Şekil 1.2. Nemi gölünde bulunan ahşap döner tablanın parçası

Günümüzde Leonardo Da Vinci tarafından 1490'lı yıllarda yazılmış olan Madrid'in Kodları-1 isimli kitapta günümüz aksenal rulmanlarına benzeyen ve bilyeleri arasında dönel ayırıcılar bulunan bir mekanizmaya ait çizimler bulunmaktadır (Dowson ve Hamrock, 1981).



Şekil 1.3. Leonardo Da Vinci'nin rulman çizimi

1794 yılında Philip Vaughan'ın at arabası aksarındaki tekerlek sürtünmesini azaltmak için geliştirdiği rulmanın patentini alması rulman tarihi için dönüm noktası olmuştur. 1869'da Jules Suriray'ın metal bisikletler için geliştirdiği radyal rulman patenti alması ile gelişmeler hızla devam etmiş ve günümüze kadar gelmiştir.



Şekil 1.4. Philip Vaughan'ın hafif dingil tekerlekli at arabaları için rulman tasarımı

Günümüzde birçok tipe rulman üretilmektedir ve dönel mekanizmaları olan makinelerin çoğunda kullanılmaktadır. Malzeme ve yağ teknolojisindeki gelişmeler rulmanların üretim teknolojilerine de yansımaktadır. Fakat istatistiklere göre dünyada üretilen rulmanların %9,5'lük kısmı önlem amaçlı değiştirilerek, %0,5'lik kısmı ise bozularak ömürlerini tamamlayamadan devre dışı kalmaktadır. Bu, senede 50 milyon rulmanın hasara uğrayarak bozulması çalıştıkları makinelerin de bu anda durması ve hatta hasara uğraması anlamına da gelmektedir (SKF, 2014).

Rulman arızaları sadece maddi kayıplar değil, zaman, işgücü ve iş güvenliği kayıpları anlamına da gelmektedir. Bu tür kayıpların yaşanmaması için özellikle kritik görevlerde bulunan rulmanların kondisyonunun izlenmesi çok önemlidir.

Rulmanlar dönel durumdaki makinelerin, döner makine ekipmanının sağlıklı durumu üzerinde önemli bir etkisi olan döner makinelerin temel bileşenidir. Rulmanların durumunu izlemek ve makinelerin ölümcül arızalarından kaçınmak için rulman arızalarını belirlemek üretim ve insan kayıplarını önlemek çok önemlidir (Gupta ve Pradhan 2017), (Randall ve Antoni, 2011).

Arızalı bir rulman değiştirilmediği takdirde üzerinde çalıştığı parçanın veya bulunduğu sistemin üzerinde telafisi zor arızalara neden olabilir. Ömrünü tamamlamadan değiştirilen bir rulman ise maddi ve işçilik kaybı anlamına gelmektedir (Aliustaoğlu vd., 2008). Buna göre, güvenilir bir sağlamlık durumu izleme sistemi, çok çeşitli endüstriler için çok yararlıdır. Bazı durum izleme indekslerinin varyasyonlarını ve trendlerini gözlemleyerek geleneksel bakım işlemleri genellikle zaman alıcıdır ve özellikle arızadan etkilenen veriler olduğu için arıza teşhisi için çoklu özellikler uygulandığında her zaman güvenilir değildir (Liu vd., 2010).

Titreşim ve ses sinyalleri gibi yuvarlanma sinyallerinden çıkarılan önemli sayıda durum parametresinin mevcudiyeti veriye dayalı arıza teşhisinin kullanımını motive etmiştir. Rulmanın dönerken yaydığı titreşim ve ses sinyalleri ile rulmanın sağlamlık veya arıza durumu arasında doğrudan bir bağlantı vardır ve bu sinyaller ayırt edici özellikler taşımaktadır (Gupta ve Pradhan 2017). Bu özelliklerin alt bileşenlerine ayrılması ve analiz edilmesi rulmanların sağlamlık durumları ve meydana gelmiş arızaların tespit edilmesinde birincil rol oynamaktadır.

Klasik veriye dayalı arıza teşhis teknikleri arasında istatistiksel sınıflandırıcılar, geometrik yöntemler ve polinom sınıflandırıcılar yer almaktadır. Bu teknikler zamanla değişen sistemler için kullanılamaz çünkü bu modeller, titreşim verilerinin istatistik ölçümlerine (örneğin, yoğunluk ve olasılık) bağlıdır. Veriye dayalı, sinir ağları (Chen vd. 2017), bulanık mantık (Castellano vd., 2004), sinerjik şemalar, nöron bulanık (NF)

paradigmaları (Wang, 2008) ve Bayes çıkarımı (Wang ve Miao, 2015) gibi çıkarım temelli zeki araçlar altında arıza teşhis için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, endüstriyel uygulamaların geliştirilmesindeki kolaylık nedeniyle, destek vektör makinesi ve ilgili modelleri gibi bazı makine öğrenme yaklaşımları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalgacık ayrışımı ve varyantları gibi sinyal analizine dayalı teknikler de, döner makinelerin sağlam sağlık değerlendirmesi için klasik araçlar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Miao ve Makis, 2007).

Arıza teşhisinin üç temel görevi vardır: (1) ekipmanın normal olup olmadığını belirleme; (2) yeni başlayan arızayı ve nedenini bulmak; (3) arıza geliştirme eğilimini tahmin etmek. Bu nedenle, temel olarak, arıza teşhisi, rulman arıza sınıflandırması ile ilgili bir model tanıma problemi olarak görülebilir.

Güçlü bir model tanıma aracı olarak, makine öğrenmesinin temelini oluşturan yapay zeka birçok araştırmacıdan büyük ilgi görmüştür ve rulman arıza tanıma uygulamalarında umut vaat etmektedir. Yanıt sinyallerinin çeşitliliği ve zenginliği nedeniyle, arıza desenlerini doğrudan tanımak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, ortak bir arıza teşhis sistemi genellikle iki önemli adımdan oluşur: veri işleme (özellik çıkarma), arıza tanıma (Dragomir vd., 2009).

En yaygın akıllı arıza teşhis sistemleri, daha kolay eşleşme ve karşılaştırma için düşük-boyutlu özellik vektörleri tarafından temsil edilebilmeleri için girdi desenlerini dönüştürmek üzere özellik öznitelik algoritmaları ile ön işlemeye dayanarak oluşturulmuştur (Lecun vd., 1998). Ardından, özellik vektörleri arıza tanıma için yapay zeka tekniklerinin girişi olarak kullanılır. Arıza tanıma adımı, özellik alanında elde edilen bilgilerin, arıza alanındaki makine arızalarına eşlenmesi anlamına gelir. Konveks optimizasyon, matematiksel optimizasyon ve sınıflandırma, istatistiksel öğrenme ve olasılık temelli yöntemler gibi çeşitli yapay zeka araçları veya teknikleri kullanılmıştır.

Spesifik olarak, sınıflandırıcılar ve istatistiksel öğrenme yöntemleri, k-en yakın komşu (k-NN) algoritmaları (Wang, 2016), Bayes sınıflandırıcı , destek vektör makinesi (SVM) içeren döner makinelerin arıza teşhisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Vapnik, 2013) ve yapay sinir ağı (YSA) (Chen vd., 2017).

Son zamanlarda, arıza teşhisi alanında derin öğrenme yaklaşımları da uygulamaya başlamıştır. Günümüzde, derin öğrenme teknikleri, arızalı karakteristik madenciliği ve dönen verilerin akıllı tanısı için umut verici bir araç haline gelmektedir (Yan vd., 2014), vites kutusunun arızalarını tanımlamak ve sınıflandırmak için konvolüsyon sinir ağlarını (CNN) tanıttı. (Han vd. 2017) pistonlu kompresör valflerini teşhis etmek için derin bir inanç ağ tabanlı uygulama önerdi. (Khaleghi vd. 2013), vites kutusu arıza teşhisi için multimodal derin destek

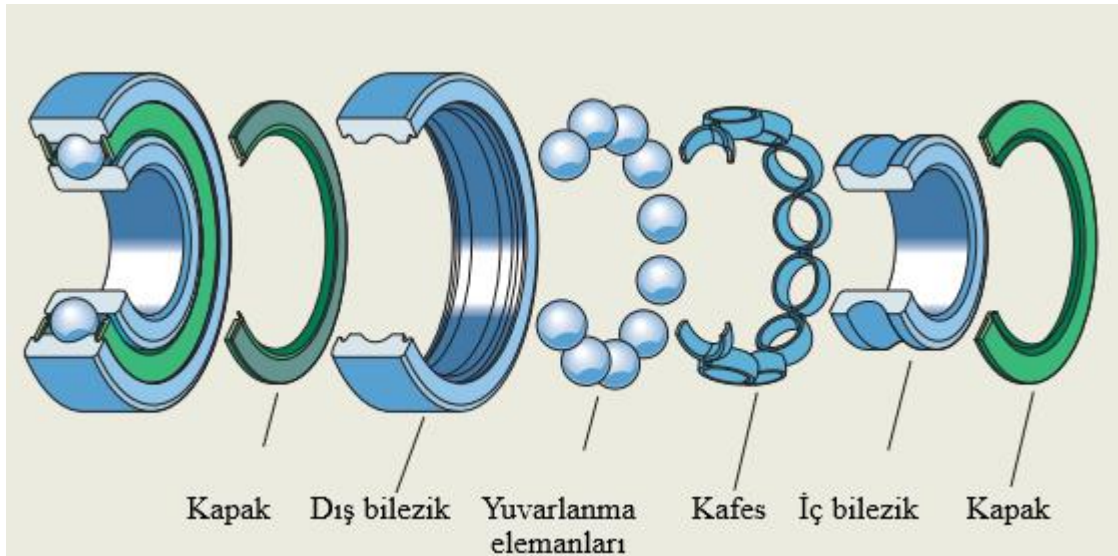
vektör sınıflandırması önermişlerdir; Gaussian-Bernoulli Derin Boltzmann Makineleri (GDBM'ler) sırasıyla titreşim ve akustik sinyalin özelliğini sırasıyla, frekans ve dalgacık modalitelerinde ayıklamak için kullanılmıştır; ve daha sonra ayıklanan özellikler GDBM'leri kullanarak arıza teşhisi için entegre edilmiştir. Li'nin araştırması Gaussian-Bernoulli Derin Boltzmann Makinelerinin vites kutusu arıza teşhisi için etkili olduğunu gösterdi.

Derin öğrenme tekniklerini tanımak ve popülerleştirmek için daha kapsamlı mühendislik doğrulaması gereklidir fakat geliştirilen yeni algoritma ve yöntemlerin başarımlarını bu tekniklerin gelecekte birçok alanda kullanılmasına olanak tanıyacaktır (Dükkancı ve Kırbas, 2018). Artan işlemci gücü sayesinde makineler daha hızlı eğitilebilmekte ve ayrıca verilerdeki arızalar da ayıklanabilmektedir (Zhang vd., 2018). Günümüz teknolojisinin gelişmesi ve bilgisayarların artan işlem gücü sayesinde gerçek zamanlı arıza tespiti yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

2. RULMAN ARIZALARI

2.1. Rulmanın Yapısı

Rulmanlar Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi İç bilezik, Dış bilezik, Yuvarlanma elemanları, Kafes ve rulmanı dış etkenlerden koruyan kapaklardan oluşmuştur.



Şekil 2.1. Tek sıralı bilyeli rulmanın yapısı

İç ve Dış bileziğin iç kısımlarında oyuklar şeklinde yuvarlanma yolları bulunur. Yuvarlanma elemanları bu oyuklarda dönerler. Yuvarlanma sırasında metal metale sürtmesini

engellemek için rulmanların içine yağ doldurulur. Yuvarlanma elemanları oluşan bu yağ tabakası üzerinde sürtünme olmadan dönerler. Yuvarlanma elemanları küresel bilye veya silindirik olabilir. Yuvarlanma elemanları arasındaki mesafeyi korumak için ise kafes denilen ayırıcılar kullanılır. Rulmanların dış bilezikleri genellikle sabitlenir ve dönme işlemi iç bileziğin monte edildiği mil tarafında gerçekleşir. Böylece dönel makinedeki mekanik hareket minimum sürtünme ile gerçekleşir.

2.2. Temel Rulman Tipleri

Uygulama alanlarının artması ve teknolojinin gelişmesi ile farklı üreticiler çok farklı tipte rulmanlar üretmeye başlamışlardır. Özellikle uygulamaya yönelik özel rulmanlar da geliştirilmektedir. Çok farklı tipte rulman olmasına rağmen en çok kullanılan ve Temel Rulman Tipleri diye tanımladığımız rulman tiplerinin terminoloji açısından bilinmesi faydalıdır. Özellikle Rulman Arıza Modları kısmında bu tiplerinden bahsedilmektedir.

2.2.1. Bilyeli Rulmanlar

Bilyeli Rulmanlar bilyeleri döner eleman olarak kullanır. Bilyeler ve kanallar arasında noktasal temas mevcuttur. Kural olarak bilyeli rulmanlar çok hızlı döner ancak ağır yükleri destekleyemez. (NSK, 2019)

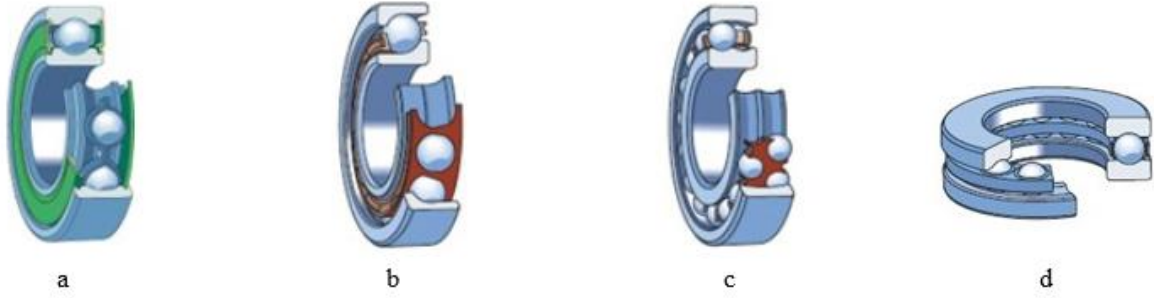
Şekil 2.2.a'da görülen Sabit Bilyeli Rulmanlar en yaygın kullanılan rulman türüdür ve çok farklı uygulamalarda kullanılır. Kompleks olmayan yapıları sayesinde bakımları kolaydır ve çalışma koşullarından hassas şekilde etkilenmezler. Temel olarak radyal kuvvetleri karşılamak için üretilmiş olsalar da ek olarak her iki yönde çok yüksek olmayan aksel kuvvetleri de taşırlar. Yüksek hız ve düşük tork gerektiren yerlerde kullanılabilirler.

Şekil 2.2.b'de görülen Eğik Bilyeli Rulmanların yapıları sabit bilyeli rulmanlara benzese de esas özellikleri bir temas açısına sahip olmalarıdır. Rulmana uygulanan kuvvetler bir yuvarlanma yolundan diğerine belirli bir açıda transfer edilir. Bu nedenle eğik bilyeli rulmanlar radyal kuvvetlere ek olarak yüksek aksel kuvvetlerin aktarılacağı kombine yükler için kullanılabilirler.

Şekil 2.2.c'de görülen Oynak bilyeli rulmanlar, çift sıra bilye içerir. Bu bilyelerin ihtiyacı doğrultusunda bir kafes ve çift sıra kanallı iç bilezik ile yönlendirilen çift sıra bilye yapısına sahiptirler. Dış bilezik ise içe doğru açılı sürekli bir küresel yapıda imal edilmiştir. Bu özellikleri monte edildikleri sistemde eksen kayıklığının belirli bir seviyeye kadar tolere edilmesine olanak tanır. Bu rulman türü şaft ve yatak hizalanmasındaki sorunları gidermek ve

şaft sapmaları oluşabilecek durumlarda önerilmektedir. Oynak bilyeli rulmanlar temel olarak radyal kuvvetleri karşılamak için kullanılabilirler.

Şekil 2.2.d’de görülen Eksenel Bilyeli Rulmanlarda bilezikler birbirine benzeyen iki adet diskten oluşur. Disklerin birer yüzlerinde yuvarlanma yolları oluşturulmuştur. Eksenel bilyeli rulmanlar sadece tek yönde eksenel kuvvetleri sönmölemek için geliştirilmiştir, yani bu tip rulmana monte edilecek şaftta eksenel olarak sadece tek yönde kuvvet uygulanmalıdır.



Şekil 2.2. Bilyeli rulman tipleri

2.2.2. Makaralı Rulmanlar

Makaralı Rulmanlarda çizgisel temas mevcuttur ve kuvvetin dağıtıldığı bölge daha geniştir. Bu temas özelliğinden dolayı makaralı rulmanların aynı ebattaki bilyeli rulmanlardan daha yüksek yük kapasitesine sahiptirler. Temas hattında artan sürtünme nedeniyle hız seviyesi bilyeli rulmandan daha düşüktür.

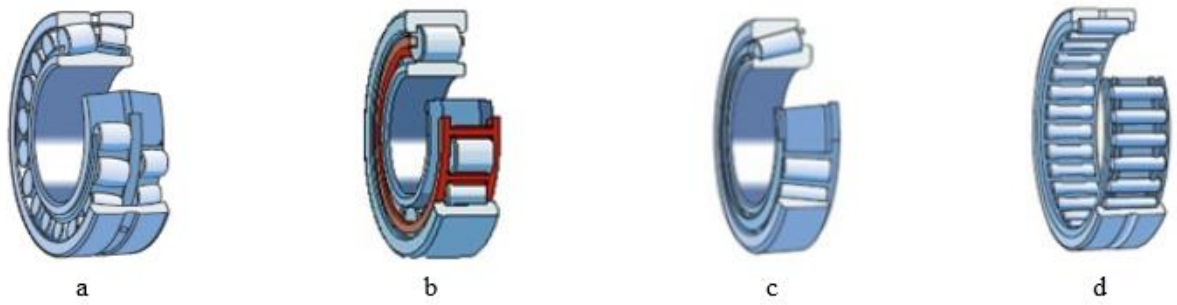
Şekil 2.3.a’da görülen Oynak Makaralı rulmanlar oynak bilyeli rulmanlarla aynı tip yapıda imal edilirler ve çalışma olarak aynı prensibe sahiptirler. Ancak daha yüksek kuvvetlerin karşılanabilmesi için yuvarlanma elemanları bilyeler yerine küresel makaralardan oluşturulmuştur. Sadece küresel makaralar şaft ve yatak arasındaki hataları telafi edebilir. Küresel makaralı rulmanlar yüksek radyal yükleri ve orta seviyeli eksenel yükleri karşılayabilir.

Şekil 2.3.b’de görülen Silindirik makaralı rulmanlar döner elemanlar ve kanallar arasındaki çizgisel teması kullanırlar, bu özellik makara ve kanal arasındaki temas noktasında gerilim faktörlerinin dağılımını optimize etmektedir. Bu yapı, silindirik makaralı rulmanların çok yüksek radyal yük seviyesine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Tasarıma bağlı olarak sınırlı miktarda eksenel yük de aktarabilirler.

