



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPAY ZEKÂ TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Köksal GÜNDOĞDU

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ**

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 232304023 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Köksal GÜNDOĞDU tarafından hazırlanan “**YAPAY ZEKÂ TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Mekanik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

Üniversite Adı: Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nazlı ÖZSOLAK

Üniversite Adı: Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Semih BENLİ

Üniversite Adı: Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 17/12/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Fazliye Karabörk

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Köksal GÜNDOĞDU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca büyük bir sabırla beni destekleyen, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman her koşulda adına hayat dediğimiz bu yolculukta yüklerimizi birlikte paylaştığımız sevgili eşime, aileme ve canım oğlum Furkan Ege GÜNDOĞDU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak çalışma arkadaşlarım olan Doğuşçay Aksaray Cips Üretim Tesisi teknik bakım ekibine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Köksal GÜNDOĞDU

AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Endüstriyel Sanayi Dönemleri	2
2. BAKIM ONARIM.....	3
2.1 Bakım Yöntemleri.....	4
2.2 Plansız Bakım	4
2.2.1 Arızı (Reaktif) bakım	5
2.3 Planlı Bakım.....	6
2.3.1 Otonom bakım.....	7
2.3.1.1 Temizlik ve kontrol	7
2.3.1.2 Karşı tedbirler.....	8
2.3.1.3 Geçici standartların oluşturulması	8
2.3.1.4 Genel kontroller	8
2.3.1.4 Otonom kontrol	8
2.3.1.5 Standardizasyon	8
2.3.1.6 Tam otonom bakım	8
2.3.2 Periyodik bakım	9
2.3.3 Kestirimci bakım.....	9
3.KESTİRİMCİ BAKIM.....	11
3.1 Ultrasonik İzleme	12
3.1.1 Hava kaçaklarının izlenmesi	13
3.1.2 Rulmanların izlenmesi	14
3.1.3 Buhar kaçağı takibi	15
3.2 Titreşim Analizi	16
3.3 Yağ Analizi	20
3.4 Kızıl Ötesi Analizi(Termografi).....	24
3.4.1 Termal kameralar	25
3.5 Motor Akım Değerlerini İzleme.....	25
3.6 Kestirimci Bakımın Avantaj Ve Dezavantajları	27
4. YAPAY ZEKÂ	29
4.1 Makine Öğrenmesi	29
4.1.1 Denetimli (Supervised) öğrenme	30
4.1.2 Denetimsiz (Unsupervised) öğrenme	31
4.1.3 Yarı denetimli öğrenme.....	31
4.1.4 Pekiştirmeli (Reinforcement) öğrenme	31
4.2 Derin Öğrenme.....	31
4.3 Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis).....	33
5.KALAN FAYDALI ÖMÜR	34
6.MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
6.1 Öznitelik Çıkarma (Feature Extraction).....	38
6.2 Normalizasyon	40

6.3 Temel Bileşenlerin Tespiti	41
6.4 Sağlık Göstergesi	42
7.ARAŞTIRMA BULGULARI.....	44
8.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53



YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPAY ZEKÂ TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMASI

Köksal GÜNDOĞDU

Aksaray Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ÖZET

Üretim sistemlerinin verimlilikleri söz konusu olduğunda bakım yaklaşımları son derece önemli bir role sahiptir. Geleneksel bakım yaklaşımları kısıtlı bir başarı sağlamış olsa da günümüz endüstriyel teknolojilerinin özellikle de Endüstri 4.0'ın itici gücü ile birlikte makinelerden belirli standartlar ile veriler gerçek zamanlı okunabilmektedir. Nesnelerin interneti (IoT) geliştikten sonra endüstriyel alanda yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. IoT sayesinde herhangi bir ekipmanın veya sistem üzerinden sıcaklık, nem, titreşim gibi veriler toplanıp işlendiğinde ekipman ömrü hakkında önemli bilgiler verir. Toplanan bu veriler makine öğrenmesi (Machine Learning - MÖ) yöntemi ile bakım zamanları minimize edilebilmekte ve arıza meydana gelme periyodu tahmin edilerek arıza oluşmadan müdahale edilebilmektedir. Kestirimci bakım adı verilen bu strateji zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlar.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Makine Öğrenmesi, Periyodik Bakım, Arıza Bakım, Otonom Bakım ve Toplam Üretken Bakım.

Aralık, 2025; 53 sayfa

M.Sc. THESIS
ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED PREDICTIVE
MAINTENANCE APPLICATION

Köksal GÜNDOĞDU

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department Of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ABSTRACT

When it comes to the efficiency of production systems, maintenance approaches play an extremely important role. Although traditional maintenance approaches have achieved limited success, today's industrial technologies, particularly the driving force of Industry 4.0, enable data to be read in real time from machines according to specific standards. Following the development of the Internet of Things (IoT), it has become widely used in the industrial sector. Thanks to IoT, when data such as temperature, humidity, and vibration is collected and processed from any equipment or system, it provides important information about the equipment's lifespan. This collected data can be used with machine learning (ML) methods to minimise maintenance times and predict failure periods, enabling intervention before failures occur. This strategy, known as predictive maintenance, offers advantages in terms of time and cost.

Keywords: Predictive Maintenance, Machine Learning, Periodic Maintenance, Breakdown Maintenance, Autonomous Maintenance and Total Productive Maintenance.

December, 2025; 53 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sanayi devriminin gelişimi	2
Şekil 2.1. Bakım sistemlerinin gelişimi	3
Şekil 2.2. Bakım yöntemleri	4
Şekil 3.1. Kestirimci bakım yöntemlerinin uygulama oranları	12
Şekil 3.2. Hava kaçağının izlenmesi	13
Şekil 3.3. Ultrasonik rulman izleme	15
Şekil 3.4. Rulman durumunun incelenmesi	15
Şekil 3.5. Buhar kapanı (kondestop) testi	16
Şekil 3.6. Basit harmonik hareket	17
Şekil 3.7. Titreşim parametreleri grafiği.....	18
Şekil 3.8. Sinyal çevrim şeması	18
Şekil 3.9. Titreşim analizi	20
Şekil 3.10. Manuel yağ numunesi alma	22
Şekil 3.11. Yağ analiz raporu.....	23
Şekil 3.12. Elektrik kontaktöründeki gevşekliğin termal kamera ile tespiti	24
Şekil 3.13. Elektrik motorlarının arıza dağılımı	26
Şekil 3.14. Asenkron motorun iç yapısı ve parçaları	27
Şekil 5.1. Ekipmanın bozulma profili	35
Şekil 7.1. İvme sensörü montaj pozisyonu	45
Şekil 7.2. SKF CMSS 2200 ivme ölçer sensör	45
Şekil 7.3. İşlenmemiş titreşim sinyali (zaman alanı)	46
Şekil 7.4. Güç spektral yoğunluğu (frekans alanı).....	46
Şekil 7.5. Anlık spektrum grafiği.....	47
Şekil 7.6. KFÖ tahmini (trend grafiği).....	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Periyodik bakım formu	9
Çizelge 3.1. Kestirimci bakım avantaj ve dezavantajları	36
Çizelge 3.1. Kalan faydalı ömür için istatistiksel öznitelikler	48



SİMGELER VE KISALTMALAR

AR-GE	Araştırma Geliştirm
CPM	Cycles per Minute
DL	Deep Learning
IoT	Internet of Things
KFÖ	Kalan Faydalı Ömür
ML	Machine Learning
MTBF	Mean Time Between Failure (İki arıza arasındaki ortalama süre)
MTTR	Mean Time to Repair (Ortalama onarım süresi)
OB	Otonom Bakım
PCA	Principal Component Analysis
PHM	Prognostics & Health Management
RNN	Recurrent Neural Networks
RO	Rastgele Orman
RSM	Root Mean Square
SOM	Self Organizing Map
TBA	Temel Bileşen Analizi
TPM	Toplam Üretken Bakım
ÜR-GE	Üretim Geliştirme
YSA	Yapay Sinir Ağları
YZ	Yapay Zekâ

1. GİRİŞ

Sanayileşme çağı dünyanın gelişimi açısından çok önemlidir. Sanayileşmeyle birlikte geliştirilen endüstri ürünleri hayatı oldukça kolaylaştırmış ve vazgeçilmez hale getirmiştir. Bu vazgeçilmez ürünlerin üretildiği üretim sanayisinde, işletme maliyetlerinin büyük bir bölümü bakım maliyeti olarak karşımıza çıkmaktadır. Bakımla ilgili maliyetler, işletme maliyetlerinin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla farklı bakım yöntemleri bulunmuş ve günümüzde de halen bu yöntemler uygulanmaktadır. Arıza tahmini, arızaların bulunması ve bakım planının yapılabilmesi için üretim yerlerinde önemli konulardan bir tanesidir.

İşletmelerde bakımlar genellikle arıza meydana geldikten sonra plansız bir şekilde gerçekleşmektedir. Plansız oluşan arızalarda bakım esnasında zaman kaybı çok fazla olmakta ve bu durum ciddi üretim kayıplarına neden olmaktadır. Çoğu sektörde bitmiş ürün elde etmek için birden fazla makine eş zamanlı olarak birlikte çalışmaktadır. Üretim operasyonlarının birbirine bağlı olması ve sistemin arıza oluşturmada çalışması oldukça önemlidir. Plansız olarak yapılan bakımlar nedeniyle farklı makineler veya parçalar da hasar alabilmektedir. Üretimin durması veya aksaması sistemin dengesinin bozulmasına ara ürünlerin birikmesine, üretimin yetişmemesine ve personelin boşa çıkmasına sebep olabilmektedir. Bunların her biri birer maliyettir. Kötü yapılan bakım planlaması, ürünlerin zamanında teslim edilememesinin yanı sıra firmanın hem saygınlığını yitirmesi hem de maddi açıdan kayıplar yaşanmasına neden olmaktadır.

Endüstri 4.0 çağında yapay zekâ, üretim sektörünü köklü biçimde şekillendirmektedir. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things - IoT) ve makine öğrenmesi yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte, üretim süreçleri artık makineler, sensörler ve insanlar arasında gerçek zamanlı veri alışverişi ve iş birliği temelinde yürütülmektedir. Bu sayede fiziksel süreçler anlık olarak izlenebilmekte ve sistemler, elde edilen veriler doğrultusunda akıllı kararlar alabilmektedir. Yapay zekâ uygulamaları, üreticilere geçmiş deneyimlerden öğrenebilen makine öğrenimi algoritmaları aracılığıyla ekipman arızalarını önceden tahmin etme, üretim hatalarını tespit etme, duruş sürelerini en aza indirme ve tedarik zinciri süreçlerini optimize etme olanağı sunmaktadır [1]. Bu teknolojilerin son uygulamalarından biri de kestirimci bakım (predictive maintenance) sistemleridir. Tahmine dayalı bakım, üretim ekipmanının bakıma ihtiyaç duyacağı tam zamanı tah-

min etmek için endüstriyel IoT teknolojilerini makine öğrenimi ile birleştirerek problemlerin çözülmesine ve uyarlanabilir kararların zamanında alınmasına olanak tanır [2].

1.1 Endüstriyel Sanayi Dönemleri

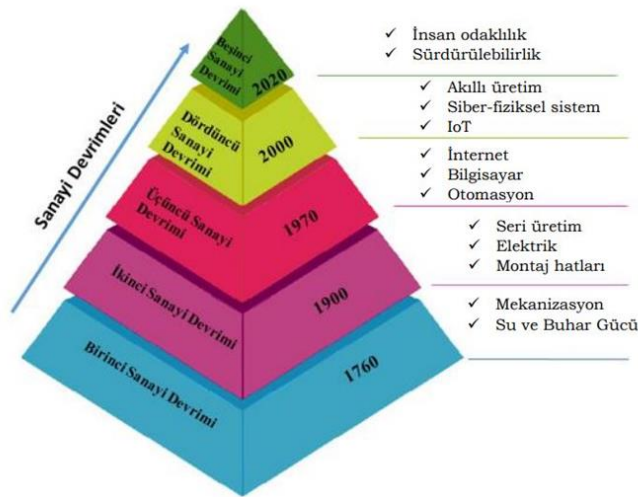
Endüstri 1.0, 18.yüzyılda (1760-1840) buhar gücünün kullanımı ve üretimin makineleşmesiyle başlayan süreci ifade etmektedir.

Endüstri 2.0, 19. yüzyılda elektrik üretimi ve üretim hatlarının kurulmasıyla başlayıp seri üretimin devreye girdiği süreçtir.

Endüstri 3.0, 20. yüzyılda (1970'lerden itibaren) otomasyon döneminin başladığı, beden gücü yerine programlanabilir mantıksal denetleyicilerin (PLC) kullanıldığı, elektronik ve bilgi teknolojilerinin devreye girişi bu yıllardan sonra başlamıştır.

Endüstri 4.0, cihazların hem kendi aralarında hem de insanlar arasında iletişim kurduğu, ayrıca uzaktan erişilebildiği ve iyileştirici aksiyonlar alabildiği, son derece karmaşık ve otomatikleştirilmiş üretim sistemleri, hizmetleri ve iş süreçleri için kullanılan genel bir terimdir [3].

Endüstri 5.0, insan ve robotların iş birliği içinde çalıştığı, kişiselleştirilmiş ve sürdürülebilir üretim süreçlerine odaklanan yeni bir sanayi devrimidir. Bu aşama, teknolojiyi insan merkezli yaklaşımlarla birleştirerek üretim süreçlerini daha verimli ve esnek hale getirmeyi amaçlar. Sanayi devriminin gelişimi aşağıda Şekil 1.1'de verilmiştir.



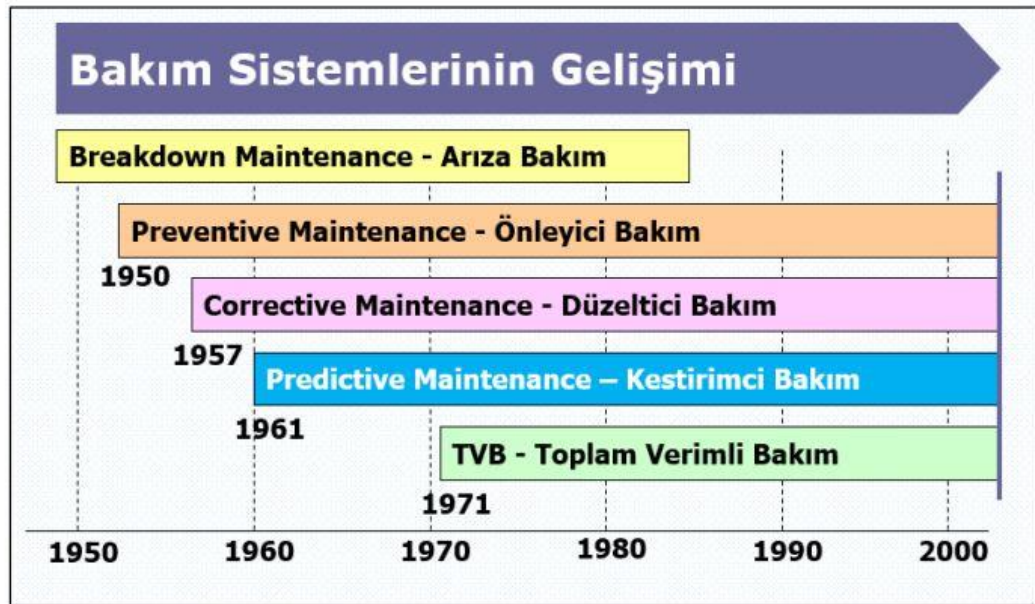
Şekil 1.1. Sanayi devriminin gelişimi [4].

2. BAKIM ONARIM

Avrupa standartlarına göre, bakım, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca tutması veya gerekli işlevi gerçekleştirebileceği bir durumda geri getirmesi veya eski haline getirmesi amaçlanan tüm teknik, idari ve yönetsel eylemlerin birleşimi olarak tanımlanır [5].

Makinelerin verimsiz çalışmasının nedenlerinin başında ani oluşan arızalar gelmektedir. Düşük verimlilikte çalışan bir makineden de, hızlı, kaliteli ve ekonomik bir üretim beklemek yanlış olur. Ancak, planlı bir bakım metodu uygulamak verimi büyük ölçüde arttırmamıza yardımcı olacaktır.

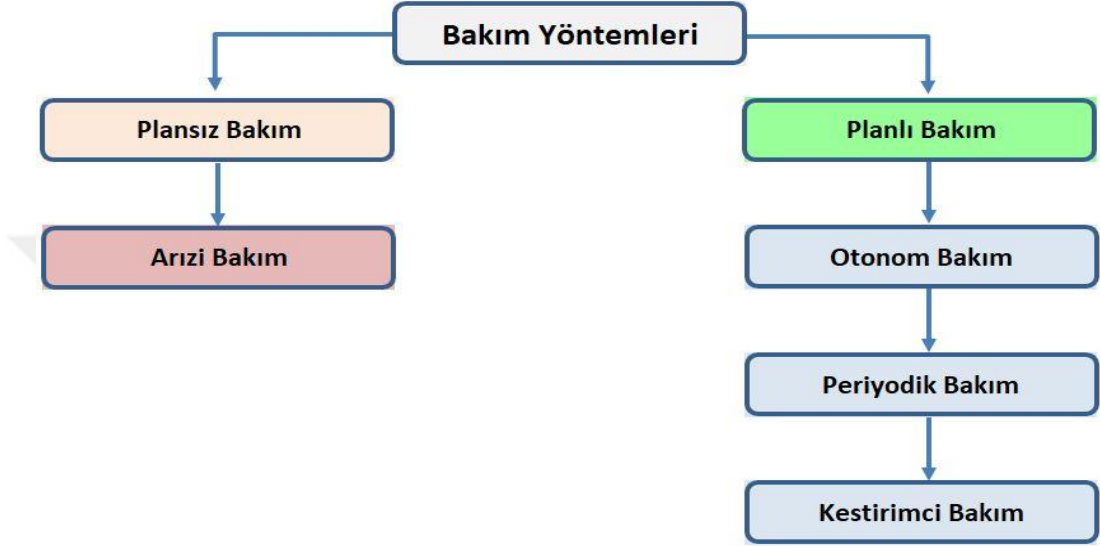
Fabrikalardaki en önemli bölümlerden birisi bakım-onarım bölümü olup, üretimin aksamadan devam ettirilebilmesi, makine ve ekipmanlarda meydana gelen ani arızaların giderilmesi ve arızaların tekrarlamaması için periyodik bakımlarının yapılması, işletmenin bina ve yardımcı tesislerin bakımı ve işletilmesi ile makinelerin montaj, demontaj ve yer değiştirmesi gibi görevleri olan bu bölüm, çoğunlukla makinelerin mekanizmasını geliştirecek ya da etkinliğini ve verimliliğini arttıracak yeni tasarımlar yapılması, imalatı ve montajı, çevre kirliliğine karşı önlemler alınması, iş güvenliği önlemlerinin uygulanması, hurda ve atık malzemelerin yönetimi, bina ve tesislerin yangından korunması gibi işlerden de sorumlu tutulur. Bakım sistemlerinin tarihi gelişimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Bakım sistemlerinin gelişimi [6].