Şekil 2.3.c’de görülen Konik Makaralı Rulmanlar konik makaralar kullanılarak imal edilirler. Konik makaraların problemsiz çalışabilmesi için iç ve dış bileziklere konik şekilde

yuvarlanma yolları açılmıştır. Bu konik temas açısı sayesinde konik makaralı rulmanlar tek yönde yüksek radyal ve aksel kuvvetleri karşılayabilirler. Her iki yönde aksel kuvvet karşılanmak istenirse iki adet konik makaralı rulman sırt sırta monte edilerek istenilen kuvvet karşılaması gerçekleştirilebilir.

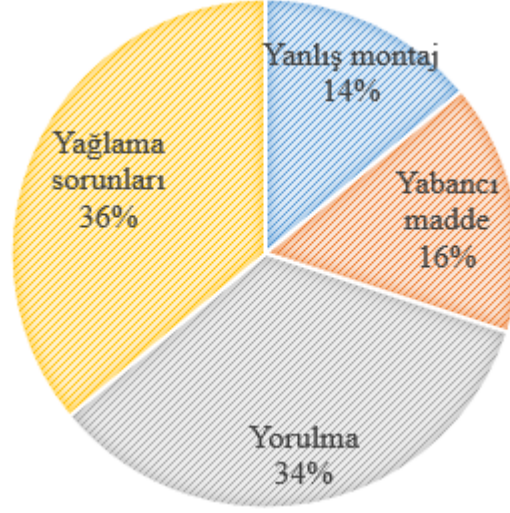
Şekil 2.3.d’de görülen İğneli Rulmanlar yuvarlanma elemanı olarak iğne makara olarak adlandırılan ince silindirik yuvarlanma elemanlarına sahiptirler. İğneli rulmanlar özel bir rulman türüdür. Çapın boya oranı 1:3 ve 1:10 arasındaki değerlerde olabilir. İğneli rulmanlar yüksek yük seviyesine sahiptir ve yalnız radyal kuvvetler için uygundur. Rulman çapının düşük olmasını gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar.



Şekil 2.3. Makaralı rulman tipleri

2.3. Rulman Arıza Süreci

Rulman Arıza dağılımı kullanıldıkları sektöre göre farklılıklar gösterebilmektedir. SKF’nin kaynaklarına dayanan genel istatistiğe göre rulmanlar en çok yağlayıcı sorunlarından dolayı ömürlerini erken tamamlamaktadırlar (Şekil 2.4.). Diğer büyük bir faktör ise erken yorulmadır.



Şekil 2.4. Rulman erken arıza nedenleri

Rulman kapaklarının veya koruyucu keçelerin yanlış kullanımı veya aşınmasından dolayı yabancı madde girişi diğer bir erken ömür tamamlama nedenidir. Yanlış montaj ve yanlış kullanım her altı rulmandan birinin erken ömür tamamlama nedeni olmaktadır.

Şekil 2.5.'te Çift Sıra Oynak Bilyeli bir rulmanın iç bileziğinin hasar durumu altı aşamalı olarak gösterilmiştir. Şekil 2.6.'da bu aşamaların Rulman titreşimine olan etkileri ve Rulman kondisyonunu izleme yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Rulman arıza oluşum süreci

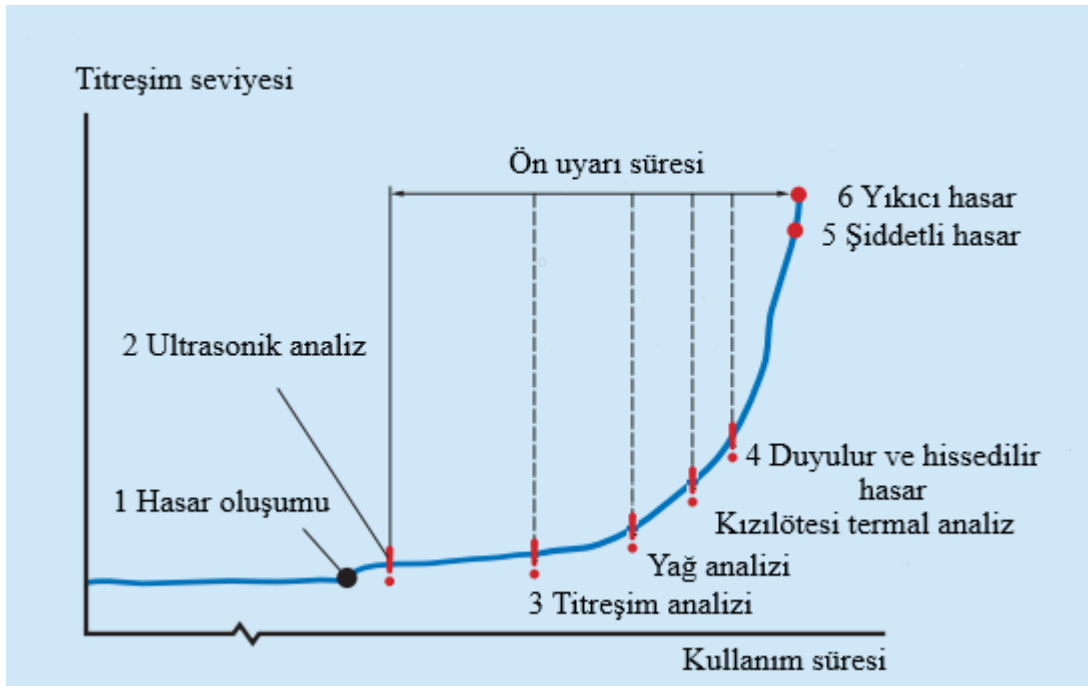
Birinci aşamada Rulman fakir yağlama veya yağdaki yabancı katı madde içeriğinden dolayı Aşındırıcı Aşınmaya maruz kalmış ve hasarlanmıştır.

İkinci aşamada yüzeyde ilk döküntü meydana gelmiş ve Rulman titreşimi çok az da olsa artmıştır. Bu seviyede Rulman kondisyonu Ultrasonik analiz ve İleri Titreşim Analizi gibi yöntemlerle izlenebilmektedir.

Üçüncü aşamada döküntü gelişmiş ve Standart Titreşim Analizi yöntemleri ile izlenebilecek hale gelmiştir. Arıza seviyesi ilerledikçe Rulman titreşimi artar ve hasarlanan bölgeden kopan parçacıklar Yağ Analizi ile tespit edilebilmektedirler. Rulman iç bilezik yüzeyinde meydana gelen pürüzler rulmanın sürtünme direncini de artırır ve ısı oluşumu Kızılötesi Termal Kamera ile gözlenebilecek hale gelir.

Dördüncü aşamada hasar insan kulağının ayırt edebileceği ses basıncına ulaşmıştır. Titreşimin ulaştığı seviye de insanın hissedebileceği düzeydedir.

Beşinci seviyeye iç bilezik yüzeyi tamamen bozulmuş ve yorgunluk kaynaklı çatlaklar meydana gelmiştir. Bu aşamaya gelinmeden rulmanın çalıştığı makine kesinlikle durdurulmalıdır. Çalışan makine durdurulmaz ve zorlanmaya devam edilirse rulman parçalanır ve yıkıcı hasar meydana gelir.



Şekil 2.6. Rulman arıza oluşum sürecinin rulman titreşimine etkisi

2.4. Rulman Arıza Modları

Çok sayıda rulman üreticisi var ve rulman hasarı ve arızası hakkında birçok yayın var. Farklı yayınlar, rulman hasarı ve arızasını farklı şekillerde sınıflandırabilir ve farklı terminoloji kullanabilir. ISO organizasyonu içerisinde, 1995 yılında rulman hasarı tipleri için ortak bir sınıflandırma metodu ve terminoloji tanımlamak üzere bir çalışma grubu oluşturulmuştur.

Çalışma grubu şunları tespit etmiştir:

- Arıza nedeni belirli bir karakteristik gösterir.
- Belirli bir arıza mekanizması, belirli bir arıza modu ile ilişkilendirilebilir.
- Gözlemlenen hasardan, arızanın kök nedenini tanımlamaya çalışmak mümkündür.

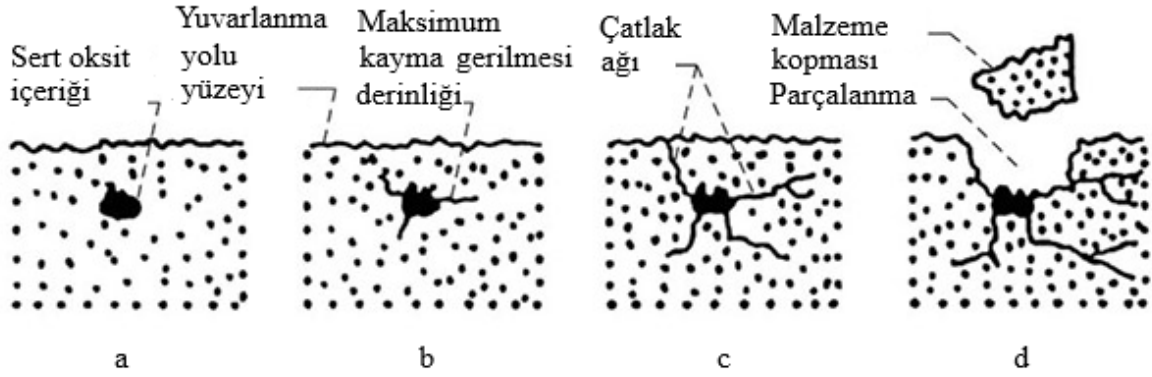
ISO 15243 standardı 2004 yılının başlarında yayınlanmıştır ve o zamandan beri rulman hasarı ile ilgili ek bilgi ve tecrübe edinilerek 2017 yılında yenilenmiştir. ISO 15243 standardına göre arıza modları hizmetteki görünür ayırt edici karakteristik görünümüne bağlı olarak altı ana grupta ve çeşitli alt gruplarda sınıflandırılmıştır (ISO 2017).

2.4.1. Yuvarlanma Temas Yorgunluğu

Eğer sağlam bir rulmanın montaj işlemi doğru yapılmış ve rulmanın çalışma şartları önceden belirlenmiş olan yük, devir ve sıcaklıklara uygunluk gösteriyorsa ve de uygun bir yağlama sistemi mevcutsa; rulmanın, normal olarak, malzeme yorulması (pitting-karınçalanma) nedeniyle hasarlandığı kabul edilir. Bu şekilde hasar alan rulmanın çalışmaya devam ettirilmesi halinde yüzey soyulması hızla artar ve tüm yataklama düzenine zarar verebilecek şekilde tamamen bozulur.

Alt Yüzey Kaynaklı Yorgunluk dönen bir yatakta, yuvarlanma yollarının ve yuvarlanma elemanlarının temas yüzeylerinin altında döngüsel gerilme değişiklikleri meydana gelir. Radyal bir rulmanın dönen iç bileziğini üzerine etki eden radyal bir yük ile düşünün. Bilezik döndükçe, yuvarlanma yolu üzerindeki belirli bir nokta yük bölgesine girer ve yük bölgesinden çıkmadan önce maksimum yüke (gerilime) ulaşmak için bir alan boyunca devam eder. Her devirde, yuvarlanma yolundaki bir nokta yük bölgesine girip çıkarken, sıkıştırma ve kayma gerilmeleri meydana gelir. Yüke, sıcaklığa ve belli bir süre boyunca gerilme döngüsü sayısına bağlı olarak, malzemenin rastgele yönlendirilmiş bir tane yapısından kırılma düzlemlerine değişmesine neden olan artık gerilmelerin birikmesi vardır. Bu düzlemlerde, yüzey altı mikro çatlaklar, en zayıf yerde, maksimum kayma gerilimi bölgesi etrafında, tipik olarak 0,1 ila 0,5 mm derinlikte, yüzey altında gelişir (Şekil 2.7.). Derinlik

yüke, malzemeye, temizliğe, sıcaklığa ve çeliğin mikro yapısına bağlıdır. Çatlak sonunda yüzeye yayılır ve parçalanma meydana gelir (Şekil 2.8.).



Şekil 2.7. Alt yüzey kaynaklı yorgunluk hasarının oluşum süreci

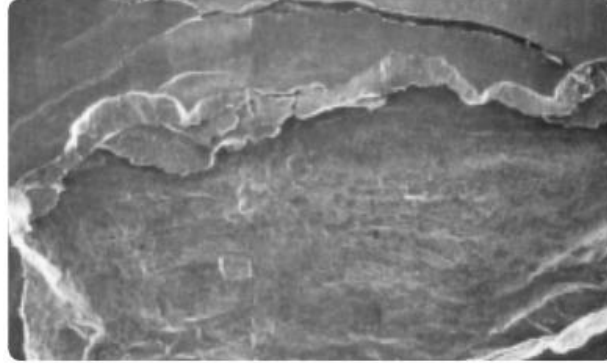
Şekil 2.8.'de görüldüğü gibi parçalanma meydana gelir gelmez rulman hasarlanmış olur.



Şekil 2.8. Bilyeli rulman alt yüzey kaynaklı yorgunluk hasarı

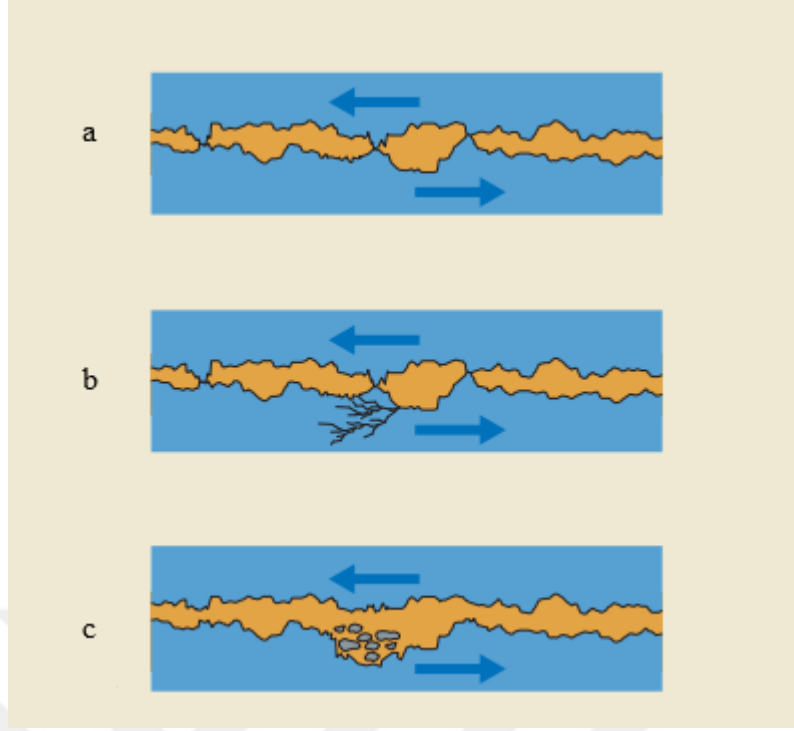
Bu, rulmanın hizmette kalamayacağı anlamına gelmez. Leke kademeli olarak artar ve makinede gürültü ve titreşim seviyelerine yol açar. Rulmanın görev yaptığı makine işlevini yerine getiremeyecek hale gelmeden önce makine durdurulmalı ve rulman onarılmalıdır. İlk parçalanmadan arızaya kadar geçen süre, makinenin tipine ve çalışma şartlarına bağlıdır (Şekil 2.9.). yorgunluğun neden olduğu bir yayılmayı göstermektedir. Rulman, çatlak yüzeye ulaşana kadar çok uzun süre çalışmıştır. Bu genellikle temiz ve iyi yağlanmış çalışma koşulları altında çalışan çok temiz çelikten imal edilmiş rulmanlarda meydana gelir. Yayılan alanın düz

çevresine ve etrafındaki “düzgün” çatlaklara dikkat edilmelidir. Bunlar yüzeye ulaşan çatlaklar ve zamanla daha fazla malzeme kopmasına sebep olacaklardır.

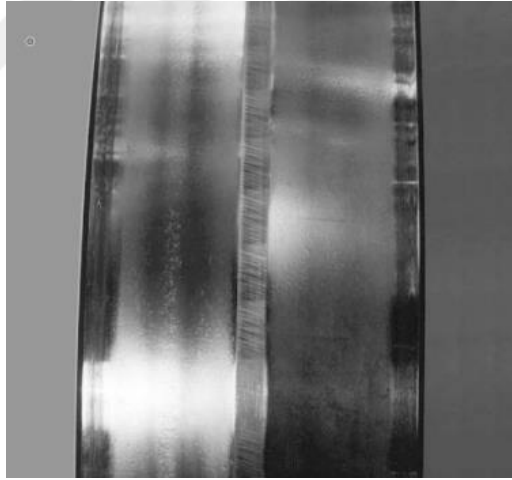


Şekil 2.9. Alt yüzey kaynaklı çatlağının büyütülmüş hali

Üst yüzey kaynaklı yorgunluk yüzeyin başlattığı yorgunluk temel olarak, genellikle yetersiz yağlama nedeniyle ortaya çıkan yuvarlanma temas yüzeyindeki hasarlardan kaynaklanır. Yetersiz yağlama, birkaç farklı faktörden kaynaklanabilir. Yüzeye, örneğin katı kirletici maddelerin yuvarlanmasından dolayı zarar verilirse, yağlama artık çok uygun değildir ve yağlayıcı filmi azalır veya yetersiz kalır. Bu, yağlayıcı miktarı veya tipi uygulama için uygun değilse ve temas yüzeyleri birbirlerinden yeterince ayrılmamışsa da oluşabilir (Şekil 2.10.a). Elde edilen metal-metal teması, yüzey boşluklarının birbirlerinin üzerinde kaymasına neden olur; bu, yuvarlanan temas alanı yüzeyleri arasındaki mikro kayma ile birlikte cilalanmış veya camlı bir yüzey oluşturur (Şekil 2.10.b). Daha sonra pürüzlerde mikro çatlaklar oluşabilir, bunu takiben mikro duvarlar izler, sonuçta yüzeyin başlattığı yorgunluğa neden olur (Şekil 2.10.c).



Şekil 2.10. Üst yüzey yorgunluğunun oluşum süreci



Şekil 2.11. İç bilezikte üst yüzey yorgunluğu

Yağ filminin yuvarlanma temas yüzeylerinin tamamen ayırmadığı tüm rulmanlarda yüzey kaynaklı yorulma riski vardır. Yuvarlanma temas yüzeyinde kayma varsa risk artar. Tüm rulmanlar, özel geometrileri ve yuvarlanma elemanlarının ve yuvarlanma yollarının elastik deformasyonu nedeniyle, yuvarlanma temas alanında bir miktar mikro kayma gösterir. Yüzeyde başlatılan yorgunluğun sıklıkla göz ardı edilen bir başka nedeni de 'Aşırı Basınç' katkı maddelerinin kullanılmasıdır. AB katkı maddeleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda agresif

hale gelebilir ve mikro yayılmayı hızlandırabilir. Genel olarak, yüzeyin başlattığı yorgunluk, karışık veya sınır yağlama koşulları altında doğrudan temasta bulunan yüzey kalitesinin bir sonucudur. Yükleme ve sürtünme kuvvetleri belirli bir büyüklüğe ulaştığında, yüzeyde küçük ve keskin kenarlı çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar daha sonra mikro pullanmalara dönüşebilir. Genel olarak, bu mikro pulların boyutu sadece birkaç mikrondur ve yüzey donuk ve gri renkte görünür (Şekil 2.11.).

2.4.2. Aşınma

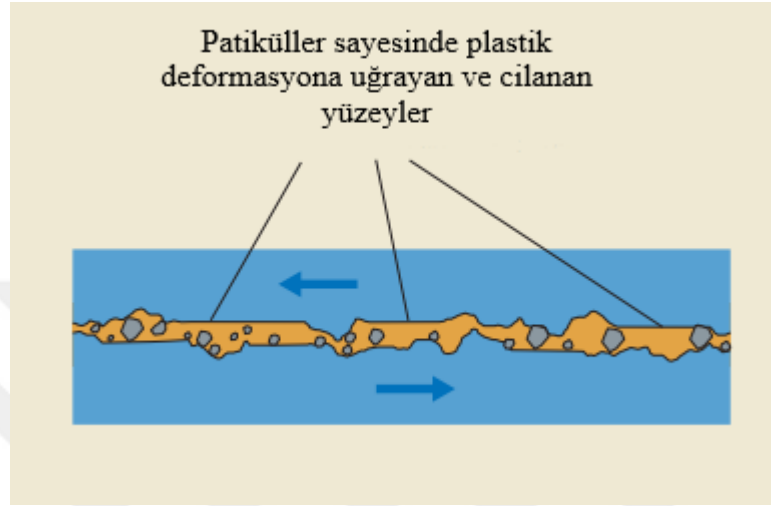
Fakir yağlama şartları kaçınılmaz olarak sürtünmelerin aniden artmasına ve temas yüzeylerinin aşırı ısınmasına sebebiyet verir. Ağır yük ve yüksek devir hızlarına maruz kalan hareketli yüzeyler arasındaki yağ filminin kopması, mikro seviyede kalıcı şekil değiştirmelere (plastik deformasyon) ve malzeme kaynamalarına neden olur. Bu durum, temas yüzeylerinin pürüzsüzlüğünün ve parlaklığının kaybolmasıyla kendini gösterir.

Aşındırıcı aşınma, malzemenin yüzeyden aşamalı olarak çıkarılması anlamına gelir. Başlangıçta rulman çalışma aşamasında çok hafif bir aşınma yaşar ve çoğunlukla sadece bir patern deseni gösterir. Çoğu zaman gerçek aşındırıcı aşınma yetersiz yağlama veya katı kirlenici maddelerin girmesi nedeniyle oluşur. Aşındırıcı aşınma, genellikle donuk yüzeylerle karakterize edilir. Aşındırıcı aşınma, sonunda yatağın mikro geometrisini tahrip eden dejeneratif bir işlemdir, çünkü aşınma partikülleri yağlama maddesinin etkinliğini daha da azaltır. Aşındırıcı parçacıklar, halkaların ve yuvarlanma elemanlarının yanı sıra, kafes ceplerinin yuvarlanma yollarını hızla aşındırabilir. Kafes, rulmanların kritik bir parçasıdır. Bilezikler ve yuvarlanma elemanları yaklaşık 60 HRC'ye sertleştirilmiştir. Çoğu metal kafesler metal saç veya pirinçten imal edilmiştir ve sertleştirilmemiştir. Kötü yağlama koşullarında, kafes ilk aşınan bileşen olabilir. Şekil 2.12. bir katı pirinç kafes içinde cepten aşınma göstermektedir.



Şekil 2.12. Pirinç kafes içinde cepten aşınma

Parlatma aşınması, özel bir aşındırıcı aşınma şeklidir. Yeni yatakların yuvarlanma yüzeyleri parlaktır ancak ayna gibi yansıtıcı değildir. Kullanımda olan bir rulmanda ayna benzeri gerçek yüzeyler, ince bir yağ filmi ve parlatma maddesi olarak görev yapan partiküllerin neden olduğu yetersiz yağlamadan kaynaklanır. Bu metalin metale temasına izin vererek, aşındırıcı aşınmaya ve pürüzlerin plastik deformasyonuna neden olur (Şekil 2.13.).



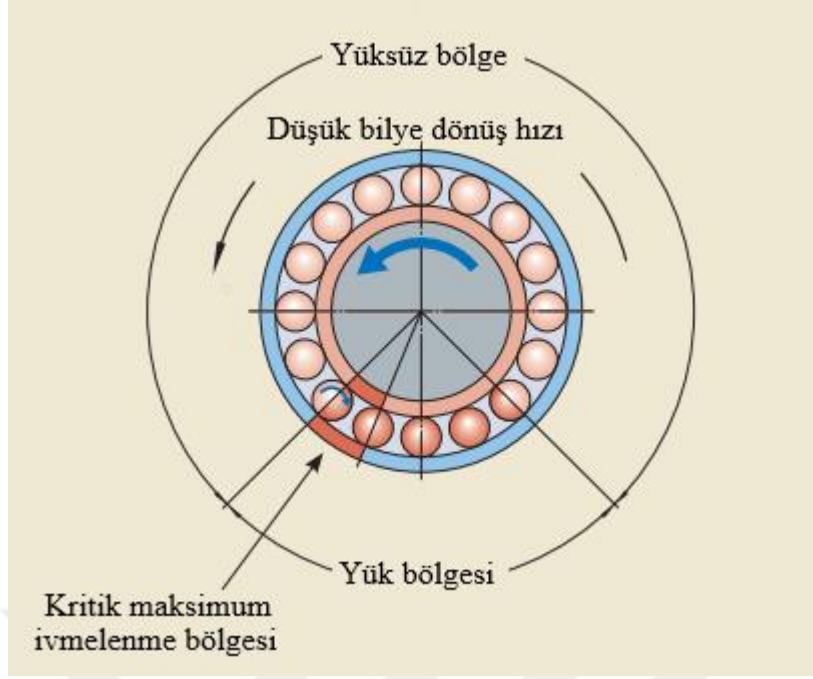
Şekil 2.13. Parlatma Mekanizması

Yüzeyler serbest kalan partiküllerin boyutuna, sertliklerine ve çalışma sürelerine bağlı olarak aşırı derecede parlak olabilir. Ayna benzeri yüzeyler, aşındırıcı aşınma ve plastik deformasyonun sadece pürüzlerin sınırlı tutulması koşuluyla kontrol altında tutulabilir. Bazı durumlarda parlatma aşınması, yuvarlanma yüzeylerinin şeklini ciddi bir şekilde değiştirmek için pürüzlerin ötesine geçebilir. İç ve dış bilezik kanalları ve muhtemelen silindirler aşınmış, ancak yine de ayna benzeridir (Şekil 2.14.). Bu aşındırıcı aşınma seviyesi, bir faktörlerin birleşiminden kaynaklanır: yağın viskozitesi çok düşüktür ve yağda aşırı miktarda çok küçük aşındırıcı parçacık vardır. Diğer faktörler düşük hız, ağır yük ve yetersiz yağ filmi kombinasyonunu içerebilir. Bu tür bir hasarı önlemek için, yağlama maddesinin viskozitesi artırılmalıdır ve yağlama maddesinin temizliğini düzenli olarak kontrol edilmelidir.



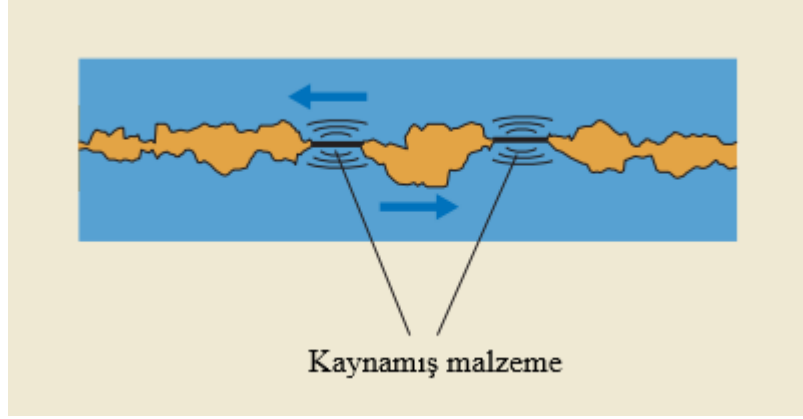
Şekil 2.14. Parlatma aşınması oluşmuş rulman bilezikleri

Yapışkan aşınması, birbirine göre kayan iki birleşme yüzeyi arasında meydana gelen bir tür yağlama maddesi hasarıdır. Malzemenin bir yüzeyden diğerine aktarılmasıyla karakterize edilir. Tipik olarak, bazen eşleşen yüzeyleri temperleyen veya yeniden şarj edebilen sürtünme ısısı eşlik eder. Sürtünme ısısı, temas alanlarında çatlamaya veya dağılmaya neden olabilecek lokal stres konsantrasyonları üretir. Normal çalışma koşullarında lekelenme yaygın değildir. Bağlı kayma hızı, rulman temas geometrisinin neden olduğu mikro kayma ve yuvarlanma temas bölgesindeki elastik deformasyondan daha yüksek olmalıdır. Ciddi ivmelenmelerden kaynaklanan leke yapışkan aşınması ile ifade edilir. Belirli koşullar altında, makaralı elemanların yüzeyinde ve nispeten yüksek hızlarda çalışan makaralı yatakların kanallarında leke meydana gelebilir. Yük bölgesinin dışında, halkaların yuvarlanma elemanlarını sürmemesi nedeniyle yuvarlanma elemanı dönüşü geciktirilir. Bu nedenle yuvarlanma elemanları, yük bölgesine girdiklerinde hızlı ve ani hızlanmaya maruz kalırlar (Şekil 2.15). Bu ani hızlanma, iki yüzey metal-metal temas noktalarında erimekte ve böylece yeterince ısı üretebilen kaymaya neden olabilir (Şekil 2.16.). Bu kaynak işlemi, malzemenin bir yüzeyden diğerine aktarılmasına neden olur ve bu da daha yüksek sürtünmeye yol açar.



Şekil 2.15. Yük bölgesi ivmelenme mekanizması

Bu işlem sırasında, malzemenin temperlenmesi ve yeniden sertleştirilmesi de vardır. Bu, lokal stres konsantrasyonlarına ve çatlakların oluşması riskinin yüksek olmasına ve rulmanın erken bozulmasına neden olabilir. Çatlama yönünde 90°'de çatlaklar oluşabilir. Lekelenme fenomenine ayrıca safra ya da sürtünme denir. Lekelenme tehlikeli bir yüzey hasarıdır, çünkü normal olarak etkilenen yüzeyler aşamalı olarak pürüzlü hale gelir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça metal-metal temasını artıran ve yatak aşınması kısır bir döngüye girer. Yuvarlanma elemanlarının ağırlığı önemli hale gelir ve yük bölgesinin dışında oldukça yavaşlar. Yük bölgesine tekrar girildiğinde, neredeyse anında dönme hızına çıkarlar, ancak yuvarlanma elemanı ağırlığı nedeniyle kısmi kayma ile oluşur. Jiroskopik etkilerden kaynaklanan lekelenmeler, bilyeli yataklarda da ortaya çıkmaktadır. Bu durumlarda bilyalar, yük bölgesinin dışında olduklarında temas açısını değiştirir ancak yük bölgesine girdiklerinde doğru temas açısına kayarak geri itilir. Yük, dönme hızına göre çok hafif olduğunda, yuvarlanma elemanları ve oluklar arasında da bulaşma olabilir.



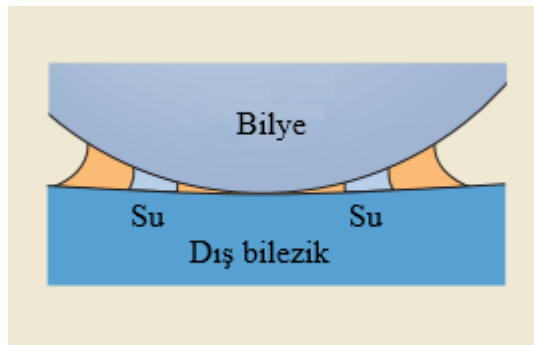
Şekil 2.16. İki yüzeyin birbirine kaynaması

2.4.3. Korozyon

Rulmanın nemli bir ortamda çalışıyor olmasından ya da su, asit veya alkali maddelerle teması sonucu kirlenmesinden dolayı, metal yüzeylerde oluşan kimyasal reaksiyonlar, rulmanın paslanarak aşınmasına yol açar.

Rutubete Bağlı Korozyon etkili olmayan sızdırmazlık düzenlemeleri nem, su ve agresif sıvı kirleticilerin yatağa girmesine izin verebilir. Sıvı kirletici madde miktarı, yağlayıcının çelik yüzeyleri gerekli koruma yeteneğini aştığında, pas oluşacaktır.

Yüzeyleri havaya maruz kalan temiz çelik üzerinde ince bir koruyucu oksit filmi oluşturulur. Bununla birlikte, bu film geçirgen değildir ve su veya aşındırıcı maddeler çelik yüzeylerle temas ederse, oksidasyon meydana gelir.

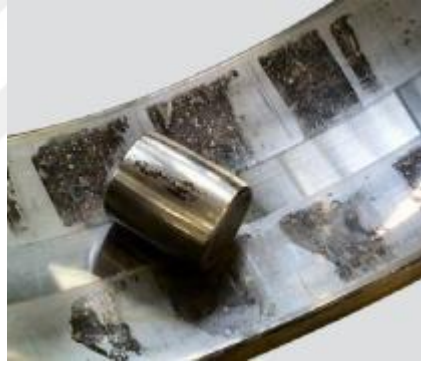


Şekil 2.17. Korozyon oluşumu mekanizması

Korozyon, belki de kağıt makinelerindeki ve gıda ve içecek endüstrisindeki işlem ekipmanlarındaki erken rulman arızasının en yaygın nedenidir. Bu makinelerdeki rulmanlar, operasyonel işlemin bir parçası olarak su ve diğer sıvıların girişine maruz kalmaktadır. Makine

dururken temizlenirken, yıkama sırasında su da verilebilir, bu da yuvarlanma elemanı adımına denk gelen grimsi siyah lekeler neden olur.

Dururken, yağlama maddesinde serbest su, yatağın tabanında birikir. Su konsantrasyonu, yuvarlanma kontağına belirli bir mesafede en yüksek olacaktır. Bunun nedeni, serbest suyun yağdan daha ağır olması ve haddeleme elemanı ile oluk arasında uygun bir boşluğa gelinceye kadar batacağıdır. Bu, aşındırma olarak adlandırılan derin yerleşimli korozyona neden olabilir. Aşındırma kimyasallarının olduğu ve bir kağıt makinesinin kurutucu kısmı gibi yüksek sıcaklıkların olduğu uygulamalarda dağlama olasılığı daha da yüksektir. Aşındırma genellikle erken bozulmaya yol açar, malzeme yapısal bir değişikliğe maruz kaldığından ve yayılma bölgesindeki yüzeyler aşırı yüklenme meydana gelene kadar azaltılır. Korozyonu önlemenin en iyi yolu, uygulamayı yeterince kapatarak yağlayıcıyı su ve agresif sıvılardan uzak tutmaktır. Pas önleyici özelliklere sahip bir kayganlaştırıcı kullanılması da yardımcı olur.

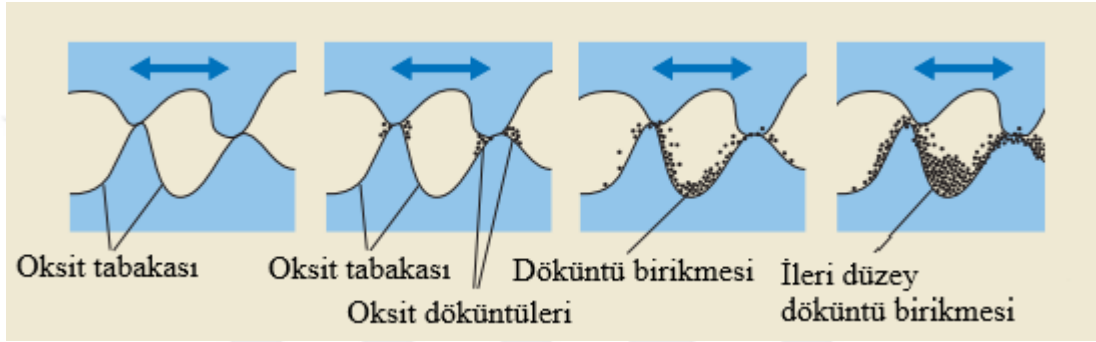


Şekil 2.18. Rutubete bağlı korozyon oluşmuş oynak makaralı rulman

Sürtünmeye bağlı korozyon durgun biçimde titreşen veya yavaşça salınan rulmanların kayma (makara uçları) ve yuvarlanma temasına maruz kalan yüzeylerinde, küçük kıvılcıklar şeklinde gözlenebilen oksitlenmeler oluşur. Rulmanın korozyona uğramasından dolayı ortaya çıkan bu türden bir aşınma; radyal boşluğun, titreşimlerin ve gürültülü seviyesinin artmasına neden olmak suretiyle, rulman ömrünün azalmasında doğrudan etkili olur.

Aşınma (titreşim) korozyonu, bir yatak halkası ile bir mil veya bir yuvadaki yatağı arasında nispi bir hareket olduğunda oluşur. Aşınma, genellikle çok gevşek bir oturuştan veya şekil yanlışlıklarından kaynaklanır. Göreceli hareket, küçük malzeme parçacıklarının yatak yüzeyinden ve yuvasından ayrılmasına neden olabilir. Bu parçacıklar havaya maruz

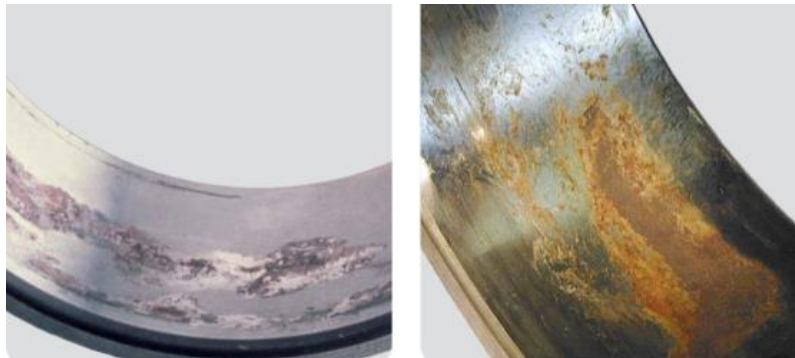
kaldıklarında hızlı bir şekilde okside olurlar ve sonuç demir oksittir. Demir oksit hacminden demirden daha büyüktür. Aşınma korozyonunun bir sonucu olarak, yatak halkaları, yatak içindeki yük dağılımı üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilecek şekilde eşit şekilde desteklenmeyebilir. Aşınmış alanlar ayrıca kırılma çentikleri gibi hareket eder (Şekil 3.10.). Aşınma korozyonu, dış halkanın dış yüzeyinde veya iç halkanın deliğinde paslanma alanı olarak görünür. Yuvarlanma yolu paterni, karşılık gelen pozisyonlarda yoğun bir şekilde işaretlenebilir. Bazı durumlarda, aşınma korozyonu, yuvarlanma yolunun ağır biçimde dağılmasından dolayı ikincil hasardır (Şekil 2.20.).