2.1 Bakım Yöntemleri

Bakım tekniği, bir sistemdeki teknik personellere ait olması gereken gereksinimlerin olması gereken durumunu korumak veya bu durumu yeniden kazandırmak; benzer şekilde, teknik personellerin mevcut durumlarını gözlemleyerek değerlendirmek için gerekli önlemler topluluğudur. Bakım sistemlerinin şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Bakım yöntemleri.

2.2 Plansız Bakım

Plansız bakım, ya da diğer bir ifadeyle arızı bakım, ekipman veya sistemde bir arıza ortaya çıktıktan sonra gerçekleştirilen onarım ve bakım faaliyetleridir. Hatta o anda başka küçük tip arızaların fark edilmediği, daha sonra bu tip arızaların daha büyük arızalara ve duruşlara sebep olduğu görülmektedir [7].

Bu yöntem, ellerinde çok sayıda yedekleri bulundurulmuş ve aşırı pahalı olmayan makinelerle üretim yapan tesis ve atölyelerde kullanılmaktadır. Beklenmedik bir anda aniden oluşan bir arıza nedeniyle makine durduğunda yapılan bakım ve onarımları kapsamaktadır. Bu bakım yönteminde en büyük problem, hasarın ne zaman meydana geleceği bilinmediğinden, gerçek bir üretim planı yapmanın mümkün olmayışdır [8].

Plansız bakım veya arızı bakım, temelde arıza meydana gelene kadar kullanılması mantığına dayanan bir bakım yöntemidir. Bu bakım yönteminin amacı; Arıza meydana gelene kadar ekipman kullanılır, arızalandıktan sonra teknik personelin bilgi ve tecrübesi kadar tamir edilme yoluna gidilir. Meydana gelen arızalar bakım personelinin ta-

mir edemeyeceği kadar büyük boyutlarda ise ekipman veya makina servisi ile görüşülerek servis personelinden destek talep edilir. Ekipmanın arızada kalma süresi veya arıza onarım süresi arızanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Ekipmanların arızada kalma süresi boyunca ciddi üretim ve enerji kayıpları meydana gelecektir. Bu kayıplar planlı bakım uygulamaları ile karşılaştırıldığında arıza bakımının daha fazla işgücü, zaman ve maliyet kaybına neden olduğu görülecektir. Plansız bakım arıza oluşuktan sonra yapılan düzeltici işlemleri kapsamaktadır. Plansız bakım oldukça maliyetli ve riskli bakım yapma metodudur. Bu bakım yönteminin en büyük dezavantajı, arızanın ne zaman ortaya çıkacağı belli olmadığından hem gerçek bir üretim planı yapılmasına hem de bakım planı yapılmasına izin vermemektedir.

Plansız bakım sürecinde:

- a) Üretim veya operasyon süreçlerinin herhangi bir aşamasında beklenmedik arızalar ortaya çıkabilir,
- b) Arızaların oluşması beklenir,
- c) Plansız duruşlar uzun süreli olabilir ve bu durum üretim planlamasında aksamalara neden olur,
- d) Yedek parça ve tedarik maliyetleri yüksektir,
- e) Arızaların giderilmesi sırasında ek iş yükü olduğundan, fazla mesaiye ihtiyaç duyulur,
- f) Üretim ve bakım kaynaklarının etkin kullanılmaması sonucu ciddi ölçüde kaynak israfı yaşanır,
- g) Bu bakım metodunun yönetimi stresli ve zordur,
- h) Gereğinden fazla ve plansız işgücü gerektirir,
- i) Arıza nedeni ile enerji kayıpları meydana gelir,
- j) Beklenmedik arızalar, iş güvenliği açısından risk oluşturabilir ve yaralanma ya da can kaybına neden olabilir.

2.2.1 Arıza (Reaktif) bakım

Arıza (Reaktif) bakımın temelinde “bozulana kadar çalıştırın” mantığı vardır. Ekipman veya makine bozulana kadar kullanılır, bozulduktan sonra bakım personelinin bilgi ve

tecrübesinin yettiği ölçüde tamir edilir. Teknik elemanın tamir edemeyeceği durumlarda ise ekipman servisi ile irtibat kurularak arıza giderilmeye çalışılır. Fakat ekipmanların beklenmedik anda bozulmaları ürün maliyetlerinde artışa sebep olur. Çünkü ekipmanın onarım süresi boyunca üretim kayıpları meydana gelir. Ayrıca arızalanan ekipmanlar senkronize çalıştığı diğer parçalara da zarar verebilir. Üretim hattında makinenin işlem yaptığı andaki parçaya da zarar vererek o parçayı kullanılmaz hale getirebilir. Ekipmanlara planlı ve periyodik şekilde bakım yapılmadığı için ekipman bozuluncaya kadar geçen sürede daha fazla enerji tüketimi gerçekleşecektir.

Dünya genelinde hâlen en çok kullanılan bakım onarım metodu olarak görünse de, gelişen teknolojiye ayak uydurmanın gerekliliğini fark eden ve bakım yönetim sistemlerini kurmaya başlayan işletmelerin hızla terk ettiği bu metodun temel avantajları, bakım personeli sayısının az olması ve görünen maliyetinin düşük olmasıdır. Bunun yanı sıra bakım onarım personelinin doğru yer ve zamanda kullanılmaması, makinenin arızalanması sonucunda başka bir arızanın ortaya çıkma olasılığı, parça değişimi ve/veya tamir maliyeti, yoğunlukla fazla mesai yapılması gereği ile ortaya çıkan fazladan işçilik ücreti ve beklenmedik zamanlarda meydana gelen arızalar sebebi ile oluşan plansız duruşlar sonucu artan maliyetler gibi dezavantajları vardır. Yine de kritik olmayan, ucuz ve/veya bozulması halinde tamir edilene kadar üretimi çok fazla etkilemeyecek ekipmanlar için en uygun bakım metodu olarak kullanılabilir.

2.3 Planlı Bakım

Planlı bakım stratejisi; periyodik bakım, önleyici bakım ve kestirimci bakım olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir. Bu bakım uygulamaları, ekipman ve makinelerin güvenilirliğini ile dayanıklılığını en düşük maliyetle sürdürmeyi hedefler. Başka bir ifadeyle planlı bakım, üretim hatlarında kullanılan ekipman ve makinelerin belirlenen tolerans sınırları içerisinde çalışmasını sağlamak ve işlevsel özelliklerinin sürekliliğini korumayı amaçlayan bir yaklaşımdır [9].

Planlı bakımların yapılmasının amacı arızaların henüz meydana gelme aşamasındayken tespit edilmesi ve ekipmanların arıza yapmadan çalışmalarının sağlanmasıdır. Zaten %100 ekipman verimliliği, sıfır arıza, sıfır duruş, düşük ortalama onarım süresi (Mean Time To Repair) değeri ve iki arıza arasında geçen zaman (Mean Time Between Failure) aralığının uzaması gibi kavramlar ne kadar önemli ise planlı bakım terimleri de o kadar önemlidir. Planlı bakımlar ile ekipmanların verimlilik durumları en üst seviyelere çıkarılabilmesi için ekipmanların mutlaka alt sistemleri dahil tüm parçalarının

kontrol altında tutulması gerekir. Parça kullanım ömürleri arttırıldıktan ve parça ömürleri konusunda hassasiyet sağlandıktan sonra planlı bakım faaliyetleri daha iyi sonuç vermeye başlayacaktır.

Planlı bakım altyapısı olan bir bakım yönetim sistemi, özellikle seri üretim yapan işletmeler için vazgeçilmez bir gerekliliktir. Bozulana kadar çalıştır bakım yönetimi anlayışından, planlı bakım moduna geçildiğinde şu faydalar görülür:

- a) Maksimum kullanılabilirlik ve yüksek verimlilik,
- b) Beklenmeyen arızaların önceden öngörülmesi,
- c) Ekipmanların ömürlerinin uzatılması,
- d) Bakım maliyetlerinin azalması,
- e) Bakım, mühendislik ve üretim birimleri arasında koordinasyon ve takım çalışmasının gelişmesi.

2.3.1 Otonom bakım

Otonom; kendi kendine yapılabilir anlamına gelir. Bu açıdan bakıldığında Otonom Bakım (OB) kendi kendine bağımsız olarak yapılan bakım uygulamalarıdır. Otonom Bakımın uygulayıcısı makineleri kullanan operatörlerdir.

Otonom Bakım, operatörlerin makinesini sahiplenerek küçük duruşların önlenmesini; makineye müdahale edemediği ileri seviye konularda ise arıza oluşmadan bakım ekibine haber vererek ciddi problemler yaşanmadan makinenin onarılmasını sağlar. Japonca Jishu Hozen olarak adlandırılan Otonom Bakım konusu, Toplam Üretken Bakım (TPM)'in kritik bir sütunudur. Otonom bakım 7 aşamadan oluşur.

2.3.1.1 Temizlik ve kontrol

Ekipman ve üretim alanının detaylı bir şekilde temizlenmesi ile başlar. Temizlik sırasında, ekipmanın üzerindeki kir, boya, toz, yağ lekesi gibi yabancı maddeler giderilir. Temizlik, sadece görsel bir işlem olmanın ötesinde, operatörlerin makineleri elle temizlemesi sayesinde küçük kusurların ve anormalliklerin fark edilmesini sağlar.

2.3.1.2 Karşı tedbirler

İlk adımda tespit edilen kirlilik ve saçılma kaynakları yok edilir veya minimize edilir. Ayrıca, erişilmesi güç bölgelerin temizliği kolaylaştırılır. Kaizen çalışmalarıyla temizlik ve kontrol süreçlerinin süresi azaltılır. Bu sayede operatörlerin motivasyonu artırılır ve ekip ruhu pekiştir.

2.3.1.3 Geçici standartların oluşturulması

Bu adımda, operatörlere yağlama noktaları, yağ seviyesi kontrolü ve yağ takviyesi ile ilgili eğitimler verilir. Elde edilen deneyimler doğrultusunda geçici otonom bakım standartları oluşturulur ve bu standartlar sürekli olarak revize edilir. Operatörler, ekipmanın kötüye gitmesini durdurmak ve arıza öncesi anormallikleri fark etmek için temizlik, kontrol ve yağlama faaliyetlerini uygularlar.

2.3.1.4 Genel kontroller

Bu adımda, operatörler ekipmanın fonksiyon ve yapısını derinlemesine öğrenirler. Günlük kontroller yapılır ve PUKÖ (Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem Al) döngüsü uygulanır. Operatörler, ekipmanın her parçasıyla ilgili bilgi sahibi olurlar ve otonom bakım yeteneklerini artırır.

2.3.1.4 Otonom kontrol

Bu aşamada, temizlik ve kontrol faaliyetlerinin verimliliği artırılır. Ürün kalitesine odaklanılır ve operatörlere bu konuda ek eğitimler verilir. Makinelerin ilk günlük performanslarına ulaşması sağlanır. Operatörler, ekipmanın ürün kalitesine nasıl etki ettiğini anlayarak daha bilinçli çalışır.

2.3.1.5 Standardizasyon

Otonom bakım yönetim koşulları belirlenir ve yönetim mekanizması oluşturulur. İş standartları, iş akış planları ve veri kayıt kriterleri geliştirilir. Operatörlerin hareketlerine odaklanılarak işin yapılması kolaylaştırılır ve kayıplar yok edilir. Bu adım, tüm operatörlerin ortalama düzeydeki performansını artırır.

2.3.1.6 Tam otonom bakım

Son adımda, elde edilen başarıların sürdürülebilirliği sağlanır. Operatör geri bildirimleri ile yeni ekipman ve ürün geliştirme desteklenir. Üretim sahası temiz, düzenli olur. İlk günlük performanslarına ulaşmış ekipmanlar ve "sıfır kaza, sıfır arıza, sıfır hata ve sıfır duruş" felsefesi benimsenmiş operatörlerle kayıpsız üretim gerçekleştirilir.

2.3.2 Periyodik bakım

Periyodik bakım, işletmenin varlıklarının işlevselliği ve verimliliği için makine ve ekipmanların geçmiş bakım kayıtlarının ve çalışma şartlarının değerlendirilip zaman planlarına dayalı olarak durdurulup bakım onarım şemalarına göre bakım yapılması ve değişecek yedek parçadan işçiliğe kadar tüm aşamaların planlanıp hazır bulundurulduğu bakım yönetimidir. Periyodik bakım; ekipmanın arıza çıkarma ihtimalini azaltmaya yönelik uygulanan, zamanı ya da kullanım alışkanlığını temel alarak yapılan bakım yöntemi olarak tanımlanır. Periyodik bakım işletmelerde en çok kullanılan bakım türüdür. Örnek periyodik bakım formu şekil Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Periyodik bakım formu.

FİRMA LOGOSU				FİRMA İSMİ				Yayın Tarihi		1.01.2014																							
								Rev Tar./No		11.01.2022 / 22																							
								Doküman No																									
MEKANİK PERİYODİK BAKIM FORMU						Duruş Gerektirenler		TOPLAM		FREKANS		ÇALIŞMA ZAMANI		19. HAFTA		46. HAFTA		47. HAFTA		48. HAFTA		49. HAFTA		50. HAFTA		51. HAFTA		52. HAFTA		Adı Soyadı		Kullanılan Zaman	
TESİS NO	TESİS ADI	MAKİNA ADI	İş Güvenliği Ürün Güvenliği	YAPILACAK OPERASYON																													
001	PC-21	Paletli Taşıma Elevatörü	X	Elevatör genel kontrolünü yapınız. Rulmanların yağlamasını yapınız.		120	H	10	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
001	PC-21	Paletli Taşıma Elevatörü	X	Redüktör yağ seviyesini kontrol ediniz. Eksikse talimata göre tamamlayınız.		240	1A	20	1A						1A																		
001	PC-21	Paletli Taşıma Elevatörü	X	Redüktör bakımını talimata göre yapınız.		180	1Y	180			2A																						
001	PC-21	Paletli Taşıma Elevatörü	X	Elevatör paletlerini ve pimleri kontrol ediniz. Aşınmışsa yenileriyle değiştiriniz.		180	2A	30																									
001	PC-21	Paletli Elevatör Sonrası Bez Bant	X	Bant kontrollerini yapınız. Rulmanları yağlayınız.		780	H	15	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
001	PC-21	Paletli Elevatör Sonrası Bez Bant	X	Redüktör yağ seviyesini kontrol ediniz. Eksikse talimata göre tamamlayınız.		240	1A	20					1A																				
001	PC-21	Paletli Elevatör Sonrası Bez Bant	X	Redüktör bakımını talimata göre yapınız.		180	1Y	180																									
001	PC-21	Düzenli Besleme	X X	Helezonların yataklarını ve rulmanlarını yağlama talimatına göre yağlayınız.	X	2080	H	40	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	
001	PC-21	Düzenli Besleme	X X	Helezonların dişli ve zincirlerini yağlama talimatına göre yağlayınız.	X	120	1A	10																									

ADI SOYADI	TARİH	İMZA
FORMEN:		
TARİH:		
İMZA:		

2.3.3 Kestirimci bakım

Kestirimci bakım; ekipmanın ve bileşenlerinin sorun çıkarmadan önce durumlarının izlenmesi ve verilerin analitik yöntemlerle analiz edilmesiyle yaşam ömürlerinin öngörülüp arıza çıkarma ihtimallerini değerlendirerek zamanında önlem almaktır. Böylece ekipman belirli parametreler açısından izlenir ve ileriki dönemde “hangi arızaları çıkarma ihtimalini sergiliyor” kontrol edilir.

Kestirimci bakım, ekipman parametrelerinin durumuna bağlı olarak arıza riskini azaltarak, hizmet ömrünü artırmayı amaçlar [10].

Kestirimci bakımın iki amacı vardır. Bunlardan birincisi ekipmanın çıkarması muhtemel arızayı belirlemek, ikincisi ise bu arızanın büyümesini engellemek adına önceden müdahale etmektir. Temel olarak kestirimci bakımın periyodik bakımdan ayrıldığı nokta bakımın zaman bazlı değil de durum bazlı olmasıdır.

Kestirimci bakımın amacı, ekipmanın çalışma durumunu izleyerek ve ekipman arızasının ne zaman ortaya çıkabileceğini tahmin ederek sıfır arıza üretimi öncülüğünde arıza süresini ve bakım maliyetini azaltmaktır. Gelecekteki potansiyel arızalar için tahmin yoluyla arıza gerçekleşmeden önce bakımın planlanmasını sağlamaktadır. İdeal olarak, bakım programı bakım maliyetini en aza indirmek ve sıfır hatalı üretime ulaşmak için optimize edilmektedir.

Kestirimci bakım, izlenen ekipmanlardan veri alınarak, bozulma gerçekleşmeden bakımın doğru ve yeterli bir biçimde yapılmasını sağlar. Kestirimci bakım %12 uygulanma yüzdesi ile bakım çeşitliliğinde son sırada yer alır. Oysa Kestirimci Bakım, getirdiği fırsatlarla işletmeler için birçok olanak sağlar. Kestirimci Bakım kısaca, çeşitli analizler sonucu arıza yaşanmadan sistem için önlemler alınmasıdır. Kestirimci bakım Türkiye’de ilk olarak ODTÜ’de 3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat kongresinde ortaya çıkmıştır.