Şekil 2.19. Aşınma (titreşim) korozyonu oluşum mekanizması

Kimyasal reaksiyona bağlı olarak, korozyon şu şekilde görünebilir:

- kırmızı (hematit, Fe_2O_3)
- siyah (manyetit, Fe_3O_4)



Şekil 2.20. Dış bilezikte korozyonu örnekleri

Temas alanında, mikro titreşimler ve / veya döngüsel titreşimler altında elastik temanın esnekliği nedeniyle çukurlanmalar meydana gelir. Titreşimlerin yoğunluğuna, yağlama koşullarına ve yüke bağlı olarak, kanalda sık çöküntüler meydana getiren bir korozyon ve

aşınma kombinasyonu oluşabilir. Sabit bir rulman olması durumunda, çöküntüler yuvarlanma elemanı adımıda görünür:

- bilyalı rulmanlar için küresel çöküntüler
- makaralı rulmanlar için uzunlamasına baskılar

Gresle yağlanan uygulamalarda çukurlanma tipik olarak kırmızımsı kahverengidir, yağda yağlanan uygulamalarda çok parlak ayna benzeri çöküntüler ortaya çıkar. Pek çok durumda, depresyonların altındaki pası ayırt etmek mümkündür. Bu, havaya maruz kalmalarının bir sonucu olarak hacimleriyle ilgili olarak geniş bir alana sahip olan ayrılmış parçacıkların oksidasyonundan kaynaklanmaktadır. Yuvarlanma elemanlarında genellikle çok daha az hasar vardır

Şekil 2.21. bir oynak bilyalı rulmanın dış halkasında çukurlanma hasarını gösterir.

Kök sebep, durma sırasındaki titreşimdir. Yatak, uzun durma süreleri olan yardımcı ekipmana monte edilmiştir. Her bir duraklama süresinden kaynaklanan dış bilezikte oluşmuş çeşitli olur kümeleri görülebilir. Hasarın büyüklüğü, titreşim seviyesine, titreşim frekansına ve durma süresine bağlıdır.



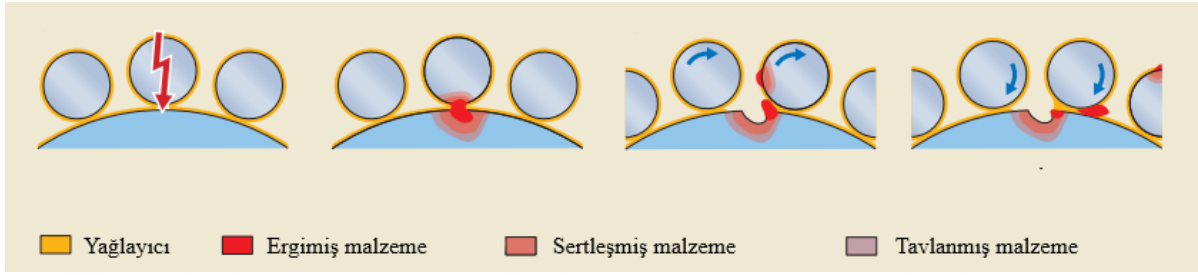
Şekil 2.21. Dış bilezikte çukurlanma

2.4.4. Elektrik Erozyonu

Elektrik erozyonu bir elektrik akımı demetinin rulmanın yuvarlanma temas yüzeyinden parçacık kopartmasıdır.

Aşırı akım erozyonu bir elektrik akımı bir halkadan diğerine yuvarlanma elemanları vasıtasıyla geçtiğinde Şekil 2.22.a'da görüldüğü gibi hasar meydana gelecektir. Temas yüzeylerindeki işlem elektrik ark kaynağına benzer ve Şekil 2.22.b'deki gibi küçük temas yüzeyinde yüksek akım yoğunluğu şeklinde kendini ortaya çıkartır. Malzeme, tavlama erime seviyelerine kadar değişen sıcaklıklara ısıtılır. Bu, malzemenin temperlendiği, yeniden

yüklendiği veya eritildiği boyut olarak değişen renksiz alanların ortaya çıkmasına neden olur. Kraterler ayrıca, malzemenin eridiği ve sonuç olarak yuvarlanma elemanının dönmesi nedeniyle koptuğu yerde oluşur (Şekil 2.22.c). Yuvarlanan elemandaki fazla malzeme aşınır (Şekil 2.22.d). Görünüm genellikle yuvarlanma yüzeylerinde ve yuvarlanma elemanlarında kraterler şeklindedir.



Şekil 2.22. Aşırı akım erozyonu oluşum mekanizması

Bazen bilyeli yatak oluklarında zikzak yanıkları görülebilir. Şekil 2.23.'te yerel kanallarda ve yuvarlanma elemanlarında oluşan yanıklar görülmektedir.



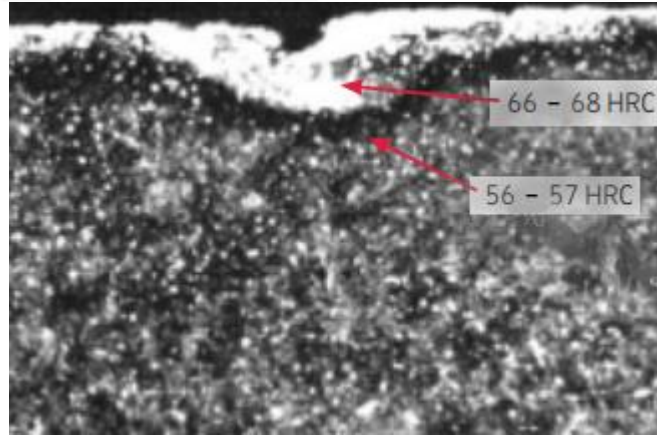
Şekil 2.23. Aşırı akım erozyonu sunucu dış bilezik ve bilyede oluşan kraterler

Akım Sızma erozyon hasarının ilk aşamasında, yüzey tipik olarak birbirine yakın konumlandırılmış ve aşırı akımdan gelen hasara kıyasla çap olarak daha küçük olan sığ kraterler tarafından zarar görür. Bu, akımın yoğunluğu nispeten düşük olsa bile gerçekleşir. Zamanla kraterler tırtıklı ve mat bir desen haline gelebilir. Desen yuvarlanma kanallarında belirir (Şekil 2.24.).



Şekil 2.24. İç bilezikte akım sızma erozyonu izleri

Bilyeli yataklarda, bilyeler tüm yüzeyleri boyunca donuk, açık ila koyu gri olarak renksizleşir. Hasarın kapsamı bir dizi faktöre bağlıdır: akım şiddeti, süre, taşıma yükü, hız ve yağlama maddesi. Bir yatağın bir kesiti, Şekil 2.25.'de gösterilmiştir. 500x büyütmede beyaz alan, metalin yeniden yüklendiğini, tipik olarak 66 ila 68 HRC olduğunu gösterir. Bu malzeme çok sert ve kırılgan. Yeniden sertleştirilen alanın altında, ısı ile tavllanmış siyah bir tabaka bulunur, bu da çevre yatak malzemesinden daha yumuşaktır (56 ila 57 HRC).



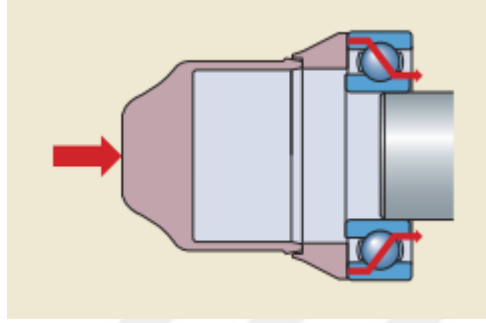
Şekil 2.25. Yüzey sertlik şekillenmesi

2.4.5. Plastik Deformasyon

Rulmanın fiziksel yapısında kalıcı deformasyonlardır. Bunların birçok sebebi olabilir. Depolamada, taşımada, montajda, kullanım sırasında aşırı yüklenmeler ve darbeler plastik deformasyona neden olabilirler. Partikül kaynaklı deformasyonda ise yuvarlanma yoluna giren sert veya yumuşak partiküller neden olabilir.

Aşırı yük deformasyonu statik aşırı yüklenmeden, şok yüklerden veya yanlış kullanımdan kaynaklanabilir. Bu durumlarda, sonuçta ortaya çıkan hasar aynı görünür, bu yüzden bir arıza alt modunda birleştirilirler.

Şekil 2.26. yanlış montajdan kaynaklanan deformasyon mekanizmasının nasıl oluştuğunu göstermektedir.

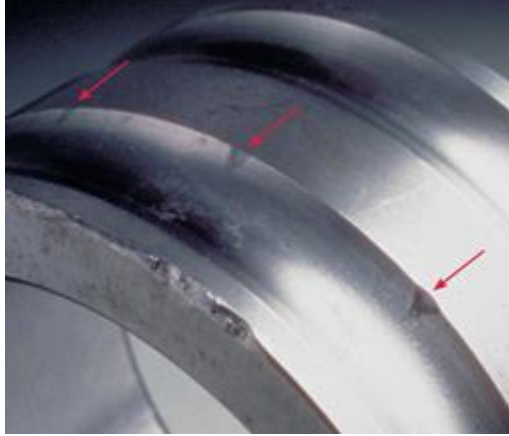


Şekil 2.26. Yanlış montajdan kaynaklanan deformasyonların oluşum mekanizması

Şekil 2.27. bir kafesin doğrudan deforme olmasına neden olacak şekilde çarptığı bir durumu gösterir. Montaj kuvveti haddeleme elemanlarına uygulanırsa veya rulman dururken anormal yüklemeye maruz kalırsa, kanallar ve haddeleme elemanları kirlenebilir (Şekil 2.28.). Girintiler arasındaki mesafe yuvarlanma elemanı hizasındadır.



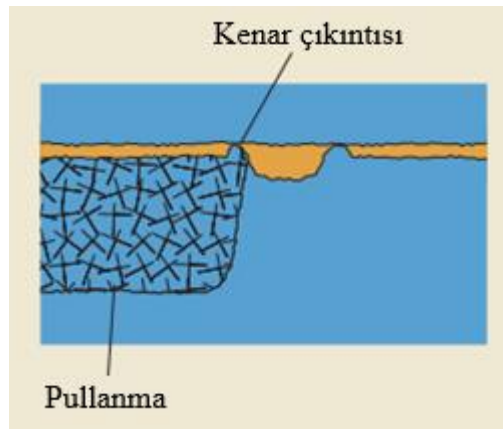
Şekil 2.27. Yanlış taşımadan kaynaklanan kafeste plastik deformasyon



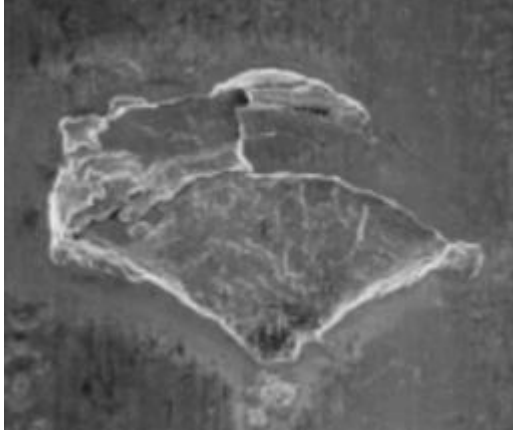
Şekil 2.28. Yanlış montajdan kaynaklanan iç bilezikte plastik deformasyon

Üretim, nakliye, depolama ve montaj sırasında taşıma önemlidir. Kötü kullanım, sert ve / veya keskin nesnelerin neden olduğu yerel aşırı yüklenme ve gözle görülür “çentikler” ile tanımlanır. Silindirler, iç bilezik kanalında silindir perdesinde çentikler yapmışlardır. Hizmete sokulursa yüksek gürültü ve titreşim seviyeleri ortaya çıkar.

Partikül kaynaklı çentiklenme katı kirletici maddeler bir rulmana kapaklarından sızarak veya yağlayıcı aracılığı ile girebilir. Ayrıca, dişli gibi bitişik bir bileşenin yıpranmasından veya hasar görmesinden de kaynaklanabilir. Katı bir kirletici, yuvarlanma elemanları tarafından fazla yuvarlandığında, yuvarlanma yoluna itilir ve bir girinti oluşturur (Şekil 2.29.). Girintiyi oluşturan parçacığın zor olması gerekmez. Yeterince büyük olduğunda yumuşak parçacıklar bile zararlı olabilir. Bir girintinin kenarları etrafındaki yükseltilmiş malzeme yorgunluğu başlatır. Yorgunluk seviyesi belli bir noktaya ulaştığında, girintinin arkasından kaynaklanan erken dökülmeye neden olur.



Şekil 2.29. Partikül kaynaklı çentiklenme mekanizması



Şekil 2.30. Bilezikte partikül kaynaklı çentiklenme

Yağ temizliği ve montaj sırasındaki dikkatli taşıma, girintilerin önlenmesinde önemli faktörlerdir.

Şekil 2.30. bir girinti sonucu ortaya çıkan bir oluklu bilyeli rulman içinde sıçramayı göstermektedir. Yuvarlanma yönü aşağıdan yukarıya doğrudur. V şekli, ilk ayrılmanın girintinin arka ucundan açıldığı bir yataktaki tipik bir girinti hasarı işaretidir.

2.4.6. Çatlama ve Kırılma

Rulman malzemesinin dayanımının üzerinde bir yük ile yüklenmesinin veya başka bir cisim ile darbe sonucu kırılmalar oluşmaktadır. Kırılmaların diğer nedeni de malzeme yorulması devamında çatlaklardan oluşan kırılmalardır. Çatlamlar ise genellikle termal düzensizlik kaynaklı olabilir.

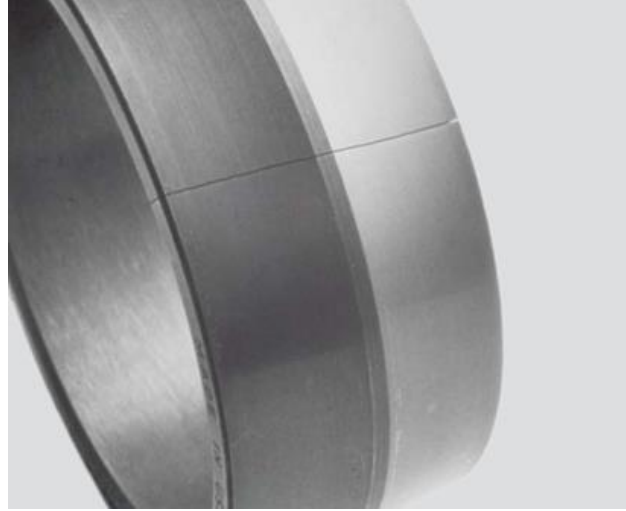
Yüke bağlı kırılma, stres konsantrasyonları malzemenin gerilme mukavemetini geçtiğinde ortaya çıkar. Yerel aşırı yüklenme ve aşırı baskı, zorla kırılmanın iki yaygın nedenidir.

Şekil 2.31 kaba muameleyi kırılma için ortak bir neden göstermektedir. Rulmanlar bir çekiç ve keski ile soğuk olarak monte edildiğinde meydana gelir.



Şekil 2.31. Darbe kaynaklı yüke bağlı kırılma

Doğrudan bileziğe vurmak, rulman devreye girdiğinde hızla çatlaklara dönüşecek ince çatlakların gelişmesine neden olabilir. Konik bir yataklamada aşırı yüklenme iç bileziğin kırılmasına neden olabilir. Aşırı sürtünme sonucu halkada meydana gelen bilezik gerilmeleri, bileziğin kullanımda çatlamasına neden olur (Şekil 2.32). Martensit sertleştirilmiş halkalar, bainit sertleştirilmiş halkalardan daha hassastır.



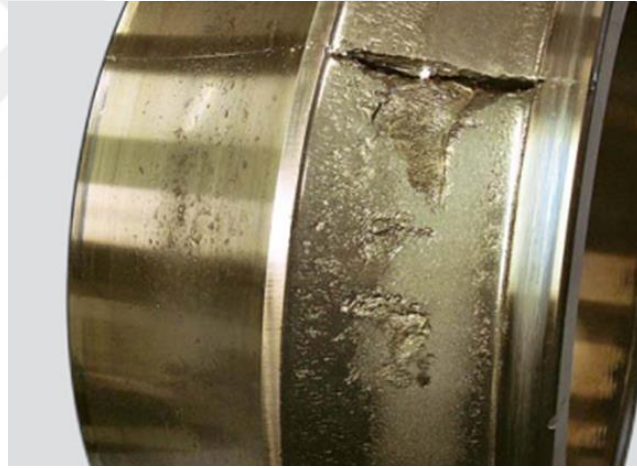
Şekil 2.32. Akım Sızma Erozyonu

Şekil 2.33'de görüldüğü gibi aynı sonuç, rulmanlar ısıtıldığında ve çok büyük shaftlara monte edildiğinde ortaya çıkabilir.



Şekil 2.33. Büyük şaftta montaj sonucu kırılmış silindirik rulman iç bileziği

Yorgunluk kaynaklı kırılma bir malzemenin yorulma dayanımı döngüsel bükülme altında aşıldığında, yorulma kırılması başlar. Tekrarlanan bükülmeler bilezik veya kafeste tam bir çatlak geliştirene kadar yayılan bir ince çizginin çatlamasına neden olur.

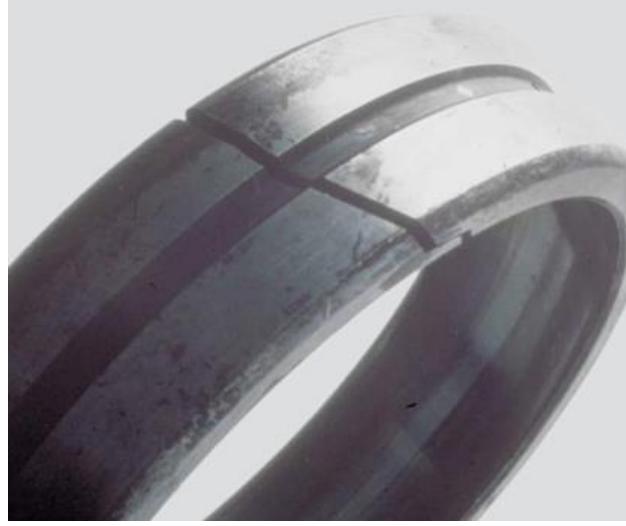


Şekil 2.34. Ardışık yüklemeler sonucu çok yoğun döküntü ve yorgunluk kaynaklı kırılma

Şekil 2.34'de büyük şaftta montaj sonucu kırılmış silindirik rulman iç bileziği

Şekil 2.35 küresel bir rulmanın kırık dış bileziğinin bir örneğini göstermektedir.

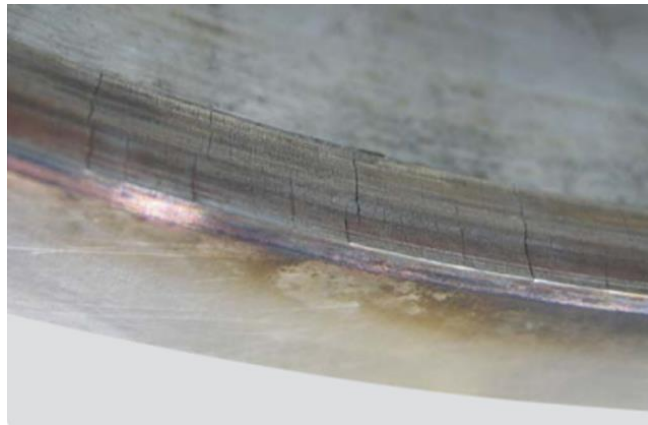
Rulman yük bölgesinde yetersiz desteği olan bir yuvaya monte edilmiş. Sonuç olarak, rulman dış bileziği bir çatlak geliştirene kadar döngüsel bükülme stresine maruz bırakılmış.



Şekil 2.35. Oynak makaralı rulmanın dış bileziğinin yorgunluk kaynaklı kırılması

Termal çatlama birbirine kayan iki yüzey sürtünme ısısı oluşturur. Kayma büyük ölçüde ise ısı genellikle kayma yönüne dik açıda olan çatlaklara neden olabilir. Termal çatlamları ayırt etmek malzeme yüzeyindeki renk değişmelerinden dolayı çok zor değildir.

Tipik bir örnek, Şekil 2.36'da görülmektedir. Dönen bir iç bilezik gevşek bir şekilde oturtulmuş ve aksel bir yüke maruz bırakılmıştır. Sürtünme nedeniyle, yatak tarafındaki yüz ile shaft omzu veya ara parçası arasında kayan bir hareket sonucu lekelenmeye neden olmuştur. Sürtünme ısısı, enine çatlaklara neden olur ve sonunda halka çatlar. Renk değişimi termal çatlamanın ön göstergesi olabilir.

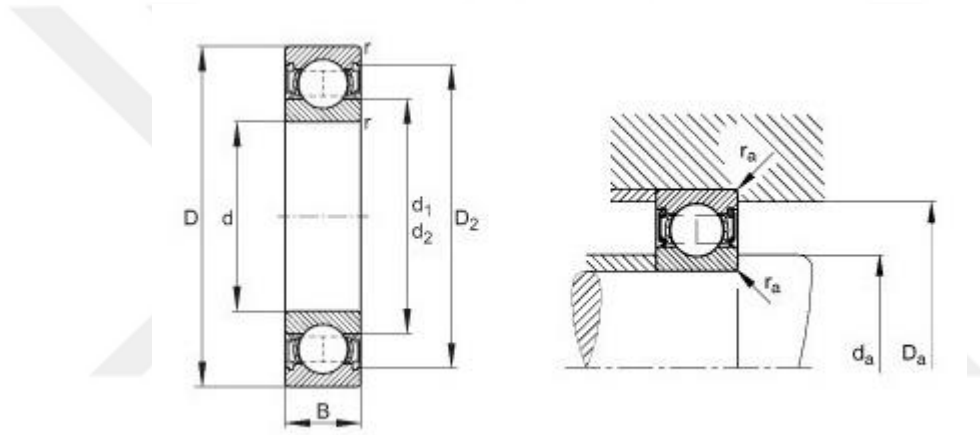


Şekil 2.36. Yetersiz Yağmala Sonucu Dış Bilezikte Oluşan Termal Çatlamlar

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Rulman Arızalarının Oluşturulması

Çalışmada FAG üreticisinin 6203 kodlu tek sıra bilyeli rulmanları kullanılmıştır.. Bunlara aynı zamanda derin oluklu bilyeli rulman da denmektedir (FAG, 2019). Şekil 3.1’de 6203 kodlu rulmana ait boyut parametreleri ve Tablo 3.1’de de ölçüleri verilmiştir Toplamda 20 adet rulman kullanılmış ve 5’li dört adet farklı grup oluşturulmuştur. Birinci grup montaj kaynaklı Plastik Deformasyona uğratılmıştır. İkinci grup Aşırı Akım Erozyonu kaynaklı arızaya maruz bırakılmıştır. Üçüncü grupta Rutubete bağlı Korozyon arızası oluşturulmuştur. Dördüncü grup ise sağlam (hasarsız) rulmanlardan oluşmaktadır.



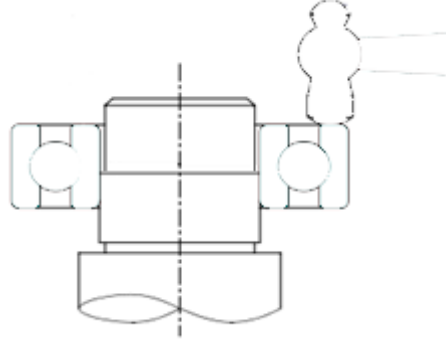
Şekil 3.1. 6203 Kodlu rulmanın boyut parametrelerinin gösterimi

Tablo 3.1. Kullanılan rulmanın temel ölçüleri

Parametre	Değer (mm)
d	17
D	40
B	12
D ₁	33,1
D _a max	35,8
d ₁	24
d _a min	21,2
r _a max	0,6
r _a min	0.6

Plastik Deformasyon arızası sabitlenmiş 17mm çapında bir mile geçirilen rulmanlara dış bileziğinden çekiç ile vurularak oluşturulmuştur (Şekil 3.2.). Çalışmamızda Arıza boyutu

çalışılmadığı ve sadece Arıza Modu sınıflandırması çalışıldığı için vuruşların açısı, sayısı ve kuvveti dikkate alınmamış ve kayıt edilmemiştir.



Şekil 3.2. Plastik deformasyon oluşturulma prensibi

Korozyon arızası rulmanların 1/3 oranındaki Perhidrol (H_2O_2) – Hidroklorik Asit (HCl) karışımında 30-90s arasındaki farklı sürelerde bekletilerek oluşturulmuştur. Rulmanlar asit karışımına bırakılmadan önce iç ve dış bilezik yüzeyleri izole bant ile kaplanarak korozyondan korunmuştur (Şekil 3.3.).

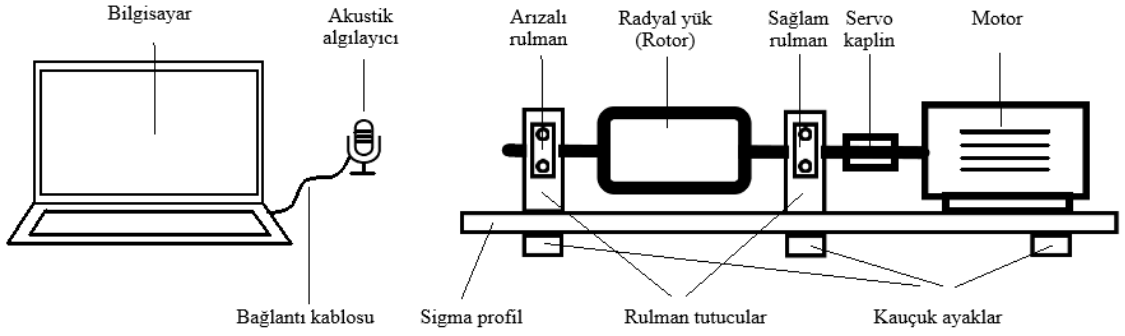


Şekil 3.3. Yapay korozyon oluşumu

Aşırı akım erozyonu hasarı rulman döndürülürken DC 30V'luk bir güç kaynağından rulmanın iç bileziğine 6A akım akıtılarak oluşturulmuştur. Rulmanın sabitlendiği alüminyum tutucu ise şaseye bağlanmıştır. Böylece rulman iç bileziğinden gelen elektrik akımı bilyeler üzerinden dış bileziğe geçerken elektriksel arklar oluşturarak yuvarlanma yollarında aşırı akım erozyonu meydana getirmiştir.

3.2. Deney Düzeneği ve Akustik Verinin Toplanması

Akustik veriler Şekil 3.4.'te prensip şeması ve Şekil 3.5. te gerçek hali görülen AC Motor tarafından tahrik edilen iki rulman tarafından yataklanmış bir rotor düzeneğinden oluşmuştur. Rotor rulmanlara radyal bir yük oluşturmak için kullanılmıştır. Deneyde kullanılan tek sıra bilyeli rulmanlar özellikler radyal yükleri kaldırmak için üretilmişlerdir. AC Motordan Rotora güç aktarımı Servo Kaplin ile gerçekleştirilmiştir. Servo kaplinler oldukça sessizdir ve shaftlar arasındaki eksen kaçıklıklarını iyi başarılı bir şekilde giderirler. Deney düzeneğindeki rulmanlardan biri tamamen sağlıklı diğeri ise arızalı olandır. Şekil 3.6.'da ayrıntılı olarak görülen Akustik veriyi toplayan ses kayıt cihazı arızalı rulman tarafına konumlandırılmıştır ve çıkış kablosu ile veriyi doğrudan bilgisayara aktaracak şekilde çıkış kablosu ile bağlanmıştır. Düzenek platformu gereksiz titreşim ve ses üretmemesi için üçlü kauçuk ayaklar üzerinde durmaktadır. Deney düzeneği arızalı rulmanın kolay takılıp çıkarılacağı şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.4. Deney düzeneği prensip şeması

Rulmanlar sıra ile Deney Düzeneğine takılıp 1400d/d dönüş hızında Akustik verileri Audacity yazılımı kullanılarak 600 saniyelik örnekler ile bilgisayara kayıt edilmiştir.

Şekil 3.5.'de kullanılan rulmanlar açık olarak görülmektedir. Sadece fotoğraf için açık gösterilen rulmanlar saklanırken ve depolanırken plastik poşet ve kutular içerisinde saklanmalıdır. Bu nem ve dış kirleticiler açısından çok önemlidir. Rulmanları insan parmak izlerinin yaratacağı korozyondan korumak için eldiven kullanılmadılır.



Şekil 3.5. Deney düzeneği



Şekil 3.6. Zoom H1 Akustik ses kayıt cihazı

Zoom H1 Stereo Ses Kayıt Cihazı Özellikleri:

Dahili 90° X / Y stereo mikrofon

Stereo 1/8" Mic / Hat Girişi mini telefon jakı, Prize takılı halde (2,5V)

Ses seviyesi kontrollü özel Stereo Telefon Hat Çıkışı jakı

Hızlı izleme için dahili referans hoparlör

Arka aydınlatmalı LCD ekran

32 GB'a kadar microSD ve microSDHC kartlara doğrudan kayıt yapabilme

BWF uyumlu WAV veya çeşitli MP3 formatlarında 24 bit / 96 kHz ses desteği

Giriş seviyesinin otomatik kontrolü için Otomatik Seviye

Rüzgar gürültüsü ve gürültünün giderilmesi için filtre

Kayıt başına 99 kadar işaret verebilme

Bilgisayara veri aktarımı ve ses arabirimi ve USB mikrofon olarak kullanmak için USB bağlantı noktası

SD kart okuyucu

İsteğe bağlı adaptörle doğrudan tripod veya mikrofon standı veya DSLR'ye monte edilebilirlik

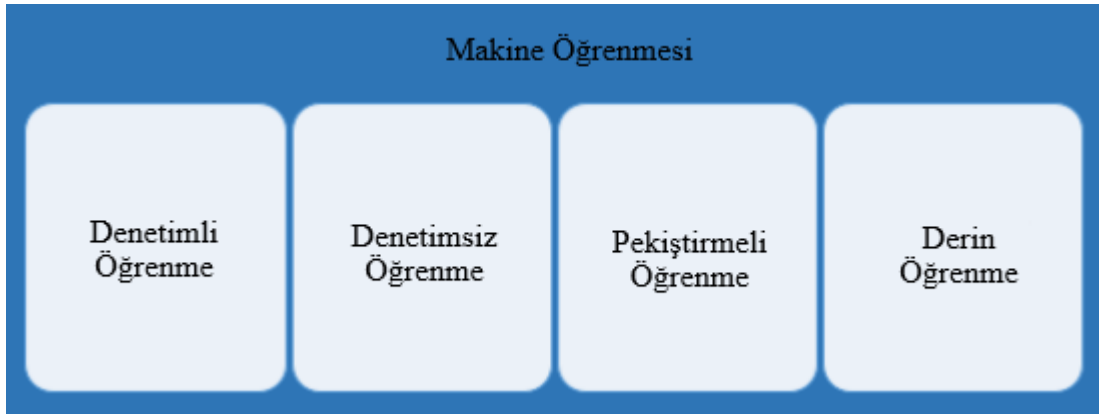
Sadece tek standart AA alkali veya NiMH şarj edilebilir pil ile çalışabilme

Tek bir AA alkalin pil ile 10 saate kadar çalışabilme

3.3. Makine Öğrenmesi Teknikleri

Makine öğrenmesi 1959 yılında bilgisayar biliminin yapay zekada sayısal öğrenme ve model oluşturma çalışmalarından geliştirilmiş bir alt dalıdır. Makine öğrenmesi yapısal işlev olarak öğrenebilen ve veriler üzerinden tahmin, sınıflandırma veya kümeleme yapabilen algoritmaların çalışma ve inşalarını araştıran bir sistemdir. Makine öğrenmesi algoritmaları statik program talimatlarını bire bir uygulamak yerine örnek girişlerden veri tabanlı tahminleri ve kararları gerçekleştirebilmek amacıyla bir model oluşturarak çalışırlar.

Tahmine dayalı modellerin doğruluğunu artırmak için makine öğrenme teknikleri gerekir. Ele alınan iş sorununun niteliğine bağlı olarak, verilerin türüne ve hacmine bağlı olarak farklı yaklaşımlar vardır.



Şekil 3.7. Makine öğrenmesi türleri

Denetimli öğrenme tipik olarak belirlenmiş bir veri kümesi ve bu verilerin nasıl sınıflandırıldığına dair kesin bir anlayışla başlar (Hurwitz ve Kirsch, 2018). Denetimli öğrenme, bir analitik sürecine uygulanabilecek verilerdeki kalıpları bulmayı amaçlar. Bu veri, verilerin anlamını tanımlayan özellikleri etiketlemiştir. Örneğin, milyonlarca hayvan imgesi

olabilir ve her bir hayvanın ne olduğuna ilişkin bir açıklama içerebilir ve daha sonra bir hayvanı diğerinden ayıran bir makine öğrenme uygulaması oluşturabilirsiniz. Bu verileri hayvan türleri hakkında etiketleyerek, yüzlerce farklı tür kategorisine sahip olabilirsiniz. Verilerin nitelikleri ve anlamı tanımlandığından, modellenmiş verileri eğiten kullanıcılar tarafından etiketlerin detaylarına uyacak şekilde anlaşılmıştır. Etiket sürekli olduğunda, bir regresyondur; Veriler sınırlı bir değer kümesinden geldiğinde, sınıflandırma olarak bilinir. Temelde, denetimli öğrenme için kullanılan regresyon değişkenler arasındaki ilişkiyi anlamana yardımcı olur. Denetimli öğrenmeye bir örnek, hava tahminidir. Regresyon kullanarak analiz, hava durumu tahminleri, bilinen tarihi hava durumlarını ve hava durumu hakkında bir tahmin sağlamak için mevcut koşulları dikkate alır. Algoritmalar önceden işlenmiş örnekler kullanılarak eğitilir ve bu noktada algoritmaların performansı test verileri ile değerlendirilir. Bazen, verilerin bir alt kümesinde tanımlanan desenler, daha büyük veri popülasyonunda algılanamaz. Model yalnızca eğitim alt kümesinde bulunan kalıpları temsil etmek için uygun ise, aşırı öğrenme adlı bir sorun yaratırsınız. Aşırı öğrenme, modelinizin eğitim verileriniz için tam olarak ayarlandığı ancak bilinmeyen büyük veri kümeleri için geçerli olmayabileceği anlamına gelir. Aşırı öğrenmeye karşı korunmak için öngörülemeyen veya bilinmeyen etiketli verilere karşı test yapılması gerekir. Test kümesi için öngörülemeyen verileri kullanmak, modelin sonuçları ve sonuçları tahmin etmedeki doğruluğunu değerlendirmenize yardımcı olabilir. Denetimli eğitim modelleri, sahtekarlık tespiti, öneri çözümleri, konuşma tanıma veya risk analizi gibi çeşitli işletme sorunlarına uygulanabilir.

Denetimsiz öğrenme, problemin etiketlenmemiş büyük miktarda veri gerektirmesi durumunda en uygun yöntemdir. Bu verinin ardındaki anlamı anlamak, bulunduğu örüntülere veya kümelere göre verileri sınıflandırabilmeye dayanan anlamı anlamaya başlayabilen algoritmalar gerektirir. Bu nedenle, denetlenen öğrenme, insan müdahalesi olmadan verileri analiz etmek için yinelemeli bir süreç yürütmektedir. Denetimsiz öğrenme, e-posta spam tespit teknolojisiyle birlikte kullanılır. Bir analistin istenmeyen toplu e-postaları göndermesi için yasal ve spam e-postalarında çok fazla değişken var. Bunun yerine, istenmeyen e-postaları belirlemek için kümeleme ve ilişkilendirmeye dayalı makine öğrenmesi sınıflayıcıları uygulanır.

Denetimsiz öğrenme algoritmaları verileri gruplara ayırır. Bunlar örnekler (kümeler) veya özellik gruplarıdır. Etiketlenmemiş veriler parametre değerlerini ve verilerin sınıflandırılmasını oluşturur. Temelde bu süreç, denetlenebilmesi için verilere etiketler ekler.

Denetimsiz öğrenme, büyük miktarda veri olduğunda sonucu belirleyebilir. Bu durumda, geliştirici analiz edilen verilerin içeriğini bilmediğinden, etiketleme bu aşamada

mümkün değildir. Bu nedenle, denetimsiz öğrenme, verileri denetimli bir öğrenme sürecine aktarmadan önce ilk adım olarak kullanılabilir. Denetimsiz öğrenme algoritmaları, işletmelerin büyük miktarlarda yeni, etiketlenmemiş verileri anlamalarına yardımcı olabilir. Denetimli öğrenmeye benzer şekilde bu algoritmalar verilerdeki kalıpları arar; bununla birlikte, fark, verilerin henüz anlaşılmadığıdır. Örneğin, sağlık hizmetlerinde, belirli bir hastalık hakkında büyük miktarlarda veri toplamak, uygulayıcıların semptom kalıpları hakkında fikir edinmesine ve bunları hastalardan elde edilen sonuçlarla ilişkilendirmesine yardımcı olabilir. Diyabet gibi bir hastalıkla ilişkili tüm veri kaynaklarını etiketlemek çok zaman alacaktır. Bu nedenle, denetimsiz bir öğrenme yaklaşımı, denetimli bir öğrenme yaklaşımından daha hızlı sonuçların belirlenmesine yardımcı olabilir.

Pekiştirmeli öğrenme, davranışsal bir öğrenme modelidir. Algoritma, verilerin analizinden geri bildirim alır, böylece kullanıcı en iyi sonuca yönlendirilir. Pekiştirmeli öğrenme diğer denetimli öğrenme türlerinden farklıdır çünkü sistem örnek veri seti ile eğitilmemiştir. Aksine, sistem deneme yanılma yoluyla öğrenir. Bu nedenle, başarılı kararlar dizisi, sürecin “pekiştirilmesi” ile sonuçlanacaktır çünkü eldeki sorunu en iyi şekilde çözer.

Pekiştirmeli öğrenimin en yaygın uygulamalarından biri robotik veya oyun oynamadır. Bir merdiven setinde gezinmek için bir robot yetiştirme ihtiyacına bir örnek verin. Robot, eylemlerinin sonucuna dayanarak arazide gezinme yaklaşımını değiştirir. Robot düştüğünde, veriler yeniden kalibre edilir, böylece robotlar merdivenleri tırmanmayı anlamak için deneme ve yanılma ile eğitilinceye kadar farklı adımlarla yönlendirilir. Başka bir deyişle, robot başarılı bir dizi eylemi temel alarak öğrenir. Öğrenme algoritması, merdiven çıkmadan başarılı bir şekilde tırmanma hedefi ile sonuca yol açan olayların sırası arasında bir ilişki bulabilmelidir.