Yapılan anket çalışmalarına göre Kestirimci Bakım uygulayan firmaların işletmelerinde aşağıdaki faydaları gördüğü belirlenmiştir;

- Bakım faaliyetlerinde azalma: % 25 -30
- Bozulmalarda azalma % 35 - 45
- Üretimde artış: %20-25
- Yatırımın geri dönüş miktarı: 10 kat artmıştır.

3.KESTİRİMCİ BAKIM

Kestirimci bakım (KB); makine, ekipman ve üretim hatlarının mevcut durumları izlenerek toplanan verilerin analizi sonucu, arızasız çalışma sürelerini, arıza olasılıklarını ve bu arızanın ne zaman gerçekleşeceğini saptamayı içerir. Bu saptamalar doğrultusunda, bir aksaklık yaşanmadan önce zamanında önleyici tedbirlerin alınması sağlanır. Bu metodoloji ile ekipmanlar üretici firmalarca belirlenmiş tolerans değerleri dahilinde izlenir; bu limitlerin dışına çıkmaya başladığı an, detaylı takibe alınarak, gelecekte hangi tür arızaları verebileceği öngörülür. Kestirimci bakımın iki temel hedefi bulunmaktadır: bunlardan ilki ekipmanların potansiyel olarak vereceği arızayı erkenden belirlemek, diğeri ise bu arızanın büyümesini ve daha ciddi hasarlara yol açmasını önlemek adına önceden tedbirler almaktır.

Günümüzün ilgi çekici bakım yaklaşımlarından biri olan kestirimci bakım, ekipmanların durumundaki parametrelerinin mevcut durumunu değerlendirerek, arıza olasılığını artırmadan makinelerin ve ekipmanların ömrünü optimize edebilmek için uygun görevlerin yerine getirilip getirilmediğini ölçen bir bakım türüdür [11]. Bir başka terime göre, Kestirimci bakım; makine ve ekipmanların çalışma koşullarını, yapılan ölçüm ve analizlerin sonuçlarını değerlendiren, olumsuz bir durum saptandığında önlem olarak gerekli planlamaların yapılmasını sağlayan bir bakım stratejisidir [12].

Daha kapsayıcı bir ifadeyle kestirimci bakım; “Ekipmanların anlık parametrelerinin ölçülmesini, bu verilerin kabul görüş mühendislik standartları ve tolerans sınırları ile karşılaştırılmasını, analiz edilip yorumlanmasını ve böylece arızalara neden olabilecek kök sebepleri önceden tespit ederek bu problemlerin ekonomik bir şekilde etkisiz hale getirilmesi ve düzeltilmesi çalışmalarının tamamı” olarak tanımlanır [13].

İşletmelerde yüksek güvenilirlik seviyesine ve “sıfır arıza” hedefine ulaşmak için kestirimci bakım yaklaşımının çeşitli yöntemleri kullanılmalıdır. Bakım ekipleri ne kadar deneyimli ve ön görülmesi olursa olsunlar, yalnızca kendi duyu organlarıyla algılayabildikleri sınırlar dahilinde arıza tespiti yapabilirler. Bu eşğin altındaki, çok daha hassas belirtileri yakalamak, tespit etmek ve yorumlamak için ise özel kestirimci bakım yöntemlerinden faydalanılmaktadır [14]. İşletmeler aşağıdaki Şekil 3.1’de verilen yöntemlerden birini uygulayabileceği gibi daha kapsamlı bir kestirimci bakım programı oluşturmak için birden fazlasını da bir arada kullanabilirler:

- a) Ultrasonik İzleme,
- b) Titreşim Analizi,
- c) Yağ Analizleri,
- d) Kızıl Ötesi Termografi /İnfrared izleme,
- e) Motor Akımı İzleme



Şekil 3.1. Kestirimci bakım yöntemlerinin uygulama oranları.

3.1 Ultrasonik İzleme

Ultrasonik ses, insanların işitme sınırının üzerindeki frekanslara sahip ses dalgalarını ifade eder. İnsan kulağı genellikle 20 Hz ile 20 kHz arasındaki sesleri duyabilirken, birçok kişi 16.5 kHz üzerindeki sesleri algılayamaz. Duyulabilir seslerin dalga boyu 1.9 cm ile 17 m arasında değişirken, ultrason cihazlarının yakaladığı dalga boyu 0.3 cm - 1.6 cm gibi çok kısa aralıktadır ve bu nedenle insanlar tarafından işitilemez [15]. Bu nedenle insan kulağının algılayamadığı frekansları saptayabilen izleme cihazları tasarlanmıştır. Bu cihazlar çevreden gelen frekansları kolaylıkla tespit eder; ardından bir dizi elektronik filtreleme işlemi uygulayarak bu seslerin insanlar tarafından da işitilebilir hale gelmesini sağlar. Ultrason izleme sistemlerinin başlıca üstünlüğü, ses takibi için mutlaka sessiz bir ortama ihtiyaç duymamasıdır. Yoğun gürültünün hakim olduğu endüstriyel alanlarda bile duyulabilir seslerin arasından çok düşük seviyedeki ultrasonik sesleri başarıyla ayıklayarak anlamlı verilere dönüştürme kapasitesine sahiptir.

Ultrason tekniği 40 yılı aşkın bir süreden beri durum izleme alanlarında kullanılmaktadır [16]. Kestirimci bakım yöntemlerinden biri olan ultrasonik izleme işletmelerin

önemli kazançlar elde etmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu kestirimci bakım yönteminde titreşim analizine benzeyen ilkeler kullanılır. Ultrasonik izleme ile makine, ekipman ve üretim hatları tarafından üretilen olağan dışı gürültüler dinlenerek arızaların tespit edilmesine imkan tanır. Ultrasonik izlemede titreşim analizinin aksine daha yüksek frekanslar izlenir [17].

3.1.1 Hava kaçaklarının izlenmesi

İşletmelerde basınçlı havanın etkin bir şekilde yönetilememesi, kritik bir enerji kaynağının büyük ölçüde israf edilmesine yol açar. Yapılan testlere göre, üretilen basınçlı havanın yaklaşık olarak %25 ile %35’lik önemli bir bölümü kaçak olarak kaybedilmektedir [16]. Bu kayıp enerji göz ardı edilmemesi gereken yüksek maliyetler yaratmaktadır. Basınçlı hava sızıntılarının olduğu bölgelerde oluşan türbülans, şiddetli ultrasonik dalgaların yayılmasına neden olur. Çevre gürültüsünden ayrılan bu ultrasonik dalgalar, özel ultrason algılayıcıları kullanılarak kolaylıkla tespit edilebilir. Aşağıda Şekil 3.2’de verilen bu izleme yöntemi, yalnızca hava kaçaklarıyla sınırlı kalmayıp, diğer tüm gaz sızıntılarının tespitinde de etkin bir şekilde kullanılabilir [18].

Taşınabilir ultrason sistemleri sayesinde basınçlı hava sızıntılarının yanı sıra vakum, buhar, nitrojen ve bazı soğutucu gaz kaçaklarını da bulmak mümkündür [16]. Vakum sızıntılarının maliyeti, basınçlı hava kaçakları ile benzer düzeyde olduğundan, bu tür arızaların da ultrasonik yöntemlerle sürekli izlenmesi ve önleyici tedbirlerin alınarak arızaların önceden tespit edilip giderilmesi gerekmektedir [18].



3.2. Hava kaçağının izlenmesi.

3.1.2 Rulmanların izlenmesi

Makine elemanları arasında en önemli ve hassas bileşenlerden biri olan rulmanlar, sistem performansını doğrudan etkileyen unsurlardır. Rulmanlarda meydana gelen arızaların tespiti, değiştirilmesi ve bakım işlemleri ciddi iş gücü ve maliyet kayıplarına yol açmakta, aynı zamanda ekipmanın uzun süreli durmasına neden olabilmektedir. Yapılan araştırmalar ve arıza kayıtlarının değerlendirilmesi sonucunda, yeni takılan rulmanların yaklaşık %30'unun montaj sırasında yapılan hatalar veya eksenel hizasızlık nedeniyle kısa sürede arızalandığı görülmüştür. Bu tür hatalar, rulmanların ömrünü 2 ila 5 kat arasında azaltabilmektedir. Ayrıca, rulman arızalarının büyük bir kısmının montajdan sonraki ilk altı ay içerisinde gerçekleştiği tespit edilmiştir [18]. Rulmanlar çalışırken, bilye ve makaraların iç ve dış bilezikler ile temasından kaynaklanan sürtünmeler sonucunda ultrasonik frekans aralığında sesler oluşur. Sağlam ve yeterli şekilde yağlanmış bir rulman bu sesleri düşük düzeyde, hafif bir hışırtı şeklinde üretirken, yetersiz yağlanmış ya da tamamen yağsız kalmış rulmanlarda daha yüksek şiddette çıtırtı ve gıcırtı benzeri sesler duyulur. Öte yandan, aşırı yağlanmış rulmanlar ise neredeyse hiç ses üretmez. Rulmanlarda arıza gelişmeye başladığında, hasarın türüne bağlı olarak tırmalama, tıkırtı veya sıyrılma şeklinde farklı karakterde ultrasonik sesler yayılabilir. Bu seslerin düzenli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi sayesinde, rulmanların sağlık durumu değerlendirilebilir ve potansiyel arızalar henüz başlangıç aşamasındayken tespit edilebilir. Ultrasonik rulman izleme örneği Şekil 3.3'te verilmiştir.

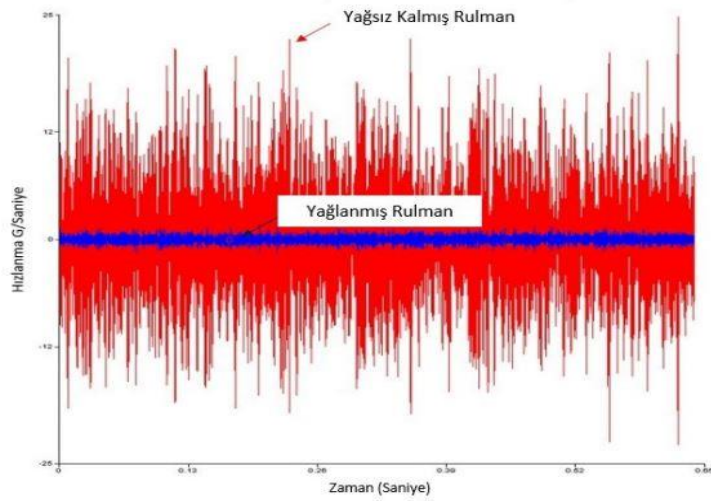
NASA'nın rulmanlar üzerine yaptığı çalışmalar [19], ultrasonik ölçümler arasındaki ses düzeyi farklarının arızanın seviyesi hakkında bilgi verdiğini ortaya koymuştur. Buna göre;

- a) 8 dB'lik bir artış, yağlama eksikliği ya da arızanın ilk sinyalleri olarak değerlendirilmektedir,
- b) 12 dB'lik bir artış, arızanın başlangıç seviyesinde olduğunu,
- c) 12 dB'lik bir artış, arızanın başlangıç seviyesinde olduğunu,
- d) 35-50 dB arasında bir artış ise, ciddi düzeyde bir arızanın meydana geldiğini göstermektedir.



3.3. Ultrasonik rulman izleme.

Şekil 3.4’te, rulmanın normal yağlanma durumuyla yağsız kalmış hali karşılaştırılmış ve bu durumlara ait ultrasonik ses örnekleri görsel olarak sunulmuştur. Grafikte mavi alan, rulmanın ideal yağlama seviyesinde çalıştığını gösterirken; kırmızıyla işaretlenmiş yüksek tepecikler, yağlama ihtiyacının ortaya çıktığını ve potansiyel bir arızanın habercisi olabileceğini işaret etmektedir.



Şekil 3.4. Rulman durumunun incelenmesi [20].

3.1.3 Buhar kaçağı takibi

Yüksek üretim maliyetleri nedeniyle, buhar enerjisi de tıpkı basınçlı hava gibi maliyetli enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Buhar sistemlerinde önemli bir rol üstlenen buhar kapıları, sistemde oluşan yoğuşmanın, havanın ve yoğuşmayan gazların dışarı atılmasını sağlayarak hem buhar kayıplarını önler hem de sistemin verimli çalışmasına katkıda bulunur. Bu ekipmanlarda meydana gelen arızalar, buhar basıncında

ve kalitesinde düşüŖşlere, sistem içinde türbölansların oluşmasına ve genel verimliliğın azalmasına neden olabilir. Ayrıca buhar kaçakları sadece enerji kaybı açısından değıl, ekipmanlar da oluşturduğı korozyon gibi sorunlar nedeniyle de işletmeler açısından ciddi riskler taşır. Mevcut veriler, işletmelerdeki buhar kapanlarının yaklaşık %15 ila %20'sinin arızalı olduğunu göstermektedir. Bu tür arızaların tespiti ve giderilmesiyle enerji tüketiminde ve bakım maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlanabilir. Buhar kapanlarının izlenmesi için yaygın olarak görsel kontroller ve termal görüntölme yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak ultrasonik izleme teknikleri, arızaların daha net ve kesin biçimde belirlenmesini sağlar [19]. Bununla birlikte, sistemde yer alan çekvalfler, vanalar, eşanjörler, sıcak su depoları (boyler) ve boru hatları gibi diğér elemanlarda oluşabilecek buhar sızıntıları da ultrasonik dinleme yöntemleriyle etkin biçimde tespit edilebilmektedir. Buhar kapanı testi izleme örneğı Şekil 3.5'te verilmiştir.

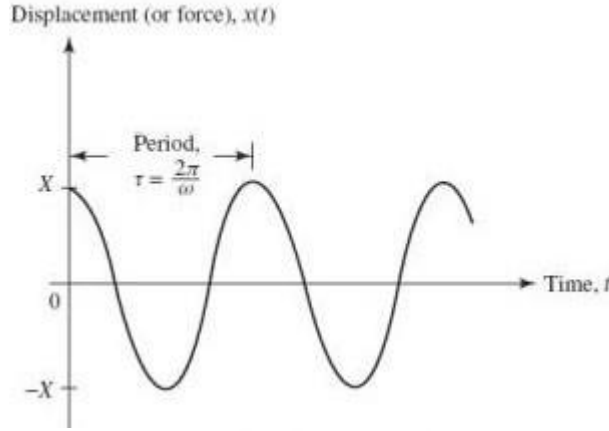


Şekil 3.5. Buhar kapanı (kondestop) testi.

3.2 Titreşim Analizi

Titreşim, bir cismin sabit bir referans noktası veya denge konumu etrafında gerçekleştirdiğı tekrarlı harekettir. Mühendislik sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan bu durum, yapıların ve makinelerin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Titreşim, bazı durumlarda zararlı etkiler oluşturarak önlenmesi gereken bir problem olarak görülürken, bazı uygulamalarda ise fayda sağlayarak istenilen bir özelliktir. Her iki durumda da titreşimle ilgili verilerin doğru bir şekilde analiz edilmesi, ölçölmesi ve kontrol altına alınması mühendislik açısından kritik öneme sahiptir. Titreşim teorisi, cisimlerin ve bu cisimlere etki eden kuvvetlerin oluşturduğı salınımlı (Oscillatory)

hareketlerin incelenmesini kapsar. Şekil 3.6’da görülen salınımlı hareket Basit Harmonik Hareket olarak adlandırılır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.



Şekil 3.6. Basit harmonik hareket.

$$x(t) = X \cos \omega t \quad (3.1)$$

Bu denklemde X hareketin genliği, ω hareketin frekansı ve t zamandır.

Bu hareket sırasında sistem, potansiyel enerji ile kinetik enerji arasında sürekli bir dönüşüm gerçekleştirir. Bu nedenle, titreşimli sistemlerde enerji depolayabilen elemanların bulunması gerekir. Potansiyel enerjiyi depolayan yapılar genellikle yay ya da elastik elemanlar, kinetik enerjiyi depolayan yapılar ise kütle ya da atalet elemanlarıdır. Titreşim parametreleri grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir.

Titreşim parametrelerinin elemanları;

Frekans (f): Frekans üç farklı şekilde tanımlanabilir. Bir hareketin birim zamanda kaç kez tekrarlandığını gösterir. Bir saniye içinde tekrar eden titreşim hareketidir. Birimi Hertz (Hz)’dir. Bir dakika içinde tekrar eden titreşim hareketidir. Birimi RPM (Revolution Per Minute) veya CPM (Cycles Per Minute)’dir.

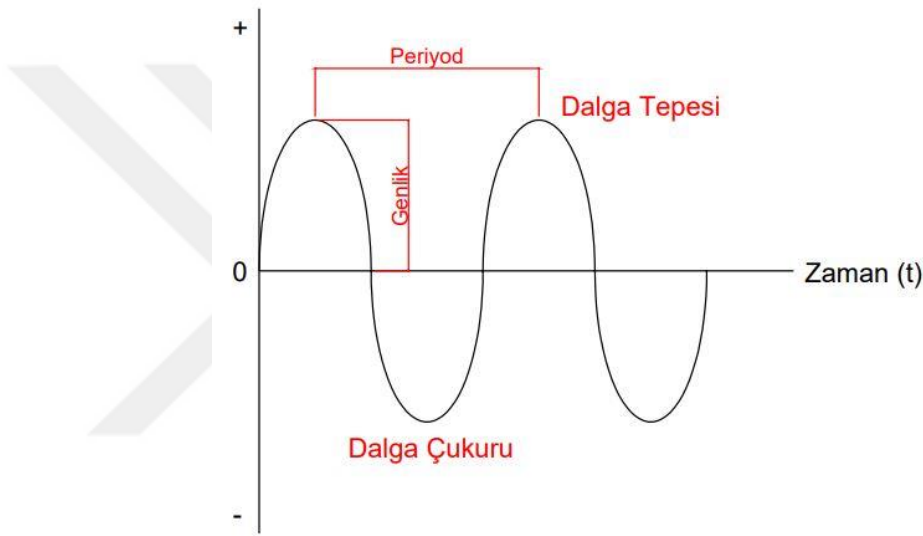
Periyot (T): Bir tam titreşim döngüsünün süresidir. Periyot ve frekans ters orantılıdır. $f=1/T$ ve $T=1/f$ şeklinde ifade edilir.

Açısal frekans (ω) : Dönen cisimlerin birim zamanda kat ettiği yolun radyan cinsinden değeridir. Birimi rad/s dir, $\omega = 2 \pi f$ ile ifade edilir.

Faz (ϕ): İki titreşimli hareketin zamanlama farkını gösterir. Birimi radyan ($0-2\pi$) veya derece ($0^\circ-360^\circ$) olarak verilir. Faz açısı hesaplamalarında dönüş yönünün tersi (+) pozitif, dönüş yönü ise (-) negatiftir.

Genlik: Titreşimin şiddetini belirleyen ölçüdür ve sinüs eğrisinin “0” noktası ile tepe noktası arasındaki mesafesidir. Bir makineye etkiyen tüm kuvvetlerin oluşturduğu titreşimlerin toplam büyüklüğü olarak da tanımlanır.

Pik (Peak): Titreşim sinyalinin ulaştığı en yüksek değerdir ve maksimum titreşim seviyesini gösterir.



Şekil 3.7. Titreşim parametreleri grafiği.

Yapılan araştırmalara göre titreşim analizi, kestirimci bakım yöntemleri arasında en çok uygulanan ve en hızlı sonuç alınabilen eş zamanlı bir yöntemdir. Titreşim analizi ilk kez Jean-Baptiste Fourier tarafından 1822 yılında geliştirilmiştir [21]. Fourier yapmış olduğu çalışmada günümüzde yaygın olarak kullanılan ve literature Fourier Serisi [22] olarak giren bir sinyalin basit sinüs dalgalarının bileşimi olarak ifade edilebileceğini göstermiştir. Sinyal çevrim şeması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Sinyal çevrim şeması.

Denetimimiz altında bulunan makinelerden elde edilen titreşim verilerinin, bilgisayar destekli sistemler aracılığıyla ayrıntılı biçimde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu yöntem, tüm kestirimci bakım yaklaşımlarında olduğu gibi, uygulayıcının deneyimine ve yorumlama becerisine bağlıdır. Hatta diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, en fazla uzmanlık gerektiren analiz türlerinden biri olduğu söylenebilir. Yeterli bilgi birikimi olmadan yapılan değerlendirmeler, hatalı sonuçlara neden olabilir ya da olası arıza belirtilerinin gözden kaçmasına yol açarak makinelerde beklenmedik arızaların oluşmasına sebep olabilir.

Makine ve ekipmanlar da ortaya çıkan titreşim kaynaklı arızalar, genellikle belirli aralıklarla tekrarlayan sinyaller üretir. Bu sinyaller, frekans analiz yöntemleriyle bileşenlerine ayrılarak detaylı olarak incelenebilir. Bu analiz sürecinde, sinyallerin içerisinde yer alan frekans bileşenleri yani harmonikler, genellikle sinüs eğrileriyle temsil edilir. Sinüs dalgaları, titreşim hareketinin genliği ve periyodu hakkında önemli kestirimci bilgiler sunar. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan en temel titreşim türü harmonik titreşimdir [23]. Bu tür titreşimler daima periyodik özellik gösterir ve ters yönde oluşan harmonikler genellikle sistemde görülmez. Titreşime neden olan kuvvetlerin büyüklüğü arttıkça, sistemdeki yer değiştirme miktarı yani genlik de buna paralel olarak artar. Bu nedenle, kuvvet ile titreşim genliği arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur.

Titreşimin kendini tekrar ettiği zaman aralığı periyod olarak adlandırılırken [23], birim zamandaki tekrar sayısına frekans denir. Periyot ve frekans, titreşim analizinde temel kavramlar olarak kabul edilir. Örnek titreşim ölçümü Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Titreşim analizi.

Titreşim analizi, özellikle dönen parçalara sahip makineler olmak üzere titreşim oluşturan tüm makine ve ekipmanların durumlarını izlemek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu teknik, makinelerin mekanik durumları hakkında detaylı bilgi edinmemizi sağlar [24]. İzleme işlemi, makinelerin önem derecesine göre belirlenen periyodlarla veya sürekli olarak titreşim ölçümleri yapılarak gerçekleştirilir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sayesinde, makinelerin güvenilirliği hakkında önemli bilgiler sağlanabilir. Düzenli titreşim izleme ile birçok arıza erken aşamada tespit edilebilir. Örneğin, titreşim analizi sayesinde arızalı yataklar, boşluklar, aşınmış ya da hasar görmüş dişliler gibi problemler zamanında belirlenerek müdahale şansı artar [25].

3.3 Yağ Analizi

Mekanik sistemlerde birbiriyle temas hâlinde çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmenin azaltılması amacıyla yağlama uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Bu uygulamaların temel hedefi, sistemin ilk günlük performansını korumak ve çalışma hassasiyetini sürdürebilmektir. Aynı zamanda, potansiyel arızaların önceden engellenmesi de yağlamanın kritik görevleri arasında yer almaktadır. Özellikle rulman, mil, yatak ve kızak gibi döner ya da hareketli parçaların yüksek devir ve ağır yük altında çalıştığı durumlarda, düzenli ve uygun yağlama hayati öneme sahiptir. Yanlış yağ kullanımı, yağın zamanla özelliğini kaybetmesi ya da yağlamanın tamamen ihmal edilmesi gibi durumlar, geri dönüşü olmayan arızalara yol açabilmektedir. Yapılan birçok arıza incelemesinde, sistemin yeterli yağlama almadığı tespit edilmiştir.

Yağlama işlemlerinin düzenli ve kontrollü bir şekilde yapılması gerektiği gibi, kullanılan yağların durumunun da belirli periyotlarla analiz edilmesi büyük önem taşır. Bu noktada, yağ analizleri, kestirimci bakım süreçlerinde öne çıkan uygulamalardan biridir [26]. Yapılan analizlerle; yağın fiziksel ve kimyasal yapısı, içerisinde su bulunup bulunmadığı, viskozite durumu, metal aşınma oranları, partikül miktarı ve büyüklüğü gibi parametreler değerlendirilerek olası arızalar hakkında fikir sahibi olunabilir [25].

Ancak, analiz süreçlerinin güvenilir sonuçlar verebilmesi için en önemli adım doğru şekilde yağ numunesi alınmasıdır. Numune alma sırasında hijyen kurallarına dikkat edilmeli, işlem temiz ekipmanlarla ve steril koşullarda gerçekleştirilmelidir. Bu kapsamda, numune alınacak yüzeyin temizliği sağlanmalı; numune kapları, hortumlar ve pompalar uygun şekilde dezenfekte edilmelidir. Mümkünse numune alma işlemleri kapalı ortamlarda gerçekleştirilmelidir. Açık alanlarda ise hava akımı, toz ve kirlenici partiküllerin bulunmadığı ortamlar tercih edilmelidir. Aksi hâlde analiz sonuçları güvenilirliğini yitirir ve yanıltıcı olabilir. Yağ numuneleri, manuel olarak ya da numune alma pompaları yardımıyla toplanabilir. Ancak işlem öncesinde bazı koşullar sağlanmalıdır. Makinenin bir süre durdurulması, yağın oda sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ulaşması ve sistemdeki yağın dinlenmiş hâlde olması gereklidir. Eğer uzun süredir çalışmayan bir sistemden numune alınacaksa, öncelikle ekipman kısa süreli çalıştırılmalı, ardından numune alınmalıdır. Numune hortumu doğrudan yağın dibine kadar gönderilmemeli, mümkünse yağ seviyesinin ortasında bulunan kısımdan numune alınmalıdır. Tortuların da karışıma dahil edilmesi, analiz sonuçlarını olumsuz etkileyebilir. Yağ analizlerinin etkin olabilmesi için, numunenin alındıktan sonra hızlı bir şekilde analize gönderilmesi şarttır. Ancak bazı işletmelerde numunelerin analiz merkezine geç ulaşması ya da toplu gönderimler yapılması gibi nedenlerle analiz süreci haftalar sürebilmektedir. Bu gecikmeler, analiz sonuçlarının güncelliğini ve uygulanabilirliğini ortadan kaldırır. Bu nedenle, yağ numunesi alındıktan sonra analiz süreci mümkün olan en kısa sürede tamamlanmalı, hatta olanak varsa işletme bünyesinde yağ analiz

laboratuvarları kurulmalıdır. Böylece bakım süreci içerisinde analiz sonuçları alınabilir ve sistem yeniden çalıştırılmadan önce gerekli önlemler alınabilir. Manuel yağ alma örneği Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Manuel yağ numunesi alma.

Yağ analiz işlemi yapılırken zaman kayıpları gibi problemler nedeni ile oluşabilecek ciddi arızaların önüne geçebilmek için son yıllarda özellikle hidrolik sistemlerde arızaları erken aşamada tespit edebilmek amacıyla uyarı sensörleri ile hidrolik sistemler kontrol edilebilir hale getirilmiştir. Bu sensörler sayesinde, hidrolik sıvılardaki kirlilik düzeyi, metal aşınmaları ve viskozite gibi kritik parametreler çevrim içi (online) veya çevrim dışı (offline) olarak izlenebilmektedir. Ek olarak, sisteme yerleştirilen basınç, debi ve sıcaklık sensörleri ile hidrolik sıvının performans değerleri sürekli olarak kontrol altında tutulur. Takılan sensörler yardımı ile yağların gerçek zamanlı analizleri yapılmakta ve veri sonuçları alınabilmektedir. Bu sistemler erken uyarı sistemleri olarak adlandırılmakta ve içerisinde geçen sıvıların durumlarını sürekli olarak takip etmesi ve tespit ettiği olumsuzlukları Wi-Fi veya radyo dalgaları aracılığıyla servis cihazları ile bağlantı kurarak toplamış olduğu verileri bakım ekibine bildirebilmesi kestirimci bakım yöntemi için çok büyük avantajlar sağlamaktadır.

İşletmelerin bir kısmı yağ analizini ek maliyet olarak görse de, uzun vadede bu uygulama ciddi tasarruf sağlamaktadır. Yağ analizleri, tıpkı bir bireyin sağlık kontrolünde yapılan kan tahlilleri gibi, sistemin genel durumu hakkında detaylı bilgiler sunar. Elde

edilen veriler doğrultusunda, makinelerin çalışma ve sağlık durumlarının izlenmesi büyük önem taşır. Bir arızanın ön belirtisinin tespit edilmesi durumunda, bu arızanın ne kadar ciddi olduğu ve ne zaman meydana gelebileceğinin öngörülmesi, sistem güvenliği ve verimliliği açısından kritik bir değere sahiptir. Bu analizler sayesinde; yağın içeriğindeki su ve silis gibi istenmeyen maddeler, viskozite değişimleri ve metal parçacıkları tespit edilebilir. Elde edilen veriler, sistemde olası bir aşınma, çatlak veya kimyasal bozulmanın önceden anlaşılmasına yardımcı olur. Ayrıca, analizler sayesinde henüz kullanılabilir durumda olan yağların gereksiz yere değiştirilmesinin önüne geçilerek hem maliyet hem de çevresel fayda sağlanmış olur. Bu yönüyle yağ analizleri, sadece arıza öncesi bir tedbir değil, aynı zamanda sürdürülebilir bakım yönetimi açısından da stratejik bir araçtır. Yağ analiz raporu örneği Şekil 3.11’de verilmiştir.

Fullcheck
LAB

FİRMA BİLGİLERİ

Firma :	İl / Ülke :	İZMİR / TÜRKİYE
Departman / Hat :	Ekipman :	
İlgili :	Sistem :	Motor

YORUM

Değişim numunesidir. Silis değeri limit seviyededir.Yetersiz hava filtresi ya da havalandırma sistemindeki bir arızadan kaynaklanabilir.

NUMUNE BİLGİLERİ

	SON	2	3	4
Numune Numarası	T2021010968			
Numune Alınış Tarihi	30.11.2021			
Numune Lab. Giriş Tarihi	13.12.2021			
Kullanılan Yağın Kodu	Opet Fullpro HT CI-4 15W-40			
Ekipman Çalışma Süresi	578 saat			
Yağın Çalışma Süresi	194 saat			
Genel Durum	!			

DENEY SONUÇLARI

METOD	BİRİM	Ortalama	SON	2	3	4
Kirleticiler						
FT-IR Su Miktarı*	ASTM E 2412	%wt	0	-	-	-
FT-IR Glikol*	ASTM E 2412	%wt	0	-	-	-
ICP - Si	ASTM D 5185	mg/kg	17	-	-	-
FT-IR Kurum*	ASTM E 2412	% wt.	0,31	-	-	-

Kimyasal Analiz

VI	ASTM D 2270	-	144	-	-	-
Kinematik Viskozite, @40°C	ASTM D 445	mm ² /s	97,64	-	-	-
Kinematik Viskozite, @100°C	ASTM D 445	mm ² /s	13,86	-	-	-
FT-IR Sülfat*	ASTM E 2412	Abs/cm	6	-	-	-
FT-IR Oksidasyon*	ASTM E 2412	Abs/cm	3	-	-	-
FT-IR Nitrasyon*	ASTM E 2412	Abs/cm	8	-	-	-

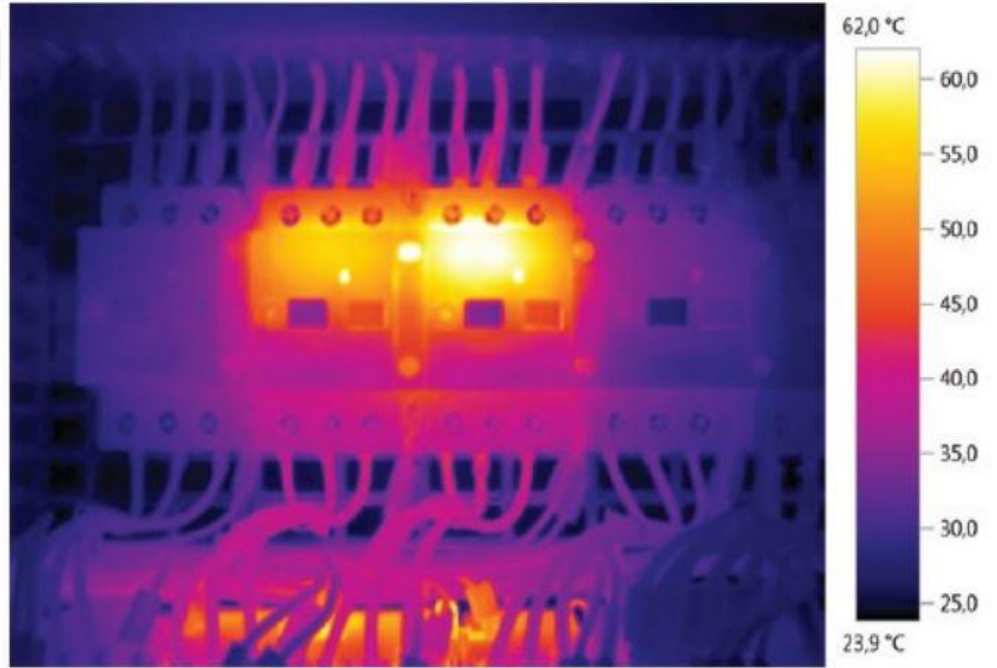
Aşınma Metalleri

ICP - Sn	ASTM D 5185	mg/kg	6	-	-	-
ICP - Pb	ASTM D 5185	mg/kg	1	-	-	-
ICP - Ni	ASTM D 5185	mg/kg	0	-	-	-
ICP - Fe	ASTM D 5185	mg/kg	14	-	-	-
ICP - Cu	ASTM D 5185	mg/kg	5	-	-	-
ICP - Cr	ASTM D 5185	mg/kg	3	-	-	-
ICP - Al	ASTM D 5185	mg/kg	4	-	-	-

Şekil 3.11. Yağ analiz raporu.

3.4 Kızıl Ötesi Analizi(Termografi)

Termografi terimi, köken itibarıyla "sıcaklığın görüntüsü" anlamına gelen sözcüklerden türemiştir. Kızılötesi termografi, yüzey sıcaklığının tespit edilmesi ve ölçülmesi amacıyla, ışıma duyarlı elektronik ve optik sistemlerin kullanıldığı bir tekniktir [27]. Doğada var olan her nesne, insanlarca algılanamayan kendine özgü bir ısı enerjisi yayar. Termal görüntüleme sisteminin temel çalışma prensibi, duyu organlarımızla hissedemediğimiz bu termal enerjiyi algılamak ve ardından sıcaklık seviyesine göre renklendirerek bir görsel oluşturmaktır [28]. Kızılötesi ışınlar, görünür ışığın ötesinde yer alan ve daha uzun dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalardır. Termal görüntüleme teknolojisi, bu dalgaları kullanarak sıcaklık dağılımlarını gözlemlenebilir kılar. Şekil 3.12’de verilen termal kamera görüntüsünde, sıcaklığı yüksek olan bölgeler açık tonlarla (beyaz veya sarıya yakın), düşük sıcaklığa sahip bölgeler ise koyu tonlarla (siyah veya maviye yakın) ifade edilir. Renkli görüntülemelerde genellikle mavi en soğuk, kırmızı ve sarı ise en sıcak alanları temsil edecek şekilde bir sıcaklık skalası kullanılır. Bu sayede, yüzeylerdeki sıcaklık farkları kolaylıkla analiz edilebilir [27].



Şekil 3.12. Elektrik kontaktöründeki gevşekliğin termal kamera ile tespiti [27].

3.4.1 Termal kameralar

Termal kameralar, ısıdaki değişim ilkesine dayanarak çalışan, başta havacılık ve uzay olmak üzere hemen hemen tüm sektörlerde kullanılan tanı ve görüntüleme ekipmanlarıdır. Bu araçlar sayesinde normalde fark edilemeyecek olan sorunlar ve anormallikler tespit edilebilir. Termal kameralar objelerden yayılan termal enerjiyi algılayan lensler ile algılayıcılardan meydana gelmiştir. Termal cihazlar, nesnelerin yaydığı ısı enerjisini algılayan özel lensler ve sensörlerden oluşur. Başka bir ifadeyle, termal kameralar ekipmanların yaydığı ısıyı, onlarla fiziksel temas kurmaya gerek kalmadan ölçebilen aletlerdir. Görüntüleme süreci, çıplak gözle görülemeyen kızılötesi enerjinin yakalanması ve bu kızılötesi kaynaktan gelen görüntünün genel yapısının, ölçülen ısı değerlerine karşılık gelen renklere dönüştürülmesiyle gerçekleşir. Termal cihazlar, büyük arızalara yol açabilecek en küçük problemleri bile net bir şekilde görünür kılarak, olası ekipman bozulmalarının önüne geçilmesine önemli ölçüde katkı sağlar.