Pekiştirmeli öğrenme, aynı zamanda kendi kendini süren otomobiller için kullanılan bir algoritmadır. Birçok yönden, kendi kendini süren bir arabayı eğitmek inanılmaz derecede karmaşıktır çünkü çok fazla potansiyel engel var. Yoldaki bütün otomobiller özerk olsaydı, deneme yanılma aşılması daha kolay olurdu. Bununla birlikte, gerçek dünyada insan sürücüler çoğu zaman tahmin edilemez olabilir. Bu karmaşık senaryoda bile, algoritma, eylemlerin ödüllendirildiği duruma uyum sağlama yollarını bulmak için zaman içinde optimize edilebilir.

Pekiştirmeli öğrenmeyi düşünmenin en kolay yollarından biri, bir hayvanın ödüllere dayalı eylemler yapmak için eğitildiği yoldur. Köpek, her komutada oturduğunda bir muamele görürse, her seferinde bu eylemi gerçekleştirir.

Derin öğrenme, verilerden yinelemeli bir şekilde öğrenmek için sinir ağlarını ardışık katmanlara dahil eden, makine öğrenmenin spesifik bir yöntemidir. Derin öğrenme özellikle yapılandırılmamış verilerden kalıp öğrenmeye çalıştığınızda faydalıdır.

Derin öğrenme ve karmaşık sinir ağları insan beyninin nasıl çalıştığını taklit etmek için tasarlanmıştır, böylece bilgisayarlar soyutlamalar ve iyi tanımlanmamış problemlerle başa çıkmak için eğitilebilir.

Ortalama bir beş yaşındaki çocuk, öğretmenin yüzü ile geçiş görevlisinin yüzü arasındaki farkı kolayca tanıyabilir. Buna karşılık, bilgisayar kimin kim olduğunu bulmak için çok çalışmalı. Yapay sinir ağları ve derin öğrenme genellikle görüntü tanıma, konuşma ve bilgisayarlı görü uygulamalarında kullanılır.

Bir sinir ağı üç veya daha fazla katmandan oluşur: bir giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıkış katmanı. Veriler giriş katmanı yoluyla alınır, gizli katmanda işlenir ve çıktı katmanına iletilir. Tipik sinir ağı, yoğun bir şekilde birbirine bağlı binlerce veya hatta milyonlarca basit işlem düğümünden oluşabilir. Derin öğrenme terimi, sinir ağında çok sayıda gizli katman olduğunda kullanılır. Bir yinelemeli yaklaşım kullanarak, bir sinir ağı sürekli bir şekilde durur ve belirli bir durma noktasına ulaşılan kadar çıkarımlar yapar. Yapay sinir ağları genellikle görüntü tanıma ve bilgisayarla görme uygulamaları için kullanılır.

Derin öğrenme, denetlenmeyen ve denetlenen algoritmaların kombinasyonundan öğrenmek için hiyerarşik sinir ağlarını kullanan bir makine öğrenme tekniğidir. Derin öğrenmeye genellikle makine öğrenmenin alt disiplini denir. Genellikle, derin öğrenme etiketlenmemiş ve yapılandırılmamış verilerden öğrenir. Derin öğrenme geleneksel bir sinir ağına çok benzese de, daha birçok gizli katmana sahip olacaktır. Problem ne kadar karmaşık, modelde o kadar gizli katmanlar olacaktır.

Derin öğrenmenin işletmeler üzerinde etkili olacağı pek çok alan var. Örneğin, ses tanıma otomobillerden müşteri yönetimine kadar her konuda uygulamalara sahip olacak. İçinde

Nesnelerin İnterneti (IoT) üretim uygulamaları, derin öğrenme bir makinenin ne zaman arızalanacağını tahmin etmek için kullanılabilir. Derin öğrenme algoritmaları, kolluk kuvvetlerinin bilinen bir şüphelinin hareketlerini izlemesine yardımcı olabilir.

3.3.1. Bayes Ağları (Bayesian Network)

Bilgisayar bilimlerinde veri modelleme ve durum geçişi ifade etmek için kullanılan yöntemlerden birisidir. Literatürde bayes network veya belief network (inanç ağı) olarak da

geçen ağların özelliği istatistiksel ağlar olmaları ve düğümler (nodes) arası geçiş yapan kolların (edges) istatistiksel kararlara göre seçilmesidir (Şeker, 2019).

Bayes ağları yönlü dönüşsüz ağlardır (directed acyclic network) ve her düğüm ayrı bir değişkeni ifade eder. Ayrıca bu değişkenler (rastgele değişkenler, random variables) arasındaki sıralama da bayes ağları ile gösterilebilir (basitçe bir düğümden diğer düğüme geçiş sırası).

Bayes ağlarının daha geniş hali de belirsiz karar ağaçlarıdır (uncertain decision trees) (Patterson ve Gibson, 2017).

Bayes ağları ile amaç, gözlemlenen kanıtlar göz önüne alındığında, gözlemlenmeyen olası nedenlerin her birinin arka koşullu olasılık dağılımını hesaplamaktır, yani $P[\text{Sebe} | \text{Kanıt}]$. Bununla birlikte, pratikte çoğu zaman neden $P[\text{Kanıt} | \text{Sebe}]$ olarak verilen kanıtları gözlemlenmenin koşullu olasılık dağılımını elde edebilmektedir. Tüm Bayesian ağları kavramı, Bayes teoremi üzerine kuruludur; bu, konuyla ilgili kanıtı gözlemlenme olasılığını kullanarak, gözlemlenen kanıtın koşullu olasılık dağılımını ifade etmemize yardımcı olur:

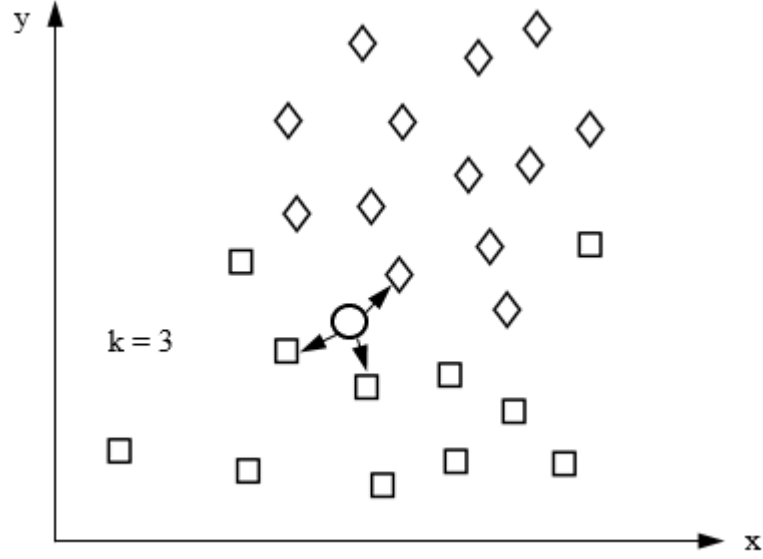
A: Gerçekleşme olasılığı ile ilgilendiğimiz olay

B: Daha önce gerçekleşmiş olan olay

$$P(A|B) = \frac{P(B|A).P(A)}{P(B)} \quad (3.1)$$

3.3.2. K-En Yakın Komşu Algoritması (K Nearest Neighbor-KNN)

K-En Yakın Komşu algoritması makine öğrenme yöntemleri içerisinde en basit yaklaşımlardan biridir. Bu algoritmadan sınıflandırılmak istenen yeni öge özniteliklerine bakılarak kendisine en yakın k sayıdaki komşularının özniteliklerine bakılarak sınıflandırılır. Burada 'k' öznitelikleri karşılaştırılan komşu sayısıdır. Komşu sayısının seçimi algoritmanın etkinliği için önemli bir kriterdir.



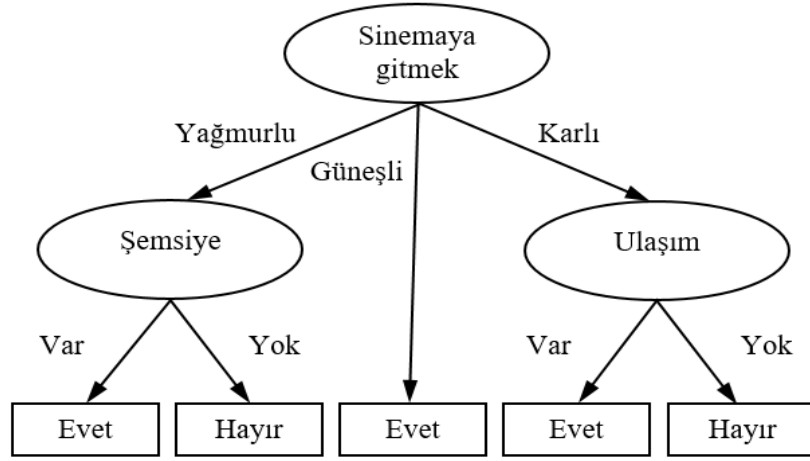
Şekil 3.8. k-En yakın komşu algoritması

Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi iki boyutlu ve iki sınıftan oluşan bir veri setinde $k=3$ alındığında yeni eklenen üyenin özniteliklerine bakılarak (x ve y) kendisine öznitelik bakımından yakın üç komşusu ile mesafeleri hesaplanır ve yakın bulunduğu sınıfa atanır (Akpınar, 2014).

3.3.3. Karar Ağacı Algoritmaları (Decision Tree)

1950'li yılların sonlarından itibaren çok çeşitli karar ağacı algoritmaları geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bu algoritmaların bazıları sınıflandırma bazıları ise geleceği tahmin etmek için kullanılır.

Karar ağaçları kök düğümden başlayarak yapraklara doğru bütünü en bölen özniteliği bularak kendini tekrarlayan süreçler şeklinde çalışırlar.



Şekil 3.9. Basit karar ağacı algoritması

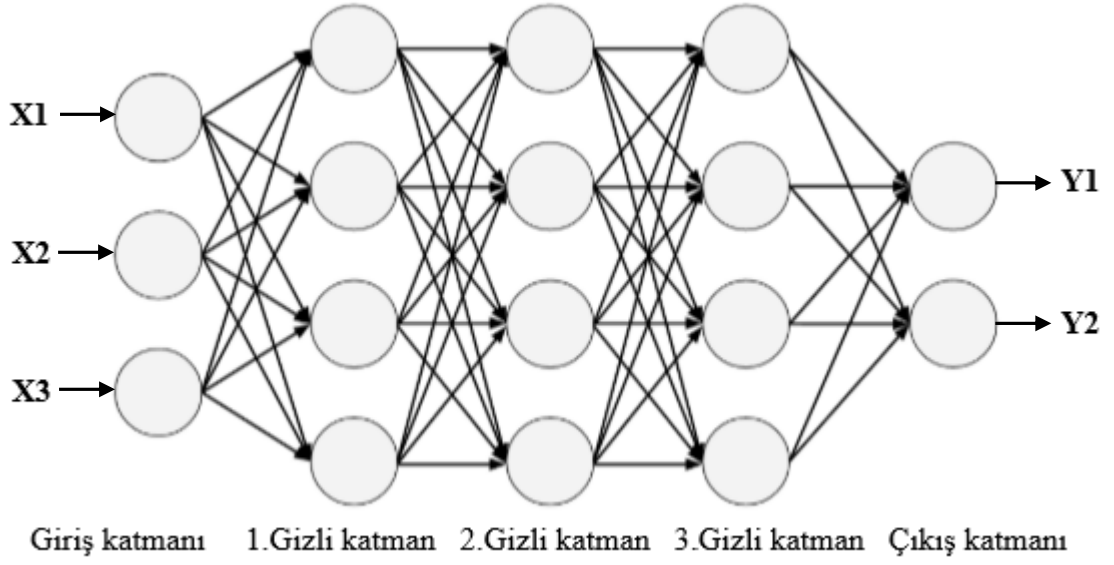
Şekil 3.9.'da örnek basit bir Karar Ağacı algoritması görülmektedir. Bu algoritma ile kişinin sinemaya gitme isteği sorgulanmaktadır. Hava yağmurlu ve şemsiyesi var ise gidecektir, şemsiyesi yok ise gitmeyecektir. Hava güneşli ise başka bir koşulu sorgulamadan gidecektir. Hava karlı ise ulaşım sorgulanacaktır, ulaşım var ise gidecektir yok ise gitmeyecektir (Witten vd., 2011).

3.3.4. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron)

Çok katmanlı algılayıcılar XOR Problemi'ni çözmek için yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Rumelhart ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu modele 'Back Propagation Model' ya da hatayı ağa yaydığı için 'Hata Yayıma Modeli' de denmektedir. Delta Öğrenme Kuralı denilen bir öğrenme metodu kullanır. ÇKA özellikle sınıflandırma ve genelleme yapma durumlarında etkin çalışır (Azginoğlu, 2019). Çok Katmanlı Ağ'ların yapısı Şekil 3.10'daki gibidir.

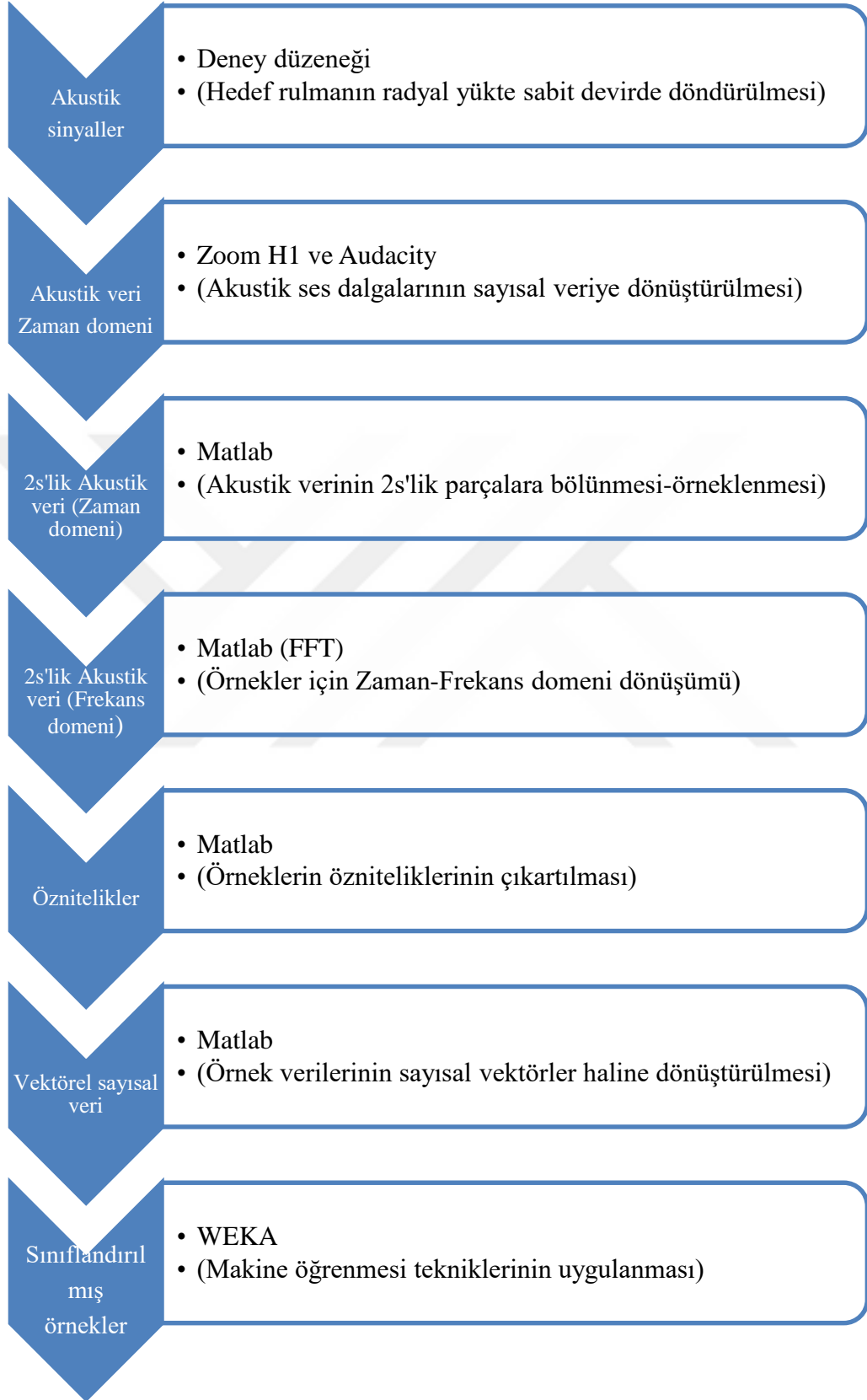
Birçok giriş için bir nöron yeterli olmayabilir. Paralel işlem yapan birden fazla nörona ihtiyaç duyulduğunda katman kavramı devreye girer. Görüldüğü üzere Single Perceptron Model'den farklı olarak arada gizli katmanlar bulunmaktadır. Giriş katmanı gelen verileri alarak ara katmana gönderir. Gelen bilgiler bir sonraki katmana aktarılırlar. Ara katman sayısı en az bir olmak üzere probleme göre değişir ve ihtiyaca göre ayarlanır. Her katmanın çıkışı bir sonraki katmanın girişi olmaktadır. Böylelikle çıkışa ulaşılmaktadır. Her işlem elemanı yani nöron bir sonraki katmanda bulunan bütün nöronlara bağlıdır. Ayrıca katmandaki nöron sayısı da probleme göre belirlenir. Çıkış katmanı önceki katmanlardan gelen verileri işleyerek ağın çıkışını belirler. Sistemin çıkış sayısı çıkış katmanında bulunan eleman sayısına eşittir.

Modelde aktivasyon fonksiyonu olarak herhangi bir matematiksel fonksiyon kullanılabilir. Ancak Sigmoid, tang, lineer, threshold ve hard limiter fonksiyonları en çok kullanılan fonksiyonlardır.



Şekil 3.10. Çok katmanlı algılayıcı yapısı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA



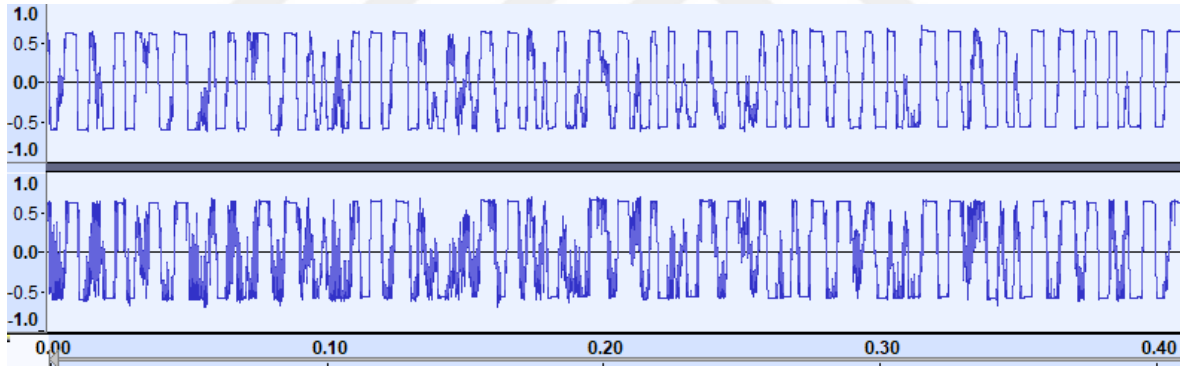
Şekil 4.1. Sistemin genel akış algoritması

Şekil 4.1.'de Rulman Arıza Sınıflandırma Sisteminin Genel Akış Şeması görülmektedir. Çalışmada kullanılan 20 adet her rulman için 600s'lik Akustik veri kaydı gerçekleştirilmiştir. Bu veriler Matlab programı ile 2s'lik parçalara bölünmüştür. Her rulman için rastgele 6 adet 2s'lik sinyal verisi alınarak 120 örnekli veri seti oluşturulmuştur. Bundan sonraki aşamada Matlab programı kullanılarak Akustik Sinyallerinin verileri Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak Zaman domeninden Frekans domenine dönüştürülmüştür.

4.1. Akustik Verinin Analizi ve Öznitelik Çıkartımı

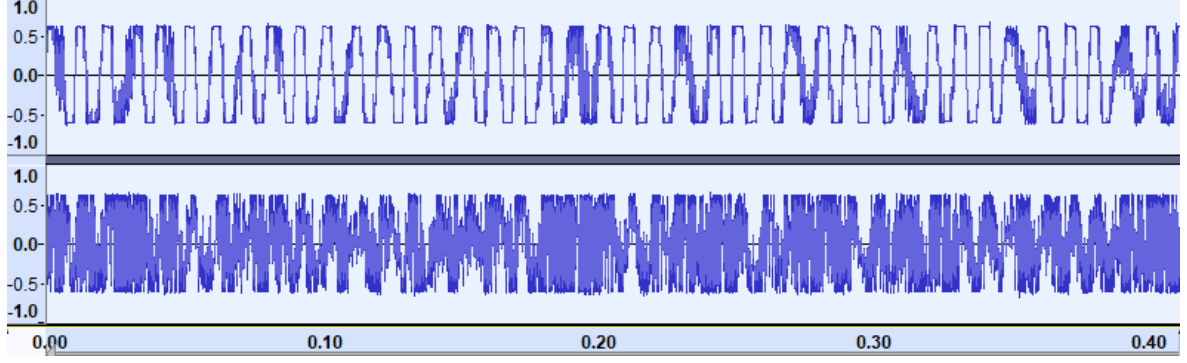
Veri toplama kartına ihtiyaç duyulmadan akustik verilerin bilgisayara kayıt edilmesi için Audacity yazılımı kullanılmıştır. Şekillerde farklı tipte Rulman Arızalarına maruz kalmış rulmanların akustik sinyalleri görülmektedir. Bu sinyaller 32 bit çözünürlükte ve 44100Hz örnekleme frekansı ile 90° Açısal Stereo olarak kayıt edilmişlerdir. Sinyal daga şekillerinden paralelsizlik bu açıdan dolayıdır. Şekillerde de görüldüğü gibi Arıza Tipleri arasındaki fark sinyallere de yansımıştır ve görsel olarak da ayırt edilebilmektedir.

Şekil 4.2.'de Plastik Deformasyon arızası oluşturulmuş rulman sinyali görülmektedir.



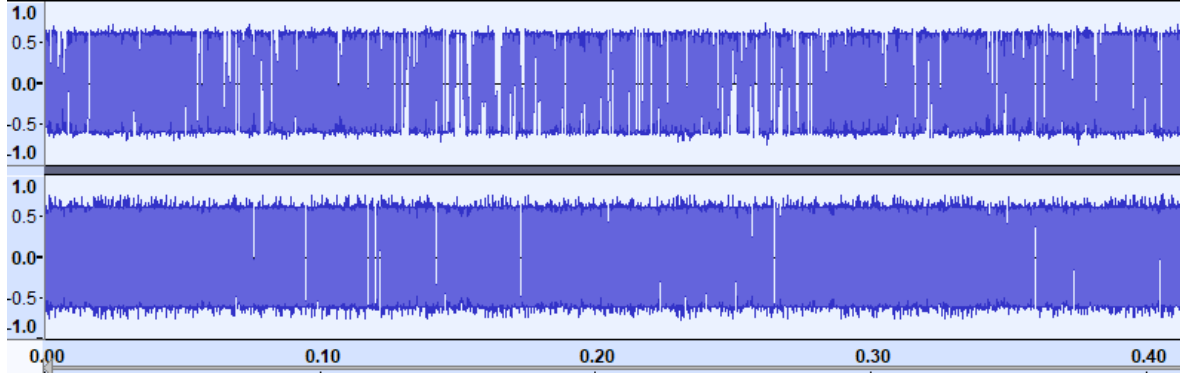
Şekil 4.2. Plastik deformasyon hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali

Şekil 4.3.'te görülen Aşırı akım erozyonu hasarlı rulman akustik stereo sinyalindeki iki kanal arasındaki fark dikkat çekmektedir.



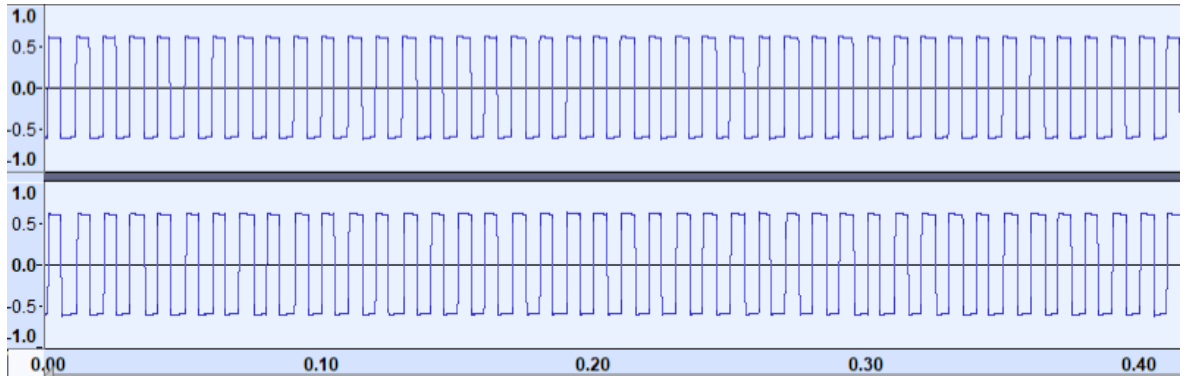
Şekil 4.3. Aşırı akım erozyonu hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali

Şekil 4.4.'te Korozyona uğratılmış rulman sinyali görülmektedir. Sinyaldeki frekans yoğunluğu rulmanın ileri derecede hasara uğradığını göstermektedir.



Şekil 4.4. Rutubete bağlı korozyon hasarlı rulman 0,4s akustik sinyali

Şekil 4.5.'te Sağlam (Hasarsız) bir rulmanın akustik sinyali görülmektedir. Kanallar ve sinyal alternansları arasındaki homojenlik dikkat çekmektedir.



Şekil 4.5. Sağlam rulman 0,4s akustik sinyali

Unutulmamalıdır ki birçok ünlü ve kalitesini kanıtlamış rulman üretici firmanın ürünleri taklit edilebilmektedir ve bu taklit ürünler piyasada satışa sunulabilmektedir. Doğal olarak bu taklit ürünler asılları ile aynı kalitede ve kusursuzlukta olmayacaklardır. Rulman satın alınırken yetkili bayiler ve satıcılarla çalışmak büyük önem arz etmektedir.

Akustik ses sinyalleri Hızlı Fourier dönüşü kullanarak zaman domeninden frekans domenine dönüştürülür.

Fourier dönüşümü teorisine bakacak olursak, Ayrık Fourier dönüşümü (DFT), Fourier dönüşümünün eşit aralıklı frekanslardaki örneklerine özdeştir. Sonuç olarak N noktalı bir DFT'nin hesaplanması Fourier dönüşümünün N örneğinin, N eşit aralıklı frekanslarla ($\omega_k=2\pi k/N$), z düzlemindeki birim çember üzerinde N nokta ile hesaplanmasına karşılık gelir. Burada temel amaç N noktalı DFT'nin hesaplanması için verimli algoritmaların kullanılmasıdır. Bu algoritmalar ortak olarak hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmaları adını alır.

Ayrık zaman Fourier dönüşümü (DTFT) aşağıdaki şekilde verilir.

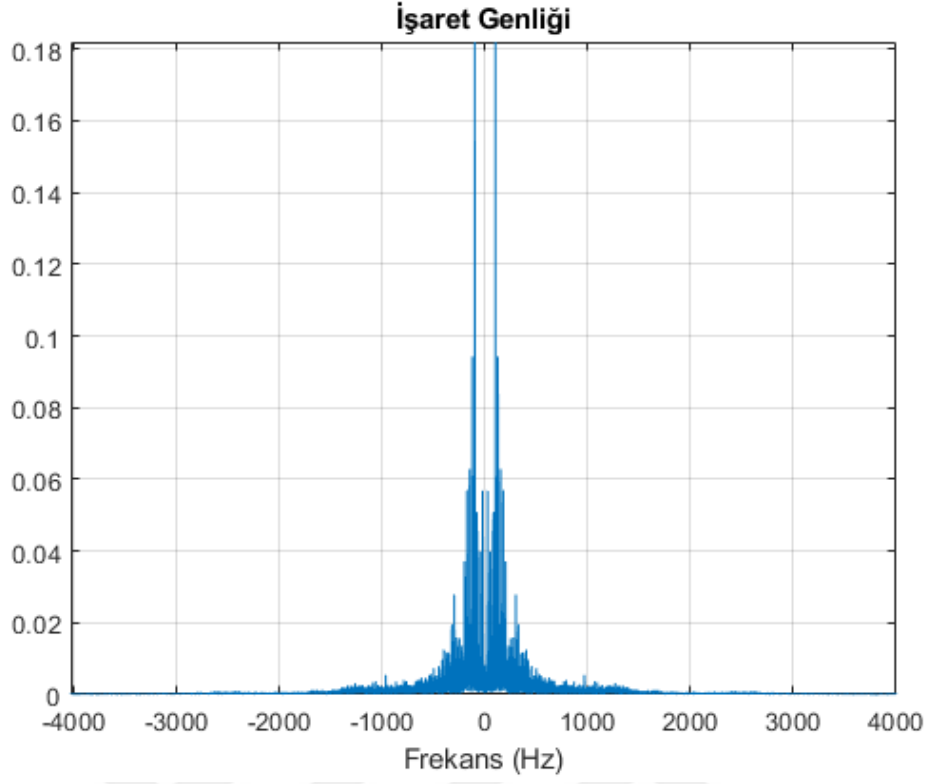
$$X(e^{j\omega}) = F\{x(n)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-i\omega n} \quad (4.1)$$

$F\{\cdot\}$ operatörü $x(n)$ n ayrık işaretini gerçel değerli ω 'nın karmaşık değerli ve sürekli bir fonksiyonu olan $x(e^{j\omega})$ 'ya dönüştürmektedir. $x(e^{j\omega})$ 'yı $\Delta\omega$ aralıklarıyla periyodik olarak örneklediğimizi varsayalım. $x(e^{j\omega})$, 2π periyodunda bir fonksiyon olduğundan dolayı sadece temel frekans aralığında kalan örnekler yeterli olacaktır. Kolaylık için $0 \leq \omega < 2\pi$ aralığında N tane eşit aralıklı örnek alalım ($\Delta = / 2\pi N$). Eğer (4.1) denklemini $\omega = 2\pi k/N$ noktasında değerlendirecek olursak:

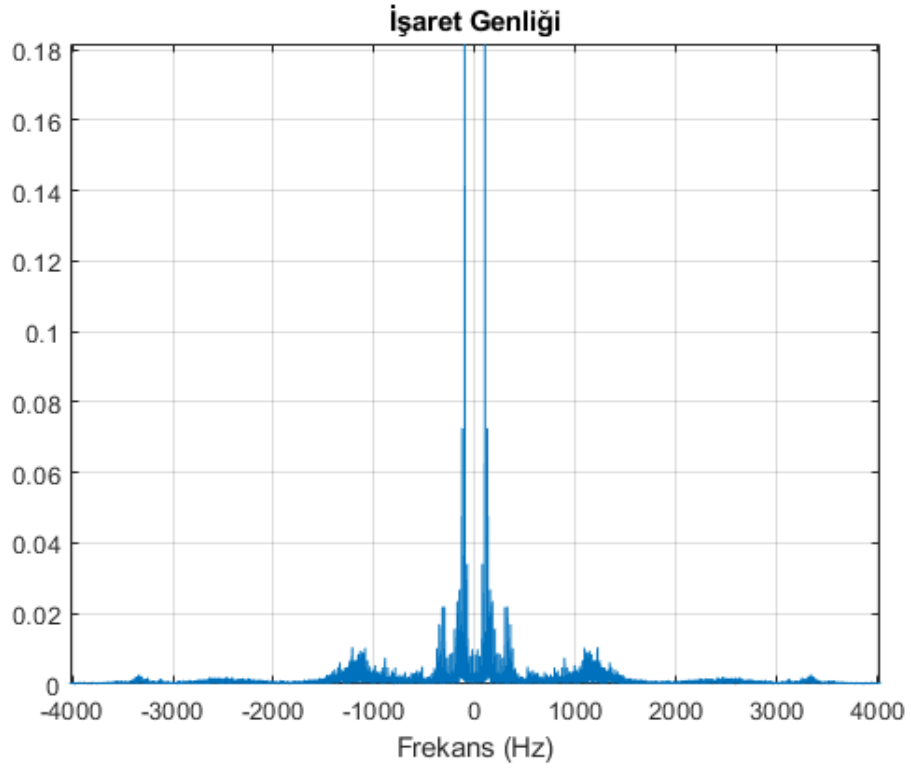
$$X(e^{j2\pi k/N}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi k/N} \quad (4.2)$$

M uzunluğunda sınırlı uzunluklu bir $x(n)$ dizisinin ($x(n) = 0$, $n < 0$ ve $n \geq M$ için) Fourier dönüşümü aşağıdaki şekilde verilir:

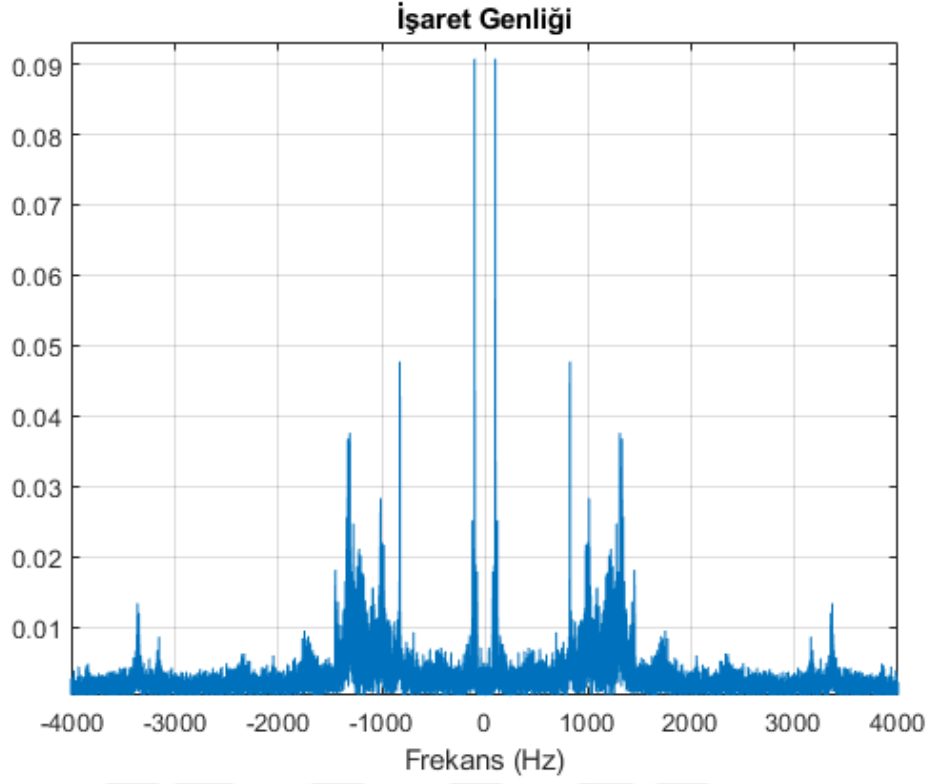
$$X(e^{j\omega}) = F\{x(n)\} = \sum_{n=0}^{M-1} x(n)e^{-i\omega n} \quad (4.3)$$



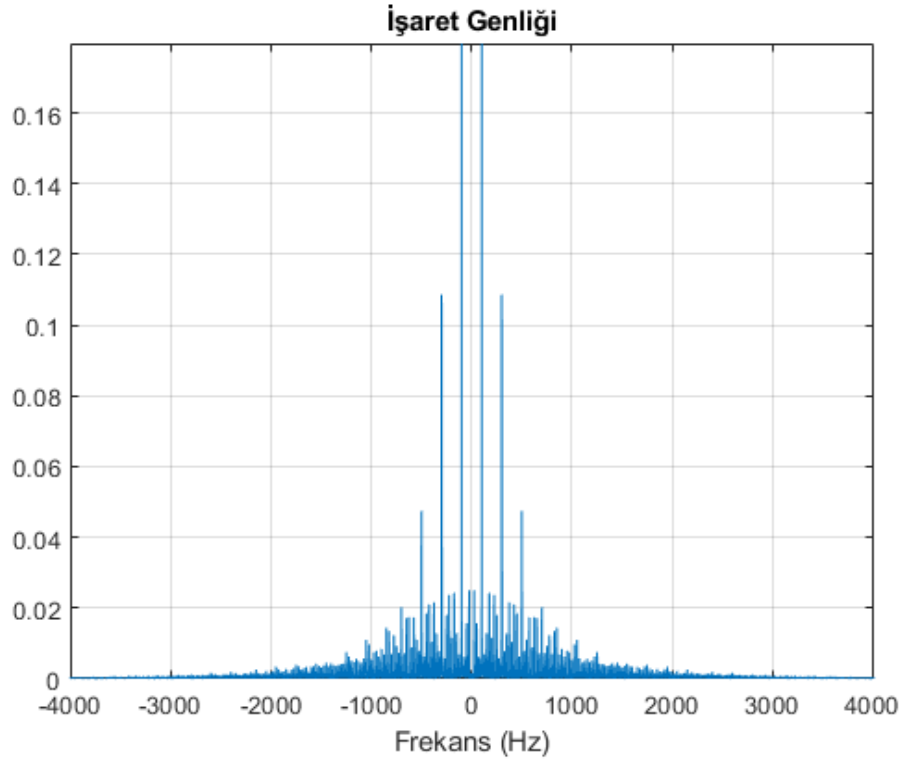
Şekil 4.6. Plastik deformasyon hasarlı rulman FFT sinyali



Şekil 4.7. Aşırı akım erozyonu hasarlı rulman FFT sinyali



Şekil 4.8. Rutubete bağlı korozyon hasarlı rulman FFT sinyali



Şekil 4.9. Sağlam rulman FFT sinyali

Frekans domenindeki en önemli 100 frekans bölgesi geliştirilen bir algoritma sayesinde seçilerek her örnekleme için 100 öznitelik oluşturulmuştur. Makine Öğrenmesi Algoritmalarında seçilen bu öznitelikler kullanılmıştır.

4.2. Makine Öğrenmesi Teknikleri ile Arıza Sınıflandırması

Çalışmada kullanılan Makine Öğrenmesi Teknikleri algoritmaları Yeni Zellanda Waikado Üniversitesinin Java kullanılarak açık kaynak kodlu olarak geliştirdiği WEKA programı ile uygulanmıştır. WEKA ile ön işleme (preprocess), sınıflandırma (classification), ilişkilendirme (association), kümeleme (clustering), görselleştirme (visualize) gibi işlemler gerçekleştirilebilir.

Uygulanan Makine Öğrenmesi Algoritmaları sonucu elde edilen sonuçlar Tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Bayes ağları algoritması başarımları

Parametre	Değer
Model Oluşturma Süresi (s)	0,11
Toplam Örnek Sayısı	120
Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	107
Sınıflandırma Başarımı (%)	89,1667
Kappa İstatistiği	0,8556
Mutlak Hata	0,0545
Karekök Ortalaması	0,2328
Göreceli Mutlak Hata (%)	14,5351
Bağıl Karekök Hatası (%)	53,7538

Tablo 5.2. K-En yakın komşu algoritması başarımları

Parametre	Değer
Model Oluşturma Süresi (s)	0
Toplam Örnek Sayısı	120
Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	116
Sınıflandırma Başarımı (%)	96,6667
Kappa İstatistiği	0,9556
Mutlak Hata	0,0293
Karekök Ortalaması	0,1277
Göreceli Mutlak Hata (%)	7,8133
Bağıl Karekök Hatası (%)	29,49

Tablo 5.3. Karar ağacı algoritması başarımları sonuçları

Parametre	Değer
Model Oluşturma Süresi (s)	0,07
Toplam Örnek Sayısı	120
Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	111
Sınıflandırma Başırımı (%)	92,5
Kappa İstatistiği	0,9
Mutlak Hata	0,0637
Karekök Ortalaması	0,163
Göreceli Mutlak Hata (%)	16,9889
Bağlı Karekök Hatası (%)	37,6531

Tablo 5.4. Çok katmanlı algılayıcı algoritması başarımları sonuçları

Parametre	Değer
Model Oluşturma Süresi (s)	3,79
Toplam Örnek Sayısı	120
Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	116
Sınıflandırma Başırımı (%)	96,6667
Kappa İstatistiği	0,9556
Mutlak Hata	0,0304
Karekök Ortalaması	0,1277
Göreceli Mutlak Hata (%)	8,1129
Bağlı Karekök Hatası (%)	29,5005

Tablo 5.5. Bayes ağları algoritması karışıklık matrisi

	PD	AAE	RBK	SG	Toplam
PD	25	<u>2</u>	<u>3</u>	0	30
AAE	<u>1</u>	27	<u>2</u>	0	30
RBK	<u>5</u>	0	25	0	30
SG	0	0	0	30	30
Toplam	31	29	30	30	

Tablo 5.6. K-En yakın komşu algoritması karışıklık matrisi

	PD	AAE	RBK	SG	Toplam
PD	27	<u>2</u>	<u>1</u>	0	30
AAE	0	29	<u>1</u>	0	30
RBK	0	0	30	0	30
SG	0	0	0	30	30
Toplam	27	31	32	30	

Tablo 5.7. Karar ağacı algoritması karışıklık matrisi

	PD	AAE	RBK	SG	Toplam
PD	25	<u>3</u>	<u>2</u>	0	30
AAE	<u>1</u>	28	0	<u>1</u>	30
RBK	<u>2</u>	0	28	0	30
SG	0	0	0	30	30
Toplam	28	31	30	31	

Tablo 5.8. Çok katmanlı algılayıcı algoritması karışıklık matrisi

	PD	AAE	RBK	SG	Toplam
PD	27	0	<u>3</u>	0	30
AAE	<u>1</u>	29	0	0	30
RBK	0	0	30	0	30
SG	0	0	0	30	30
Toplam	28	29	33	30	

4.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Tablo 5.9.'da kullanılan Makine Öğrenmesi Tekniklerinin başarımları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Alınan sonuçlara göre veri setimizde için en yüksek başarıyı 120 örnekten 116 örneği doğru sınıflayarak K-En Yakın Komşuluk (kNN) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) algoritmaları eşit şekilde elde etmişlerdir. En düşük sonucu 120 örnekten 107 örneği doğru sınıflamış olan Bayes Ağları (BN) Algoritması vermiştir.

Model oluşturma sürelerine bakıldığında K-En Yakın Komşuluk (kNN) algoritmasının model oluşturmaya ihtiyacı olmadığı için süre sıfır olarak hesaplanmıştır. Yapay Sinir Ağı

şeklindeki Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) algoritmasının model oluşma süresi 3,79 saniye ile en süre olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.9. Kullanılan algoritmaların karşılaştırmalı başarımları sonuçları

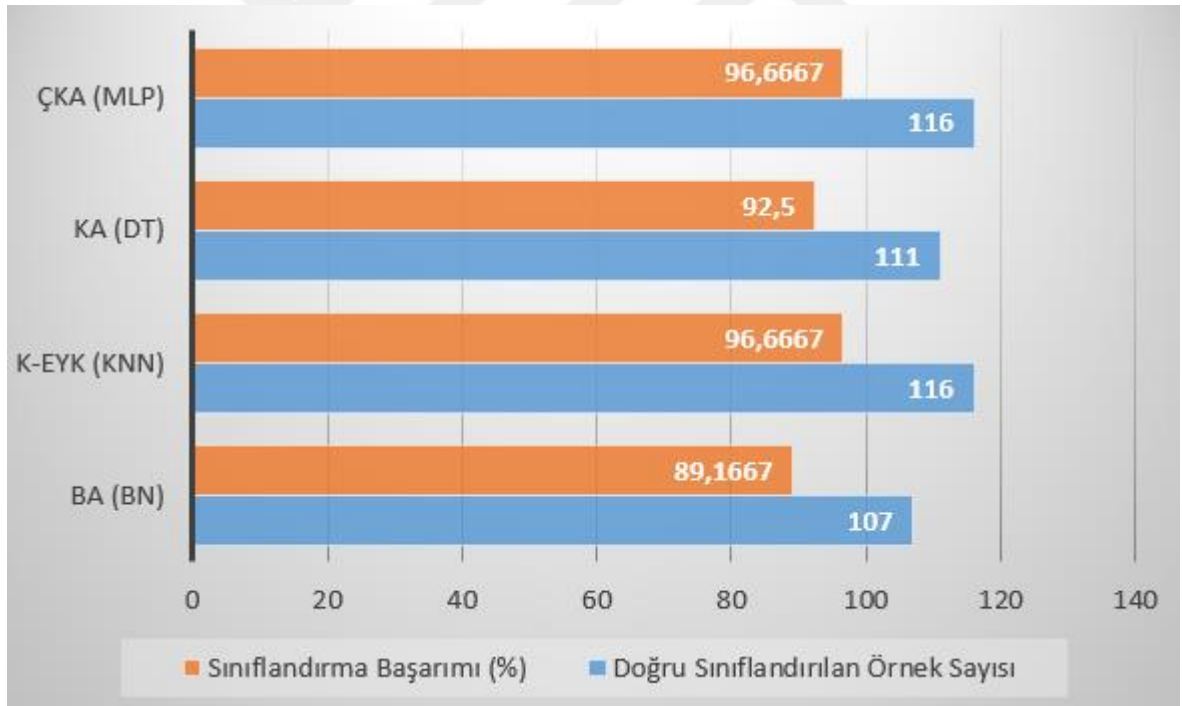
Parametre	BA ^a	K-EYK ^b	KA ^c	ÇKA ^d
Model Oluşturma Süresi (s)	0,11	0	0,07	3,79
Toplam Örnek Sayısı	120	120	120	120
Doğru Sınıflandırılan Örnek Sayısı	107	116	111	116
Sınıflandırma Başarımı (%)	89,1667	96,6667	92,5	96,6667
Kappa İstatistiği	0,8556	0,9556	0,9	0,9556
Mutlak Hata	0,0545	0,0293	0,0637	0,0304
Karekök Ortalaması	0,2328	0,1277	0,163	0,1277
Göreceli Mutlak Hata (%)	14,5351	7,8133	16,9889	8,1129
Bağlı Karekök Hatası (%)	53,7538	29,49	37,6531	29,5005

^aBayes Ağları

^bK-En Yakın Komşuluk

^cKarar Ağacı

^dÇok Katmanlı Algılayıcı



Şekil 4.10. Algoritmaların başarımları oranları grafiği

Karışıklık matrislerini incelediğimizde ise en çok yanlış sınıflanan örneklerin Plastik Deformasyon arızası bulunan rulmanlara ait olduğunu görülmektedir. En başarılı sınıflandırılan örnekler ise Sağlam Rulmanlara ait olan örnekler olmuştur.

Tablo 5.10. Dört algoritmanın kombine karışıklık matrisi

	PD	AAE	RBK	SG	Toplam
PD	104	<u>7</u>	<u>9</u>	0	120
AAE	<u>3</u>	113	<u>3</u>	<u>1</u>	120
RBK	<u>7</u>	0	113	0	120
SG	0	0	0	121	120
Toplam	114	120	125	121	

5. SONUÇ

Rulman arıza sınıflandırma çalışmaları titreşim analizi, akustik analiz, yağlayıcı analizi ve rulmanın parçalarının analizi ile yapılabilir. Yağlayıcı analizinin yapılabilmesi için rulmanın çalıştığı makinenin durdurulması ve rulmandan yağ örneği alınması gerekir. Bu yağ örneklerinin görüntülerinin büyütülerek içeriğindeki parçacıkların incelenmesi gerekmektedir. Rulman parçalarının analizi için ise rulmanın çalıştığı makineden sökülmesi ve özellikle yuvarlanma yüzeylerinin görüntülerinin incelenmesi gerekir. Bahsedilen her iki yöntemde de makine duruşu söz konusudur. Bu zaman, işçilik ve maddi kayıplar anlamına gelmektedir. Titreşim analizi ve akustik analiz ile rulmanın bağlı olduğu makine durdurulmadan rulman arıza sınıflandırılması yapılabilir. Titreşim analizi en kesin sonuçlar veren ve bundan dolayı en çok kullanılan yöntem olsa da bazı dezavantajları vardır. Bunlardan en önemlileri titreşim algılayıcısının rulmanın montaj bölgesine temas zorunluluğu ve titreşim algılayıcılarının fiyatlarının nispeten pahalı olmasıdır.

Bu çalışmada titreşim analizine alternatif olarak rulman akustik verisi kullanılarak rulman arıza sınıflandırması yapılmıştır. Akustik veri analizi ile rulmanın montaj bölgesine temas zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Akustik veriyi elde etmek için kullanılan mikrofonlu ses kayıt cihazı ise titreşim algılayıcısına göre çok daha ekonomiktir ve mekanik sistem ile doğrudan temas olmadığı için aşınma, yıpranma ve bozulma oranı çok daha düşük olacaktır. Bu avantajlar Akustik sinyaller aracılığı ile rulman kondisyonunu sürekli izleme imkanı yaratmaktadır.

Bu tez çalışmasında Akustik sinyal verileri kullanılarak dört farklı rulman grubu arıza tiplerine göre makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak yüksek başarımlar ile

sınıflandırılmıştır. Akustik verilerin toplanması için bir deney düzeneği oluşturulmuş ve rulmanlar bu deney düzeneğine sıra ile monte edilerek Akustik verileri Stereo olarak kayıt edilmiştir. Kayıt edilmiş Akustik sinyaller 2s'lik parçalara bölünerek Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile Zaman domeninden Frekans domenine dönüştürme yapılmıştır. Burada kritik süreçlerden biri Frekans domenindeki verilerde öznitelik çıkarımıdır. Çok yüksek oranda sınıflandırmanın başarımları bu sürece bağlıdır. Matlab programı kullanılarak kritik öznitelikleri çıkartan yazılım geliştirilmiş ve her örnek için 100 adet öznitelik çıkarılmıştır. Toplam 120 örneklilik veri seti kullanılarak dört farklı Makine Öğrenmesi Tekniği ile Rulman Arıza Sınıflandırılması gerçekleştirilmiş ve yüksek başarımları elde edilmiştir. Yüksek başarımlarının elde edilmesi gelecekte daha geniş rulman arıza tipleri ile çalışılabileceğinin umudunu vermektedir.

Bir makinede çalışan kritik bir rulmanın kondisyonunu akustik sinyaller aracılığı ile temassız olarak 24 saat sürekli izleyen bir sistem düşünülebilir. Nesnelerin interneti teknolojisi aracılığı ile Rulman verisi bulut teknolojisi dünyanın herhangi bir noktasından izlenebilir ve analiz edilebilir. Sürekli olarak Rulman akustik sinyallerini izleyen böyle bir sistem etraftaki başka akustik verileri de izleyebilir ve makinede veya etrafında oluşan anomalileri de tespit edebilir. Bu tezde elde ettiğimiz sonuçlar bize bu imkanların kapısını aralamıştır.

KAYNAKLAR

- Akpınar, H., 2014. *DATA Veri Madenciliği Veri Analizi*. Papatya yayıncılık eğitim. İstanbul.
- Aliustaoğlu C., Ertunç M.H. ve Ocak H., 2008. Arıza Gözlemlemeye Yönelik Rulman Hata Tespit Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analiz. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, 6, 130-135.
- Azgınoğlu, N., 2019. *Çok Katmanlı Algılayıcılar*. <http://www.nuhazginoglu.com/tag/cok-katmanli-algilayicilar/>.(Erişim Tarihi: 22.09.2019)
- Chen Z., Deng S., Chen X., Li C., Sanchez R.V. ve Qin H., 2017. Deep Neural Networks-Based Rolling Bearing Fault Diagnosis. *Microelectronics Reliability* 75, 327-33.
- Dowson, D. ve Hamrock, B.J., 1981. *History of Ball Bearings*. NASA.
- Dragomir, O. E., Gouriveau R., Dragomir F., Minca E., ve Zerhouni N., 2009. Review of Prognostic Problem in Condition-Based Maintenanc. *2009 European Control Conference (ECC)*, 1587-1592.
- Dükkancı A., ve Kırbaş İ., 2018. Rulman Hatalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhis. *International Conderence on Data Science and Applications, Conference Book Volume-1 Abstract Book*, 25-26.
- FAG, *FAG 6203 rulman ölçüleri*. <http://bearingsize.info/catalogue-online/deep-groove-ball-bearings/bearing-6203-fag-obj23583.html>. (Erişim Tarihi: 20.09.2019)
- Castellano G., Fanelli A.M., ve Mencar C., 2004. An empirical risk functional to improve learning in a neuro-fuzzy classifie. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 34, 725-31.
- Gupta, P. ve Pradhan M.K., 2017. Fault Detection Analysis in Rolling Element Bearing: A Review. *Materials Today: Proceedings* 4, 2085-94.
- Han, T., Jiang D., Zhang X., ve Sun Y., 2017. Intelligent Diagnosis Method for Rotating Machinery Using Dictionary Learning and Singular Value Decomposition. *Sensors (Basel, Switzerland)* 17, 689.
- Hurwitz, J., 2018. *Machine Learning For Dummies*, IBM Limited Edition. John Wiley & Sons, Inc. 111 River St. Hoboken.

- ISO, 2017. ISO 15243 Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes. International Standart.
- Khaleghi B., Khamis A, Karray F., ve Razavi S., 2013. Multisensor Data Fusion: A Review of the State of the art. 14.
- Liu, J., Wang W, ve Golnaraghi M., 2010. An Enhanced Diagnostic Scheme for Bearing Condition Monitoring. 59.
- Miao, Q. ve Makis V., 2007. Condition monitoring and classification of rotating machinery using wavelets and hidden Markov models. *Mechanical systems and signal processing* 21, 840-55.
- NSK, 2019. *Rulman Tipleri*, <https://www.nskeurope.com.tr/tr/products/what-s-a-bearing/types.html>. (Erişim Tarihi: 16.08.2019)
- Patterson, J., ve Gibson, A., 2017. Deep Learning, A Practitioner's Approach. O'REILLY.
- Randall, R.B., ve Antoni J., 2011. Rolling Element Bearing Diagnostics—A Tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, 485-520.
- SKF, 2014. Bearing damage and failure analysis. SKF Group 2014.
- SKF, 2018. Rolling bearings. SKF Group. PUB BU/P1 17000/1 EN.
- Şeker, S.E., 2019. Bayes Ağları. Bilgisayar Kavramları. 22 Ağustos 2019. <http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2008/12/21/bayes-aglari-bayesian-network/>.(Erişim Tarihi: 14.08.2019)
- Vapnik, V., 2013. The nature of statistical learning theory. Springer science & business media, New York.
- Wang, D., 2016. K-Nearest Neighbors Based Methods for Identification of Different Gear Crack Levels under Different Motor Speeds and Loads: Revisited. *Mechanical Systems and Signal Processing* 201-8, 70-71.
- Wang D. ve Qiang M., 2015. Smoothness index-guided Bayesian inference for determining joint posterior probability distributions of anti-symmetric real Laplace wavelet parameters for identification of different bearing faults. 345, 250-266.
- Wilson W., 2008. An Intelligent System for Machinery Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 16 (1), 110-22.

Witten, I. H., Frank E. ve Hall M.A., 2011. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. 3rd ed. Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Burlington, MA: Morgan Kaufmann.

Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., ve Haffner P., 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE* 86 (11), 2278-2324.

Yan R., Gao R. ve Chen X., 2014. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. 96, 1-15.

Zhang W., Chuanhao L., Peng G., Chen Y., ve Zhang Z., 2018. A Deep Convolutional Neural Network with New Training Methods for Bearing Fault Diagnosis under Noisy Environment and Different Working Load. *Mechanical Systems and Signal Processing* 100, 439-53.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ayhan Dükkancı
Doğum Yeri ve Yılı : Razgrad / Bulgaristan 1977



<u>Eğitim Durumu</u>	<u>Yıl</u>
Lise : Eskişehir Atatürk Endüstri Meslek Lisesi	1995
Lisans : Kocaeli Üniversitesi - Elektrik Öğretmenliği	2000
Yüksek Lisans :	

<u>Çalıştığı Kurum / Kurumlar</u>	<u>Yıl</u>
1- Bingöl Merkez Endüstri Meslek Lisesi	2000 - 2003
2- Eskişehir Beylikova Çok Programlı Lisesi	2003 - 2007
3- Eskişehir Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2007 - 2019

Yayınları (SCI ve diğer makaleler)

- 1- Development of A Wi-Fi Based Indoor Location System Using Artificial Intelligence Techniques, Data Science and Application, Vol.2, No1, 2019
- 2- Diagnosis of Bearing Faults with Artificial Neural Networks, International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'18)
Özet bildiri, Elektronik, Yalova, 2018
- 3- Development of A Wi-Fi Based Indoor Location System Using Artificial Intelligence Techniques, International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'18)
Özet bildiri, Elektronik, Yalova, 2018
- 4- Designing a web based data acquisition system for battery-powered wireless sensor nodes: WiFiLab, ICENS International Conference on Engineering and Natural Science
Tam metin bildiri, Elektronik, Kiev, 2018
- 5- Otomatik Sıcaklık Kontrollü Tavşan Doğum Kutusu Tasarımı:Nesnelerin İnterneti Uygulaması, International Advanced Researches Engineering Congress-2017
Tam metin bildiri, Elektronik, OSMANİYE, 2017