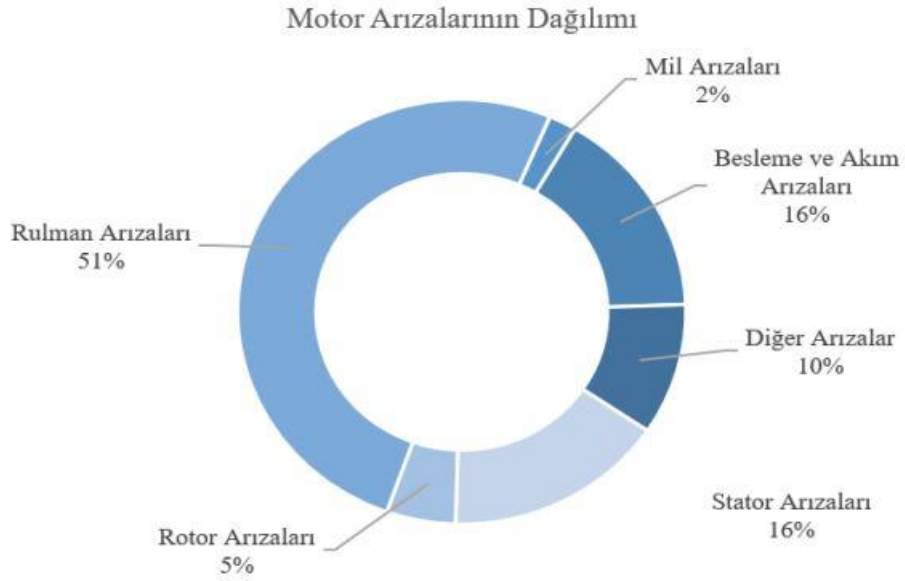
Termografi, yıllardır potansiyel arızaları bulmak için kullanılan köklü bir yöntemdir. Termal kamera ile ölçüm tekniğinin ana uygulama alanları geçmişte elektrik sistemleri, elektronik devre bileşenleri ve demir-çelik sanayisi gibi kritik sektörler olmuştur. Diğer kestirimci bakım yöntemleriyle karşılaştırıldığında, termografinin başlangıçta yüksek yatırım, işletme ve bakım maliyetleri nedeniyle kullanımı birkaç yıl öncesine kadar yalnızca uzman personelle sınırlıydı. Ancak günümüzde el tipi termal kameraların yaygınlaşması, hem uygulama maliyetlerini düşürmüş hem de çok derin uzmanlık gerektirmeyen kişilerin dahi bu teknolojiyi kullanabilmesine, dolayısıyla kullanım alanının büyük ölçüde genişlemesine olanak tanımıştır.

3.5 Motor Akım Değerlerini İzleme

Sanayi tesislerinde yaygın olarak kullanılan asenkron motorların, elektriksel ve mekanik sorunlarının önceden belirlenmesi; işletme güvenliği, bakım maliyetlerinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu hedef doğrultusunda geliştirilen akım izleme temelli kestirimci bakım yöntemleri, motor performansının sürekli olarak takip edilmesine olanak tanımaktadır [29].

Elektrik motorlarında en yaygın arızalar aşırı ısınma, yanma, yalıtımda bozulmalar, rulman arızaları, mekanik arızalar ve motor devresindeki arızalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlara ek olarak, motorların beslendiği güç kaynaklarında oluşan harmonik

bozulmalar da arızalara zemin hazırlayan bir diğer önemli etkidir. Motorlarda meydana gelen arızalar ve dağılımları aşağıdaki şekil 3.13'te gösterilmiştir.

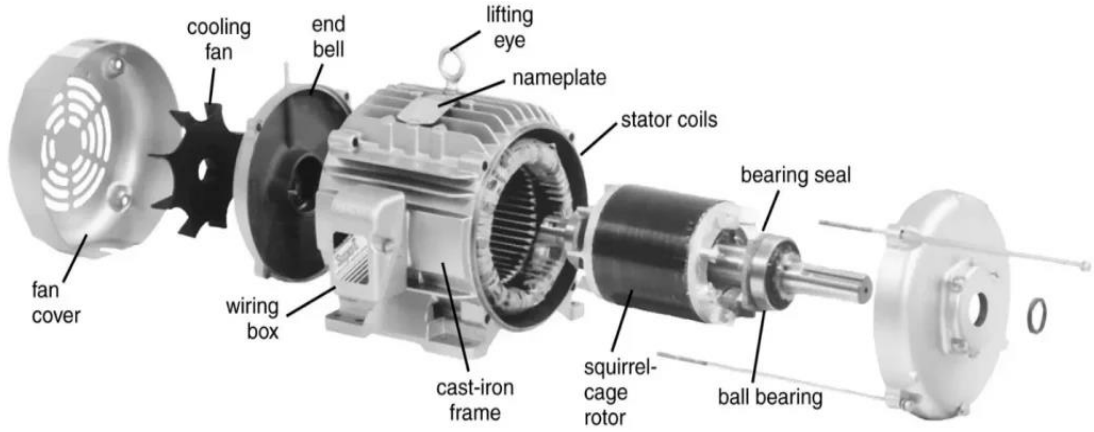


Şekil 3.13. Elektrik motorlarının arıza dağılımı.

Literatürde yapılan çalışmalar, motor stator akımında oluşan bazı harmonik bileşenlerin arızaların göstergesi olabileceğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, motorun faz akımında zamanla meydana gelen harmonik değişimlerin analiz edilmesiyle, olası arıza durumları önceden tahmin edilebilmektedir. Akım izleme yöntemleri, motorun bozulma eğiliminde olan bileşenlerinin tespit edilmesini sağlayarak, plansız duruşların önüne geçebilir.

Akım izlemesi ile motor faz akımlarında meydana gelen harmoniklerin genetik yapıları incelendiğinde, aşağıdaki arızaları önceden tespit edebiliriz. Şekil 3.14'de asenkron motorun iç yapısı ve parçaları verilmiştir.

- a) Motorun aşırı yüklenmesine bağlı enerji kayıpları,
- b) Elektromanyetik dengesizlik kaynaklı problemler,
- c) Titreşim etkisiyle gelişen yapısal arızalar,
- d) Üretim sürecinden kaynaklanan hatalar,
- e) Parçalarda aşınma ya da kırılma sonucu oluşan sorunlar,
- f) Merkezkaç kuvvetinin neden olduğu mekanik dengesizlikler,
- g) Ortam kirliliğinin yarattığı dış etkenli arızalar,
- h) Rulman ve yatak grubundan kaynaklanan arızalar.



Şekil 3.14. Asenkron motorun iç yapısı ve parçaları [URL-1].

Türkiye'de sanayi elektrik tüketiminin yaklaşık %70'inin ve toplam elektrik kullanımının yaklaşık %36'sının üç fazlı AC asenkron motor sistemlerinde gerçekleştiği göz önünde bulundurulduğunda, bu motorlar üzerinde detaylı analizlerin yapılması büyük önem arz etmektedir. Motor arızalarının fark edilmemesi durumunda, motorun tamamen devre dışı kalması ya da yanması gibi ciddi sonuçlarla karşılaşılabilir. Yanmış bir motorun tekrar sarılması ekonomik bir çözüm gibi görünse de, ilk üretim kalitesine ulaşamaması nedeniyle motor veriminde genellikle %1 ila %4 arasında kayıplar yaşanır. Ayrıca, yük karakteristiğine uygun olmayan motor seçimi durumunda verim düşüşü %18'e kadar çıkabilir. Bu tür sorunlar genellikle aşırı akım çekme eğilimi ile kendini gösterdiğinden, akım izleme temelli kestirimci bakım yaklaşımları, arıza öncesi erken uyarı sistemi gibi çalışarak sistem güvenliğini artırmaktadır.

3.6 Kestirimci Bakımın Avantaj Ve Dezavantajları

Kestirimci Bakım (KB) tekniği, üretim hatları, makineler ve ekipmanların gelecekteki durumu hakkında kritik ön bilgiler sunması nedeniyle son derece iddialı sonuçlar vaat eder. Bu sonuçlar, ekipman verimliliğini maksimum seviyeye çıkarma ve arıza kaynaklı duruşları sıfırlama hedeflerini içerir. Kestirimci bakım, mevcut diğer bakım yaklaşımlarıyla karşılaştırıldığında kuşkusuz birçok üstünlüğe sahiptir. Kestirimci bakım avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kestirimci bakım avantaj ve dezavantajları.

Kestirimci Bakım Avantaj ve Dezavantajları	
Avantaj	Dezavantaj
1 Bakım maliyetlerinin %30 civarında	İşlenecek verilerin toplanabilmesi,
2 Arızaların %75 oranında ve arıza sürelerinin %45 oranında düşmesi	Toplanan verileri işleyebilecek kalifiyeli personellerin olması
3 İzlenen makinelerde meydana oluşabilecek önemli arızaların önceden tespit edilmesi	Kestirimci bakım için gerekli olan sensörler, ses algılayıcıları, kameralar vs ürünlerin maliyeti
4 Plansız ve ani duruşlar ortadan kalkar. Planlı ve yönetilebilir zaman ortaya çıkar	Kestirimci bakım yöntemine karşı oluşan ön yargı
5 Üretim planına uyma ve üretim gerçekleştirme hedefleri olasılığı artar	
6 Planlı bakım uygulamalarına büyük bir veri kaynağı ile katkıda bulunur	
7 Makinelerin mevcut durumları ve kalan ömürleri hakkında gerçekçi veriler elde edilir	
8 Kestirimci bakım yöntemi ile iyi durumda olup çalışan makineler gereksiz yere durdurulmamış olur	
9 Bakım zamanı gelen makine arızadan yakın bir süre önce kapatılarak gereksiz duruşların önüne geçilir	
10 Plansız bakıma göre kıyaslandığında yedek parça stokları ve maliyetleri azalır	
11 Makinelerin kullanılabilirliği ve güvenilirliği artar	
12 Makinelerin ve çalışma ömrünün uzatılmasını sağlar	
13 Ekipman kaynaklı iş kazalarının önüne	

Yapılan araştırmalar, Kestirimci Bakım stratejilerini benimseyen işletmelerin operasyonel performanslarında önemli iyileşmeler kaydettiğini göstermektedir.

a) Bakım İş Yükünde Azalma: Bakım faaliyetlerinin toplam hacmi %25 ila %30 oranında azalmıştır.

b) Arıza ve Bozulmalarda Düşüş: Arıza kaynaklı duruşlar ve bozulmalar %35 ile %45 arasında önemli ölçüde düşüş göstermiştir

c) Üretim Artışı: Üretim hacminde %20 ila %25 arasında artış sağlanmıştır.

d) Yatırım Getirisi: Kestirimci Bakıma yapılan yatırımın geri dönüş miktarı (kârlılığı) 10 kat artmıştır.

4. YAPAY ZEKÂ

Yapay zekâ, insan zekâsına özgü bilişsel yetenekleri taklit edebilen ve aldığı veriler doğrultusunda kendini sürekli olarak geliştirebilen sistemler ya da makineler olarak tanımlanabilir. Bir başka ifadeyle, yapay zekâ; robotlar veya bilgisayar sistemlerinin, insanlara özgü düşünme, karar verme ve öğrenme gibi davranış biçimlerini simüle etme kapasitesine sahip olmasıdır. Yapay zekâyı yalnızca tek bir kavram altında değerlendirmek yanıltıcı olabilir. Makine öğrenmesi (Machine Learning) ve derin öğrenme (Deep Learning) gibi alt başlıklar, yapay zekâ alanının temel bileşenlerindendir. Bu sistemler, planlama, öğrenme, mantıksal çıkarım, problem çözme, bilgi temsili, algılama, hareket etme ve yönlendirme gibi birçok insan zekâsıyla ilişkili işlevi yerine getirebilir. Bazı yapay zekâ sistemleri ayrıca sınırlı ölçüde de olsa sosyal zekâ ve yaratıcılık gösterebilmektedir. Bilişim alanında, yapay zekâ yerine genellikle İngilizce karşılığı olan Artificial Intelligence ifadesinin kısaltması olan AI kullanılmaktadır.

YZ'den bahsedilirken genel olarak kullanılan makine öğrenimi terimi, makinelerin öğrenme yeteneğini ifade eder. YZ, odaklandığı alanlardan biri olarak makine öğrenimini içeren bir üst kümedir. YZ'nin temelinde makinelerin çevreleri ve giriş parametreleri hakkındaki farkındalıklarına ve beklentilere dayalı olarak öngörülen görevleri yerine getirme yanıtlarına dayalı olarak ortaya çıkardığı şekilde bir zekâ geliştirmektir. Son zamanlarda YZ alanında derin öğrenme terimi de kullanılmaya başlanmıştır. Derin öğrenme, çok katmanlı yapay sinir ağlarına dayalı olarak geliştirilen ve makine öğrenmesinin alt kümesi olarak değerlendirilen bir yöntemdir. Derin öğrenme, makine öğrenimini gerçekleştirmek için geliştirilen yapay zekânın bir sonraki adımudur. Derin öğrenme ile makine öğrenimi arasında bazı farklılıklar vardır. Makine öğreniminde özellikler algoritmalara manuel olarak girilirken, derin öğrenmede özellikler otomatik olarak oluşturulmaktadır. Özellikler, görüntüden çıkarılan bireysel ölçülebilir özellik veya karakteristik olarak tanımlanır. Özelliklerin manuel girilmesini gerektiren YZ yaklaşımlarının yanı sıra derin öğrenme, doğru tahminler sunmak için daha büyük miktarda veri ve bilgi işlem gücü gerektiren daha karmaşık algoritmalar kullanır [30].

4.1 Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi, yapay zekâ alanının bir alt disiplini olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda geliştirilen yeni öğrenme algoritmaları, çevrimiçi ortamlarda erişilebilen veri miktarındaki artış ve bilgi işlem kapasitesindeki ilerlemeler, makine öğrenmesinin

hızlı bir şekilde gelişmesine katkı sağlamıştır [28]. Makine Öğrenimi (ML), bilgisayarların açıkça programlanmasına gerek kalmadan mevcut verilerden kendi kendine öğrenmesini sağlamaktadır. Bu makineler, geçmiş öğrenmelerine dayalı olarak yeni verilere tepki verebilir. Tahmin, Makine Öğreniminin önemli uygulamalarından biridir [32].

Makine öğrenmesi, yapay zekâ alanında önemli bir konuma sahip olup, çeşitli uygulamalarda akıllı tahminler yapabilen algoritmaların geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yüksek boyutlu verileri işleyebilme ve farklı ortamlarda yer alan veriler arasındaki gizli ilişkileri ortaya çıkarabilme yeteneğine sahiptir [33].

Her gün dijital ortamlarda devasa miktarda veri üretilmekte ve paylaşılmaktadır. Bu verilerin anlamlandırılması ve işe yarar bilgilere dönüştürülmesi, oldukça karmaşık ve zahmetli bir süreçtir. Söz konusu veri hacmini manuel olarak analiz etmek pratikte mümkün olmadığından, bu süreçte otomatik analiz yöntemlerinin kullanılması bir zorunluluk hâline gelmiştir. Büyük veriler üzerinde uygulanan analiz teknikleri sayesinde belirli örüntüler (kalıplar) ortaya çıkarılmakta, böylece çeşitli alanlarda daha bilinçli ve veri temelli kararlar alınabilmektedir [34].

Kullanılacağı amaca bağlı olarak 4 farklı makine öğrenmesi türü mevcuttur.

1. Denetimli (Supervised) Öğrenme
2. Denetimsiz (Unsupervised) Öğrenme
3. Yarı-Denetimli (Semi-Supervised) Öğrenme
4. Pekiştirmeli (Reinforcement) Öğrenme

4.1.1 Denetimli (Supervised) öğrenme

Denetimli öğrenme, her eğitim örneğini karşılık gelen hedef değeriyle birlikte gerektiren bir makine öğrenimi tekniğidir. Daha basit bir ifadeyle, her eğitim örneği hem girdi hem de çıktı değerleri olarak gelir. Eğitim sürecinden sonra model, yeni bir girdi için hedef değer anlamına gelen çıktı değerini tahmin eder. Makine öğrenimi, genellikle sınıflandırılmış yani etiketlenmiş veri kümeleri üzerinden yürütülür. Denetimli öğrenme yönteminde, model eğitilirken giriş verileri (bağımsız değişkenler) ile birlikte bunlara karşılık gelen sonuçlar (bağımlı değişken) da modele sunulur. Eğitilen bu model, daha sonra yalnızca bağımsız değişkenleri kullanarak, hedeflenen çıktıyı tahmin

edebilme yeteneği kazanır Sınıflandırma ve regresyon amaçlı kullanılır. Doğrusal regresyon (lineer regresyon), lojistik regresyon (logistic regression), naive bayes, destek vektör makineleri (support vector machines), karar ağaçları (decision tree) gibi denetimli makine öğrenmesi algoritmaları mevcuttur.

4.1.2 Denetimsiz (Unsupervised) öğrenme

Denetimli öğrenmenin aksine, denetimsiz öğrenmedeki modellerin kullanıcılar tarafından denetlenmesine gerek yoktur. Bu öğrenme tekniği, modellerin daha önce tanımlanmamış yapıları ve bilgileri kendi kendilerine öğrenmelerine izin verir. Denetimsiz makine öğrenmesi, etiketlenmemiş ve belirli bir sınıflandırması olmayan veri kümeleri üzerinde çalışır. Bu yaklaşımda amaç, verileri çeşitli gruplar veya kümeler halinde organize ederek içerisindeki anlamlı yapıları ortaya çıkarmaktır. Bu bağlamda, K-ortalamlar (k-means), K-en yakın komşu (k-nearest neighbor), Apriori algoritması ve Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis - PCA) gibi yöntemler yaygın olarak kullanılan denetimsiz öğrenme algoritmaları arasında yer alır.

4.1.3 Yarı denetimli öğrenme

Bu yaklaşım, sınırlı sayıda etiketlenmiş veri ile geniş hacimli etiketlenmemiş verilerin birlikte kullanıldığı hibrit bir öğrenme yöntemidir. Hem denetimli öğrenmenin sağladığı gözetimli bilgi hem de denetimsiz öğrenmenin keşifsel veri analizi yeteneklerini birleştirerek, modelin genel performansını ve genelleme kabiliyetini artırmayı hedefler.

4.1.4 Pekiştirmeli (Reinforcement) öğrenme

Başarıya ulaşmak için deneme ve yanılma süreçlerini kullanan bir yöntemdir. Bu öğrenme türünde, ajan çevresinden bilgi toplar ve buna göre bir hareket gerçekleştirir. Gerçekleştirilen bu hareketin sonucunda bir geri bildirim alır ve bu geri bildirim, ödül-ceza sistemi çerçevesinde değerlendirilir. Ajan, aldığı ödüller doğrultusunda kendini geliştirir. Ödül ve ceza mekanizmasına dayanan bu yaklaşım, pekiştirmeli öğrenme olarak adlandırılır.

4.2 Derin Öğrenme

Derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt dalı olarak, çok katmanlı yapay sinir ağı (YSA) yapıları aracılığıyla yüksek boyutlu ve karmaşık veriler üzerinde işlem yapma kapasitesine sahip bir yöntemdir. Özellikle çok sayıda gizli katmandan oluşan bu mi-

mari, verilerden anlamlı özellikler çıkararak öğrenmeyi mümkün kılar. Derin öğrenme, özellikle yüz tanıma, nesne tespiti, otonom park sistemleri, plaka okuma, şerit tanıma, hareket algılama, yaya tespiti ve ileri sürücü destek sistemleri gibi birçok gelişmiş uygulama alanında etkin biçimde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, doğal dil işleme, konum belirleme, duygu analizi ve ilaç tasarımı gibi çeşitli disiplinlerde de başarılı sonuçlar sunmaktadır. Bu alanlardaki uygulamalarda, derin öğrenme yöntemlerinin sağladığı doğruluk oranları oldukça yüksektir. Özellikle görüntü tanıma ve işleme uygulamalarında, bu algoritmalar hem performans hem de uygulanabilirlik açısından öne çıkmaktadır [35].

Yapay sinir ağları, biyolojik sinir hücrelerinden esinlenerek geliştirilen ve katmanlı bir yapıya sahip modellerdir. Temel olarak üç ana bileşenden oluşur: giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve çıkış katmanı.

Giriş Katmanı: Bu katman, dış dünyadan gelen verilerin modele aktarıldığı ilk yapıdır. Her bir nöron, giriş verisinin bir özelliğini temsil eder. Bu katmanda doğrudan bir hesaplama yapılmaz; veriler doğrudan gizli katmanlara yönlendirilir. Girişteki nöron sayısı, veri setinin boyutuna bağlı olarak belirlenir.

Gizli Katmanlar: Girdiler bu katmanlarda işlenir. Aktivasyon fonksiyonları (örneğin ReLU, sigmoid, tanh) aracılığıyla veriye çeşitli dönüşümler uygulanır. Gizli katman sayısı ve her bir katmandaki nöron sayısı, modelin derinliğini ve öğrenme kapasitesini belirler. Bu katmanlar, veriler arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenmede kritik rol oynar.

Çıkış Katmanı: Girdi verileri ve gizli katmanlardan gelen bilgiler işlenerek sonuca ulaşılır. Çıkış nöronlarının sayısı, çözülmek istenen problem türüne (sınıflandırma, regresyon vb.) göre değişiklik gösterir. Bu katmandaki her bir nöron, bir önceki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır ve bu bağlantılar belirli ağırlıklarla temsil edilir.

Veriler, giriş katmanından itibaren ileri doğru aktarılırken her katmanda belirli işlemlerden geçer ve çıkış katmanında sonuca ulaşır. Katmanlar arası bağlantılar, ağırlık değerleri ile temsil edilir ve bu ağırlıklar, modelin öğrenme süreci boyunca sürekli olarak güncellenir. Bu güncelleme işlemi, genellikle geri yayılım algoritması (backpropagation) kullanılarak gerçekleştirilir. Amaç, modelin tahmin hatasını en aza indirmektir. Son yıllarda veri hacmindeki artış ve işlem gücündeki gelişmeler, derin öğrenmenin gelişimini hızlandırmıştır. Derin öğrenmenin temel hedeflerinden biri,

ham verileri daha anlamlı ve ayırt edici temsillere dönüştürebilmektir. Bu dönüşümler, çok sayıda katmandan geçerek gerçekleştiğinden, modelin öğrenme kapasitesi de geleneksel yöntemlere kıyasla oldukça yüksektir. Derin mimariler, daha fazla katman içerdikleri için yüksek temsil gücüne sahip olup, karmaşık desen ve örüntüleri öğrenmede avantaj sağlamaktadır.

4.3 Temel Bileşenler Analizi (Principal Component Analysis)

Çok sayıda değişkene sahip büyük veri kümelerinde, verideki temel bilgiyi koruyarak boyutu azaltmak önemli bir ihtiyaçtır. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri olan Temel Bileşenler Analizi (TBA), veri setindeki değişken sayısını azaltırken, veri içeriğindeki bilginin büyük bir bölümünü korumaya çalışır.

TBA, çok boyutlu veri setlerinde yer alan değişkenler arasındaki ilişkiyi dikkate alarak, bu değişkenlerin yerine geçebilecek yeni bileşenler oluşturur. Bu bileşenler, orijinal verilerin doğrusal kombinasyonlarıdır ve verinin varyansını en iyi şekilde yansıtan yapılar olarak sıralanır. Böylece yüksek boyutlu veriler daha düşük boyutlu bir forma indirgenir ve bilgi kaybı minimum düzeyde tutulur.

Temel bileşenler analizi genellikle üç amaç doğrultusunda kullanılır:

1. Veri boyutunu azaltarak daha sade bir yapı elde etmek,
2. Verilerden elde edilen bileşenleri tahminleme süreçlerinde kullanmak,
3. Veriyi daha kolay analiz edebilmek için düşük boyutlu bir yapıya dönüştürerek görselleştirmek.

Bu yöntem, özellikle karmaşık yapı ve çok değişkenli veri kümelerinde, analiz öncesi uygulandığında hem işlem maliyetini düşürür hem de model performansını artırabilir.

5.KALAN FAYDALI ÖMÜR

Modern endüstriyel ekipmanın temel parçalarından biri olan rulman, dönen makine-lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Rulman sürekli olarak belirli bir yük altında çalıştığından kaçınılmaz olarak bazı bozulma eğilimleri üretecek ve sonuçta ekipmanın düzenli kullanımını etkileyecektir. Modern endüstrinin arka planında, rulmanın kazara arızalanması yalnızca ciddi maddi kayıplara değil aynı zamanda feci sonuçlara da neden olacaktır. İlgili çalışmalar rulmanların dönen makine arızalarının yaklaşık %30'una neden olabileceğini göstermiştir [36].

Kestirimci bakım, makinelerin veya ekipmanların belirli bir zaman aralığındaki çalışma durumunu öngörmeye yönelik bir yaklaşımdır. Bu süreçte, cihazlara yerleştirilen sensörler aracılığıyla elde edilen sıcaklık, basınç, titreşim, gürültü, elektrik akımı ve çevresel koşullar gibi çeşitli veriler analiz edilerek ekipmanın durumu değerlendirilir.

Arıza meydana geldikten sonra yapılan müdahalelerde, sorunun tespitinin zaman alması, onarım süresinin uzaması ve arızanın başka bileşenleri de olumsuz etkileyebilmesi gibi nedenlerle sistem verimliliği ciddi şekilde azalabilir. Bu riski ortadan kaldırmak adına, düzenli aralıklarla yapılan klasik periyodik bakım uygulamaları tercih edilebilmektedir. Ancak bu yöntem de çoğu zaman gereksiz bakım işlemlerine neden olarak hem zaman hem maliyet açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir. İşte bu noktada kestirimci bakım, bakım faaliyetlerinin ihtiyaç duyulduğu anda yapılmasını sağlayarak daha dengeli ve verimli bir çözüm sunar. Temel amaç, sistemin ne zaman bakım gerektireceğini önceden belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, makinenin Kalan Faydalı Ömrünün (Remaining Useful Life – RUL – KFÖ) tahmin edilmesi büyük önem taşır. KFÖ tahmini, ekipmanın gelecekte ne kadar süre daha sorunsuz çalışabileceğini öngörmeye yarar. Gelişmiş veri analiz ve tahmin yöntemleri kullanılarak, arıza gerçekleşmeden önce müdahale edilecek uygun zaman belirlenebilir. Böylece plansız duruşların önüne geçilir, gereksiz bakım masrafları azaltılır ve genel makine performansında önemli bir artış sağlanmış olur [37]. Makine ve ekipmanların kalan faydalı ömrünü (KFÖ) tahmin etmek amacıyla geliştirilen yöntemler, genel olarak 3 ana kategori altında toplanmaktadır;

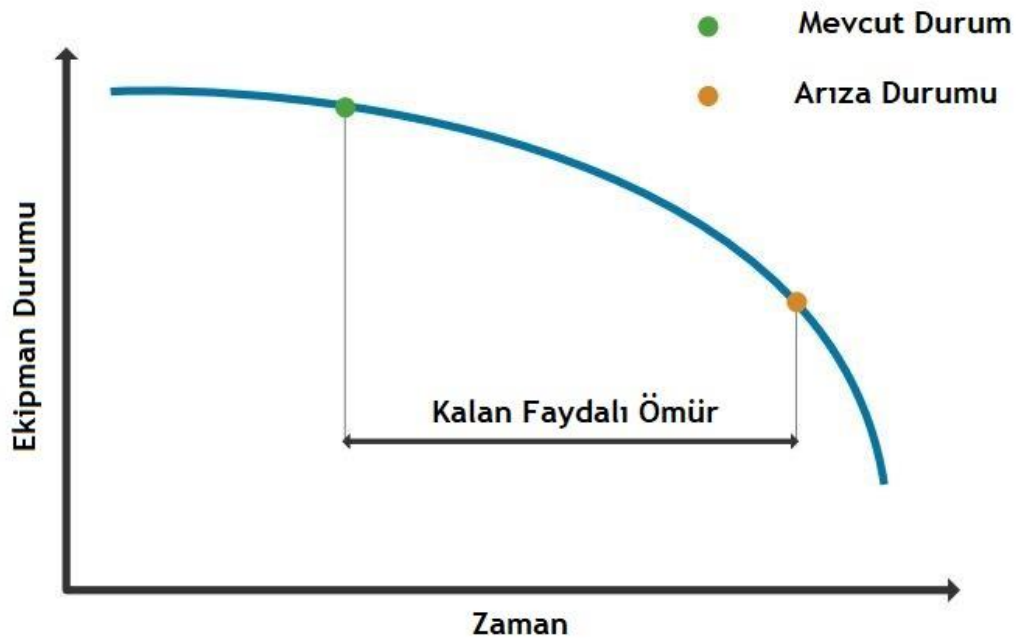
1.Hayatta Kalma Modeli: Bu yaklaşım, sistem ya da bileşenin arıza verdiği anın verilerine ulaşılabildiği durumlarda kullanılır. Özellikle, bileşenin hangi koşullar altında

ve ne zaman arıza verdiği net olarak biliniyorsa, bu model kalan ömrün tahmininde yüksek doğruluk sağlayabilir,

2.Bozulma Modeli: Elde arıza verileri yoksa ancak arızayı işaret eden bir eşik değeri bilindiği takdirde,

3.Benzer Modeli: Makinenin/ekipmanın sağlıklı çalıştığı bilinen bir t zamanından itibaren arıza oluşuncaya kadar ki süreçte tüm veriler bilindiği takdirde uygulanır [38].

RUL tahmini, tüm yaşam döngüsü boyunca rulman titreşim sinyali gibi rulman ömrünün mevcut verilerini analiz ederek rulmanın kalan faydalı ömrünü elde etmektir. Şu anda, rulmanların RUL'unu tahmin etmek için üç kategori vardır. Model tabanlı yöntemler, veri odaklı yöntemler, model tabanlı ve veri odaklı hibrit yöntemler. Model tabanlı rulman RUL tahmin yöntemleri, rulman arızası mekanizmasını veya operasyonel bozulma sürecini temsil etmek için istatistiksel veya fiziksel modeller gerektirir. Ancak mekanik ekipmanın karmaşık çalışma ortamı, arıza türleri ve bozulma arıza mekanizmaları, giderek daha çeşitli hale geldiğinden uygulamada doğru bir mekanistik model oluşturmak giderek daha zor hale gelmektedir. Ekipmanın bozulma profili Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Ekipmanın bozulma profili [URL-2].

Rulmanın kalan faydalı ömrünün (RUL) tahmin edilmesi, rulman arızalarından kaynaklanan mühendislik kazalarını etkili bir şekilde önleyebilir. Prognostik ve sağlık yönetiminin (PHM) temel teknolojilerinden biri olan RUL tahmini geçmiş bilgilere ve ekipman tarafından elde edilen çevresel bilgilere göre kendi kendine hasarın ilerlemesini tahmin etmeyi ve şu andan beklenen işlev arızasına kadar geçen süreyi tahmin etmeyi amaçlamaktadır [39].

Mühendislik ekipmanlarının artan karmaşıklığıyla birlikte ekipman arıza mekanizmasının fiziksel modelini elde etmek zorlaşmaktadır. Aynı zamanda, yapay zekanın (AI) gelişmesiyle birlikte, çok sayıda veri odaklı algoritma ortaya çıkmıştır. Veri odaklı yöntem, mühendislik ekipmanlarının ömür verilerinden performans bozulma eğilimiyle ilgili karakteristik bilgileri çıkarabilir. Maliyet ve zamandan etkili bir şekilde tasarruf sağlayabilir. Buna göre, veri odaklı yöntemler RUL tahmininin birincil yolu haline gelmiştir [40].

Veriye dayalı olarak rulmanların RUL'unun tahmin edilmesi rulman bozulma eğilimini yansıtan özelliklerin çıkarılmasını ve rulman RUL'u tahmin modelinin oluşturulmasını içerir. Rulman bozulma eğilimini yansıtan özelliklerin çıkarılması rulmanların RUL tahmininin gerçekleştirilmesi için ön koşuldur. Özellik çıkarımının amacı rulman bozulma sürecini temsil eden sağlık göstergelerini çıkarmaktır. Yapı stratejilerine göre, sağlık göstergeleri fiziksel ve sanal olarak ikiye ayrılabilir. Fiziksel sağlık göstergeleri arızalarla ilgilidir ve genellikle istatistiksel veya sinyal işleme yöntemleri kullanılarak sinyallerden çıkarılır. Sanal sağlık göstergelerinin pratikte fiziksel bir önemi yoktur ve genellikle birden fazla fiziksel sağlık göstergesinden veya sensör sinyallerinden oluşur.

Fiziksel sağlık göstergelerinin oluşturulmasında kullanılan geleneksel yöntemler genellikle titreşim sinyallerinin tepe değeri çarpıklık basıklık ve kök ortalama kare (RSM) gibi istatistiksel özelliklerini hesaplar. Fiziksel sağlık göstergelerinin oluşturulma yöntemi son yıllarda önemli ölçüde ilerleme kaydetmiştir. Rulman arıza sinyallerinin dürtüsellliğini ve döngüsellliğini ölçmek için ağırlıklı normalleştirilmiş kare zarf ve seyreklik ölçüsü (basıklık, negatif entropi, pürüzsüzlük indeksi ve gini indeksi dahil) toplamı gibi fiziksel özellikler önerilmiştir. Bu rulmanların ve dişlilerin yerel arızalarından kaynaklanan arıza sinyallerindeki değişiklikleri yansıtabilir. Hou ve diğerleri [41] yarı-aritmetik ortalama ve uyarlanabilir ağırlıklı sinyal ön işleme teknolojisini kullanarak izleme sinyallerinin monotonluğunu incelemiştir.

Sanal sağlık göstergelerinin oluşturulmasında standart yöntemler temel bileşen analizi (PCA), kendi kendini organize eden haritalama (SOM) ve benzerlerini içerir. Son yıllarda, derin  ėrenme (DL) algoritmalarının gelişmesiyle birlikte, sanal sağlık göstergeleri oluşturmak için birçok DL yöntemi kullanılmıştır.



6.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan titreşim verileri, bir gıda üretim tesisinde yer alan kızartma makinesine bağlı kızgın yağ sirkülasyon pompasından elde edilmiştir. Titreşim sinyalleri, pompa üzerinde X, Y ve Z yönlerinde olmak üzere, 2018 ile 2024 yılları arasında her yıl düzenli aralıklarla toplanan sinyal verileri kullanılmıştır. Bu sistemde, iç çapı 60 mm, dış çapı 130 mm ve genişliği 31 mm olan SKF 6312 Z2 C3 tipi sabit bilyalı rulman tercih edilmiştir. Titreşim ölçümleri için SKF CMSS 2200 model ivme sensörü kullanılmış ve bu sensör, pompa miline radyal yönde monte edilmiştir. Sensör tarafından algılanan ve mil eksenine dik doğrultuda gerçekleşen titreşim verileri, Siemens S7-1200 PLC aracılığıyla toplanmış; ardından Modbus iletişim protokolü kullanılarak SCADA sistemine aktarılmıştır.

Bu çalışmanın temel hedefi, sistemde meydana gelen mekanik bozulmaları makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz ederek bir sağlık göstergesi (health indicator) geliştirmektir. Elde edilen bu sağlık göstergesi, ilerleyen aşamalarda ekipmanın kalan faydalı ömrünün (KFÖ) tahmininde kullanılacaktır. Sağlık göstergesinin oluşturulmasında izlenen adımlar (1) öznitelik çıkarma, (2) normalizasyon, (3) temel bileşenlerin tespiti ve (4) sağlık göstergesinin elde edilmesi şeklinde sıralanmaktadır.

6.1 Öznitelik Çıkarma (Feature Extraction)

Ham titreşim verilerinden anlamlı ve işlenebilir bilgilerin elde edilmesi süreci, öznitelik çıkarma olarak adlandırılmaktadır. Rulmanlar, genellikle yüksek sıcaklık, nem, kirlilik gibi zorlu çevresel koşullar altında çalıştıkları için çeşitli arıza türlerine maruz kalabilmektedir. Bu arızaların tespiti ve izlenmesi açısından titreşim verilerinin analizi kritik öneme sahiptir. İvmeölçerler tarafından zaman domeninde kaydedilen titreşim sinyalleri, doğrudan analiz edilmeden önce farklı dönüşüm teknikleriyle daha anlamlı hale getirilebilir. Bu amaçla sinyaller, özellikle frekans alanına dönüştürülerek, belirli hata türlerine duyarlı karakteristik bilgilerin ortaya çıkarılması sağlanır. Frekans alanındaki analizler, özellikle erken aşamadaki arızaların tespitinde avantaj sağlar. Bu çalışmada, zaman domaininde elde edilen titreşim verileri Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yöntemi ile frekans domainine aktarılmıştır. FFT ile elde edilen frekans spektrumu üzerinden sistemin durumunu yansıtan öznitelikler çıkarılarak sonraki analiz adımları için veri seti oluşturulmuştur.

Fourier Dönüşümü, bir zaman alanındaki sinyali frekans alanına dönüştüren matematiksel bir işlemdir. Temel olarak, karmaşık sinyallerin frekans bileşenlerini ortaya çıkarmak için kullanılır. Fourier Dönüşümü şu matematiksel denklemle ifade edilir:

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ikx} dx \quad (6.1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(k) e^{-ikx} dk \quad (6.2)$$

Titreşim sinyallerinde oluşan değişimleri analiz etmek amacıyla kullanılan istatistiksel öznitelikler, özellikle arıza tespiti süreçlerinde etkili ve yaygın olarak tercih edilen araçlardır. Bu öznitelikler, sinyalin davranışını sayısal olarak temsil etme konusunda yüksek başarı sağlar. Ayrıca, bu tür özniteliklerin elde edilmesi hem yöntemsel olarak basittir hem de düşük hesaplama maliyeti gerektirir. Bu yönüyle, hem zaman alanında hem de frekans alanında rahatlıkla uygulanabilirler.

Bu çalışmada, doğrudan zaman alanından elde edilen titreşim verileri ile bunların frekans bileşenlerini içeren güç spektrumları üzerinden çeşitli istatistiksel öznitelikler hesaplanmıştır. Söz konusu özniteliklerin matematiksel ifadeleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir. Burada:

- $x(k)$: zaman veya frekans alanında örneklenen sinyal değerini,
- k : örnek indeksini,
- N_k : toplam örnek sayısını,
- x_m : sinyalin ortalama (mean) değerini,
- x_{std} : sinyalin standart sapmasını ifade etmektedir.

Çizelge 6.1. Kalan faydalı ömür için istatistiksel öznitelikler.

İstatistiksel Öznitelik	Denklem
Basıklık	$x_{kurtosis} = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} (x(k) - x_m)^4}{(N_k - 1)x_{std}^4}$
Çarpıklık	$x_{skewness} = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} (x(k) - x_m)^3}{(N_k - 1)x_{std}^3}$
Etkin Değer	$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} (x(k))^2}$
Tepe Faktörü	$CF = \frac{\max(x(k))}{x_{rms}}$
Etki Faktörü	$IF = \frac{\max(x(k))}{(1/N_k \sum_{k=1}^{N_k} x(k))}$
Peak to Peak	$X_{peak} = \frac{1}{2} (\max(x_i) - (\min(x_i)))$

6.2 Normalizasyon

Zaman serisi boyunca elde edilen öznitelikler, genellikle birbirinden farklı büyüklüklerde ve ölçeklerde olur. Bu durum, arıza davranışlarını doğru şekilde temsil eden bir sağlık göstergesi oluşturmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle, özniteliklerin ortak bir ölçeğe getirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, verilerin standartlaştırılması amacıyla z-skor normalizasyonu uygulanmıştır. Bu yöntem, her bir veri noktasının kendi ortalamasına ve standart sapmasına göre dönüştürülmesini sağlar. Burada:

- $x(k)$: normalizasyon uygulanacak ham öznitelik değeri,
- x_m : özniteliklerin ortalama değeri,
- x_{std} : standart sapması,
- $z(k)$: z-skoruna göre normalize edilmiş değeridir.

$$z(k) = \frac{x(k) - x_m}{x_{std}} \quad (6.3)$$

Her ne kadar Denklem 2’de tanımlanan öznitelikler arıza tespiti açısından faydalı bilgiler sunsa da, bu sinyaller çoğu zaman çeşitli dış etkenler nedeniyle gürültü içerebilir. Bu tür gürültüler, sağlık göstergesinde belirsizlik oluşturarak kalan faydalı ömür (KFÖ) tahmininde hatalara yol açabilir. Bu sorunu azaltmak amacıyla, literatürde yaygın olarak kullanılan Hareketli Ortalama (Moving Average) ve Savitzky-Golay düzeltme yöntemlerinden yararlanılır. Bu çalışmada, sinyalin genel eğilimini korurken, yüksek frekanslı gürültüleri etkili bir şekilde filtreleyebilen Savitzky-Golay düzeltme yöntemi tercih edilmiştir. Savitzky-Golay yöntemi, sinyal boyunca sabit genişlikte bir pencere belirleyerek, bu pencere içerisindeki veri noktalarına düşük dereceli bir polinom eğrisi uydurur. Bu regresyon işlemi sayesinde, sinyaldeki rastgele gürültü azaltılırken, veri yapısının temel özellikleri korunmuş olur [42].

6.3 Temel Bileşenlerin Tespiti

Bir makinenin veya bileşeninin kalan faydalı ömrü (KFÖ), mevcut sağlık durumundan başlayarak arızanın gerçekleşeceği ana kadar geçen süre olarak tanımlanır. Bu sürenin doğru tahmini, bakım planlaması ve sistem güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, rulmanın tamamen arızalandığı ana kadar olan tüm yaşam döngüsünü kapsayan veri seti mevcut değildir. Bunun yerine, rulmanın ömrünün erken evrelerinde kaydedilen verilerden yola çıkılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, endüstriyel ortamda gerçek zamanlı tahmin sistemlerinin geliştirilmesine yönelik uygulamalarda oldukça yaygındır. Toplanan ham veriler, öncelikle z-skor normalizasyonu yöntemiyle ölçeklendirilmiş; ardından sinyallerdeki yüksek frekanslı gürültünün azaltılması amacıyla Savitzky-Golay düzeltme filtresi uygulanmıştır. Bu iki işlem sonucunda elde edilen temiz ve ölçeklenmiş öznitelikler, analizde kullanılmak üzere aşağıdaki kümeye dahil edilmiştir:

$$z = \{z_{i,j}\} , i = 1, \dots, N_i , j = 1, \dots, N_j \quad (6.4)$$

Burada, i ölçümün yapıldığı günü, N_i ölçümün yapıldığı toplam gün sayısını, j öznitelik indeksini ve N_j toplam öznitelik sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada toplam gün sayısı 50 ve toplam öznitelik sayısı 4 zaman alanında ve 4 frekans alanında olmak üzere 8’dir. İkinci adım olarak her bir öznitelikler için aşağıdaki denklemler kullanılmak üzere ortalama değer ve standart sapma bulunmuştur. Burada, N_i^* toplam gün sayısının %60’ı kadardır.

$$z_{train} = \{z_{i^*}\} \quad i^* = 1, \dots, N_i^* \quad j = 1, \dots, N_j \quad (6.5)$$

$$\mu_{z_{train},j} = \frac{1}{N_i^*} \sum_{i^*=1}^{N_i^*} z_{i^*,j} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{z_{train},j} = \sqrt{\frac{\sum_{i^*=1}^{N_i^*} (z_{i^*,j} - \mu_{z_{train},j})^2}{N_i^*}} \quad (6.7)$$

Kestirimci bakım, sinyal işleme ve biyoinformatik gibi birçok alanda boyut indirgeme işlemleri için yaygın olarak Temel Bileşen Analizi (TBA) yöntemi kullanılmaktadır [43]. TBA'nın temel amacı, değişkenler arasındaki ilişkileri keşfetmek ve bunların oluşturduğu yapıyı ortaya koymaktır. Özellikle değişkenler arasında yüksek korelasyon bulunduğunda, veri boyutunu azaltmak mümkündür. Bu yöntemle, yüksek boyutlu veri kümesi, verideki maksimum varyansı temsil eden yeni doğrultulara (temel bileşenlere) dönüştürülür. Böylece, karmaşık ve yüksek boyutlu veri, daha düşük boyutlu bir alt uzaya yansıtılarak ifade edilebilir. Ancak, TBA'nın önemli bir dezavantajı, aykırı (uç) değerlerden fazlasıyla etkilenmesidir. Bu nedenle, verilerin ön işleme aşamasında dikkatli davranmak gerekmektedir. Bu çalışmada, temel bileşen katsayıları (TBK), eğitim verisinin ortalama ve standart sapması kullanılarak hesaplanmakta ve ardından tüm veri setine uygulanarak temel bileşen vektörleri (TBV) elde edilmektedir. TBK ve TBV hesaplamalarında kullanılan matematiksel ifadeler aşağıda kapalı form olarak sunulmuştur.

$$TBK_j = f_{TBA}(z_{i^*,j}) \quad j = 1, \dots, N_j \quad (6.8)$$

$$TBV_{i,j} = \frac{z_{i,j} - \mu_{z_{train},j}}{\sigma_{z_{train},j}} TBK_j \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, N_i \\ j = 1, \dots, N_j \end{matrix} \quad (6.9)$$

6.4 Sağlık Göstergesi

Bu bölümde, önemli temel bileşen vektörlerinin bir araya getirilerek tek bir sağlık göstergesi (health indicator) oluşturulmasına odaklanılmıştır. Sağlık göstergesi, bir makine parçasının veya sistemin sağlıklı durumdan bozulma aşamasına ve nihayetinde arıza ile sonuçlanan süreçlerine ait durumu yansıtan bir göstergedir [44]. Yöntemin kritik aşamalarından biri, temel bileşen vektörleri arasından bozulma sürecini en iyi

temsil edenleri seçmektir. Çünkü her temel bileşen, sistemin sağlığındaki değişimi aynı şekilde yansıtmayabilir; bazı vektörler sağlıktan arızaya doğru düzenli ve tutarlı bir artış göstermeyebilir. Bilindiği üzere, bir makine parçasının bozulma süreci genellikle eksponansiyel bir artış eğilimi taşır. Bu nedenle, kullanışlı temel bileşen vektörlerini belirlemek için her vektörün değişim eğimi hesaplanır. Bu eğim, aşağıda verilen formülle tüm öz nitelikler için (j) değerlendirilir ve eksponansiyel artışı temsil eder. Eğim değerleri hesaplandıktan sonra, en yüksek eğime sahip temel bileşen vektörleri, bozulmayı en iyi yansıtan “kullanışlı” bileşenler olarak seçilir. Son aşamada ise, bu seçilen bileşenlerin ortalama değeri alınarak makinenin genel sağlık durumu tek bir sağlık göstergesi olarak belirlenir.

$$eğim_j = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \left| \frac{TBV_{i,j} - TBV_{N_i,j}}{1 - N_i} \right| \quad j = 1, \dots, N_j \quad (6.10)$$

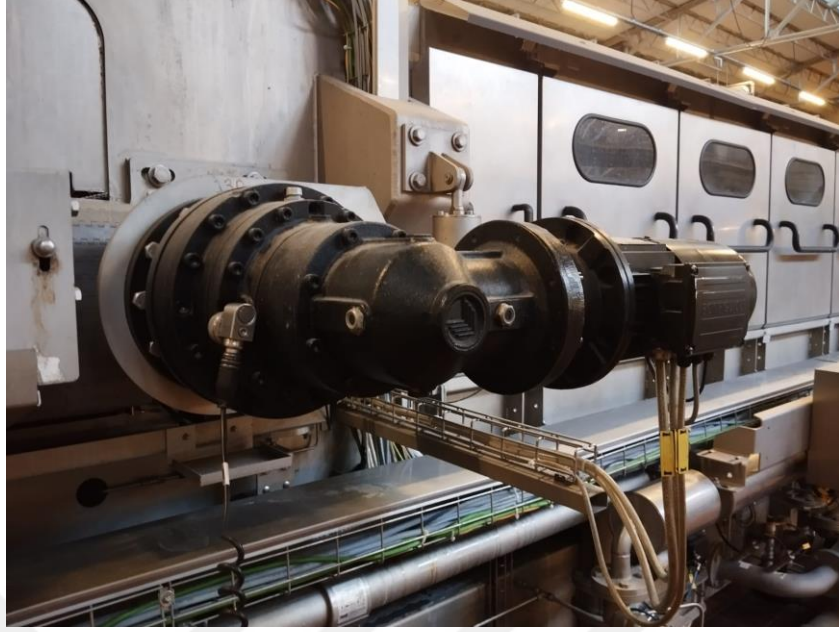
7.ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmanın temel amacı, makine öğrenimi teknikleri kullanarak sabit bilyalı rulmanların sağlık göstergesini belirlemektir. Veri olarak bir gıda firmasında her yıl düzenli olarak ölçümü yaptırılan rulmana ait titreşim verileri kullanılmıştır. Toplanan işlenmemiş (ham) titreşim sinyalleri Şekil 7.3’de verilmiştir. Şekil 7.4’de 2018-2024 yılları arasında her yıl için hesaplanan spektral yoğunluk verilmiştir. Frekans alanındaki güç spektral yoğunluğun analizi için FFT(Fast Fourier Transform) dönüşümü kullanılmıştır.

Titreşim sinyalleri toplandıktan sonra, arızaya duyarlı özelliklerin elde edilmesi amacıyla sinyallerden Çizelge 6.1’de tanımlanan istatistiksel öznitelikler hesaplanmıştır. Basıklık (kurtosis) ise, bir sinyalin tepe noktalarının, yani piklerinin, normal dağılımın tepe noktasına kıyasla ne kadar sivri veya yayvan olduğunu ölçen bir parametredir. Başka bir deyişle sinyalin sivri bir dağılım mı yoksa daha düz bir dağılım mı sergilediğini görebiliriz. Basıklık katsayısı <0 “Düz Dağılım”, basıklık katsayısı $=0$ “Normal Dağılım”, basıklık katsayısı >0 “Sivri Dağılı” olarak yorumlanır. Benzer şekilde, çarpıklık (skewness), sinyalin normal dağılımına göre sağa mı yoksa sola mı eğilim gösterdiğini ifade eder; yani dağılımın asimetrisini ölçer.

Etkin değer (RMS), bir sinyalin güç içeriğini yansıtır ve hem zaman hem de frekans alanında sinyalin güç seviyesindeki değişimleri gösterir. Ayrıca, tepe faktörü (crest factor), genellikle arıza belirtilerinin erken tespitinde önemli bir rol oynar. Etki faktörü (impulse factor) ise, titreşim sinyalindeki ani hataların etkisini ölçmekte kullanışlıdır.

Şekil 7.6’da Trend grafiğinde rulmanın yıllara göre Peak to Peak genlikleri verilmiştir. Burada “3” olarak işaretli bölge rulmanın çalışamayacağını, “2-3” olarak işaretli bölgeler arasında rulmanın bakıma ihtiyacı olduğunu ifade eder. “1” olarak işaretli çizgi rulmanın bozulma eğrisini ifade etmektedir. KFÖ tahminine göre istatistiksel olarak hesaplanan rulmanın 09.07.2026 tarihinde arızaya geçmesi beklenmektedir.

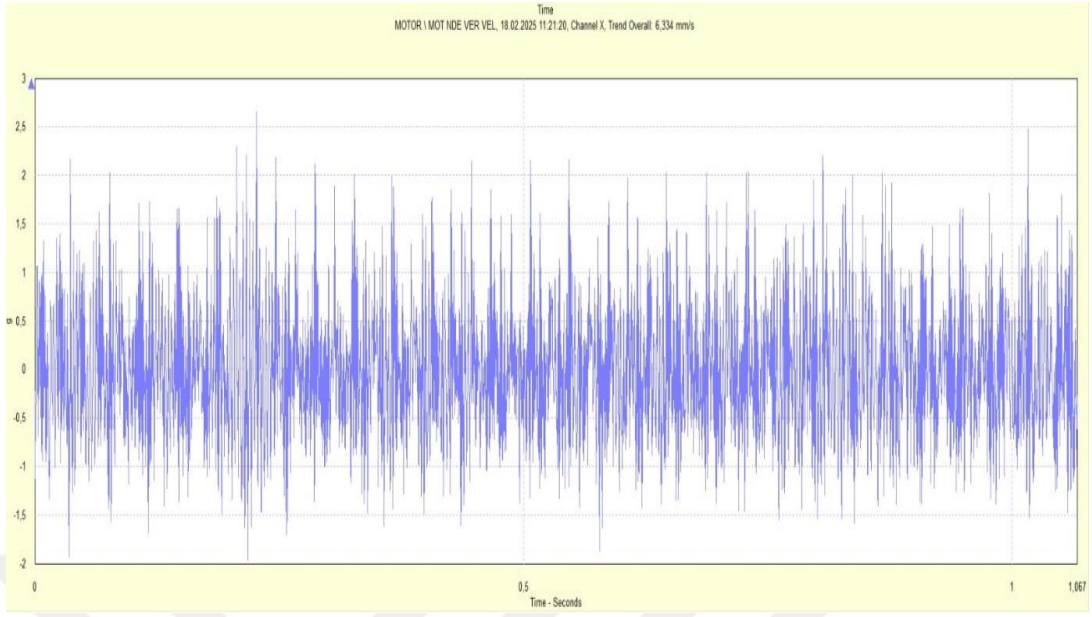


Şekil 7.1. İvme sensörü montaj pozisyonu.

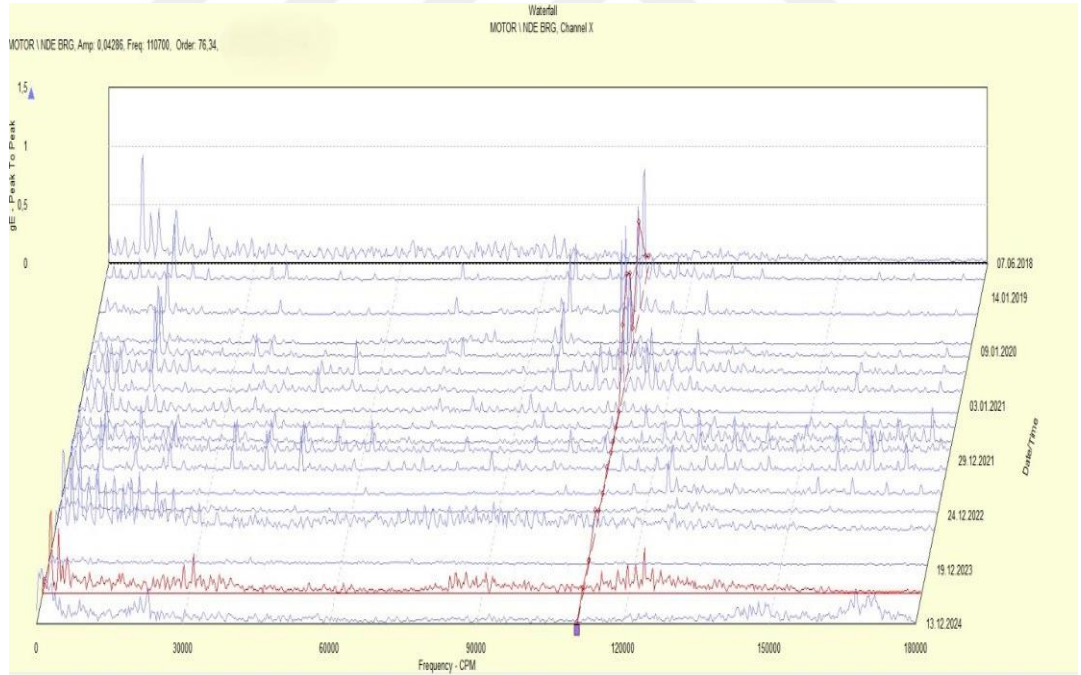


- Hassasiyet: 100 mV/g
- Hassasiyet Duyarlılığı: $\pm 5\%$ 24 °C (75°F)
- İvmelenme Aralığı: 80g peak
- Genlik Doğrusallığı: 1%
- Frekans Aralığı:
 - $\pm 10\%$: 1.0 5000 Hz
 - ± 3 dB: 0.7 5000 Hz
- Monte Edilmiş Nominal Rezonans Frekansı: 22 kHz
- Enine Hassasiyet: $\leq 5\%$ Eksenel

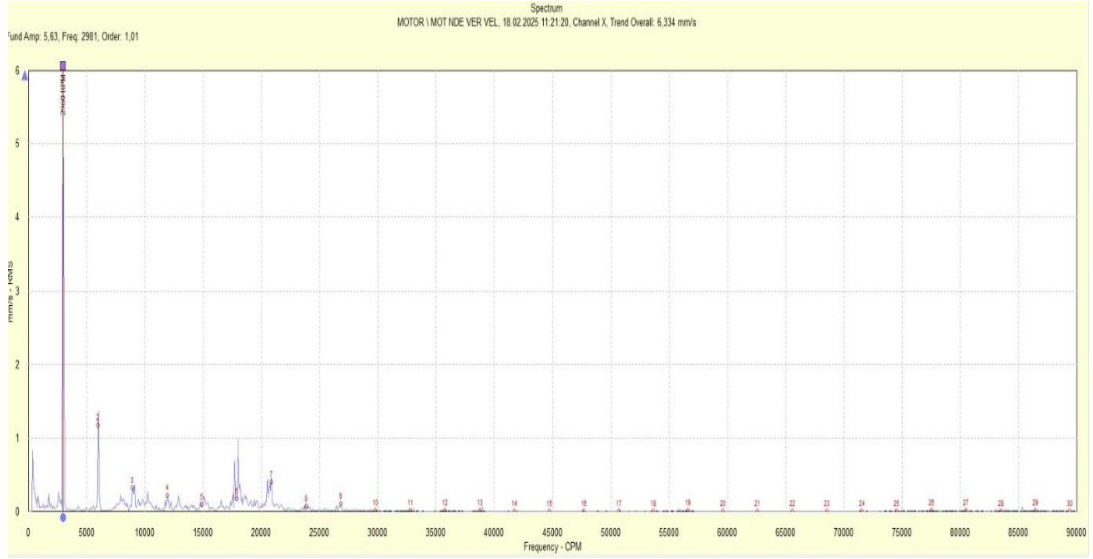
Şekil 7.2. SKF CMSS 2200 ivme ölçer sensör.



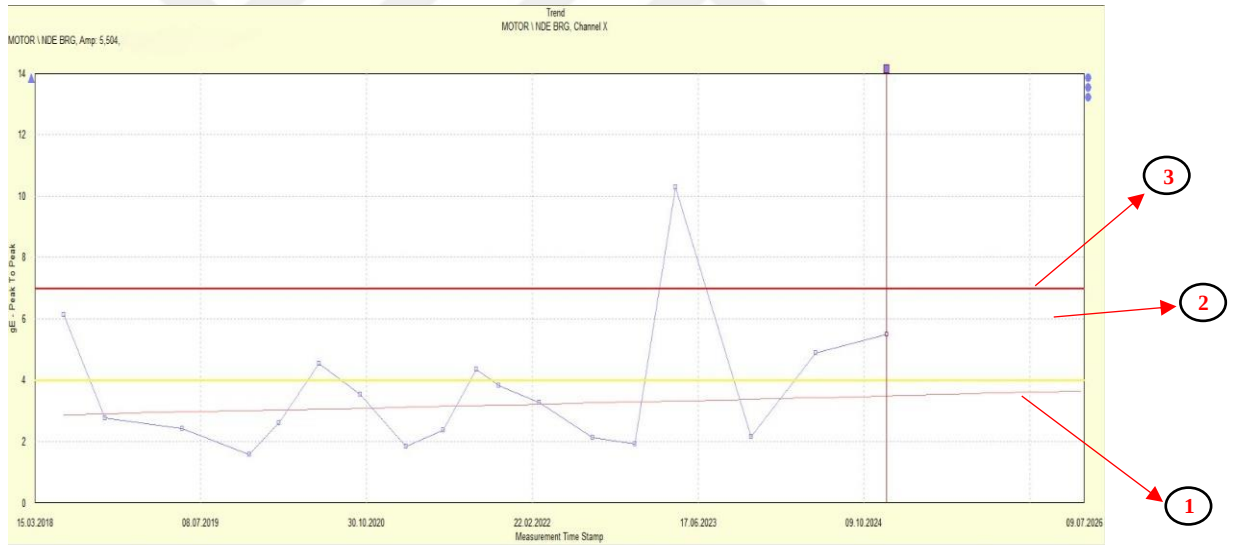
Şekil 7.3. İşlenmemiş titreşim sinyali(zaman alanı).



Şekil 7.4. Güç spektral yoğunluğu(frekans alanı).



Şekil 7.5. Anlık spektrum grafiği.



Şekil 7.6. KFÖ tahmini(trend grafiği).

8.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bakım faaliyetleri, geleneksel olarak her üretim işletmesinde gerekli bir uygulama olarak kabul edilmekle birlikte, günümüzde şirketin mali yapısını doğrudan etkileyen kritik bir işletme fonksiyonu haline gelmiştir. Endüstriyel tesislerde hâlâ yaygın olarak kullanılan arızı, periyodik ve önleyici bakım stratejileri, bazı önemli sınırlamalara sahiptir. Örneğin, arıza gerçekleşikten sonra yapılan müdahalelerde, arıza tespit süresinin uzun olması, yedek parçanın temin süresinin gecikmesi ve bir arızanın başka arızaları tetikleyebilme olasılığı gibi durumlar, üretim sürekliliğini olumsuz etkileyerek bakım maliyetlerini artırmaktadır. Öte yandan, periyodik bakım aralıklarının yanlış belirlenmesi de farklı sorunlara yol açabilir. Aralıklar uzun tutulduğunda arızı bakım ihtimali artarken, kısa tutulması durumunda sistem henüz arıza belirtisi göstermemiş olsa bile gereksiz müdahaleler yapılmakta; bu da hem üretim verimliliğini düşürmekte hem de maliyetleri artırmaktadır. Bu eksikliklerin giderilmesi ve bakım süreçlerinin daha verimli yönetilebilmesi için, makine öğrenmesi tabanlı kestirimci bakım yaklaşımları ön plana çıkmaktadır. Kestirimci bakım, makineden gerçek zamanlı olarak toplanan veriler aracılığıyla sistemin mevcut durumunu analiz eder ve değişen çalışma koşullarına rağmen optimum bakım zamanını belirler. Bu sayede, arızalar meydana gelmeden önce önlem alınabilir ve gereksiz bakım uygulamalarının önüne geçilebilir.

Bu çalışmada, özellikle rulmanlar gibi titreşim üreten sistemlerde, durum verileri kullanılarak sağlık göstergesinin tanımlanabileceği ortaya konmuştur. Uygulanan yöntem, kestirimci bakım uygulamaları için önemli bir potansiyel taşımakta olup, özellikle kalan faydalı ömür (KFÖ) tahmininde etkin bir şekilde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Angelopoulos, A., Michailidis, E. T., Nomikos, N., Trakadas, P., Hatziefremidis, A., Voliotis, S. ve Zahariadis, T. (2019). Tackling faults in the industry 4.0 era- a survey of machine-learning solutions and key aspects. *Sensors*, 20 , 109.
- [2] Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. D. P., Basto, J. P. ve Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- [3] Kumar, S., Suhaib, M. ve Asjad, M. (2020). Industry 4.0: complex, disruptive, but inevitable. *Management And Production Engineering Review*, 11 , 1.
- [4] Kılıç, R, 2023. Sanayi devrimlerinin serüveni: endüstri 1.0'dan endüstri 5.0'a, *Takvim-i Vekayi Dergisi*, 11, 2, 276-291.
- [5] EN 13306, 2017. Maintenance terminology, European Committee for Standardization, Brussels.
- [6] Suzuki, T., 1994. Tpm in process industries: originally published by the japan institute of plant maintenance, First Edition, Routledge, New York, USA.
- [7] Baskak, M. 2005. İTÜ İşletme Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü Bakım Yönetimi Ders Notları, İstanbul.
- [8] Er, E., 2004. Bakım yönetimi ve bilgisayarlı bakım yönetim sistemlerinin Türkiye’de uygulama düzeyi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Lyonnet, P., 1991. Maintenance planning methods and mathematics, First Edition, Springer-Science-Business Media, Berlin, Almanya.
- [10] Garcia, M. A. Sanz-Bobi ve Pico, J. (2006). Intelligent system for predictive maintenance. “application to the health condition monitoring of a wind turbine gearbox”, *Computers in Industry*, 57, 552–568.
- [11] Gürsoy, M., Çolak, U., Gökçe, M., Akkulak, C. ve Ötleş, S., 2019. Endüstri için kestirimci bakım. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, İzmir, 56-66.
- [12]] Zhou, X., Xi, L. ve Lee, J., 2007. Reliability centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92, 530-534.
- [13] Topaz, K. ve Sümen, H., 2003. Kestirimci bakım yöntemini uygulamak. *MakinaTek Dergisi*, 63.

- [14] Orhan, S., Aktürk, N. ve Çelik, V., 2002. Bir santrifüj pompa rulmanının çalışabilirliğinin titreşim analizi ile belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 16, 543-552.
- [15] Hancı, G., 2009. Lastik endüstrisinde kullanılan kestirimci bakım uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, SAU., Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [16] Murphy, T., 2021. Understanding Ultrasonic Signal Analysis. URL Adresi: https://reliabilityweb.com/articles/entry/understanding_ultrasonic_signal_analysis Erişim tarihi: 19.12.2024
- [17] Mobley, K., Higgins, L. ve Wikoff, D., 2008. Maintenance engineering handbook. McGraw-Hill eBook, New York, USA.
- [18] Fried, B., 2021. Machinery lubrication ultrasound for better lubrication, practicing oil analysis. URL Adresi: <https://www.machinerylubrication.com/Read/670/ultrasound-lubrication> Erişim tarihi: 20.12.2024
- [19] Denli, H., 2007. Kestirimci bakım ve uygulamalarının iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, MEÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [20] Denli, H., 2007. Kestirimci bakım ve uygulamalarının iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, MEÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- [21] Kalyoncu, M. 2006. Titreşim Analizi ile makine elemanları arızalarının belirlenmesi. Mühendis ve Makina Dergisi, 47, 552.
- [22] Dokumacı, E. ve Ergüven, N., 1994. Mekanik titreşimler ve gürültü kontrolü. TMMOB Dergisi, 169, 1.
- [23] Baykara, V. İ. 2009. Titreşim analizi ile şanzımanlarda arıza teşhisi ve kestirimci bakım. Yüksek Lisans Tezi, BEÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [24] Orhan, S. 2002. Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analizi ile kestirimci bakımı. Doktora Tezi, KKÜ., Fen Bilimleri, Kırıkkale.
- [25] Parida, S., Kotu, N.R. ve Prasad, M.M, 2007. Development and implementation of reliability centered maintenance using vibration analysis. URL Adresi: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn135/idn135.htm> Erişim tarihi: 07.01.2024
- [26] Yaman, G. ve Karadayı, H., 2014. Titreşim analizi ile pompalarda arıza tesbiti ve kestirimci bakım için örnek bir çalışma. Tesisat Mühendisliği Dergisi 140.
- [27] Çalışan, M. ve Türkoğlu, İ., 2011. Termal kameralar ve uygulamaları. Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ.
- [28] Demirci, B. ve Korkmak C., 2016. Termal video görüntüleme. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi, 458.

- [29] Eker, S. Ve Ayaz, E., 2002. Endüstriyel süreçlerde durum izleme ve öngörülü bakım teknolojileri, İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Dergisi, 1, 1.
- [30] Van Assen M., Lee S.J. ve De Cecco C.N., 2020. Artificial intelligence from a to z: from neural network to legal framework. *European Journal Radiology*, 129, 109083.
- [31] Jordan, M. I. ve Mitchell, T. M. 2015. Machine learning: trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349, 6245, 255-260.
- [32] Moyne, J., Samantaray, J. ve Armacost, M. 2016. Big data capabilities applied to semiconductor manufacturing advanced process control. *IEEE Transactions On Semiconductor Manufacturing*, 29, 4, 283-291.
- [33] Wuest T, Weimer D, Irgens C. ve Thoben K.D., 2016. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications, *Production & Manufacturing Research*, 4, 1, 23–45.
- [34] Chazhoor, A., Mounika, Y., Sarobin, M. V. R., Sanjana, M. V. ve Yasashvini, R. 2020. Predictive maintenance using machine learning based classification models. *Materials Science and Engineering*, 954, 1.
- [35] Lecun, Y., Bottou, E., Bengio, Y., & Haffner, P., 1998. Gradient-based learning applied to document recognition, *Proceedings of the IEEE*, 86, 11, 2278-2324.
- [36] Tang, S., Shen, C., Wang, D., Li, S., Huang, W. ve Zhu, Z., 2018. Adaptive deep feature learning network with nesterov momentum and its application to rotating machinery fault diagnosis, *Neurocomputing*, 305, 1–14.
- [37] Lei, Y., Li, N., Gontarz, S., Lin, J., Radkowski, S. ve Dybala, J. 2016. A model-based method for remaining useful life prediction of machinery. *IEEE Transactions On Reliability*, 65, 3, 1-13.
- [38] Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C. ve Mathew, J., 2009. Rotating machinery prognostics: state of the art, challenges and opportunities, *Mech. Syst. Signal Process*, 23, 3, 724–739.
- [39] Si, X. S., Wang, W., Hu, C. H. ve Zhou, D. H., 2011. remaining useful life estimation a review on the statistical data driven approaches, *European Journal Operation. Research*, 213, 1, 1–14.
- [40] Ozkat, E. C., 2019. The comparison of machine learning algorithms in estimation of remaining useful life, In *IX. International Maintenance Technologies Congress*, 614-619.
- [41] Hou, B., Wang, D., Xia, T., Wang, Y., Zhao, Y. Ve Tsui, K. L., 2021. Investigations on quasi-arithmetic means for machine condition monitoring, *Mechanic Systems Signal Process*, 151, 107451.

[42] Elasha, F., Shanbr, S., Li, X. ve Mba, D., 2019. Prognosis of a wind turbine gear-box bearing using supervised machine learning. Sensors, 19, 14, 1-17.

[43] Abdelli, K., Grießer, H. ve Pachnicke, S., 2020. Machine learning based data driven diagnostic and prognostic approach for laser reliability enhancement. In 22nd International Conference on Transparent Optical Networks(ICTON), Bari, Italy, 1-4.

[44] Yıldız, K., Çamurcu, Y. ve Doğan, B. 2010. Veri madenciliğinde temel bileşenler analizi ve negatıfsız matris çarpanlarına ayırma tekniklerinin karşılaştırmalı analizi, Akademik Bilişim'10, Muğla, XII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 207-213

URL-1 <<https://www.electricistanbul.com/2023/10/30/asen-kron-motorlar-birinci-bolum/>>, Erişim tarihi: 14.03.2024.

URL-2 <<https://www.mathworks.com/videos/predictive-maintenance-part-3-remaining-useful-life-estimation-1549881037621.html>>, Erişim tarihi: 19.03.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Köksal GÜNDOĞDU

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği (2013-2017)

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

- 1) Sarıgözoğlu Aksaray Pres Fabrikası / Proje Yönetimi Sorumlusu (2017-2018)
- 2) Çift Kartal Değirmen Makineleri / Ar-Ge ve Tasarım Sorumlusu (2018-2022)
- 3) Doğuşçay Cips Üretim Tesisi / Mekanik Bakım Şefi (2022-Halen)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Gündoğdu, K., 2025. Yapay zekâ tabanlı kestirimci bakım, ISSRIS'25 5. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu.