



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**RULMANLARIN KALAN FAYDALI ÖMÜR TAHMİNİ İÇİN
TİTREŞİM ANALİZİ TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM
YAKLAŞIMI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Enis KALCIOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Erkan Caner ÖZKAT

RİZE

2023

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, Dr. Öğr. Üyesi Erkan Caner Özkat danışmanlığında, Enis Kalcıoğlu tarafından hazırlanan *Rulmanların Kalan Faydalı Ömür Tahmini İçin Titreşim Analizi Tabanlı Kestirimci Bakım Yaklaşımı* adlı bu tez çalışması, 07/07/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Dr. Öğr. Üyesi Erkan Caner ÖZKAT	
Üye	: Doç. Dr. Muhammet DEMİRTAŞ	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Emre DEMİRCİ	

ETİK BEYAN

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Rulmanların Kalan Faydalı Ömür Tahmini İçin Titreşim Analizi Tabanlı Kestirimci Bakım Yaklaşımı” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

07/07/2023

Enis KALCIOĞLU

ÖN SÖZ

Bu tez, asansörlerde meydana gelen arızaların, makine öğrenmesi algoritmalarından biri olan kestirimci bakım metoduyla incelenerek arıza gerçekleşmeden önce tespit etmek ve gerekli müdahaleyi yaparak asansör sisteminin kesintisiz bir şekilde çalışmasını sağlamaya yönelik deneysel ve gözlemsel bir çalışmadır.

Bu çalışma; ile daha işlevsel, kesintisiz ve uzun süreli arızalardan korunmuş asansör sistemleri oluşturmak ve bu konuda araştırma yapmak gayesiyle yola çıkılmış ve çalışmamın temelini oluşturmuştur.

Bu çalışmanın her aşamasında yardımlarını, desteğini, ilgisini, engin bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen ve yönlendirmeleriyle yolumu aydınlatan, üzerimde büyük emeği olan kıymetli hocam Dr. Öğr. Gör. Erkan Caner ÖZKAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili babama, zenginliğim ve sığınağım olan kardeşlerime, hayatımı renklendiren ve anlamlandıran biricik eşim Kristina'ya, 3,5 aylık oğlum Emir'e teşekkür etmek istiyorum.

Güzel yürekli ve şefkatli merhume annem Neriman KALCIOĞLU'na atfedilmiştir. Onun sevgi dolu hatıraları her zaman benimle olacaktır.

Enis KALCIOĞLU
2023 / RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VII
ABSTRACT.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
1.1. Bakım Yöntemleri.....	3
1.1.1. Düzeltici Bakım	4
1.1.2. Periyodik Bakım	5
1.1.3. Kestirimci Bakım	7
1.2. Kestirimci Bakımın Kullanıldığı Sektörler	9
1.2.1. Kestirimci Bakımın Rulmanlar Üzerinde Kullanılması.....	11
1.2.2. Rulmanlar ve Arıza Sebepleri	13
1.3. Kestirimci Bakımda Kullanılan Veriler	15
1.4. Titreşim Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım	18
1.4.1. Zaman Alan Analizi	19
1.4.2. Frekans Alan Analizi	21
1.4.3. Zaman – Frekans Alan Analizi	21
1.5. Termal Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım	22
1.6. Akustik Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım	23
2. VERİYE DAYALI KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI.....	25
2.1. İstatistiksel Yaklaşım	25
2.2. Model Tabanlı Yaklaşımlar.....	26
2.3. Yapay Zeka Yaklaşımları.....	26
2.3.1. Denetimli Öğrenme.....	28
2.3.1.1. Doğrusal Regresyon	28

2.3.1.2. Karar Ağaçları	28
2.3.1.3. K-En Yakın Komşu	28
2.3.1.4. Destek Vektör Makineleri	29
2.3.1.6. Rastgele Ormanlar	29
2.3.2. Denetimsiz Öğrenme Algoritmaları.....	29
2.3.2.1. K-ortalama Kümeleme	29
2.3.2.2. Hiyerarşik Kümeleme:.....	30
2.4. Makine Öğrenmesinin Asansörlerde Uygulanması	30
3. ASANSÖR TANIMI VE GENEL YAPISI	32
3.1. Asansörün Tanımı	32
3.2. Asansörün Tarihçesi.....	32
3.3. Türkiye’de Asansör Sektörü	34
3.4. Asansörlerin Çalışma Prensibi	36
3.5. Asansörlerin Bileşenleri	38
3.5.1. Kabin.....	40
3.5.2. Kapı ve Kapı Mekanizması.....	40
3.5.3. Kılavuz Ray.....	41
3.5.4. Karşı Ağırlık	42
3.5.5. Askı Halatları	42
3.5.6. Asansör Makine ve Motoru.....	42
3.5.7. Tamponlar	43
3.5.8. Patenler.....	44
3.5.9. Hız Regülatörü	45
3.5.10. Paraşüt Fren Sistemi.....	45
3.5.11. Sınır Kesiciler	46
3.5.12. Kontrol Kartı	46
3.5.13. Kumanda Panosu.....	47
3.6. Asansörlerde Karşılaşılan Temel Arızalar	48
3.6.1. Mekaniksel Arızalar	48
3.6.2. Elektriksel Arızalar	50
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
4.1. Çalışmada Kullanılan Test Düzeneği ve Veri Seti.....	52

4.2. Çalışmada Kullanılan Yöntem	54
4.2.1. Veri Önışleme	55
4.2.2. Öznitelik Çıkarımı.....	56
4.2.3. Veri Normalleştirme	58
4.2.4. Öznitelik Seçimi.....	58
4.2.5. Sağlık Göstergesi	59
4.2.6. Bozulma Modeli.....	60
4.2.7. Kalan Faydalı Ömür Tahmini	61
5. BULGULAR ve TARTIŞMALAR	63
5.1. Sağlık Göstergesi	63
5.2. Bozulma Modeli.....	70
5.3. Kalan Faydalı Ömür Tahmini	71
6. SONUÇ.....	75
KAYNAKLAR.....	79

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Erkan Caner ÖZKAT
Hazırlayan : Enis KALCIOĞLU
Yıl : 2023
Sayfa Sayısı : 83

ÖZET

RULMANLARIN KALAN FAYDALI ÖMÜR TAHMİNİ İÇİN TİTREŞİM ANALİZİ TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM YAKLAŞIMI

Kestirimci bakım, ekipmanlardan elde edilen ölçümlerin sensörler aracılığıyla analiz edilerek arızaların önceden tahmin edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu bakım yöntemi, doğru bir şekilde ekipmanların sağlık durumunun izlenmesi için çeşitli teknikler içermektedir. Bu teknikler, lokal veya bulut tabanlı olarak çalışabilen, veri analizi ve makine öğrenme algoritmalarını içeren yöntemlerdir. Kestirimci bakım, plansız bakım ve periyodik bakıma göre maliyet avantajı sağlamaktadır.

Asansörler, modern toplumun vazgeçilmez bir parçasıdır ve güvenli ve kesintisiz çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Ancak, beklenmedik arızalar ve kesintiler, kullanıcı güvenliğini tehlikeye atmaktadır ve işletme sahiplerine büyük mali kayıplar yaşatabilmektedir. Rulmanlar, asansörlerde en sık arızalanan ekipmanlardan biridir. Rulmanlar, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak veya hareketin istenen yönde kısıtlanmasını sağlayarak döner veya doğrusal hareketi kolaylaştıran bileşenlerdir. Zorlu çalışma koşullarına maruz kaldıklarından dolayı aşırı yük, yüksek hız ve yetersiz yağlama gibi faktörlerle karşılaşılırlar. Bu koşullar altında, zamanla artan boşluk, sürtünme kuvveti ve aşırı ısınma gibi etkenlerle performans düşüklüğü ve arızalar meydana gelebilir. Bu arızaların zamanında tespit edilmemesi ve uygun bakımlarının yapılmaması, rulmanların bozulmasına yol açabilir.

Bu tez çalışmasında, bir asenkron motorun miline bağlı beş adet aynı karakteristiğe sahip rulman üzerinden elde edilen titreşim verilerinin analizi ile rulmanlarda oluşabilecek arızaların önceden tahmin edilmesi için bir kestirimci bakım modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, rulman bozulmasıyla ilgili veri seti, araştırmacılara açık kaynak olarak sunulan “*Biao Wang, Yaguo Lei, Naipeng Li, Ningbo Li, A Hybrid Prognostics Approach for Estimating Remaining Useful Life of Rolling Element Bearings, IEEE Transactions on Reliability, vol. 69, no. 1, pp. 401-412, 2020*” çalışmasından alınmıştır.

Bu çalışmada, rulmanlardan elde edilen titreşim sinyalleri zaman alanından frekans alanına Hızlı Fourier Dönüşümü ve frekans alanından da zaman-frekans alanına Dalgacık Dönüşümü yöntemleriyle işlenmiştir. Zaman alanında Ortalama, Standart Sapma, RMS, Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü gibi öznitelikler hesaplanmıştır. Frekans alanında ise Tepe Frekansı özelliği kullanılmıştır. Ayrıca, zaman-frekans alanında Ortalama Tepe Frekansı özelliği elde edilmiştir. Daha sonra, monotonluk seviyelerine göre seçilen belirli sayıda öznitelik, temel bileşen analizi kullanılarak bir sağlık göstergesi olarak birleştirilmiştir. Bu sağlık göstergesi, rulmanın sağlık durumunu tek bir değerle göstermektedir. Son olarak, bu sağlık göstergesi kullanılarak verifikasyon veri setinde rulmanların kalan faydalı ömürleri tahmin edilmiştir.

Bu çalışma, asansörlerdeki rulman arızalarının önceden tahmin edilmesi için kestirimci bakım yöntemlerinin kullanılmasını amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, asansörlerin bakım süreçlerini optimize etmek, beklenmedik arızaları önlemek ve işletme maliyetlerini düşürmek için önemli bir adım olabilir. Ayrıca, bu çalışma, veri analizi ve makine öğrenme tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini gösteren bir örnek olarak da hizmet edebilir.

Anahtar Kelimeler: Asansörler, Rulmanlar, Kestirimci bakım, Makine öğrenmesi, Kalan faydalı ömür, Arıza tespiti

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Department of Mechanical Engineer
Thesis Type : Master's Thesis
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Erkan Caner ÖZKAT
Author : Enis KALCIOĞLU
Year : 2023
Pages : 83

ABSTRACT

**VIBRATION ANALYSIS-BASED PREDICTIVE MAINTENANCE APPROACH
FOR REMAINING USEFUL LIFE ESTIMATION OF BEARINGS**

Predictive maintenance is a method that enables the early prediction of failures by analyzing measurements obtained from equipment through sensors. This maintenance approach involves various techniques for accurately monitoring the health condition of equipment. These techniques encompass methods that can operate locally or in cloud-based environments and incorporate data analysis and machine learning algorithms. Predictive maintenance offers cost advantages compared to unplanned and periodic maintenance.

Elevators are an indispensable part of modern society, and their safe and uninterrupted operation is of great importance. However, unexpected failures and interruptions jeopardize user safety and can lead to significant financial losses for business owners. Bearings are one of the most frequently malfunctioning components in elevators. Bearings are components that reduce friction between moving parts or facilitate rotational or linear movement by restricting motion in the desired direction. They are exposed to challenging operating conditions such as excessive loads, high speeds, and inadequate lubrication. Under these conditions, factors such as increased clearance, friction force, and excessive heating can result in performance degradation and failures. Failure to detect these failures in a timely manner and neglecting proper maintenance can lead to bearing deterioration.

In this thesis study, a predictive maintenance model has been developed to predict potential failures in bearings by analyzing vibration data obtained from five bearings with the same characteristics attached to the shaft of an asynchronous motor. The dataset related to bearing failures was obtained from the study titled "A Hybrid Prognostics Approach for Estimating Remaining Useful Life of Rolling Element Bearings" by Biao Wang, Yaguo Lei, Naipeng Li, Ningbo Li, published in *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 69, no. 1, pp. 401-412, 2020", which is openly available to researchers.

The vibration signals obtained from bearings were processed using Fast Fourier Transform from the time domain to the frequency domain and Wavelet Transform from the frequency domain to the time-frequency domain in the study. In the time domain, features such as mean, standard deviation, RMS, peak-to-peak, kurtosis, and crest factor were calculated. The peak frequency feature was utilized in the frequency domain. Additionally, the average peak frequency feature was obtained in the time-frequency domain. Subsequently, a selected number of features based on monotonicity levels were combined as a health indicator using principal component analysis. This health indicator represents the health condition of the bearing with a single value. Finally, using this health indicator, the remaining useful life of bearings was predicted in the verification dataset.

This study aims to employ predictive maintenance methods for the early prediction of bearing failures in elevators. The obtained results could be a significant step towards optimizing elevator maintenance processes, preventing unexpected failures, and reducing operational costs. Furthermore, this study can serve as an example demonstrating the application of data analysis and machine learning techniques in industrial settings.

Keywords: Elevators, Bearings, Predictive maintenance, Machine learning, Remaining useful life, Failure detection.

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Yıllara göre asansör periyodik kontrol verileri.....	35
Tablo 2. Veri setindeki rulmanların çalışma koşulları	54
Tablo 3. Üstel bozulma modelinde kullanılan parametre değerleri	61
Tablo 4. Üstel bozulma modelinin KFÖ'nün tahmin performansı	73



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Ekipmanın sağlık durumu ve bakım yöntemleri	4
Şekil 2. Bakım yöntemlerinin maliyetleri.....	9
Şekil 3. Bilyalı rulman.....	14
Şekil 4. Kestirimci bakımda kullanılan veriler.	16
Şekil 5. Kütle, yay ve sönüm elemanlarından oluşan mekanik sistem.....	18
Şekil 6. a) Arızalı bir İHA pervanesi ve oluşturduğu titreşim sinyalinin analizi, b) zaman alanı, c) frekans alanı ve d) zaman-frekans alanı	22
Şekil 7. Termal kamera ile arıza tespiti: a) elektriksel ve b) mekanik arıza kaynaklı ısınma.....	23
Şekil 8. Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakım deney düzeneği.....	24
Şekil 9. Elisha Graves Otis tarafından icat edilen ilk asansör.	33
Şekil 10. Türkiye’deki tarihi asansörler a) Pera Palas Oteli, İstanbul ve b) Asansör, İzmir.....	34
Şekil 11. Karşı ağırlık ve kabin	37
Şekil 12. Asansör şematik görüntüsü	39
Şekil 13. Asansör kabini	40
Şekil 14. . Asansör makine ve motor.....	43
Şekil 15. Tamponlar	44
Şekil 16. a) Silikon paten, b) Makaralı paten	44
Şekil 17. Hız regülatörü.....	45
Şekil 18. Paraşüt fren sistemi	46
Şekil 19. Kontrol kartı	47
Şekil 20. Kumanda panosu	48
Şekil 21. a) Plastik saptırma kasnak, b) Yan destekli kasnak.....	50
Şekil 22. Rulman test platformu	53
Şekil 23. Normal ve bozulmuş rulman fotoğrafları. (a) Normal, (b) İç bilezik hatası, (c) Kafes hatası, (d) Dış bilezik hatası	53
Şekil 24. Önerilen yöntemin iş akış şeması.....	55
Şekil 25. 123 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği	64

Şekil 26. 161 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği	64
Şekil 27. 158 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği	64
Şekil 28. 122 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği	65
Şekil 29. 52 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği	65
Şekil 30. 123 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği	66
Şekil 31. 122 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği	66
Şekil 32. 52 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği	67
Şekil 33. 52 dakikalık veri seti için zaman-frekans alanı grafiği	68
Şekil 34. 123 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri	68
Şekil 35. 122 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri	69
Şekil 36. 52 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri	69
Şekil 37. Tüm veri seti için elde edilen sağlık göstergesi	70
Şekil 38. Bozulma modelinde kullanılan parametrelerin belirlenmesi.....	71
Şekil 39. Verifikasyon veri seti için kalan faydalı ömür tahmini	72

GİRİŞ

Asansörler, modern toplumun vazgeçilmez bir parçasıdır ve güvenli ve kesintisiz çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Ancak, beklenmedik arızalar ve kesintiler, kullanıcı güvenliğini tehlikeye atmaktadır ve işletme sahiplerine büyük mali kayıplar yaşatabilmektedir. Rulmanlar, asansörlerde en sık arızalanan ekipmanlardan biridir. Rulmanlar, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak veya hareketin istenen yönde kısıtlanmasını sağlayarak döner veya doğrusal hareketi kolaylaştıran bileşenlerdir. Zorlu çalışma koşullarına maruz kaldıklarından dolayı aşırı yük, yüksek hız ve yetersiz yağlama gibi faktörlerle karşılaşır. Bu koşullar altında, zamanla artan boşluk, sürtünme kuvveti ve aşırı ısınma gibi etkenlerle performans düşüklüğü ve arızalar meydana gelebilir. Bu arızaların zamanında tespit edilmemesi ve uygun bakımlarının yapılmaması, rulmanların bozulmasına yol açabilir.

Kestirimci bakım, ekipmanlardan elde edilen ölçümlerin sensörler aracılığıyla analiz edilerek arızaların önceden tahmin edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Ekipmanların sağlık durumunun doğru bir şekilde izlenmesi için çeşitli teknikleri içeren bu bakım yöntemi, lokal veya bulut tabanlı olarak çalışabilen, veri analizi ve makine öğrenme algoritmalarını içeren yöntemlerden oluşmaktadır. Kestirimci bakım, plansız bakım ve periyodik bakıma göre maliyet avantajı sağlamaktadır.

Makine öğrenmesi teknikleri son yıllarda birçok alanda kullanılmaktadır (Thai, 2022; Vadyala vd., 2022; Amini vd., 2023; Paulson vd., 2022; Wang vd., 2022; Greener vd., 2022). Bu teknikler, verilerin analizi yoluyla öğrenme yapabilen ve gelecekteki olayları tahmin edebilen algoritmaların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, asansörlerdeki rulman arızalarının önceden tahmin edilmesi ve kestirimci bakım yöntemlerinin kullanılmasıyla asansörlerin güvenli ve kesintisiz çalışmasının sağlanmasıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, rulmanlardan elde edilen titreşim sinyallerinin analiz edilerek rulman arızalarının önceden tespit edilmesini ve kalan faydalı ömür tahmini için titreşim analizi tabanlı kestirimci bakım yöntemi geliştirmektir. Bu çalışmada, rulmanlardan elde edilen titreşim sinyalleri zaman alanından frekans alanına Hızlı Fourier Dönüşümü ve frekans alanından da zaman-frekans alanına Dalgacık Dönüşümü yöntemleriyle işlenmiştir. Zaman alanında Ortalama, Standart

Sapma, RMS, Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü gibi öznitelikler hesaplanmıştır. Frekans alanında ise Tepe Frekansı özelliği kullanılmıştır. Ayrıca, zaman-frekans alanında Ortalama Tepe Frekansı özelliği elde edilmiştir. Daha sonra, monotonluk seviyelerine göre seçilen belirli sayıda öznitelik, temel bileşen analizi kullanılarak bir sağlık göstergesi olarak birleştirilmiştir. Bu sağlık göstergesi, rulmanın sağlık durumunu tek bir değerle göstermektedir. Son olarak, bu sağlık göstergesi kullanılarak verifikasyon veri setinde rulmanların kalan faydalı ömürleri tahmin edilmiştir.

Ayrıca, bu çalışma, veri analizi ve makine öğrenme tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini gösteren bir örnek olarak da hizmet edebilir. Rulmanlarda titreşim analizi tabanlı kestirimci bakım yaklaşımının kullanılması, diğer endüstriyel ekipmanlarda da benzer bir yöntem olarak uygulanabilir ve arızaların önceden tespit edilmesi ve maliyetli onarımların önlenmesi açısından büyük avantajlar sunabilir.

Bu çalışmanın sonuçları, titreşim analizi tabanlı kestirimci bakım yaklaşımının rulman arızalarının önceden tahmin edilmesi için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Elde edilen sağlık göstergesi, rulmanların sağlık durumunu tek bir değerle ifade ederek bakım kararlarının alınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu çalışma, asansörlerde rulman arızalarının önlenmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunarak güvenli ve verimli asansör işletmelerinin sağlanmasına yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Bu tezin birinci bölümde, öncelikle makine öğrenmesi algoritmaları hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Ardından, kestirimci bakımın önemi vurgulanmış ve makine öğrenmesi algoritmaları ile kestirimci bakımın nasıl uygulanabileceği üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde, veriye dayalı kestirimci bakım uygulamaları sınıflandırılmıştır. Üçüncü bölümde, asansörlerin tanımı, tarihçesi ve Türkiye'deki asansör sektörü hakkında bilgiler sunulmuş, ayrıca asansörleri oluşturan temel bileşenler ve karşılaşılan arızalar hakkında genel bilgiler verilmiş ve bu arızalar kendi içinde sınıflandırılmıştır. Dördüncü bölümde ise, tez çalışmasının temel adımlarının ve kullanılan araç-gereçlerin ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise, elde edilen bulgular üzerinde durularak değerlendirmeler yapılmış ve son bölümde sonuçlara değinilmiştir.

1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bakım, herhangi bir makine veya ekipmanın, düzgün bir şekilde çalışması, performansının korunması ve arızalarının önceden tahmin edilerek önlenmesi için gerekli olan düzenli ve planlı işlemlerdir (Pinciroli vd., 2023). Günümüzde, endüstriyel tesislerde kullanılan makinelerin sayısı artmakta ve bunların verimli bir şekilde çalışması, üretim hedeflerine ulaşılması için oldukça önemlidir. Bu nedenle, bakım yöntemleri de büyük önem taşımaktadır. Klasik bakım yöntemlerinde, makinelerin belirli aralıklarla durdurulması ve bakımının yapılması gerekmektedir. Ancak, bu yöntemlerin dezavantajları, makinelerin performansının sadece bakım dönemlerinde kontrol edilebilmesi ve arızaların önceden tahmin edilememesidir (Pinciroli vd., 2023; Tibbetts vd., 2022). Bu nedenle, son yıllarda makine öğrenmesi teknikleri, özellikle kestirimci bakım konusunda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Arena vd., 2022; Abidi vd., 2022; Vallim vd., 2022; Ozkat vd., 2023). Makine öğrenmesi yöntemleri, makinelerin performansını ve arızalarını önceden tahmin etmek için kullanılan veri analizi teknikleridir.

1.1. Bakım Yöntemleri

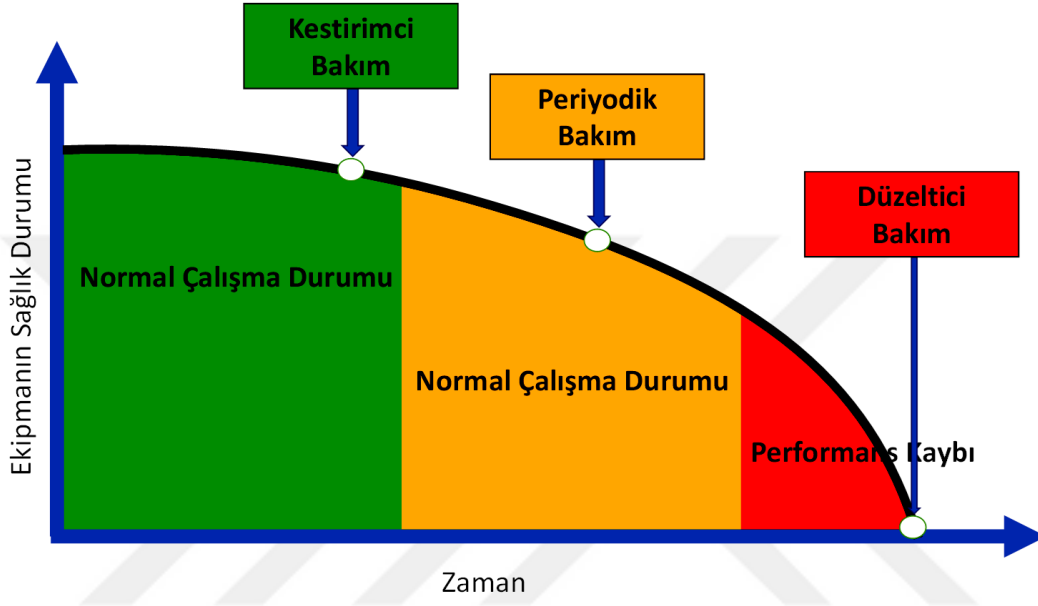
Bakım, makinenin ömrünü artırmak, işletme maliyetlerini azaltmak ve güvenliği sağlamak için gereklidir. Makine öğrenmesi algoritmaları, bakım yöntemleriyle birlikte kullanıldığında daha akıllı ve verimli bir bakım stratejisi oluşturulmasına yardımcı olabilir (Vallim vd., 2022; Ozkat vd., 2023; Hesabi vd., 2022).

Makine öğrenmesi algoritmaları, makinelerin işletme verilerini analiz ederek, bakım zamanlamalarını tahmin edebilirler. Bu, düzenli bakım planlamasının daha etkili bir şekilde yapılmasına olanak sağlar. Örneğin, makinenin hangi parçasının ne zaman değiştirilmesi gerektiği, hangi arızaların meydana gelebileceği gibi soruların cevaplanması için makine öğrenmesi kullanılabilir (Vallim vd., 2022; Ozkat vd., 2023; Hesabi vd., 2022).

Makine öğrenmesi algoritmaları ayrıca, makinenin çalışma verilerini analiz ederek, önleyici bakım ihtiyaçlarını tahmin edebilirler. Bu, arızaların meydana gelmeden önce önlenmesine yardımcı olur. Örneğin, bir motorun yağı değiştirilmeden

önce ne zaman kirlendiği tahmin edilebilir. Bu sayede, motorun zarar görmesi önlenerek, bakım maliyetleri azaltılabilir (Ozkat vd., 2023).

Bakım programları üç ana kategori altında incelenir: düzeltici bakım, periyodik bakım ve kestirimci bakım (Zonta vd., 2020). Bu bakım yöntemleri uygulama zamanı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ekipmanın sağlık durumu ve bakım yöntemleri

1.1.1. Düzeltici Bakım

Düzeltici bakım, ekipmanların arızalanmasından sonra yapılan tamir işlemlerini ifade eder ve "reaktif" bakım yaklaşımının bir parçasıdır. Bu yaklaşım, "bozulana kadar dokunma, ekipmanı çalıştırma ve arıza gerçekleştikten sonra tamir etme" anlayışını benimser.

Düzeltici bakım yaklaşımı, önleyici ve kestirimci bakım teknikleri ile karşılaştırıldığında, daha az etkilidir çünkü ekipmanlar veya makineler arızalandığında müdahale edilir. Bu nedenle, işletmelerin, düzeltici bakımdan kaçınmak ve daha önceden arızaları önlemek için proaktif bakım teknikleri (periyodik bakım ve kestirimci bakım) kullanması tavsiye edilir (Bastías vd., 2023).

Bakımın en pahalı yöntemi olan düzeltici bakım, bir dizi dezavantaja sahip olup, dikkat edilerek gerçekleştirilmelidir. İlk olarak, ekipman arızalarından

kaynaklanan iş duruşları, işletmelerin üretkenliğini olumsuz etkileyerek maliyetleri artırır. Bu durum, üretim kayıplarına ve iş sürekliliğinin tehlikeye girmesine yol açabilir. Bundan dolayı, ambar stokunda maksimum miktarda yedek parça bulundurmak zorunludur (Arena vd., 2022). Bu, olası arızaların hızlı bir şekilde giderilmesini sağlar ve süresizlik süresini minimuma indirir. İkinci olarak, düzeltici bakım yöntemi, ekipmanların ömrünü kısaltabilir ve dolayısıyla bakım maliyetlerini artırabilir. Ekipmanların sürekli olarak arızalanması ve tamir edilmesi, daha sık yedek parça gerektirebilir ve bakım masraflarını yükseltebilir (Bastías vd., 2023; Arena vd., 2022). Ayrıca, yanlış müdahaleler veya hatalı tamir işlemleri, ekipmanın daha fazla zarar görmesine yol açabilir. Bu nedenle, düzeltici bakımın dikkatli bir şekilde planlanması ve uygulanması önemlidir, böylece maliyetler en aza indirilir ve ekipmanın sağlığı korunur. Beklenmedik arızalar, çalışanların ve çevrenin zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, düzeltici bakımın dezavantajları göz önünde bulundurularak, periyodik bakım ve kestirimci bakım kullanması tavsiye edilir. Bu teknikler, ekipmanların ömrünü uzatır, işletmelerin üretkenliğini artırır ve bakım maliyetlerini azaltır (Bastías vd., 2023; Arena vd., 2022).

Sonuç olarak, düzeltici bakım, arıza gerçekleşikten sonra yapılan bir tamir yaklaşımıdır ve genellikle dikkatli bir şekilde planlanması ve uygulanması önemlidir, böylece maliyetler en aza indirilir ve ekipmanın sağlığı korunur.

1.1.2. Periyodik Bakım

Periyodik bakım, bir ekipmanın veya makinenin çalışır durumda kalması, güvenilirliğinin ve ömrünün artırılması için belli periyotlarda, düzenli olarak belirlenmiş bir zaman aralığında yapılan bakımdır (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022). Periyodik bakım, ekipmanların ve makinelerin arızalarının önceden tespit edilmesine ve giderilmesine yardımcı olur. Bu da beklenmedik duruşların önüne geçerek üretim sürekliliğini sağlar ve dolayısıyla işletmelerin maliyetlerini düşürür. Ayrıca, düzenli olarak yapılan periyodik bakım, ekipmanların veya makinelerin ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır. Aksi takdirde, hasarlı veya aşınmış parçaların zamanında değiştirilmemesi durumunda daha büyük bir arıza meydana gelebilir ve tamir maliyetleri artar (Eddarhri vd., 2022).

Periyodik bakım, farklı ekipmanlar ve makineler için farklı zaman aralıklarında yapılmalıdır. Bunun nedeni, farklı ekipman ve makinelerin farklı kullanım koşullarına sahip olmalarıdır. Bazı ekipmanlar daha yoğun kullanıldığından, periyodik bakımın daha sık yapılması gerekebilirken, bazıları daha az yoğun kullanıldığından daha az sıklıkta bakım gerektirebilir (Wu ve Zheng, 2023).

Periyodik bakımın önemli avantajlarından biri, ekipmanların düzenli olarak incelenmesine ve bakımının yapılmasına olanak tanır. Bu sayede, potansiyel arıza belirtileri önceden tespit edilir ve gerekli önlemler alınarak arızaların ortaya çıkması engellenir. Arızaların önlenmesi, üretim sürekliliğini sağlar ve işletme verimliliğini artırır. Ayrıca, ekipmanların doğru çalışmasını sağlar ve aşırı yıpranma veya aşınmanın önüne geçer. Bu, ekipmanların daha uzun süre verimli bir şekilde çalışmasını sağlar ve yeniden yatırım maliyetlerini azaltır.

Periyodik bakımın bir diğer avantajı maliyet tasarrufudur çünkü ekipman arızalarının önlenmesine ve ömrünün uzatılmasına yardımcı olduğu için maliyetleri azaltır. Ekipmanların arızalandığında, tamir ve iş duruşu maliyetleri ortaya çıkar. Ancak, periyodik bakımın düzenli olarak yapılmasıyla bu maliyetler önemli ölçüde azalır. Ayrıca, periyodik bakım sayesinde planlı bakım faaliyetleri gerçekleştirilir, böylece beklenmedik maliyetlerin ortaya çıkma olasılığı da azalır (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023).

Bununla birlikte, periyodik bakımın dezavantajları da vardır. Öncelikle, periyodik bakımın düzenli olarak yapılması gerektiği için işletmelere ek bir maliyet yükü getirir. Bu, bazı işletmeler için mali açıdan zorlayıcı olabilir ve bütçe planlaması yaparken dikkate alınması gereken bir faktördür. Buna ek olarak, periyodik bakım sırasında iş duruşu yaşanması da bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. Bu, işletmenin üretkenliğini azaltabilir ve iş sürekliliğini etkileyebilir. Bu nedenle, periyodik bakım planlaması yapılırken işletmenin operasyonel gereksinimleri ve çalışma saatleri dikkate alınmalı ve bakım faaliyetleri en uygun zamanlarda gerçekleştirilmelidir. İş duruşunun minimize edilmesi için alternatif ekipmanların kullanılması veya bakım faaliyetlerinin vardiya dışı saatlere denk getirilmesi gibi stratejiler uygulanabilir (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023).

Yanlış planlama, periyodik bakımın dezavantajlı olmasına neden olabilir. Ekipmanların düzenli bakımının yapılması gereken zamanlarının doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bunun için önceden yapılan analizler, ekipmanların kullanım yoğunluğu, işletme süreçleri ve ekipmanların özellikleri gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Yanlış planlama, bakım sürelerinin işletmenin üretkenliğini ve iş sürekliliğini olumsuz etkileyecek şekilde uzamasına neden olabilir (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023).

Sonuç olarak, arızaların önlenmesi, ekipman ömrünün uzaması ve maliyet tasarrufu sağlaması gibi periyodik bakımın avantajları işletmeler için önemlidir. Ancak, düzenli maliyetler, iş duruşu ve yanlış planlama gibi dezavantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır. İşletmelerin periyodik bakım stratejilerini planlarken, bu avantajlar ve dezavantajlar dikkate alınarak en uygun ve etkili yöntemlerin belirlenmesi gerekmektedir (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023).

1.1.3. Kestirimci Bakım

Kestirimci bakım, ekipmanlardan elde edilen verilerini analiz ederek, modeller oluşturmak ve bu modeller ile ekipmanların gelecekteki arızalarının önceden tahmin edilmesi için kullanılan bir bakım yöntemidir (Nishat Toma ve Kim, 2020; Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022).

Kestirimci bakım, diğer bakım türlerinden ayrılan birçok avantajı sayesinde işletmelerin tercih ettiği bir yöntemdir. Öncelikle, ekipman arızalarının önceden tespit edilmesini sağlayarak düzeltici ve periyodik bakımdan daha verimli bir yaklaşım sunar. Bu sayede, arızaların önlenmesi için zamanında müdahale edilebilir ve üretim sürekliliği sağlanabilir. Ayrıca, periyodik bakımdan daha az duruş süresi sağlar ve daha az maliyetli bir yaklaşım sunar. Ayrıca, ekipman ömrünün uzatılması da kestirimci bakımın bir diğer avantajıdır. Ekipman arızalarının önceden tespit edilmesi sayesinde, ekipmanların daha uzun süreli kullanımı mümkün olur, bakım maliyetleri azalır ve işletme maliyetleri düşer. İş güvenliği de kestirimci bakımın bir diğer avantajıdır. Ekipman arızalarının önceden tespit edilmesi sayesinde iş güvenliği artırılır ve çalışanların güvenliği ve sağlığı korunur, iş kazaları önlenir (Bektash vd., 2022).

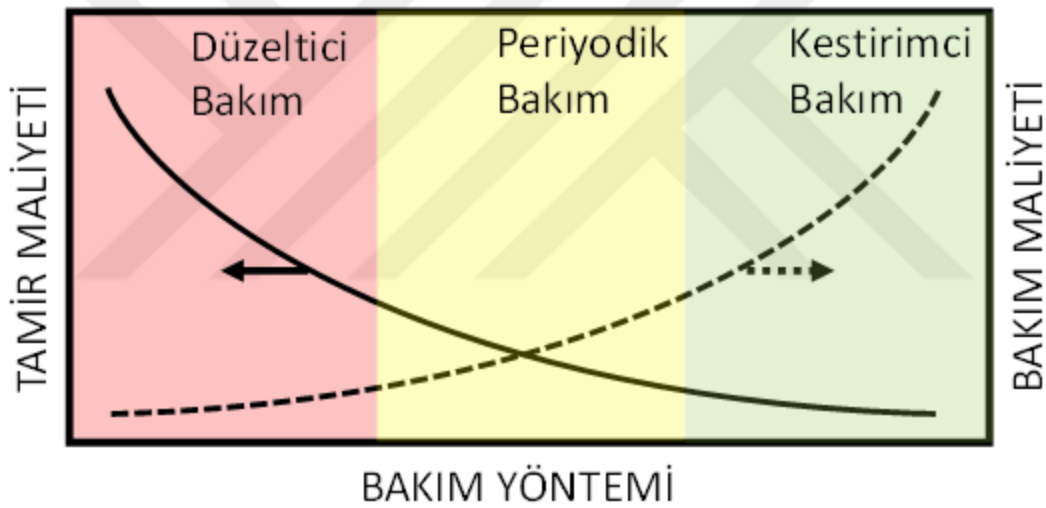
Kestirimci bakımın birçok avantajı olduğu gibi, uygulanması sırasında bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunların başında, yüksek başlangıç yatırım maliyetleri gelir. Kestirimci bakım uygulamaları için özel ekipmanlar, yazılımlar ve eğitilmiş personel gerektiği için, bu yatırımlar diğer bakım türlerine göre daha fazla olabilir. Bununla birlikte, bu maliyetler, uzun vadede karşılanabilir ve kestirimci bakımın getirdiği avantajlar maliyetleri kısa sürede telafi edebilir. Bir diğer dezavantajı ise, kestirimci bakım uygulamalarının doğru bir şekilde yapılmaması durumunda yanlış sonuçlar elde edilebilir. Bu nedenle, kestirimci bakım uygulamaları için uygun ekipman ve yazılım seçimi, veri analizi ve doğru kararlar alabilen eğitilmiş personel gereklidir. Aksi takdirde, hatalı sonuçlar elde edilerek bakım maliyetleri artabilir ve ekipmanın ömrü kısalabilir (Nishat Toma ve Kim, 2020; Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022).

Düzeltilici bakım, ekipman arızaları meydana geldiğinde gerçekleştirilen tamir işlemlerini içerir. Bu yöntem, arızaların beklenmedik olduğu durumlarda kullanılır ve genellikle tamir maliyeti en yüksek olan yöntemdir. Tamirler, arızaların ortaya çıkmasını takiben yapılır ve bu durum beklenmedik maliyetlerin işletmelere getirdiği sıkıntıları beraberinde getirebilir.

Periyodik bakım ise, ekipmanların belirli bir periyot veya zaman diliminde düzenli olarak kontrol edilmesi ve bakım faaliyetlerinin yapılmasını içerir. Bu yöntem, belirli bir plan dahilinde gerçekleştirilen düzenli bakımları içerir. Periyodik bakım, ekipmanın düzenli olarak kontrol edilerek potansiyel arızaların önlenmesini amaçlar. Tamir maliyetleri, düzeltilici bakıma kıyasla genellikle daha düşüktür. Bunun nedeni, periyodik bakımın planlı bir şekilde yapılması sayesinde, potansiyel arızaların önceden tespit edilerek önlenmesinin mümkün olmasıdır (Bektash vd., 2022).

Kestirimci bakım ise, ekipmanlardan elde edilen verilerin analiz edilerek modeller oluşturulması ve bu modeller aracılığıyla ekipmanların gelecekteki arızalarının önceden tahmin edilmesini sağlayan bir bakım yöntemidir. Bu yöntem, düzenli olarak toplanan verilerin analiz edilmesiyle ekipman arızalarının gelecekteki olası zamanlamalarının tahmin edilmesini hedefler. Kestirimci bakımın amacı, beklenmedik arızaların önlenmesi ve ekipmanların sürekli çalışabilirliğinin sağlanmasıdır.

Tamir maliyeti açısından bakıldığında, düzeltici bakım yöntemi en yüksek maliyeti gerektirirken, periyodik bakım ve kestirimci bakım sırasıyla daha düşük maliyetlere sahiptir. Bu durum, düzenli bakım faaliyetlerinin maliyetleri kontrol altında tutarak beklenmedik tamir maliyetlerini önleme potansiyeline sahip olmasından kaynaklanır. Şekil 2’de bakım yöntemlerinin maliyetleri ve avantajları tasvir edilmiştir. Sonuç olarak, kestirimci bakımın diğer bakım türlerine göre daha etkili ve verimli olduğu görülmektedir. Ancak, uygulanması için özel ekipmanlar, yazılımlar ve personel eğitimi gerektiğinden, başlangıç yatırım maliyetleri daha yüksek olabilir. İşletmelerin spesifik ihtiyaçları ve kaynaklarına göre uygun bir bakım stratejisi seçilmelidir (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023; Nishat Toma ve Kim, 2020; Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022).



Şekil 2. Bakım yöntemlerinin maliyetleri

1.2. Kestirimci Bakımın Kullanıldığı Sektörler

Kestirimci bakım, belirli bir ekipmanın tamamen bozulmadan önce yapılacak önleyici bakım faaliyetleri ile ilgili olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Kestirimci bakım, teorik analizler, deneyimli uzmanların görüşleri ve ölçüm sonuçlarına dayanarak ekipmanın ne zaman ve nasıl bakım gerektirdiğine karar vermek için kullanılır. Kestirimci bakım, bakım maliyetlerini azaltmaya, arıza sürelerini kısaltmaya, işletme sürekliliğini artırmaya ve ekipman ömrünü uzatmaya yardımcı

olabilir (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Kestirimci bakım genellikle karmaşık ekipmanların kullanıldığı endüstriyel alanlarda kullanılır. Örneğin, havacılık endüstrisi, gemi yapımı, petrol ve gaz endüstrisi, enerji üretimi, otomotiv ve raylı taşımacılık, kestirimci bakımın sıkça kullanıldığı alanlardır. Bu endüstrilerde, ekipman arızaları ciddi maliyetlere neden olabilir ve kestirimci bakım bu maliyetleri azaltmak için kullanılabilir (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Kestirimci bakım, birçok farklı endüstride uygulanabilen bir bakım yöntemidir. Havacılık, enerji üretimi, otomotiv, raylı taşımacılık, petrol ve gaz sektörü, gemi inşa ve bakımı, imalat endüstrisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Havacılık endüstrisinde, havayolları, hava kargo taşımacılığı, askeri hava araçları ve özel jetler gibi işletmeler, uçaklarının güvenli ve düzgün çalışmasını sağlamak için kestirimci bakım yöntemini uygular. Uçaklarda kullanılan parçalar ve ekipmanlar periyodik olarak test edilir ve belirli bir süre kullanımdan sonra değiştirilir.

Enerji üretimi alanında, elektrik şirketleri, nükleer santraller, rüzgar türbinleri ve hidroelektrik santralleri gibi işletmeler, kestirimci bakımı yaygın olarak kullanır. Rüzgar türbinleri gibi enerji üretim sistemlerinde düzenli bakım yapılmadığında hasarlı parçalara neden olabilecek potansiyel arızaların önceden tespit edilmesi önemlidir (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Otomotiv endüstrisinde, araç üreticileri araçlarının güvenli ve düzgün çalışmasını sağlamak için kestirimci bakımı uygular. Örneğin, frenler, motor ve diğer önemli sistemler, belirli bir kullanım süresinden sonra hasar görebileceği için düzenli olarak test edilir ve değiştirilir (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Raylı taşımacılık alanında, kestirimci bakım önemli bir rol oynar. Bu yöntem, raylı taşımacılık sistemlerindeki kritik bileşenlerin durumunu gerçek zamanlı olarak izler ve potansiyel arızaları önceden tespit ederek önleyici tedbirler alınmasını sağlar.

Bu da sistemin güvenilirliğini artırır ve arızalardan kaynaklanan durma süresini minimize eder (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Petrol ve gaz sektöründe, büyük ölçekli tesisler ve ekipmanlar sürekli aşırı koşullara maruz kalır ve sürekli çalışır. Bu nedenle, kestirimci bakım önemlidir. Bu yöntem, tesislerin ve ekipmanların önceden tahmin edilebilen arızalarını belirler ve önlemler olarak arızaların önlenmesine veya minimize edilmesine yardımcı olur.

Gemi inşa ve bakımında da kestirimci bakım önemli bir yer tutar. Deniz taşımacılığı işletmeleri, gemilerinin güvenli seyrini sağlamak için bu yöntemi kullanır. Gemilerde kullanılan parçaların düzenli olarak test edilmesi ve bakımının yapılması, gemilerin daha güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

İmalat endüstrisinde, makinelerin düzgün çalışması ve maksimum verimlilik elde edilmesi için kestirimci bakım uygulanır. Makineler düzenli olarak test edilir ve bakımları yapılır. Bu, üretim hattındaki kesintilerin azaltılmasına ve işletme maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olur (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

Kestirimci bakım yöntemi, birçok endüstride maliyetleri düşürürken güvenlik, verimlilik ve süreklilik açısından büyük avantajlar sağlar. Bu yöntem, potansiyel arızaların önceden tespit edilmesini ve önleyici tedbirlerin alınmasını sağlayarak işletmelerin düzenli bakım ve onarımlarını daha etkin bir şekilde planlamasına yardımcı olur. Bu da işletmelerin sürekliliğini ve performansını artırırken aynı zamanda güvenlik standartlarını da yükseltir (Tandon ve Choudhury, 2005; Bektash vd., 2022; Bektash ve la Cour-Harbo, 2022; Arena vd., 2022).

1.2.1. Kestirimci Bakımın Rulmanlar Üzerinde Kullanılması

Kestirimci bakımın kullanım alanlarının geniş bir yelpazede olduğu görülmektedir. Tezimin konusu olan, “Rulmanların kalan faydalı ömür tahmini için titreşim analizi tabanlı kestirimci bakım yaklaşımı” imalat endüstrisi kapsamında ve Rulman kullanılan makineler kapsamında değerlendirilecektir (Nishat Toma ve Kim, 2020).

Endüstriyel makinelerin performansı ve güvenilirliği, kullanılan bileşenlerin sağlıklı bir şekilde çalışmasına bağlıdır. Rulmanlar, bu makinelerde sıkça kullanılan ve yük taşıma işlevini yerine getiren önemli parçalardır. Rulmanların arızalanması veya hatalı çalışması, makine duruşlarına, üretim kayıplarına ve hatta güvenlik risklerine neden olabilir. Bu nedenle, rulmanların durumunu izlemek ve olası arızaları önceden tahmin etmek için kestirimci bakım uygulamaları büyük önem taşır (Nishat Toma ve Kim, 2020).

Geleneksel zaman temelli (aylık bakım) asansör bakımlarında, bakım işlemleri belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilir. Bu bakım işi, rulmanların gerçek ihtiyacından bağımsız olarak, belirlenen 1(bir) aylık periyodik bakım programına göre yapılır. Ancak, bu bakım yöntemi rulmanların beklenmedik arızalarını öngöremez ve rulmanlı kısımların ani ve beklenmedik şekilde arızalanmalarıyla asansör aksamalarının zarar görmesine ve daha yüksek maliyetli onarımlara sebep olabilir (Nishat Toma ve Kim, 2020).

Kestirimci bakım ise rulmanların durumunu sürekli olarak izler ve rulmanların gerçek ihtiyaçlarına göre bakım yapılmasını sağlar. Bu yöntem, rulmanların sağlığını izlemek için çeşitli teknikler ve araçlar kullanır ve arızaların erken tespit edilmesini sağlar. Bu da daha az bakım maliyeti, sürdürülebilirlik ve daha güvenli çalışan asansörler anlamına gelir (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021).

Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları, titreşim analizi, ses analizi, sıcaklık izleme, yağ analizi ve veri analizi gibi yöntemleri içerir. Bu teknikler, rulmanlardaki arızaları erken tespit etmeyi ve potansiyel sorunları önceden belirlemeyi amaçlar.

Titreşim analizi, rulmanlardaki titreşim desenlerini izleyerek, arıza türlerini belirler. Anormal titreşim desenleri veya titreşim seviyeleri tespit edildiğinde, bakım ekipleri gerekli önlemleri alabilir (Ceryan vd., 2021).

Ses analizi, rulmanlardan gelen ses sinyallerini dinleyerek, potansiyel sorunları tespit etmeyi amaçlar. Anormal seslerin kaynağı belirlenerek, rulmanlardaki aşınma, çatlaklar veya diğer sorunlar erken aşamada tespit edilebilir.

Sıcaklık izleme, rulmanlarda meydana gelen aşırı sıcaklık artışlarını takip eder. Termal sensörler veya termal kameralar kullanılarak rulmanların sıcaklık dağılımı izlenebilir. Anormal sıcaklık artışları, sürtünme, yağlama eksikliği veya diğer

sorunları işaret edebilir. Bu sayede, rulmanlardaki potansiyel arızalar önceden belirlenebilir ve uygun önlemler alınabilir (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021; Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017).

Yağ analizi, rulmanların doğru yağlama durumunu izlemek için kullanılır. Yağ örnekleri laboratuvar ortamında incelenerek, yağın içerdiği metal parçacıkları, su içeriği, asitlik seviyesi ve viskozite gibi parametreler analiz edilir. Anormal değerler tespit edildiğinde, uygun yağ değişimi veya bakım işlemleri gerçekleştirilir.

Veri analizi ve makine öğrenme teknikleri, rulmanlarda kestirimci bakımın daha etkili hale gelmesini sağlar. Büyük veri setleri kullanılarak elde edilen bilgiler, arızaların belirlenmesi ve arıza modellerinin oluşturulması için değerlendirilir. Makine öğrenme algoritmaları, rulmanlardaki arıza belirtilerini otomatik olarak tespit etmeyi ve gelecekteki arızaları tahmin etmeyi sağlar (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021; Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017).

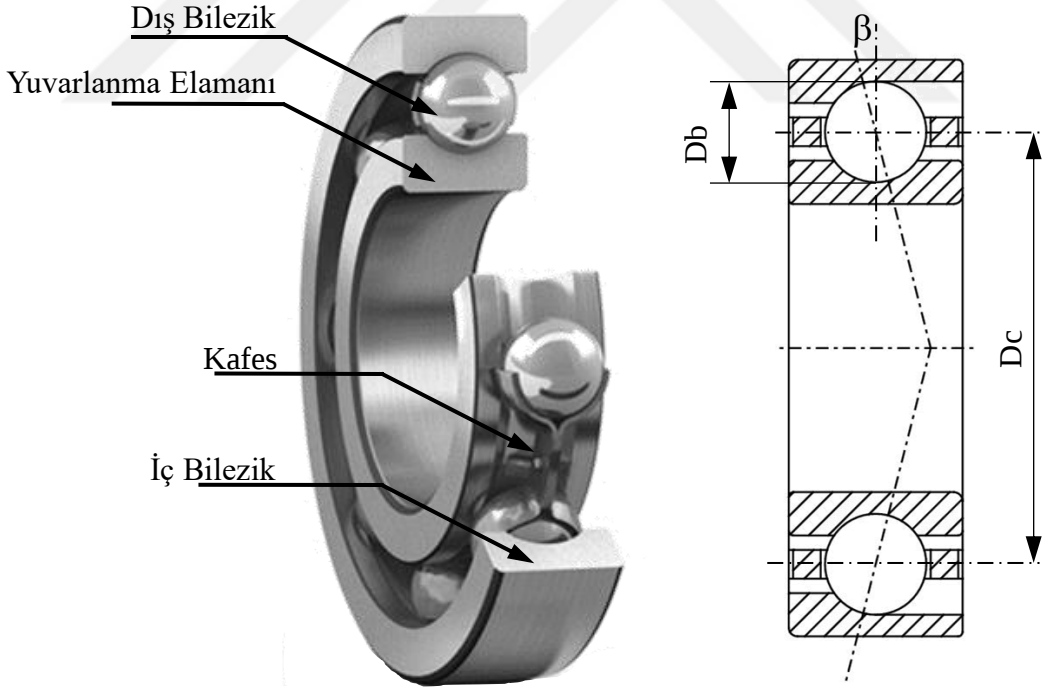
Rulmanlarda kestirimci bakım uygulamaları, bakım maliyetlerini azaltırken, rulman ömrünü uzatır ve asansörün makine performansını artırır. Erken arıza tespiti sayesinde beklenmedik duruşlar ve güvenlik riskleri de azaltılır.

1.2.2. Rulmanlar ve Arıza Sebepleri

Rulmanlar, günümüz endüstrisinde kullanılan dönen makinelerin en önemli mekanik bileşenlerinden biridir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Fransızca kökenli "roulement" kelimesinden türeyen "rulman" terimi, hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak veya hareketi istenilen yönde kısıtlayarak döner veya doğrusal hareketi kolaylaştıran mekanik bileşenleri ifade eder. Rulmanlar, genellikle yüksek hız, aşırı yük ve yetersiz yağlama gibi zorlu çalışma koşullarına maruz kaldıklarından, makinenin en hassas ve savunmasız bileşenleridir (Koca ve Ünsal, 2017). Bu zorlu çalışma koşulları altında, zamanla artan boşluk, sürtünme kuvveti, aşırı ısınma gibi etkilerle performans düşüşü ve arızalar ortaya çıkabilir. Bu arızaların zamanında tespit edilememesi ve uygun bakımın yapılmaması durumunda, rulmanın bozulması kaçınılmaz olabilir. Bu nedenle, sürekli izleme ve durum bazlı bakım senaryolarının uygulanması gibi yöntemlerle rulmanların teknik verileri (mekanik titreşim, sıcaklık, elektriksel akım, yağ analizi vb.) sürekli olarak izlenmeli ve bakımları düzenli olarak yapılmalıdır (Koca ve Ünsal, 2017).

Rulmanlar, genellikle kafes yapısı, iç bilezik, dış bilezik ve bu bilezikler arasında dönen bilyelerden oluşur. Rulman, minimum sürtünme ile dönme hareketini kolaylaştırır. Rulman bileşenlerinin güvenilirliği büyük ölçüde kullanılan malzemelere bağlıdır. Bu malzemeler, yük direncine sahip olmalı ve belirli uygulamalar için tasarlanmış olmalıdır. Bilezikler ve yuvarlanma elemanları için genellikle tamamen sertleştirilmiş krom çeliği tercih edilir. Rulmanlarda kullanılan kafesler genellikle düşük karbonlu çelikten üretilen presli çelik levhalardan yapılmıştır. Ancak, uygulama amacı ve ortamına bağlı olarak pirinç veya paslanmaz çelik gibi malzemeler de kullanılabilir (Koca ve Ünsal, 2017).

Rulman hasarı oluşumunda dört farklı frekans tipi bulunmaktadır. Bu frekanslar, rulmanın iç ve dış bilezikleri, kafesi ve yuvarlanma elemanları üzerinde oluşan titreşimlerin frekanslarını temsil etmektedir. Şekil 3'te tipik bir rulman yapısı gösterilmektedir. Burada, D_b bilye çapını, D_c kafes dairesi çapını ve β ise temas açısını ifade etmektedir.



Şekil 3. Bilyalı rulman (Koca ve Ünsal, 2017)

Rulmanlarda meydana gelen arızalar veya yıpranmalar sonucunda çeşitli frekanslarda titreşimler oluşur. Bu titreşimler, rulman bileşenleri üzerinde ve rulmanın

yapısal tasarımına bağılı olarak birbirinden bağımsız frekans bileşenleri oluşturur. Oluşan hata ve seviye hakkında bilgi sağlayan bu frekanslar, rulmanın arıza durumunu ve arızanın şiddetini belirlemektedir. Rulmanın dönüş hızı arttıkça, arızalı noktadan geçen bilyenin frekansı da değişeceğinden hata frekansı da değişmektedir. Bu nedenle, rulman arızalarının tespiti için titreşim analizi önemli bir yöntemdir (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021; Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017).

Rulmanların arızalarının zamanında tespit edilmesi ve uygun bakımlarının yapılması, makine performansının ve güvenilirliğinin sağlanması açısından kritiktir. Bu nedenle, rulmanların sürekli izlenmesi ve titreşim, sıcaklık, elektriksel akım gibi parametrelerin takibiyle arıza belirtilerinin erken teşhisi mümkün olmaktadır. Böylece, arızaların önlenmesi, gerektiğinde bakım veya onarım işlemlerinin planlanması sağlanabilir.

Rulmanlar modern endüstride önemli bir rol oynayan ve dönen makinelerin hareketini kolaylaştıran mekanik bileşenlerdir. Ancak, zorlu çalışma koşulları nedeniyle arızalara yatkın olabilirler. Bu nedenle, rulmanların düzenli olarak izlenmesi ve bakımlarının yapılması büyük önem taşır. Titreşim analizi gibi teknik yöntemlerle rulman arızalarının tespiti mümkün olmakta ve erken önlem alınabilmektedir. Bu, makine performansının ve üretkenliğin artırılması, işletme maliyetlerinin azaltılması ve güvenilirliğin sağlanması açısından büyük avantajlar sağlar (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021; Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017).

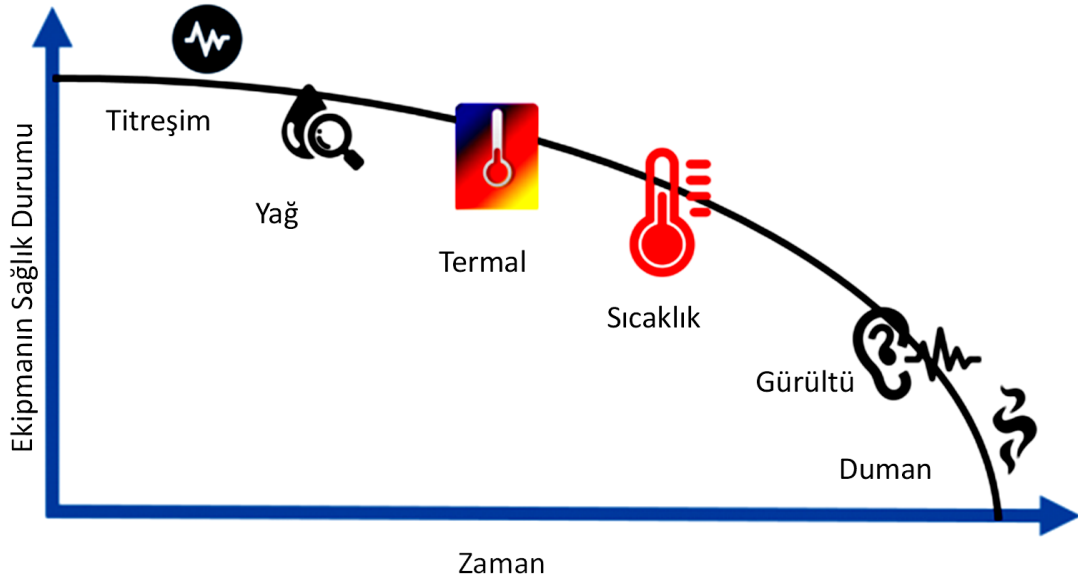
1.3. Kestirimci Bakımda Kullanılan Veriler

Kestirimci bakım, endüstriyel ekipmanların planlı ve sistematik bir şekilde izlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla, ekipman arızalarının önceden tespit edilmesi ve önlenmesini hedefleyen bir bakım stratejisidir. Bu bakım stratejisi, endüstriyel üretim tesislerinde kullanılan ekipmanların verimliliğini artırmak, duruş süresini azaltmak, bakım maliyetlerini düşürmek ve işletme sürekliliğini sağlamak gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

Kestirimci bakımın en önemli özelliği, ekipmanlardan toplanan verilerin analiz edilmesi yoluyla yapılmasıdır. Bu veriler, ekipmanın çalışma koşullarını, performansını ve potansiyel arızalarını değerlendirmek için kullanılır. Kestirimci

bakımın başarısı, doğru verilerin toplanması ve doğru şekilde analiz edilmesine dayanmaktadır (Nishat Toma ve Kim, 2020; Tandon ve Choudhury, 2005).

Kestirimci bakımda kullanılan veriler, genellikle sensörler, veri kaydediciler ve kontrol sistemlerinden toplanır. Sensörler, ekipmanın çeşitli işletme koşullarını ölçer ve bu veriler, veri kaydediciler tarafından kaydedilir. Kontrol sistemleri, ekipmanın çalışmasını izler ve verileri toplar. Bu veriler daha sonra analiz edilerek, ekipmanın sağlığı ve durumu hakkında bilgi elde edilir. Bu analizler, özellikle yapay zeka ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin kullanılmasıyla daha da geliştirilebilir. Örneğin, yapay zeka ve makine öğrenimi, kestirimci bakım verilerini analiz ederek, arızaların önceden tespit edilmesi ve ekipman performansının optimize edilmesi için daha doğru tahminler yapabilir. Kestirimci bakım için en yaygın olarak kullanılan veri türleri ise titreşim, yağ, kızılötesi, sıcaklık, ultrasonik ve duman verileridir ve Şekil 4'te gösterilmiştir (Efeoğlu ve Tuna, 2022; Eddarhri vd., 2022; Wu ve Zheng, 2023; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).



Şekil 4. Kestirimci bakımda kullanılan veriler

Titreşim verileri, ekipmanların titreşim davranışlarının analiz edilmesiyle elde edilir. Bu veriler, ekipmanın hareketi sırasında oluşan titreşimleri ölçerek, ekipmanın sağlığı hakkında bilgi sağlar. Titreşim verileri, genellikle makine parçalarının

aşınmasını, kırılmalarını ve yorgunluk hasarını belirlemek için kullanılır (Ceryan vd., 2021).

Yağ verileri, ekipmanların yağ analizleriyle elde edilir. Yağ analizleri, ekipmanın yağının kimyasal bileşimini ve fiziksel özelliklerini ölçerek, ekipmanın sağlığı hakkında bilgi sağlar. Yağ verileri, genellikle ekipmanın aşınma, korozyon, kirlenici maddeler ve su gibi sorunları tespit etmek için kullanılır.

Kızılötesi verileri, ekipmanların termal görüntülemesiyle elde edilir. Kızılötesi verileri, ekipmanın sıcaklık dağılımını ölçerek, ekipmanın sağlığı hakkında bilgi sağlar. Kızılötesi verileri, genellikle elektrikli bileşenlerin, rulmanların, motorların ve yalıtım malzemelerinin aşınmasını, aşırı ısınmasını veya sızıntılarını tespit etmek için kullanılır (Samuel ve Pines, 2005).

Sıcaklık verileri, ekipmanların sıcaklık analizleriyle elde edilir. Sıcaklık analizleri, ekipmanın sıcaklık dağılımını ölçerek, ekipmanın sağlığı hakkında bilgi sağlar. Sıcaklık verileri, genellikle ekipmanın aşırı ısınmasını veya soğumasını tespit etmek için kullanılır.

Ultrasonik verileri, ekipmanların ultrasonik testlerle elde edilir. Ultrasonik testler, ekipmanın yüzeyleri boyunca ultrasonik dalgalar göndererek, ekipmanın sağlığı hakkında bilgi sağlar. Ultrasonik verileri, genellikle ekipmanın yüzey çatlakları, sızıntılar, yüksek basınçlı sistemler ve boşaltım valfleri gibi sorunlarını tespit etmek için kullanılır.

Gürültü, ekipmanın çalışması sırasında oluşan titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Kestirimci bakımda, gürültü ölçümleri genellikle manyetik parçacık testi (MT) veya ultrasonik test (UT) gibi teknikler kullanılarak yapılır. Bu ölçümler, ekipmanın normal işleyişinde oluşan titreşimlerin ölçülmesine ve belirli bir eşik değeri aştığında anormalliklerin tespit edilmesine olanak tanır. Bu sayede, arızaların önceden tespit edilmesi ve önlenmesi sağlanır (Nishat Toma ve Kim, 2020; Özkat, 2021; Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

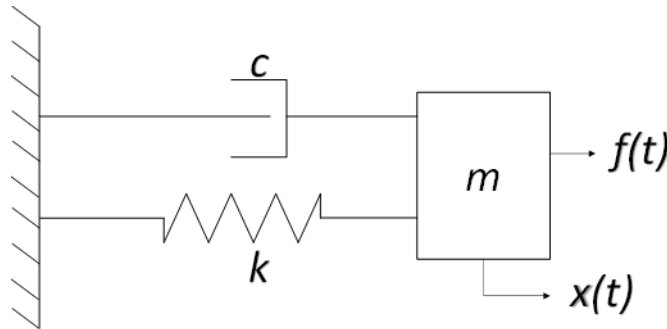
Duman, ekipmanın çalışması sırasında oluşan ısının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Kestirimci bakımda, duman ölçümleri genellikle gaz analizi gibi teknikler kullanılarak yapılır. Bu ölçümler, ekipmanın normal işleyişinde oluşan gazların ölçülmesine ve belirli bir eşik değeri aştığında anormalliklerin tespit edilmesine olanak tanır. Bu sayede, ekipman arızaları önceden tespit edilerek önlenir.

1.4. Titreşim Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım

Mekanik titreşim, bir sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinin tekrarlı değişimi veya dış bir kuvvetin etkisiyle ortaya çıkan ve denge konumu etrafında salınım hareketi olarak ifade edilen bir fenomendir. Şok ise yüksek yoğunluklu ve ani titreşimlerden kaynaklanan bir davranıştır (Nishat Toma ve Kim, 2020).

Makinelere normalde belirli bir titreşim düzeni özgüdür. Bu titreşim düzeni, genellikle makinedeki dişli çarklar, miller, rulmanlar ve elektrik alanı gibi fiziksel bileşenlerin periyodik hareketiyle ilişkilidir. Her makine bileşeni, kendi karakteristik frekansında titreşim sinyalinde kendini gösterir. Bu nedenle, bir makinede arıza olduğunda, normal titreşim sinyali arızayı belirtecek şekilde değişir. Bu durumda, makineden alınan titreşim sinyali analiz edilerek arızalar tespit edilebilir ve sınıflandırılabilir (Samuel ve Pines, 2005).

Mekanik arızalara neden olan anormal titreşim genellikle eksantrik parçalar, hatalı hizalama, gevşeklik, eğik miller, aşınmış veya hasar görmüş dişliler, yıpranmış tahrik kayışları, eskimiş zincirler, bozulmuş rulmanlar veya kaymalı yataklar gibi mekanik bileşenlerle ilgilidir. Titreşim ölçümüne dayalı kestirimci bakımın uygulanması için ilk adım, makinenin normal titreşim karakteristiklerinin belirlenmesidir. Makinenin sağlıklı çalışma durumunda, titreşim davranışı düzenli bir sinüsoidal salınım olarak görülür. Bu salınım belirli bir frekans ve amplitüd aralığına sahiptir. Makine bileşenlerinin ağırlık, yaylanma özelliği ve sönümlenmeye sahip olması göz önüne alındığında, titreşim davranışını temsil etmek için Şekil 5'te gösterilen tek serbestlik dereceli sönümlü zorlanmış sistem en basit benzeşim olarak kullanılabilir. Bu sistem, arızaların neden olduğu titreşim davranışını anlamak için bir temel sağlar.



Şekil 5. Kütle, yay ve sönüm elemanlarından oluşan mekanik sistem

Matematiksel olarak, titreşim hareketini Denklem 1 ile ifade edilir.

$$x(t) = A \sin(2\pi f t + \phi) \quad (1)$$

Bu denklemde, $x(t)$ makinenin titreşim hareketinin anlık değerini, A amplitüdü; f frekansı, t zamanı ve ϕ faz açısını temsil eder. Normal çalışma durumunda, titreşim davranışı bu sinüsoidal salınım denklemiyle ifade edilebilir. Daha sonra, düzenli aralıklarla titreşim ölçümleri yapılır ve elde edilen veriler, referans değerlerle karşılaştırılır. Titreşim verileri genellikle zaman alanında elde edildiğinden, Fourier dönüşümü kullanılarak frekans alanına dönüştürülür. Bu, titreşim spektrumunun elde edilmesini sağlar. Fourier dönüşümü Denklem 2’de ifade edilmiştir.

$$X(f) = FT(x(t)) \quad (2)$$

Bu denklemde, $X(f)$ titreşim spektrumunu, FT Fourier dönüşümü operatörünü ifade eder. Titreşim spektrumu, farklı frekans bileşenlerinin yoğunluklarını gösterir ve her bir frekans bileşeni, makinenin titreşim davranışının belirli bir yönünü temsil eder. Titreşim ölçümlerinin analizinde kullanılan temel teknikler zaman alanı analizi, frekans alanı analizi ve zaman-frekans alanı analizidir. Her biri farklı bilgiler sağlar ve arızaların teşhis edilmesi için farklı açılardan yaklaşır (Samuel ve Pines, 2005).

1.4.1. Zaman Alan Analizi

Titreşim ölçümüne dayalı kestirimci bakımda zaman bölge analizi, titreşim sinyallerinin zaman boyunca nasıl değiştiğini inceleyen bir yöntemdir. Bu analiz, titreşim sinyallerinin genliği, frekansı ve fazı gibi değişkenleri dikkate alarak, meydana gelen arızaların erken tespit edilmesine yardımcı olur (Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

Zaman bölge analizi, titreşim sinyalinin zamanla nasıl değiştiğini gösteren bir grafik çıkarır. Bu grafikte, titreşim sinyalinin genliği zamana karşı çizilir. Titreşim sinyali, genellikle belirli bir süre boyunca örneklenir ve örnekleme frekansı kullanılarak ölçülür. Örnekleme frekansı, titreşim sinyalinin en yüksek frekans

bileşeni iki katından daha yüksek olmalıdır (Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

Zaman bölge analizinde, titreşim sinyali üzerinde bazı istatistiksel metrikler de hesaplanır. Bu metrikler, titreşim sinyalinin özelliklerini tanımlamak ve arıza tespitinde kullanılmak üzere önemlidir. Titreşime dayalı kestirimci bakımda zaman alanında kullanılan temel metrikler sırasıyla Ortalama, Standart Sapma, RMS (Kök Ortalaması), Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü'dür. Bu metriklerin matematiksel ifadeleri Denklemler 3 – 8 arasında gösterilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x(t) - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt} \quad (5)$$

$$P_p = \max(x(t)) - \min(x(t)) \quad (6)$$

$$KR = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \bar{x})^4 dt}{RMS^4} \quad (7)$$

$$F_c = \frac{P_p}{RMS} \quad (8)$$

Ortalama, titreşim sinyalinin genliğinin ortalamasını ifade ederken, standart sapma, titreşim sinyalinin genliğindeki değişkenliği ifade eder. RMS, titreşim sinyalinin genliğinin karelerinin ortalama değerinin kareköküdür. Pik-pik, titreşim sinyalinin en yüksek noktası ve en düşük noktası arasındaki mesafeyi ifade eder. Kurtosis, titreşim sinyalinin kuyrukluğu (*tail weight*) veya ağırlık dağılımının düzlüğünü ölçer. Crest faktörü ise titreşim sinyalinin pik genliğinin RMS genliğine bölünmesiyle elde edilen bir orandır.

Zaman bölge analizi, titreşim sinyallerinin zaman içindeki değişimini inceleyerek, arızaların erken tespit edilmesine yardımcı olur. Bu yöntem, mekanik

sistemlerin güvenilirliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için önemli bir rol oynamaktadır (Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

1.4.2. Frekans Alan Analizi

Titreşim ölçümüne dayalı kestirimci bakımda frekans bölge analizi, titreşim verilerini frekans bileşenlerine ayırmak ve her bileşenin güç spektrumunu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, titreşim verilerindeki frekans bileşenlerinin analiz edilmesini ve bir makinedeki potansiyel arızaların erken teşhis edilmesini sağlar (Ceryan vd., 2021; Koca ve Ünsal, 2017; Samuel ve Pines, 2005).

Frekans bölge analizi, Fourier dönüşümü veya benzeri matematiksel işlemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu işlemler, titreşim sinyallerinin zamana karşı değişimini frekanslara göre analiz etmeye olanak tanır. Sonuç olarak, her bir frekans bileşeni, bir güç spektrumu grafiği olarak gösterilir.

Güç spektrumu grafiği, frekansın bir fonksiyonu olarak titreşim seviyesini gösterir. Grafiğin zirvesi, titreşimin en yüksek güç yoğunluğuna sahip frekans bileşenini gösterir. Bu bileşen, genellikle makinenin bir parçası veya bileşeniyle ilgili bir sorunun göstergesi olabilir. Örneğin, bir motorun rulmanında bir arıza meydana geldiğinde, rulmanın hareketleri ile ilişkili olan bir frekans bileşeni yüksek güç spektrumuna sahip olur.

Frekans bölge analizi, diğer titreşim analizi yöntemleri ile birleştirilerek daha kapsamlı bir kestirimci bakım yaklaşımı oluşturabilir. Örneğin, zamana bağlı titreşim ölçümleri (*time domain analysis*) ile birleştirildiğinde, frekans bileşenlerinin nasıl değiştiğine ilişkin daha kapsamlı bir görünüm sağlanır (Samuel ve Pines, 2005; Fluke Corporation 2018).

1.4.3. Zaman – Frekans Alan Analizi

Titreşim ölçümüne dayalı kestirimci bakım için zaman-frekans bölge analizi oldukça yaygın bir teknik olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, titreşim sinyallerinin zaman ve frekans etki alanları arasındaki ilişkiyi analiz ederek, makinenin durumunun tahmin edilmesine ve potansiyel arızaların tespit edilmesine yardımcı olur.

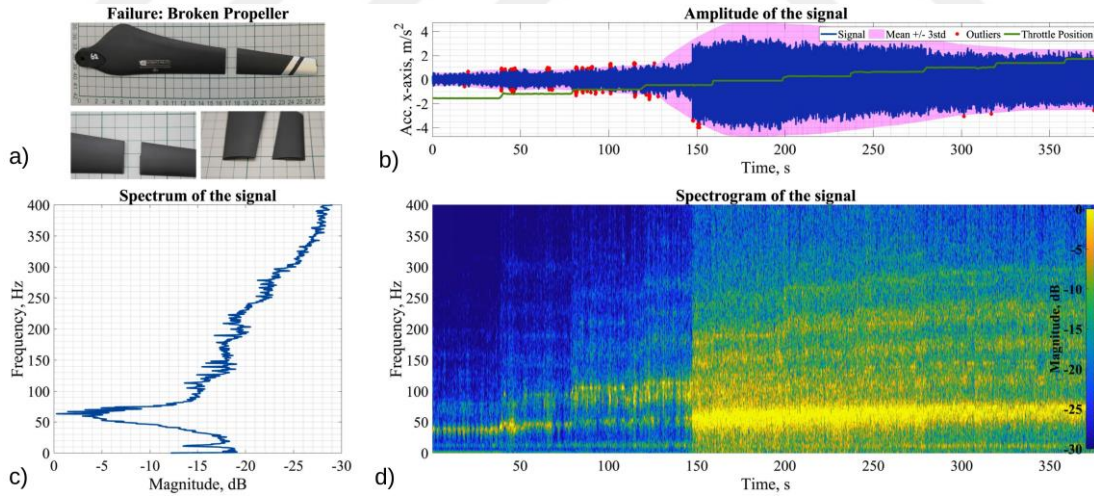
Zaman-frekans bölge analizi, zaman ve frekans boyutlarında titreşim sinyallerini analiz etmek için bir dizi matematiksel yöntemi kullanır. Bu yöntemler

arasında wavelet dönüşümü, Gabor dönüşümü, Wigner-Ville dağılımı, spektrogram, çözünürlük spektrumu ve çapraz spektrum analizi yer alır.

Bu yöntemler arasında, wavelet dönüşümü en yaygın olarak kullanılan ve kabul gören bir yöntemdir. Wavelet dönüşümü, bir sinyalin hem zaman hem de frekans boyutlarında ayrıştırılmasına izin verir. Böylece, titreşim sinyallerinin hem zaman hem de frekans etki alanlarında detaylı bir şekilde analiz edilmesi mümkün olur.

Wavelet dönüşümü, sinyalin farklı frekans bileşenlerine ayrılması için bir dizi wavelet fonksiyonu kullanır. Her wavelet fonksiyonu, farklı bir frekans bandında titreşimleri belirlemek için kullanılır. Bu dönüşüm sayesinde, zaman ve frekans boyutlarında titreşim sinyalleri ayrı ayrı analiz edilir ve daha detaylı bir analiz sağlanır.

Zaman-frekans bölge analizi, makinenin durumu hakkında bilgi sağlamak için kullanılır. Özetle, zaman-frekans bölge analizi, titreşim sinyallerinin hem zaman hem de frekans etki alanlarında analiz edilmesine olanak sağlayan bir tekniktir. Şekil 6'da Arızalı bir İHA pervanesi ve oluşturduğu titreşim sinyalinin analizi verilmektedir. Bu sinyalin; zaman alanı, frekans alanı ve zaman-frekans alanı analizleri gösterilmiştir (Ozkat, 2023).

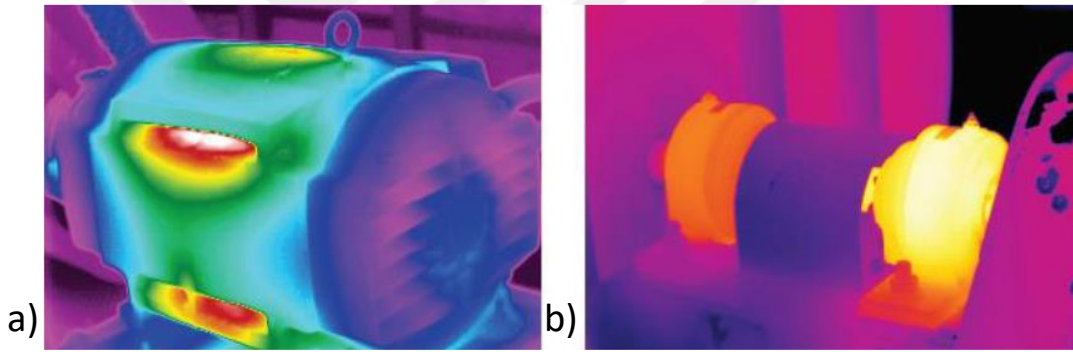


Şekil 6. a) Arızalı bir İHA pervanesi ve oluşturduğu titreşim sinyalinin analizi, b) zaman alanı, c) frekans alanı ve d) zaman-frekans alanı (Ozkat, 2023)

1.5. Termal Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım

Kızılötesi termografi, temassız bir şekilde veri toplama ve analiz etme süreciyle ilgili bir bilim dalıdır. Bu süreçte, termal görüntüleme cihazları kullanılarak ilgili

yüzeylerden yayılan ısıyı verileri toplanır ve termografi adı verilen görüntülere dönüştürülür. Kızılötesi kameraların gelişimiyle birlikte, termal görüntüleme süreci daha verimli ve yüksek çözünürlüklü hale gelmiştir. Bu yöntemle, pompalar, kompresörler, rulmanlar, kaplinler, redüktörler, sızdırmazlık elemanları, kayış ve kasnak mekanizmaları gibi mekanik sistemlerdeki arızalar, elektrik motorları, jeneratörler, şalterler, sigortalar, transformatörler, prizler, iletkenler gibi elektrik ekipmanlarındaki arızalar veya tanklar, boru tesisatı, vanalar, buhar kapıları, ısı izolasyonu gibi işletme sistemlerindeki arızalar, uzaktan ve güvenli bir mesafeden tespit edilebilir. Bu sayede, yüksek sıcaklık, potansiyel elektrik kaçakları, mekanik darbeler gibi riskli durumlarla karşılaşmadan arızalar tespit edilebilir. Şekil 7 elektriksel ve mekanik arızaların kızılötesi termal kameralarla görüntülenmesine bir örnek sunmaktadır.



Şekil 7. Termal kamera ile arıza tespiti: a) elektriksel ve b) mekanik arıza kaynaklı ısınma (Fluke Corporation, 2018)

1.6. Akustik Ölçümüne Dayalı Kestirimci Bakım

Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakım, bir makine veya sistemin sağlığının belirlenmesi ve arızaların tespit edilmesi için akustik sinyallerin analiz edilmesine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem, ses dalgalarının yayılması ve etkileşimi üzerine odaklanır.

Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakımın temel amacı, bir makinede meydana gelebilecek olası arızaların erken tespit edilmesi ve önlem alınarak daha ciddi hasarların önlenmesidir. Bu yöntem, makinenin normal çalışma durumunda ürettiği ses sinyallerinin ölçülmesi ve analiz edilmesi yoluyla gerçekleştirilir.

İlk adım, makinenin normal çalışma koşullarında ürettiği akustik sinyallerin kaydedilmesi ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu kaydedilen ses verileri, frekans analizi, zaman alanı analizi ve spektral analiz gibi yöntemlerle işlenir ve makinenin normal titreşim davranışı ve frekans spektrumu belirlenir. Daha sonra, düzenli aralıklarla makineden akustik ölçümler yapılır ve elde edilen veriler, referans değerlerle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma, herhangi bir anormallik veya değişiklik tespit edilmesi durumunda potansiyel bir arıza belirlemek için kullanılır. Bu aşamada, ileri analiz yöntemleri, arızanın türünü ve yerini belirlemek için uygulanır.

Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakım, farklı makine parçalarında meydana gelebilecek arızaları tespit etmek için kullanılabilir. Örneğin, rulmanlar, dişliler, motorlar, pompalar ve valfler gibi makine bileşenlerinde meydana gelen sürtünme, aşınma veya bozulmalar, ses sinyallerinde karakteristik değişikliklere neden olabilir. Şekil 8’de redüktör içindeki arızayı akustik ölçümüne dayalı tespitinde kullanılan kapasitif mikrofon gösterilmiştir.

Bu yöntem, arızaların erken tespitini sağlayarak bakım maliyetlerini azaltabilir, üretkenlik ve güvenilirlik açısından iyileştirmeler sağlayabilir ve beklenmedik makine duruşlarını önleyebilir. Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakım, endüstriyel ve üretim sektörlerinde yaygın olarak kullanılan etkili bir arıza tespit yöntemidir.



Şekil 8. Akustik ölçümüne dayalı kestirimci bakım deney düzeneği (Karabacak vd., 2022)

2. VERİYE DAYALI KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

Kestirimci bakım, endüstriyel makinelerin güvenilirliğini ve performansını artırmak için etkili bir yaklaşım olarak önem kazanmıştır. Rulmanlar, birçok makinede kritik bileşenler olup optimal çalışma ve beklenmedik arızaların önlenmesi için önleyici bakım stratejileri gerektirir. Tezimde rulmanlar için uyarlanmış bir veriye dayalı kestirimci bakım yaklaşımını sunulmaktadır. Önerilen metodoloji ile makine öğrenme algoritmalarını kullanarak sensör verilerini analiz etmek, desenleri tanımlamak ve rulmanların sağlık durumu ve kalan kullanılabilir ömrü hakkında doğru tahminler yapmak üzerine bir çalışmadır.

Bu akademik çalışma, rulmanlar üzerinde veriye dayalı kestirimci bakım uygulamalarını tartışmakta ve bir metodoloji sunmaktadır. Yapılan araştırmalar, veriye dayalı kestirimci bakımın rulman arızalarını önceden tahmin etme ve bakım süreçlerini optimize etme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Chen vd., 2021). Ancak, bu yaklaşımın uygulanması için veri kalitesi, özellik seçimi, model eğitimi ve işletilebilirlik gibi zorluklarla karşılaşmaktadır.

2.1. İstatistiksel Yaklaşım

İstatistiksel yaklaşımlar genellikle veri setinin istatistiksel özelliklerine dayanan modellerin oluşturulmasıyla ilgilidir. Bu yaklaşım, bir modelin test verileriyle test edildiği bir veri kümesi üzerinden yapılır. Bu yaklaşımda kullanılan teknikler, karmaşıklık açısından farklılık gösterir. En basit olanı, bilinen bir veri kümesinin yoğunluk fonksiyonunun oluşturulması temeline dayanan tekniktir. Diğer basit bir teknik ise, örneklemin standart sapması ve ortalamasının hesaplanmasıdır.

Dişli çarkların titreşim sinyallerinin istatistiksel modellemesi arızaların tespitinde ve sınıflandırılmasında istatistiksel yöntem ve ayırık dalgacık dönüşümünü önerilmiştir (Kouadri ve Zelmat, 2010). Yine helisel dişli çarkların durum izleme için çok değişkenli istatistiksel bir metodoloji sunulmuştur (Ulus vd., 2015). Farklı bir çalışmada ise, rüzgâr türbinlerinin dişli kutularının tahmin ve önleyici bakımına yönelik durum izleme çalışmalarında istatistiksel teknikleri kullanılmıştır (Moumene ve Ouelaa, 2016).

Bu örnekler, istatistiksel yaklaşımların çeşitli mühendislik alanlarında arıza tespiti, durum izleme ve bakım çalışmalarında nasıl kullanıldığını göstermektedir. İstatistiksel metotlar, verilerin analizi ve modellenmesi için güçlü araçlar sağlayarak makine ve sistemlerin performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.2. Model Tabanlı Yaklaşımlar

Modele dayalı arıza tespiti yaklaşımında, gözlemlenen sistemin matematiksel bir modeli kullanılır ve sistemde olası bir hatanın model parametrelerinde değişikliklere neden olacağı varsayılır. Bu yaklaşımda, model çıktıları ile gerçek sistemin çıktıları karşılaştırılarak artık bir sinyal üretilir. Üretilen artık sinyalin özellikleri analiz edilerek potansiyel arıza durumları tanımlanır ve arızanın tespiti ve sınıflandırılması için faydalı bilgiler elde edilir.

Dişli çark sistemleri, rulmanlı yataklar ve benzeri ekipmanların arızalarının modele dayalı olarak tespit edilmesi konusunda literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. Mesela, bir düz dişli çiftinin dinamik modellenmesini yaparak bölgesel diş arızasının erken tespiti için istatistiksel bir analiz gerçekleştirilmiştir (Liu ve Zhang, 2020). Başka bir çalışmada, tek kademeli bir düz dişli çark sisteminin dinamik modellenmesi üzerinde çalışarak titreşim analizine dayalı çatlak tespiti üzerine araştırma yapılmıştır (Parey vd., 2006). Yine, bir planet dişli setindeki diş çatlağının tespiti için titreşim sinyaline dayalı bir model geliştirmiştir (Mohammed, 2015). Başka bir çalışmada, planet dişli mekanizması için titreşim sinyallerine dayalı spektral veriler ve cebirsel denklemlere dayanan bir model oluşturarak kestirimci ve önleyici bakım ile arıza tespiti yapılmıştır (Liang, 2015). Bu çalışmalar, modele dayalı yaklaşımın dişli çark sistemleri ve benzeri ekipmanlarda arızaların tespiti için nasıl kullanıldığını göstermektedir. Modelleme, matematiksel modellerin kullanımıyla arızaların erken tespiti ve önleyici bakım çalışmalarına katkı sağlamaktadır.

2.3. Yapay Zeka Yaklaşımları

Yapay Zekâ (YZ), makinelerdeki arızaların tespiti ve sınıflandırılmasıyla ilgili çalışmalarda kullanılan çeşitli teknikleri içermektedir. Bu teknikler, yapay sinir ağları, bulanık mantık, destek vektör makineleri gibi YZ yöntemlerini içermektedir. Ayrıca k en yakın komşu (k-NN), yalın Bayes (YB), karar ağaçları (KA) gibi makine öğrenmesi

temelli sınıflandırma, regresyon ve kümeleme teknikleri de kullanılmaktadır. Örneğin; yapay sinir ağları, insan beyninin çalışma sistemini taklit ederek arızaların tespit ve sınıflandırılması için yaygın olarak kullanılan bir YZ tekniğidir. Dişli çark sistemleri, rulmanlı yataklar gibi mekanik donanımların arızalarının tespiti için çok katmanlı yapay sinir ağları kullanılmıştır. Rüzgâr türbinlerindeki dişli kutularının arızalarının tespiti de nöral ağlara dayalı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

Bulanık mantık da mekanik arızaların tespitinde kullanılan bir YZ tekniğidir. Dişli çark sistemleri gibi mekanik donanımların arızalarının tespitinde bulanık mantık kullanılarak çıkarımda bulunulmuştur. Destek vektör makineleri (DVM), arızaların tespiti için sıklıkla kullanılan bir YZ yöntemidir. Frekans bölgesindeki titreşim verileri kullanılarak dişli çarklardaki farklı türlerdeki arızaların tespiti için DVM teknikleri kullanılmıştır. Diğer kullanılan YZ teknikleri arasında diskriminant analizi (DA), yalın Bayes (YB), k en yakın komşu (k-NN) ve karar ağaçları (KA) yer almaktadır. Bu teknikler, örüntü tanıma, sınıflandırma ve kümeleme problemlerinin çözümünde kullanılmıştır.

Makine öğrenmesi tekniklerinden biri olan karar ağacı (KA), örüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. KA tabanlı arıza tespiti çalışmaları da makinelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Saravanan ve arkadaşları KA yöntemini kullanarak dişli çark kutularında meydana gelen arızaları tespit etmiştir. Bir başka çalışmada, rüzgâr türbinlerindeki dişli kutularındaki arızaların tespiti ve sınıflandırılması için KA yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, mekanik arıza tespiti ve sınıflandırması için kullanılan diğer yapay zeka teknikleri arasında genetik algoritmalar (GA), bulanık genetik algoritmalar (BGA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve yapay bağıklık sistemleri (YBS) bulunmaktadır. Bu teknikler, verilerin analiz edilmesi, özellik çıkarımı ve arıza tespiti süreçlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Makine öğrenimi algoritmaları, yapay zekanın ayrılmaz bir parçası haline geldi ve çok çeşitli uygulamalarda önemli ilerlemeler sağladı. Denetimli, denetimsiz, yarı denetimli ve pekiştirmeli öğrenme dahil olmak üzere makine öğrenimi algoritmalarının çeşitliliği, belirli sorunlara özel çözümler üretilmesini sağlar. Bu algoritmalar, diğerlerinin yanı sıra görüntü tanıma, doğal dil işleme, dolandırıcılık

tespiti, tavsiye sistemleri, sağlık hizmetleri ve finans dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada değerini kanıtlamıştır.

2.3.1. Denetimli Öğrenme

Denetimli öğrenme, verilerden örüntüleri ve ilişkileri tespit etmek için kullanılan bir öğrenme yöntemi türüdür. Bu yöntem, veri setinin girdileri ve çıktıları arasındaki ilişkiyi öğrenmeyi amaçlar.

2.3.1.1. Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, girdi özelliklerinin çıktı değişkeni üzerindeki etkisini doğrusal bir denklemlerle modelleyebilir. Doğrusal regresyon, makine öğrenmesi alanında yaygın olarak kullanılan bir öğrenme yöntemidir. Finansal tahminler, ekonomik analizler, reklamcılık ve pazarlama gibi alanlarda kullanılabilir. Doğrusal regresyon modelleri basit ve kolay yorumlanabilir olmasının avantajlarına sahip olsa da veriler arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayar ve bazı durumlarda doğru sonuçlar veremeyebilir.

2.3.1.2. Karar Ağaçları

Karar ağaçları, sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, girdi özelliklerinin değerlerine göre bir dizi karar düğümü oluşturarak verileri sınıflandırmak veya tahmin etmek için kullanılır. Karar ağaçları anlaşılması kolay ve yorumlanması kolaydır, ancak aşırı uyuma (overfitting) veya yetersiz uyum (underfitting) gibi problemlere eğilimli olabilir.

2.3.1.3. K-En Yakın Komşu

K-En Yakın Komşu (KNN), sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, yeni bir örneğin sınıfını veya değerini tahmin etmek için, örneklerin özelliklerine dayanarak en yakın komşularını kullanır. KNN, basit ve etkili bir yöntem olmasının yanı sıra, veri setinin büyüklüğüne bağlı olarak hesaplama açısından maliyetli olabilir.

2.3.1.4. Destek Vektör Makineleri

Destek vektör makineleri (DVM), sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, verileri birbirinden ayırmak için bir hiper-düzlem oluşturarak çalışır. DVM, verilerin yüksek boyutlu uzayda temsil edilmesine olanak tanır ve sınıflandırma veya regresyon için optimum bir hiper-düzlem bulmayı amaçlar. DVM, doğrusal ve non-doğrusal veri kümeleri üzerinde etkili olabilir. Ancak, büyük veri kümelerinde hesaplama ve bellek kullanımı açısından maliyetli olabilir.

2.3.1.6. Rastgele Ormanlar

Rastgele ormanlar, tahminlerin doğruluğunu ve sağlamlığını artırmak için birden çok karar ağacını birleştiren bir topluluk yöntemidir. Her bir ağacın bir alt kümesi üzerinde bağımsız olarak eğitim yapılır ve sonuçlar birleştirilerek tahmin yapılır. Rastgele ormanlar, sınıflandırma ve regresyon problemleri için etkili bir seçenek olabilir. Bu yöntem, veri setinin değişkenliklerini ele alır ve aşırı uyum problemini azaltabilir. Ayrıca, özellik seçimiyle ilgili bilgi sağlayabilir. Ancak, daha karmaşık modellerin oluşturulması ve eğitim süreci zaman alabilir.

Bu popüler denetimli öğrenme algoritmaları, verilerin özelliklerine, problem tipine ve performans gereksinimlerine bağlı olarak avantajlar ve dezavantajlar sunar. Algoritma seçimi yaparken, veri setinin özellikleri, problem alanı ve istenen performans ölçütleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca, algoritma seçimi ve model eğitimi için uygun parametrelerin belirlenmesi de önemlidir.

2.3.2. Denetimsiz Öğrenme Algoritmaları

Denetimsiz öğrenme algoritmaları, verilerdeki kalıpları ve ilişkileri tespit etmek için kullanılan algoritmaları ifade eder. Bu algoritmalar, önceden tanımlanmış bir hedef değişkenine ihtiyaç duymadan çalışırlar ve genellikle kümeleme veya boyut indirgeme gibi yöntemlerle veri analizi yaparlar.

2.3.2.1. K-ortalama Kümeleme

K-ortalama kümeleme algoritması, verileri benzerlik ölçütlerine dayanarak K kümelerine bölmek için kullanılır. Bu algoritma, verilerin uzayda birbirine yakınlık

derecelerine göre gruplandırılmasını sağlar. Başlangıçta, belirli sayıda K merkez noktası rastgele seçilir ve her veri noktası en yakın merkeze atanır. Daha sonra, her veri noktası yeniden değerlendirilir ve yeni merkez noktaları belirlenir. Bu işlem, merkez noktaları istikrarlı hale gelene kadar tekrarlanır. Sonuç olarak, her bir küme, içindeki veri noktalarının birbirine benzeyen özelliklere sahip olduğu bir grup olarak temsil edilir.

2.3.2.2. Hiyerarşik Kümeleme:

Hiyerarşik kümeleme algoritması, benzerlik ölçütlerine dayalı bir küme hiyerarşisi oluşturmak için kullanılır. Bu algoritma, verileri alt kümelere bölen bir ağaç yapısı oluşturur. İlk başta, her veri noktası ayrı bir küme olarak kabul edilir. Ardından, benzerlik ölçütlerine dayanarak en yakın küme veya veri noktaları birleştirilir ve daha büyük bir küme oluşturulur. Bu işlem, tüm veri noktaları tek bir küme oluşana kadar tekrarlanır. Hiyerarşik kümeleme, hem aglomeratif (birleştirici) hem de bölücü (bölücü) yaklaşımları içerebilir.

Sonuç olarak, makine arızalarının tespiti ve sınıflandırılması için yapay zeka teknikleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, destek vektör makineleri, karar ağaçları ve diğer yöntemler, doğruluk ve verimliliklerini artırmak için kullanılan teknikler arasındadır. Bu teknikler, mekanik sistemlerdeki arızaların erken dönemde tespit edilmesi ve doğru bir şekilde sınıflandırılması için önemli bir rol oynamaktadır.

2.4. Makine Öğrenmesinin Asansörlerde Uygulanması

Asansörler, binaların önemli bir parçasıdır ve insanların güvenliği açısından kritik bir rol oynarlar. Bu nedenle, asansörlerin doğru çalışması hayati öneme sahiptir. Asansörlerin kesintisiz çalışması için bakımı büyük önem taşır. Ancak, periyodik bakım programlarına rağmen, asansörlerin arızalanması veya istenmeyen durumlara yol açması mümkündür. Bu nedenle, asansörlerin kestirimci bakımı, asansörlerin daha etkili bir şekilde çalışmasına ve kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Kestirimci bakımın asansörlerde uygulanması için birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmalar, makine öğrenmesi tekniklerinin, asansörlerin kestirimci bakımında kullanılabileceğini göstermektedir. Bu teknikler, asansörlerdeki arıza nedenlerini

tespit etmek için verileri analiz etmektedir. Makine öğrenmesi algoritmaları, asansörlerin işleyişi hakkında bilgi edinmek için sensörlerden gelen verileri toplar ve analiz eder. Bu veriler, asansörün ne zaman bakıma ihtiyacı olduğunu veya ne zaman bir arıza meydana gelebileceğini tahmin etmek için kullanılır.

Asansörlerde kestirimci bakım için kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından biri, yapay sinir ağıdır. Yapay sinir ağı, asansör verilerini analiz ederek, asansörlerdeki sorunların nedenlerini tespit etmek ve bu sorunları önlemek için öngörülerde bulunur. Diğer bir teknik ise karar ağacıdır. Karar ağacı, verileri analiz ederek, asansörlerin bakımının ne zaman yapılması gerektiği konusunda karar verir.

Makine öğrenmesi algoritmaları, asansörlerin farklı bileşenlerinin çalışma verilerini analiz ederek arızaların önceden tespit edilmesini sağlar. Bu bileşenler arasında motorlar, frenler, şalterler ve diğer sensörler yer alır. Bu veriler, yapay zekâ algoritmaları tarafından işlenir ve asansörlerin olası arızaları hakkında tahminler yapılır.

Bu tahminler, bakım ekiplerine rehberlik ederek, arızaların önlenmesine yardımcı olur. Örneğin, bir asansörün fren sisteminde bir arıza tespit edildiğinde, bakım ekipleri önceden bildirim alarak sorunu çözmeye hazırlanabilir. Bu şekilde, asansörün arızaya yol açacak bir durumda kalması önlenir ve kullanıcıların güvenliği sağlanır. Araştırmalar, makine öğrenmesi tekniklerinin kullanılmasıyla, asansörlerin bakım maliyetlerinin azaltılabileceğini ve asansörlerin ömrünün uzatılabileceğini göstermektedir.

3. ASANSÖR TANIMI VE GENEL YAPISI

Asansörler, çağdaş şehir yaşamının önemli bir unsuru haline gelmiştir. Modern binaların vazgeçilmez bir parçası olan asansörler, katlar arasında hızlı ve güvenli bir ulaşım sağlamak için tasarlanmıştır. İnsanları veya yükleri dikey veya eğik olarak taşıyan bu mekanizmalar hem ticari hem de konut alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Asansörlerin işleyişi ve güvenlik standartları, teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli olarak iyileştirilmektedir.

Bu bölümde, asansörlerin tanımı, tarihçesi, Türkiye'deki sektör durumu, çalışma prensibi, bileşenleri ve karşılaşılan temel arızalar hakkında daha ayrıntılı bilgilere yer verilecektir. Asansörlerin nasıl çalıştığı, hangi bileşenlerden oluştuğu ve genel olarak hangi arızalarla karşılaşıldığı gibi konular ele alınarak, asansörlerin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için temel bilgiler sunulacaktır.

3.1. Asansörün Tanımı

Asansörler, belirli seviyelerde hizmet veren, esnek olmayan ve yatay düzlemle 15° den fazla bir açı oluşturan raylar boyunca hareket eden bir kabine sahip olan ve insanların ve yüklerin taşınmasına yarayan elektro-mekanik tesislerdir.

Asansör; çoğunlukla dikey olarak insan ve yük taşımaya yarayan araç ve ekipmanların birleşiminden meydana gelen sistemlerdir. Evlerde işyerlerinde vs. günlük hayatın birçok yerinde kullanılan taşıma araçlarıdır (Zhang vd., 2015).

Asansörlerin pek çok farklı kullanım alanları vardır. İlerleyen başlıklarda asansörün tarihçesine ve kullanım alanlarına kısaca değinilmiştir ve asansör ile ilgili teknik bilgilere yer verilmiştir.

3.2. Asansörün Tarihçesi

Asansörün tarihi çok eski yıllarda kullanıldığı tespit edilen ilkel kaldıraçlara dayansa da modern asansörlere benzer özellik sergileyen ilk mekanik sistem 1800'lü yılların ortalarında, Elisha Graves Otis tarafından icat edildiği söylenebilir (Elektrik Rehberiniz. "Asansör Bakım ve İşletme Yönetmeliği". Erişim:12.06.2023). Şekil 9'da icat edilen ilk asansöre ait bir fotoğraf resmedilmiştir.



Şekil 9. Elisha Graves Otis tarafından icat edilen ilk asansör (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Bakım ve İşletme Yönetmeliği”)

1900’lü yıllardaki elektronik gelişmeler ve büyük organizasyonlu asansör firmalarının kurulması neticesinde asansörler, rahatlık ve güvenlik açısından başka bir seviyeye ilerlemiştir. Kent nüfuslarının hızlı artışıyla asansörler, ev ve iş yaşamının önemli unsurları olmakla birlikte gelişimleri de çok hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Bakım ve İşletme Yönetmeliği”).

Türkiye’de ise ilk asansör İstanbul’un Beyoğlu semtindeki Pera Palas Otel’de kurulmuştur. Türkiye’deki ilk asansörlerden bahsedildiğinde ikinci meşhur asansör İzmir Konak semtindedir. İlk yapıldığında su buharı ile çalışan bu asansör daha sonra yapılan revizyonlar neticesinde elektrikli asansör halini almıştır. Şekil 10’da Türkiye’deki ilk asansörler gösterilmektedir (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 10. Türkiye’deki tarihi asansörler a) Pera Palas Oteli, İstanbul ve b) Asansör, İzmir (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”)

3.3. Türkiye’de Asansör Sektörü

Türkiye’de yüksek katlı binaların hızla artması, asansörlerin önemini artırmıştır. Kentsel dönüşüm projeleriyle birlikte asansör sektöründe önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Türkiye’de asansör sektörü; aksam imalatı, montaj, bakım ve onarım alanlarında faaliyet göstermektedir. AB uyum süreci kapsamında başlayan belgelendirme faaliyetleri sonucu, asansörlerin periyodik muayeneleri daha ciddi bir şekilde yapılabilecek hale gelmiştir.

Son olarak, yürürlüğe giren imar yönetmeliği gereği, üç katlı binalarda asansör boşluğu bırakılması, dört ve daha fazla katlı binalarda ise asansör yapımının zorunlu hale getirilmesi sağlanmıştır. Asansör sayısının ve kullanımının artmasıyla birlikte, bu sistemlerin ilgili idareler tarafından daha sıkı denetlenmesi gerekmektedir. Temel hedef, can güvenliğini etkin bir şekilde sağlamaktır. Bu doğrultuda Asansör İşletme ve Bakım Yönetmeliği, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından belediyelerin, asansör firmalarının ve kullanıcıların geri bildirimleriyle gelişen teknolojilere uyum sağlamak amacıyla sık sık güncellenmektedir. Bu güncellemelere örnek olarak, asansör firmalarının denetimlerinin bakanlıkların ilgili il müdürlükleri tarafından PGD’lerle yapılması, Bakanlık tarafından TÜRKAK tarafından onaylanmış A tipi muayene kuruluşları tarafından asansörlerde yılda en az bir kez periyodik kontrollerin gerçekleştirilmesi gösterilebilir. Yapılan periyodik muayeneler sonucunda asansör ilk

kez denetleniyorsa, asansöre bir kimlik numarası verilerek kusurlar raporlanır. Daha önceki denetimlerde bildirilen kusurların giderilip giderilmediği incelenir ve sonuca göre cezai yaptırımlar uygulanabilir.

Bu önlemler, asansörlerin güvenli ve sağlıklı bir şekilde kullanılmasını sağlamak için alınmıştır. Asansörlerin düzenli olarak bakımı ve denetimi, kullanıcıların güvenliği açısından büyük önem taşır. 2019 yılında, toplamda 507.850 adet asansörün periyodik kontrolü yapılmış olup 223.291 adet asansöre (%44) kırmızı etiket, 44.955 adet asansöre (%9) sarı etiket, 146.503 adet asansöre (%29) mavi etiket ve 93.101 adet asansöre de (%18) yeşil etiket iliştilmiştir. Tablo 1’de 2012 yılı ile başlayıp 2019 yılları arasında yapılan periyodik kontrollerin etiket dağılımı gösterilmektedir (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”).

Tablo 1. Yıllara göre asansör periyodik kontrol verileri (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”)

YILI	ETİKET				TOPLAM
	KIRMIZI	SARI	MAVİ	YEŞİL	
2012	75.190(%74)	12.062(%12)	-	14.002(%14)	101.254
2013	96.542(%64)	11.407 (%7)	-	44.329(%29)	152.278
2014	92.743(%55)	9.893(%6)	-	64.689(%39)	167.325
2015	117.933(%58)	7.856(%4)	8.289 (%4)	70.043(%34)	203.231
2016	189.539(%63)	8.813(%3)	36.458(%12)	66.723(%22)	301.533
2017	196.803(%53)	11.338(%3)	77.037(%21)	83.895(%23)	369.073
2018	223.433(%51)	21.122(%5)	102.405(%24)	87.757(%20)	434.717
2019	223.291(%44)	44.955(%9)	146.503(%29)	93.101(%18)	507.850

2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 ve 2019 yılları için asansör periyodik kontrol sonuçları değerlendirildiğinde; kontrol edilen asansör sayısında ve yeşil etiket alan asansör sayısında önemli bir artışın sağlandığı görülmektedir (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”).

Denetimler arttıkça asansör firmaları, kendi ürün tasarımlarına, periyodik olarak gerçekleştirdikleri aylık bakımlara ve yıllık revizyonlara daha çok önem vermektedirler. Ancak Türkiye’deki asansör sektörünün önemli sorunlarından bir tanesi, AR-GE alt yapısının güçlendirilmesine yönelik yürütülen çalışmaların sayısının azlığıdır. Türk asansör sektörünün genel yapısı incelendiğinde, asansör firmalarınca hazır proje uygulamaları ile üretimin içerisinde yer aldığı görülmektedir. Firmaların

farklı ve kendi sistemlerine uygun proje uygulamaları üretmesi ve özgün sistemler geliştirmesi gerekmektedir. Ancak firmaların AR-GE faaliyetleri, genellikle sonuca ulaşmayan girişimlerden oluşmaktadır. Belirli firmalar dışındaki asansör firmalarının, çağın gerektirdiği yenilenme ve dijitalleşme faaliyetlerine uyum sağlamadıkları gözlemlenmektedir (Yapı Dünyası, “Asansörün Tarihçesi”).

Türkiye’de asansör ile ilgili yürürlükte olan başlıca yönetmelik ve standartlar (Sanayi Teknoloji Bakanlığı (STB), “Asansör Sektörü Raporu”, (Erişim Tarihi:12.06.2023)

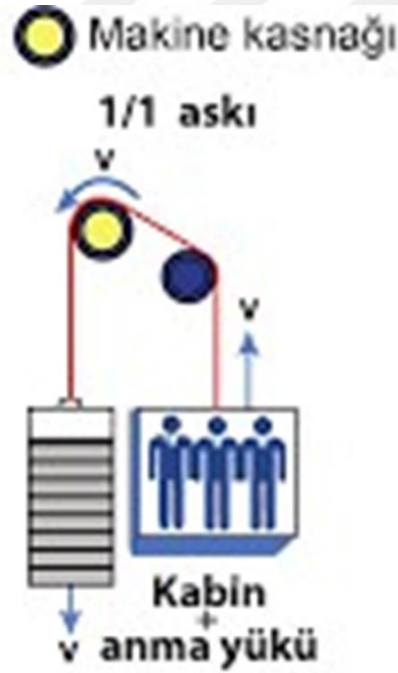
- Asansör Yönetmeliği (2014/33/AB),
- Asansör Bakım ve İşletme Yönetmeliği,
- İmar Yönetmelikleri,
- TS 81-20: Asansörler – Yapım ve Montaj için Güvenlik Kuralları Bölüm 1: Elektrikli Asansörler,
- EN 81-50: Asansörler – Yapım ve montaj için güvenlik kuralları – Bölüm 2: Hidrolik Asansörler,
- TS EN 13015: Asansör ve Yürüyen merdivenlerin Bakımı – Bakım talimatları için gerekli kurallar,
- TS 1812: Asansörlerin hesap, tasarım ve yapım kuralları (Elektrikle çalışan ve yük asansörleri için),
- ISO 9001-2000: Kalite Yönetim Sistemi,
- TS 12255: Yetkili Tamir ve Bakım Servisleri – Asansörler, Yürüyen Merdivenler, Yürüyen Yolcu Bantları.

3.4. Asansörlerin Çalışma Prensibi

Asansörler, hidrolik veya elektrik gücüyle çalışan dikey taşıma cihazlarıdır ve insanların ve yüklerin katlar arasında hareketini sağlar. Elektrikli makine prensibi, en yaygın kullanılan asansör çalışma prensibidir. Bu prensip, asansör kabini, bir motor ve tahrik sistemi arasındaki bağlantıyı içerir. Kabini, yukarı ve aşağı hareket ettiren birkaç çift kablo destekler. Bu kablolar, dengeleme sistemiyle bağlantılıdır ve kabini dengede tutar. Asansörlerin hareketi, kontrol paneli veya düğmelerle kontrol edilir. Kabindeki kişi veya yük, hedef katı seçtiğinde asansör harekete geçer. Kontrol sistemi, tahrik mekanizmasını çalıştırarak ve kablo hareketini sağlayarak kabini hedef kata taşır.

Asansörler, güvenlik sistemleriyle donatılmıştır. Bu sistemler arasında aşırı hızı önleyen fren sistemi, limit kesiciler, aşırı yük koruması, acil durumlarda tahliye sistemleri ve kapı güvenlik önlemleri bulunur. Bu sistemler, asansörün güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır.

Modern binalarda ve yapılarında asansörler, dikey ulaşımı kolaylaştıran önemli bir araçtır. Makine prensibi ve güvenlik sistemleri, asansörlerin güvenli, verimli ve sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu prensiplerin doğru bir şekilde uygulanması, insanların ve yüklerin güvenli bir şekilde taşınmasını sağlar ve asansörlerin günlük yaşamdaki önemini vurgular. Şekil 11’de karşı ağırlık ve kabin ilişkisini gösteren şematik bir görünüm mevcuttur (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 11. Karşı ağırlık ve kabin (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”)

Kabin ve karşı ağırlık ilişkisi, bir makinenin veya bir sistemdeki denge ve stabiliteyi sağlamak için önemli bir rol oynayan bir prensiptir. Bu prensip, özellikle kaldırma ekipmanları, vinçler veya asansörler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Burada, karşı ağırlık, kabin ağırlığına ve beyan edilen yükün yarısına yaklaşık olarak eşit olan bir ağırlık olmalıdır. Bu denge, sistemin istikrarını sağlar ve

aşırı yüklenmeyi önler. Eğer karşı ağırlık yeterli değilse, sistem dengesiz olabilir ve tehlikeli durumlar ortaya çıkabilir.

Bu prensip sayesinde enerjiden tasarruf da sağlanır. Karşı ağırlık, kabinin yükünü dengelemek için kullanılır ve bu sayede kabinin hareketi daha verimli hale gelir. Örneğin, bir asansörde karşı ağırlık kullanılması, asansörün daha az enerji harcamasını sağlar çünkü kabinin kendi ağırlığına ek olarak taşıdığı yükün yarısı karşı ağırlık tarafından dengelemiş olunur.

Sonuç olarak, kabin ve karşı ağırlık ilişkisi, makine ve sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan önemli bir prensiptir. Bu ilişki, dengeyi korurken enerji tasarrufu da sağlar ve çeşitli endüstrilerde güvenli bir şekilde yük taşımak için kullanılan bir yöntemdir (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”).

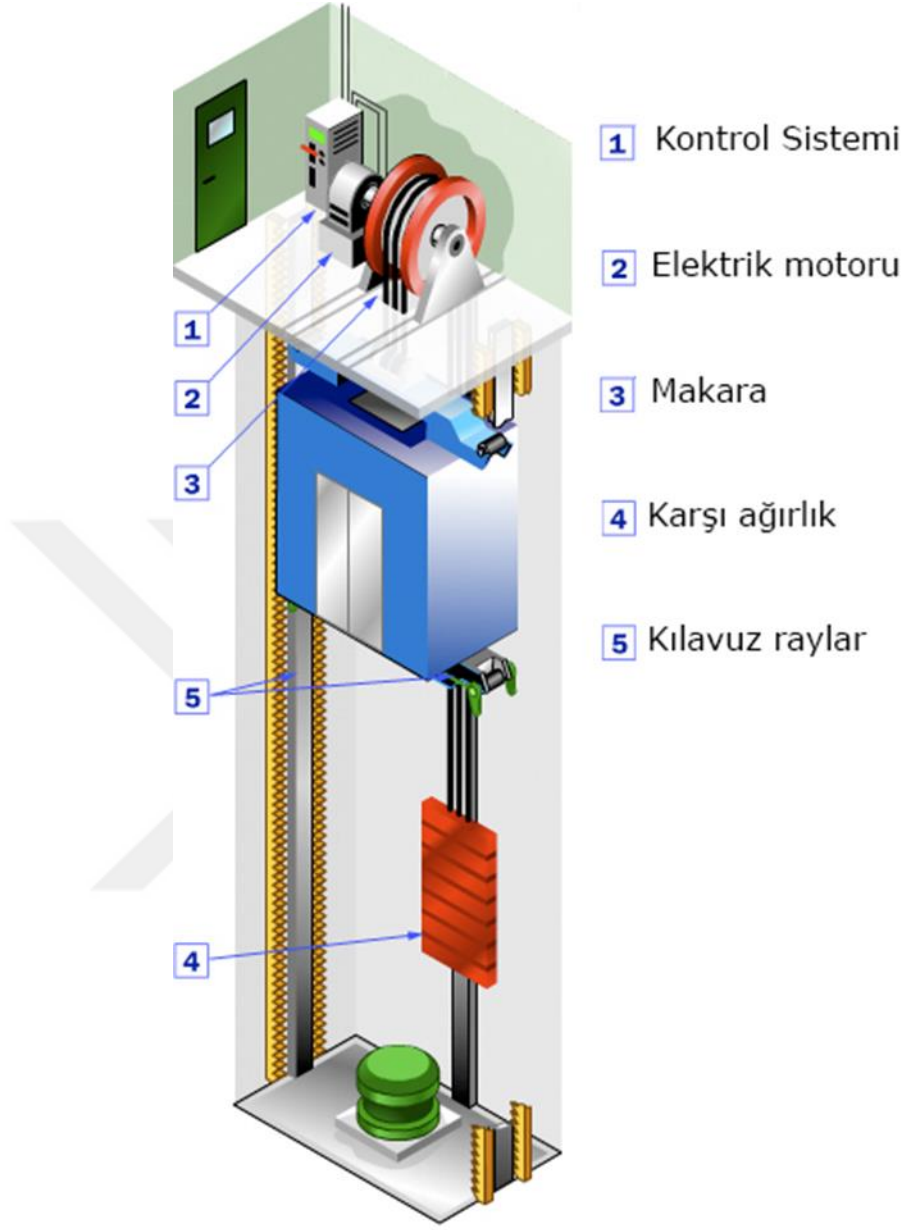
Günümüzde en çok kullanılan asansörler; halatlı asansörler dikey taşıma sistemleridir. Şekil 11’de görülen, çelik halatların kabinle karşı ağırlık arasında gerilmesi, halatların kasnak tarafından aşağı salınması veya yukarı çekilmesi prensibine göre çalışırlar. Burada halat kasnağın üzerinde sarılı olduğu için ve halatın hareketini bu kasnağın sağlamasından dolayı kasnak konumundaki değişkenlik hatatı da doğrudan etkilemektedir.

Hidrolik asansörlerde ise, asansör kabini hidrolik bir piston aracılığıyla yukarı ve aşağı hareket eder. Bu prensipte, asansör kabini üzerindeki hidrolik pistonu hareket ettiren bir pompa veya motor kullanılır. Bu prensip, daha az katlı binalar için kullanılır.

Asansörler ayrıca bir dizi güvenlik sistemi ile donatılmıştır, bu sistemler arasında aşırı hız, aşırı yük, yangın ve acil durumlarda tahliye sistemleri bulunur. Bu güvenlik sistemleri, asansörlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır.

3.5. Asansörlerin Bileşenleri

En sık kullanılan asansör çeşidi olan halatlı asansörleri oluşturan temel bileşenler Şekil 12’de gösterildiği gibidir. Bu elemanların bazıları seri güvenlik elemanlarıdır, bu elemanlar asansörlerde olmazsa olmaz kuraldır, bunlardan bir tanesinin bile eksik olması durumu asansörü kullananların kaza riskini çok artırmaktadır. Bazı elemanlar da bakım ekibinin güvenliğini sağlamaktadır (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”).

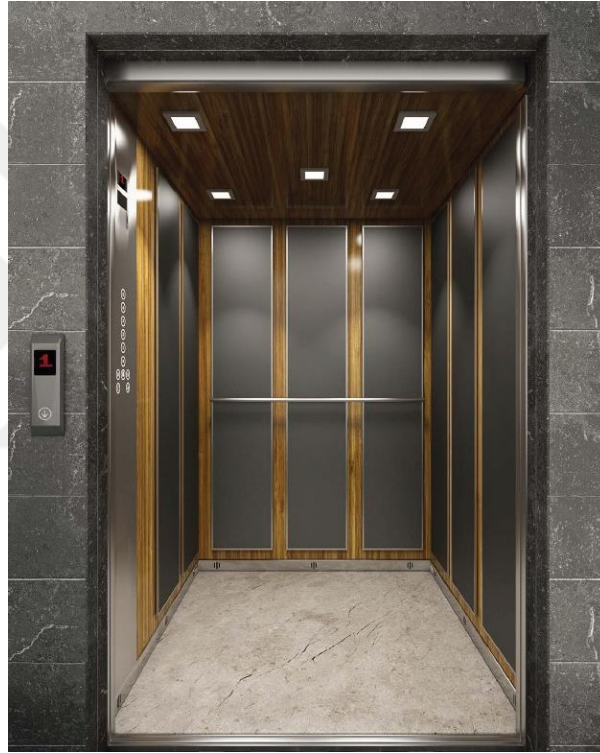


Şekil 12. Asansör şematik görüntüsü (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”)

Makine dairesindeki tahrik motorunun kumanda panosundan aldığı komut vasıtasıyla harekete geçip, kabini istenilen yöne hareket ettirmesi yoluyla çalışır. Kabin, karşı ağırlıkla müşterek çalışır. Aralarındaki çelik halatın tahrik kasnağı ile sürtünmesinden kaynaklanan bir hareket vasıtasıyla yukarı aşağı hareket ederler (Elektrik Rehberiniz, “Asansör Nasıl Çalışır”).

3.5.1. Kabin

Kabin; asansör kuyusu boyunca yolcuları ve yükleri verilen komutlara göre aşağı ve yukarı yönde taşımaya yarayan çoğunlukla çelik sac profil ile çevrili kapalı bir ortamdır. İçinde kayıt butonları, asansörün hangi katta olduğunu, hareket yönünü ve servis durumunu gösteren gösterge sistemi, otomatik kapı var ise kapının kontrolü için açma kapama butonları, acil durumlar için alarm butonu, engelli bireyler için sesli anons sistemi ve kabin dışı ile iletişim kurmak için diyafon sistemi bulunmaktadır. Kabin için örnek bir fotoğraf Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Asansör kabini

3.5.2. Kapı ve Kapı Mekanizması

Asansörlerde kullanılan kapılar genellikle üç çeşittir: basit, yarı otomatik ve tam otomatik kapılar. Günümüzde en yaygın olarak kullanılanlar ise kabin ve kat kapısının birlikte çalıştığı tam otomatik kapılı asansörlerdir. Tam otomatik kapılar, diğer kapı sistemleri içinde en güvenilir olanlardır.

Kapı mekanizması, güvenlik açısından elektronik sistemler tarafından sürekli olarak kontrol edilen bir sistemdir. Bu sistem, kapının ne zaman kapanması gerektiğini

ve ne zaman açılması gerektiğini belirler. Asansör kabini gitmesi gereken kata gelmeden önce kapılar dışarıdan asla açılmamalıdır. Aynı şekilde, kapısı tam olarak kapanmamış olan asansör, kapıların kapalı ve kilitli olduğunu öğrenmeden hareket emrini uygulamamalıdır.

Bu tür durumları önlemek için kumanda devresine seri olarak bağlanan normalde açık elektrikli kapı kontakları (fiş-priz) ve kilit devreleri kullanılır. Elektrikli kapı kontakları, asansör kapısının açık olduğu durumlarda asansörün emniyet devresini kesecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak bu kontakların kısa devre olması durumunda kullanıcı için hayati riskler ortaya çıkabilir.

Normalde açık kapı kontakları, kapının elektrikselsel olarak kapanıp kapanmadığını kontrol ettikten sonra kilit devresine hazır sinyali verir. Sinyali alan kilit devreleri ise ikinci bir kontrolle kapının mekanik olarak da kapalı olduğunu kontrol eder. Böylece kapı kilitlenir ve kabin katta olmadığına kapının açılmaması ve kapı açıkken kabinin hareket etmemesi sağlanır.

Tam otomatik kapı sistemlerinde ayrıca kapılar arasında sıkışmayı önlemek için kapı boy fotoselleri kullanılır. Bu fotoseller, önlerine bir cisim gelmesi durumunda asansör kapısının açık tutulmasını sağlar. Bu sayede sıkışma veya güvenlik sorunları önlenmiş olur (Alsem Asansör, “Asansör Kabini Modeli”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).

3.5.3. Kılavuz Ray

Asansör kılavuz rayları, asansör kabini ve karşı ağırlığın dikey hareketini sağlayan ve aynı zamanda kabini dikey olarak sabit tutan raylardır. Bu raylar, genellikle çelikten yapılmış, dikdörtgen şekilli profilden oluşur. Kılavuz raylarının dış yüzeyi, kabine ve karşı ağırlığa takılı olan ray ayaklarına yerleştirilen patenler veya rulmanlar tarafından desteklenir. Asansör kabini ve karşı ağırlığın düzgün ve kontrollü bir şekilde hareket etmesini sağlar. Raylar, asansörün çalışması sırasında sarsıntısız bir şekilde hareket etmesini sağlar ve asansörün istenilen katlara doğru yükselmesini veya inmesini sağlar. Ayrıca kılavuz rayları, asansör kabini ve karşı ağırlık arasındaki dengeyi sağlar, böylece asansör dengeli bir şekilde hareket eder.

Kılavuz rayları aynı zamanda asansörlerin fren sistemi için de önemlidir. Fren sistemi, acil durumlarda asansörü durdurmak için kullanılır ve genellikle kılavuz

raylarına tutunur. Bu sayede fren sistemi, asansörün hareketini durdurarak güvenlik sağlar.

Asansör kılavuz raylarının kaliteli ve dayanıklı malzemelerden yapılması çok önemlidir. Raylar, yoğun kullanıma ve aşınmaya dayanabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca periyodik bakımlarının yapılması da önemlidir. Bakım işlemleri, rayların düzgün çalışmasını ve asansörün güvenli bir şekilde hareket etmesini sağlamak için düzenli aralıklarla yapılmalıdır.

Asansör kılavuz rayları, asansörlerin güvenli ve stabil bir şekilde hareket etmesi için hayati öneme sahiptir. Kaliteli malzemelerden yapılmalı, düzenli bakımları yapılmalı ve gerektiğinde değiştirilmelidir. Bu şekilde asansörlerin güvenliği ve performansı sağlanmış olur.

3.5.4. Karşı Ağırlık

Kabin ağırlığı ve kabinin taşıma kapasitesinin yarısı ağırlığının toplamına tekabül edecek ağırlıktaki, genellikle demir tozu-beton karışımından olan bloklardır. Bu bloklar çelik bir çerçevenin içerisinde bulunmaktadır. Karşı ağırlık kabinle zıt yönde hareket etmektedir. Böylelikle kabin ile arasındaki momentumu dengeleyerek elektrik motorunun daha verimli çalışmasını sağlamaktadır.

3.5.5. Askı Halatları

Kabini havada tutmaya yarayan bir makaraya sarılı şekilde diğer ucunda da karşı ağırlık bulunan çelik askıdır. İnsan taşıyan asansörlerde en az iki tane bulunmak zorundadır. Bu halatlardan birisi kopsa bile diğeri tüm asansör tertibatını taşıyabilecek sağlamlıkta olmalıdır.

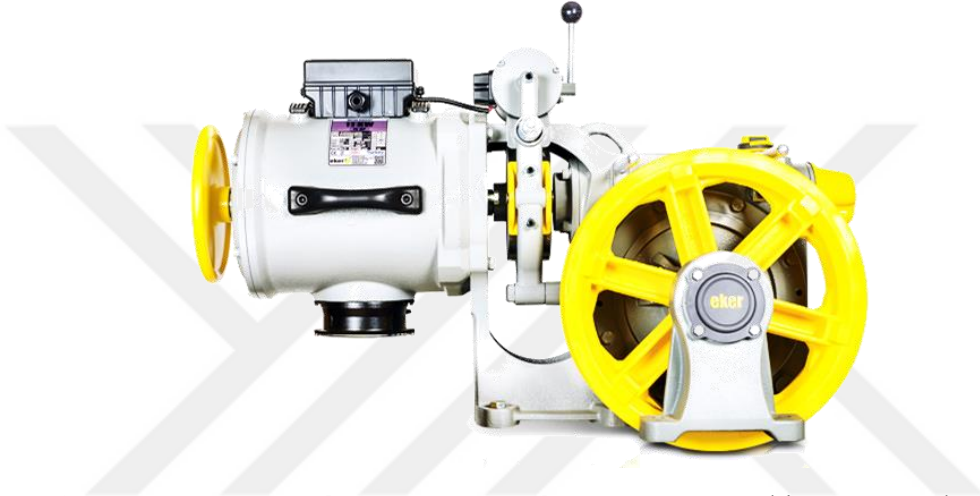
3.5.6. Asansör Makine ve Motoru

Asansör makine ve motoru, asansör sistemlerinin çalışmasını sağlayan ana bileşenlerdir. Asansör makine dairesinde bulunur ve tahrik kasnağı üzerinden geçen halatlar vasıtasıyla gücü ileterek, asansör kabini ile karşı ağırlığını hareket ettirir.

Asansör motoru, makine dairesinin bir parçasıdır. Motor, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür ve bu enerji, asansör kabini ve askı halatları arasındaki hareketi sağlamak için kullanılır.

Asansörler makine ve motorun yanı sıra, bir makara sistemi, frenler ve bir kontrol panosu gibi diğer bileşenleri içerir.

Asansör makine ve motorları, asansör sistemlerinin güvenli ve düzgün bir şekilde çalışması için hayati önem taşırlar. Bu nedenle, makine ve motorların düzenli bakımı ve onarımı, asansörlerin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için önemlidir. Şekil 14’te asansör makine ve motoru için bir örnek gösterilmiştir (Eker Asansör, “Makine Motor Aksamı”, Erişim Tarihi:12.06.2023).



Şekil 14. Asansör makine ve motor (Eker Asansör, “Makine Motor Aksamı”)

3.5.7. Tamponlar

Herhangi bir arıza durumunda zemin katta durmayan kabin veya karşı ağırlık bloğunun kuyu dibine çarpışını yumuşatmak üzere tamponlar kullanılmaktadır. Asansör hızının artmasına göre sırasıyla elastik, yaylı ve hidrolik olmak üzere üç çeşit tampon vardır (BSB Asansör, “Tamponlar”, Erişim Tarihi: 12.06.2023). Şekil 15’te tamponlara örnekler gösterilmiştir.



Şekil 15. Tamponlar (BSB Asansör, “Tamponlar”)

3.5.8. Patenler

Kabin ve karşı ağırlığın kılavuz raylar üzerinde klavuzlanıp kolayca hareket etmesini sağlayan mekanizmalardır. Asansör hızının artmasına göre sırasıyla kayan paten, dönen paten ve tekerlekli paten olmak üzere üç çeşidi vardır (Asansör Market, “Asansör Patenler”, Erişim Tarihi: 12.06.2023). Şekil 16’da patenlere örnekler gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 16. a) Silikon paten, b) Makaralı paten (Asansör Market, “Asansör Patenler”)

3.5.9. Hız Regülatörü

Asansör kuyusu üzerinde konumlandırılan ve kendine özgü halat sistemiyle kabine bağlı olmak suretiyle, aŗaėı ve yukarı yönde  alıŗmak zorunda olan güvenlik elemanıdır. Hız sınırlayıcı ve hız düzenleyici görevleri vardır. Asansör herhangi bir sebeple, beyan hızının % 1.10 m/s üzerine çıkarsa regülatör mekanizması devreye girerek kendini kilitler. Regülatör, kendi kasnağı üzerinde bulunan halatın dönmesini durdurur. Duran halat fren mekanizmasına asılır ve paraŗ t fren mekanizmasını devreye sokarak asansörü güvenli şekilde durdurur. Aynı zamanda regülatör gagası da motorun enerjisini keser. Bütün bu süreç çok kısa bir zaman diliminde ger ekleŗir (Liforbis, “Asansör Regülatör Modelleri”, Eriŗim Tarihi: 12.06.2023). şekil 17’de hız regülatörüne örnek verilmiŗtir.

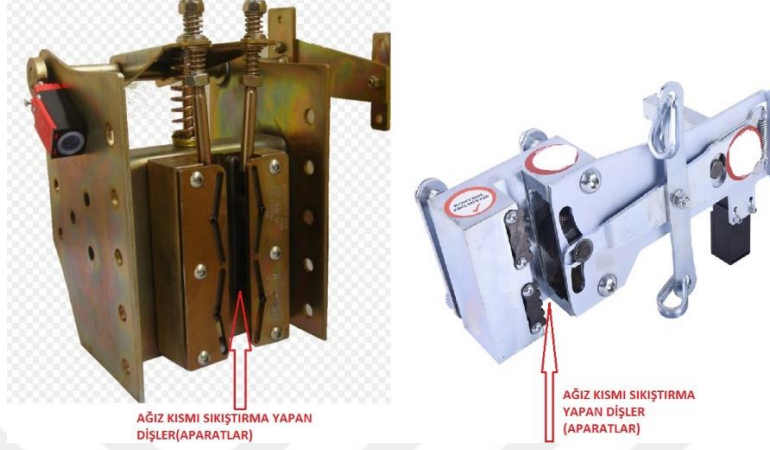


şekil 17. Hız regülatörü (Liforbis, “Asansör Regülatör Modelleri”)

3.5.10. Paraŗ t Fren Sistemi

Halat kopması veya herhangi bir baŗka nedenle asansörün kontrolsüz şekilde hareket etmesi ve beyan hızının % 1.10 m/s oranında artması üzerine devreye girerek asansörü kılavuz raylar üzerinde frenlemek suretiyle durduran düzenektir. Kabinin  st veya alt şasesine hatta bazı binalarda karŗı ağırlığın da üst veya alt şasesine yerleŗtirilirler. Paraŗ t fren sistemi, hız regülatörü tarafından devreye sokulan

sistemlerdir. Asansörlerde ikisi beraber bulunmak zorundadır. Şekil 18’de paraşüt fren sistemi için örnekler verilmiştir (Arkel, “Asansör Kumanda Kartları”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 18. Paraşüt fren sistemi (Arkel, “Asansör Kumanda Kartları”)

3.5.11. Sınır Kesiciler

Asansörde sınır güvenlik kesicileri bulunmalıdır. Sınır güvenlik kesicileri, son durak seviyelerinin aşılması durumunda mümkün olabildiğince çabuk çalışacak bir şekilde yerleştirilmeli, ancak normal işletmeyi aksatmamalıdır. Bu kesiciler, kabin veya karşı ağırlık tamponlara değmeden çalışmalıdır.

3.5.12. Kontrol Kartı

Kontrol kartı asansörün beyin işlevini gören en önemli yapıdır. Her türlü ayar ve komut bu kartın üzerinden işlenmektedir. Bu kart bütün güvenlik gereksinimlerinin sağlandığını, motora hareket emrinin verilip verilmemesi gerektiğini, gelen çağrılarını değerlendirmesini ve işleme alınmasını denetlemekle görevlidir. Şekil 19’da kontrol kartına bir örnek gösterilmiştir (Arkel, “Asansör Kumanda Kartları”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 19. Kontrol kartı (Arkkel, “Asansör Kumanda Kartları”)

3.5.13. Kumanda Panosu

Kumanda panosu asansörün çalışmasını denetleyen ve asansör hakkındaki verileri toplayan bilumum malzemenin bir arada bulunduğu panodur. İçinde kontrol kartını, motor hız sürücüsünü, çeşitli görevler için kullanılan giriş çıkış klemenslerini, sigortaları, kontaktörleri ve röleleri bir arada barındırmaktadır. Bu pano genellikle makine dairesinde konumlandırılmakta ve bakım ekibinin kolaylıkla ulaşabileceği bir yerde duvara monte edilmektedir. Şekil 20’de kumanda panosu örneği verilmiştir (E-asansör, “Dişli Kumanda Panosu”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 20. Kumanda panosu (E-asansör, “Dişli Kumanda Panosu”)

3.6. Asansörlerde Karşılaşılan Temel Arızalar

Asansörlerde bazı arızalar meydana gelebilir ve bu arızaların nedenleri ve çözümleri farklılık gösterebilir. Asansörlerde yaşanan arızaların önlenmesi için düzenli bakım ve kontrol işlemleri yapılması önemlidir. Asansörlerin düzenli olarak bakımı yapılmazsa, arızaların ortaya çıkması ve kullanıcıların güvenliği tehlikeye girebilir. Genel olarak asansörlerdeki arızaları mekaniksel ve elektriksel arızalar olarak ikiye ayırılır.

3.6.1. Mekaniksel Arızalar

Mekanik arızalar, asansörlerde çeşitli nedenlere bağlı olarak ortaya çıkabilir. Halat kopması, asansörlerdeki mekanik arızaların riskli bir sebeplerinden biridir. Halatların kopması durumunda, asansör tehlikeli bir şekilde düşebilir. Bu nedenle, asansör halatlarının düzenli olarak kontrol edilmesi ve bakımının yapılması büyük önem taşır.

Fren arızaları da asansörlerde meydana gelebilecek tehlikeli durumlar arasındadır. Fren sisteminin arızalanması, asansörün istenmeyen şekilde hareket etmesine neden olabilir ve yolcuların zarar görmesine veya ölümüne yol açabilir. Bu yüzden, asansör frenlerinin düzenli olarak kontrol edilmesi ve bakımının yapılması gerekmektedir.

Asansör kapılarının açılmaması veya kapanmaması da bir diğer mekanik arıza nedenidir. Bu durum, insanların asansöre binmesini veya inmesini engelleyebilir ve insanların sıkışmasına yol açabilir. Bu nedenle, asansör kapılarının işlevlerinin düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamak için periyodik olarak kontrol edilmeleri ve gerekli bakımların yapılması önemlidir.

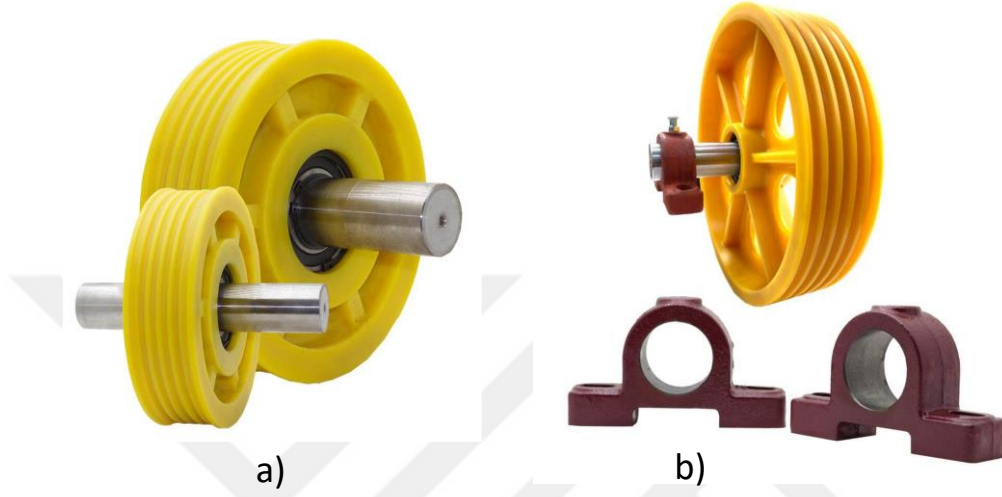
Asansör motorunun arızalanması da asansörün hareket etmesini engelleyebilir veya kontrolsüz bir şekilde hareket etmesine neden olabilir. Motor arızaları, asansörün güvenli ve düzgün bir şekilde çalışmasını etkiler. Bu yüzden, asansör motorlarının düzenli olarak kontrol edilmesi, temizlenmesi ve bakımının yapılması önemlidir.

Elektrik arızaları da asansörlerde mekanik arızalara yol açabilen tehlikeli durumlardır. Elektrik arızaları, asansörün kontrolünün kaybedilmesine ve riskli durumların oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, asansörlerin elektrik bağlantılarının düzenli olarak kontrol edilmesi, elektrik panellerinin ve bileşenlerinin bakımının yapılması önemlidir.

Son olarak, asansör parçalarının zamanla aşınması ve yıpranması da mekanik arızalara yol açabilir. Bu nedenle, düzenli bakım ve onarım işlemleri gerçekleştirilerek asansör parçalarının aşınması veya yıpranması önlenmeli veya tespit edilip müdahale edilmelidir.

Rulmanlar, makinelerde dönen veya hareket eden parçaların sürtünmesini azaltmak ve yükleri desteklemek için kullanılan önemli bileşenlerdir. Ancak, rulmanlar zamanla çeşitli arızalarla karşılaşabilir. En yaygın rulman arızalarından biri, aşırı yüklenme nedeniyle meydana gelen hasarlardır. Bu, rulmanın taşıma kapasitesini aşan bir yükün etkisiyle iç ve dış yüzeylerinde deformasyon veya çatlaklar oluşmasına yol açabilir. Diğer bir arıza türü ise yağlama sorunlarıdır. Yetersiz yağlama veya yanlış yağlama şekli, rulmanların aşınmasına ve aşırı ısınmasına neden olabilir. Bunun yanı sıra, rulmanlarda titreşim, gürültü veya düzensiz çalışma gibi belirtiler gösteren dengesizlikler, eksiklikler veya montaj hataları gibi sorunlar da ortaya çıkabilir.

Rulman arızaları, makine performansını olumsuz etkileyebilir, enerji verimliliğini azaltabilir ve hatta ciddi hasarlara yol açabilir. Bu nedenle, rulmanların düzenli olarak bakımı, uygun yağlama ve doğru montaj tekniklerinin kullanılması gibi önleyici önlemler almak önemlidir. Şekil 21’de rulmanlı kasnaklar gösterilmiştir (Artı+Kasnak, “Asansör Kasnak Türleri”, Erişim Tarihi: 12.06.2023).



Şekil 21. a) Plastik saptırma kasnak, b) Yan destekli kasnak (Artı+Kasnak, “Asansör Kasnak Türleri”)

3.6.2. Elektriksel Arızalar

Asansörlerdeki elektriksel arızalar, birçok farklı nedenden kaynaklanabilir ve çeşitli bileşenlerin etkileşimi sonucunda ortaya çıkabilir. Bu arızaların doğru bir şekilde tanımlanması ve çözülmesi, asansörlerin güvenli ve düzgün bir şekilde çalışmasını sağlamak için önemlidir.

Güç kaynağı sorunları, asansörlerde sık karşılaşılan elektriksel arızalar arasındadır. Güç kaynağı hatlarının kesilmesi, sigortaların atması, gerilim dalgalanmaları veya batarya yedeklerinin bulunmaması gibi durumlar, asansörlerin çalışmasını etkileyebilir ve arıza meydana getirebilir. Bu tür sorunlar, enerjinin düzgün bir şekilde sağlanmasını engeller ve asansörlerin durmasına veya çalışmamasına yol açabilir.

Kablolama sorunları da asansörlerdeki elektriksel arızaların sık rastlanan sebeplerindendir. Kabloların yıpranması, kopması veya yanlış bağlanması gibi durumlar, elektrik akımının iletimini etkileyebilir. Bu da asansörün hareketini

kısıtlayabilir veya tamamen durmasına neden olabilir. Ayrıca, kaçak akım rölesi sürekli olarak atabilir, bu da asansörün güvenliğini tehlikeye atar.

Kontrol sistemleri arızaları, asansörlerde elektriksel sorunların bir diğer yaygın kaynağıdır. Asansörlerin kontrol sistemleri, sensörler, röleler, düğmeler veya kumandalar gibi bir dizi bileşeni içerir. Bu bileşenler arasındaki herhangi bir arıza, asansörün düzgün çalışmasını etkileyebilir. Örneğin, sensör hataları, röle arızaları veya kontrol düğmelerindeki problemler, asansörün güvenli ve hatasız bir şekilde çalışmasını engelleyebilir. Faz hataları veya seyir süresi aşımı gibi sorunlar da kontrol sistemleri arızalarına örnek olarak verilebilir.

Motor veya motor sürücüsü sorunları da asansörlerdeki elektriksel arızaların bir başka kaynağıdır. Motorlar ve motor sürücüler, asansörün hareketini sağlayan önemli bileşenlerdir. Motorların düzgün çalışmaması veya motor sürücülerindeki sorunlar, asansörlerin performansını etkileyebilir ve hatta motorların aşırı ısınmasına veya yanmasına yol açabilir. Bu tür arızalar, asansörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını engeller.

Asansörlerdeki elektriksel arızaların bir diğer kaynağı kapı sistemleridir. Asansörlerdeki kapı sistemleri, asansörün güvenli bir şekilde yolcu alıp bırakmasını sağlayan önemli bir bileşendir. Ancak kapı sistemlerinde yaşanan arızalar, kapıların açılmamasına veya kapanmamasına neden olabilir. Bu durum, asansör kullanımını engeller ve yolcuların güvenliğini tehlikeye atar. Kapıların açılıp kapanırken sorunlar yaşanabilir, kapı sensörleri arızalanabilir veya kapı motorları bozulabilir. Bu gibi durumlar asansörün normal işleyişini etkileyebilir ve arızaların ortaya çıkmasına yol açabilir.

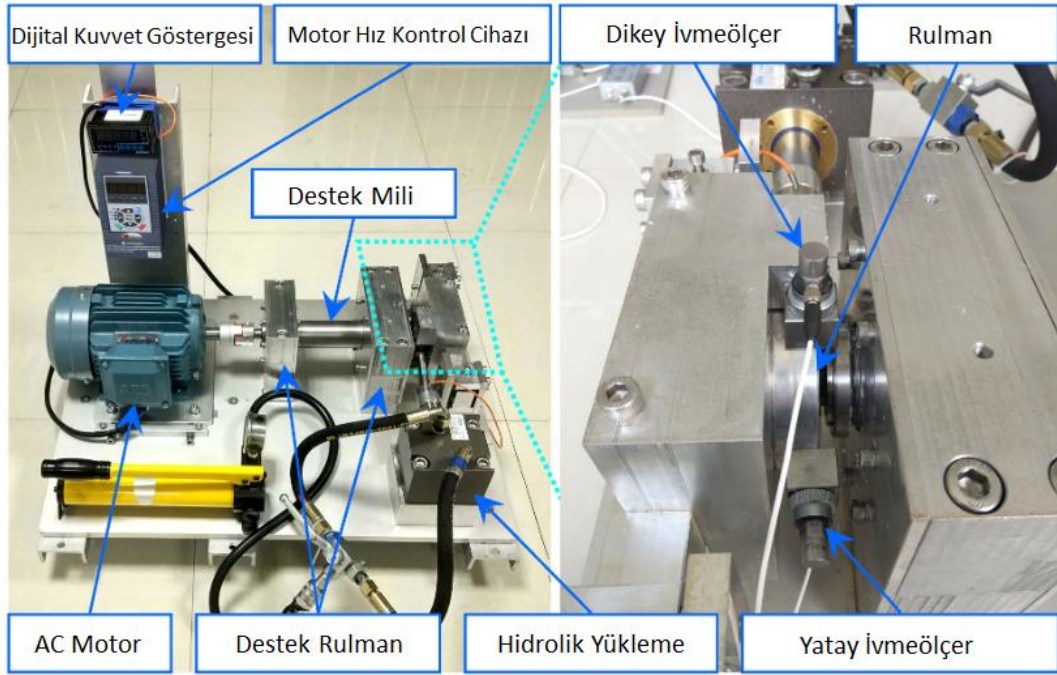
Asansörlerdeki elektriksel arızaların kaynakları oldukça çeşitlidir ve teşhis ve onarım süreci elektrik teknisyeni olan bakım personeli tarafından gerçekleştirilir. Bu teknisyenler, arızanın doğru bir şekilde tanımlanması ve uygun çözümün bulunması için gerekli bilgi ve deneyime sahiptir. Sonuç olarak, asansörlerdeki elektriksel arızalar birçok farklı nedenden kaynaklanabilir ve genellikle güç kaynağı sorunları, kablolama sorunları, kontrol sistemleri arızaları, motor veya motor sürücüsü sorunları ve kapı sistemleri sorunları gibi faktörlerden kaynaklanır. Bu arızaların doğru bir şekilde tanımlanması ve çözülmesi, asansörlerin güvenli ve sürekli bir şekilde çalışmasını ve de yolcuların rahat ve güvenli bir şekilde seyahat etmelerini sağlar.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, araştırmanın temel amacına ulaşmak için kullanılan materyaller ve kullanılan yöntemlerin ayrıntılı bir açıklaması yer almaktadır. Kullanılan verinin özellikleri ve nereden elde edildiği açıkça belirtilmiştir. Veri analizi yöntemleri, elde edilen verilerin nasıl değerlendirildiği ve yorumlandığına dair adımlar istatistiksel yöntemler, grafiksel gösterimler ve diğer analiz araçları açık bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. Çalışmada Kullanılan Test Düzeneği ve Veri Seti

Bu çalışmadaki rulman bozulmasıyla ilgili veri seti araştırmacılar için açık kaynak olarak sunulan bir çalışmadan alınmıştır (Wang, 2018). Veri seti, rulmanların hızlandırılmış bozulma testleri sırasında elde edilen titreşim sinyallerini içermektedir. Şekil 22’de gösterilen rulman test platformu bir alternatif akım (AC) motoru, bir motor hız kontrolörü, bir destek mili, iki destek yatağı (ağır hizmet tipi makaralı yataklar), bir hidrolik yükleme sistemi ve dikey ve yatay ivme ölçerlerden oluşmaktadır. Bu deneysel platform, farklı çalışma koşulları altında rulmanların hızlandırılmış bozulma testlerini gerçekleştirebilir ve arızaya kadar çalışma verilerini elde edebilir. Veri setinin açık kaynak olarak sunulması, araştırmacıların kendi yöntemlerini geliştirmelerine ve sonuçları diğer araştırmacılarla paylaşmalarına olanak tanımaktadır. Bu şekilde, rulmanların bozulma analizi ve tahmini konusundaki araştırmaların ilerlemesi teşvik edilmekte ve bu alandaki bilimsel gelişmelere katkı sağlanmaktadır.



Şekil 22. Rulman test platformu (Wang, 2018)

Test edilen rulmanların oluşturduğu titreşim sinyallerini toplamak için PCB 352C33 tipi iki ivmeölçer test edilen rulmanların mahfazasında 90°'de konumlandırılmış, yani biri yatay eksene ve diğeri dikey eksene monte edilmiştir. Örnekleme frekansı 25.6 kHz olarak ayarlanmıştır. Her örnekleme için toplam 32768 veri noktası kaydedilir ve örnekleme süresi 1 dakikaya eşittir. Tablo 2’de çalışma koşulları ve karşılaşılan hatalar özetlenmiştir. Ayrıca, Şekil 23’te normal ve bozulmuş rulmanların gösterilmiştir.



Şekil 23. Normal ve bozulmuş rulman fotoğrafları (a) Normal, (b) İç bilezik hatası, (c) Kafes hatası, (d) Dış bilezik hatası (Wang, 2018)

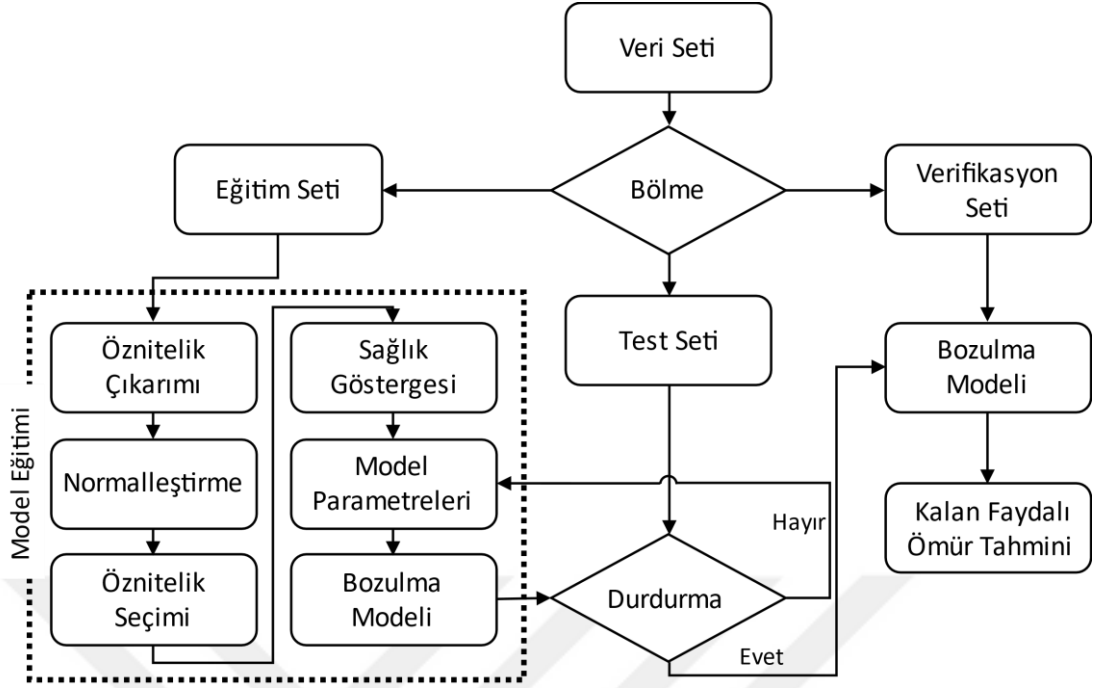
Tablo 2. Veri setindeki rulmanların çalışma koşulları (Wang, 2018)

Çalışma Koşulu	Çalışma süresi (dakika)	Karşılaşılan Hata
35 Hz 15 kN	123	Dış Bilezik
	161	Dış Bilezik
	158	Dış Bilezik
	122	Kafes
	52	İç Bilezik
37.5 Hz 11 kN	411	İç Bilezik
	161	Dış Bilezik
	453	Kafes
	42	Dış Bilezik
	339	Dış Bilezik
40 Hz 10 kN	2538	Dış Bilezik
	2496	İç Bilezik
	371	İç Bilezik
	1515	İç Bilezik
	114	Dış Bilezik

4.2. Çalışmada Kullanılan Yöntem

Bu çalışmanın temel amacı meydana gelen bozulmayı makine öğrenmesi metodolojisi kullanarak sağlık göstergesinde karakterize edilme bilmektir. Tespit edilen bu sağlık göstergesi daha sonra kalan faydalı ömür tahmininde kullanılacaktır. Sağlık göstergesi hesaplamak için gerekli işlem adımları (i) öznitelik çıkarma, (ii) normalizasyon, (iii) öznitelik seçimi ve (iv) sağlık göstergesinin elde edilmesi şeklinde sıralanmaktadır.

Bu bölümde tezin ana amacı olan kestirimci bakım modelinin tasarlanarak rulmanlarda arıza başlangıcı tespit edildikten sonra tam olarak bozulmasına ve kullanılamaz duruma gelmesine kadar geçen süreyi yani kalan faydalı ömrünü (KFÖ) tahmin etmekte kullanılan yöntemin temel adımları açıklanacaktır. Şekil 24'te kullanılan yöntemin iş akış şeması sunulmuştur.



Şekil 24. Önerilen yöntemin iş akış şeması

4.2.1. Veri Önileme

Bu tezde, veri seti eğitim, test ve verifikasyon (doğrulama) olmak üzere üçe ayrılarak kullanılmıştır. Eğitim seti, modelin öğrenmesi için kullanılan veri setidir. Model, bu verileri kullanarak parametreleri ve ağırlıkları öğrenir. Test seti ise modelin performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu veri seti, eğitim sürecinde kullanılmayan verilerden oluşur. Modelin doğruluğunu ve performansını bu veri seti üzerinde test edilir. Son olarak, doğrulama seti ise geliştirilen modelin gerçek dünya verilerine uygulaması ile kalan faydalı ömür tahmini için kullanılır.

Bu tezde kullanılan ham titreşim verileri, 1 dakikalık sürelerde bölünmüştür. 1 dakikalık bölümler hem pratik hem de analitik nedenlerle tercih edilmiştir. Pratik olarak, uzun süreli titreşim verileri yerine daha kısa süreli segmentler kullanmak, veri işleme ve analiz sürecini daha yönetilebilir hale getirir. Ayrıca, analitik açıdan, 1 dakikalık bölümler genellikle hata tespiti ve arıza analizi için yeterli bilgiyi sağlayabilir. Bu zaman aralığı, önemli titreşim özelliklerini yakalamak ve mekanik sistemdeki değişiklikleri izlemek için uygun bir seçenektir.

1 dakikalık bölümler kullanılarak elde edilen titreşim verileri, daha sonra analiz ve işleme adımlarına tabi tutulabilir. Bu adımlar arasında özellik çıkarma, veri

normalizasyonu, makine öğrenme algoritmalarının eğitimi ve modelin performans değerlendirmesi gibi işlemler yer alabilir.

4.2.2. Öznitelik Çıkarımı

Titreşim sinyalleri, rulmanlardan kaynaklanan mekanik hareketlerin bir yansımasıdır. Bu titreşim sinyalleri, rulman hatalarının erken teşhis edilmesi, arızaların tahmini ve önleyici bakımın gerçekleştirilmesi gibi önemli bilgiler içerebilir. Ancak, ham titreşim sinyalleri genellikle karmaşık ve gürültülü olabilir, bu nedenle doğrudan analizleri zor olabilir.

Ham titreşim sinyallerinden faydalı bilgilerin çıkarılması prosedürü, özellik çıkarmayı içerir. Rulmanlar genellikle zorlu çevre koşullarında çalışır ve bu nedenle çeşitli hatalara maruz kalabilirler. Mekanik titreşimlerin analizi için ivmeölçerler kullanılarak zaman alanında toplanan titreşim sinyali, hata duyarlı özellikleri ayıklamak ve yararlı bilgiler elde etmek için frekans alanı başta olmak üzere frekans ve zaman-frekans farklı alanlara dönüştürülür.

Bu tezde, zaman alan analizinde, titreşim sinyali üzerinde temel istatistiksel metrikler kullanıldı. Bu metrikler sırasıyla Ortalama, Standart Sapma, RMS (Kök Ortalaması), Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü'dür. Bu metriklerin matematiksel ifadeleri Denklemler 9 – 14 arasında gösterilmiştir. Bu denklemlerde $x(t)$ ve T sırasıyla analiz edilen zaman sinyalinin ve bu sinyalin periyodunu ifade etmektedir.

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x(t) - \bar{x})^2} \quad (10)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (11)$$

$$P_p = \max(x(t)) - \min(x(t)) \quad (12)$$

$$KR = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \bar{x})^4 dt}{RMS^4} \quad (13)$$

$$F_c = \frac{P_p}{RMS} \quad (14)$$

Frekans alanı analizi, bir sinyalin frekans bileşenlerini incelemek ve bu bileşenlerin özelliklerini anlamak için kullanılan bir tekniktir. Sinyaller içerisindeki frekans bilgilerinin elde edilmesi için kullanılan en yaygın metot Hızlı Fourier Dönüşümüdür (FFT). Genel olarak FFT, spektrumu (yani veri noktası tarafından ortaya çıkan her frekanstaki gücü) ve karşılık gelen frekansı elde eder. Böylece, sinyalin farklı frekanslardaki bileşenlerini ayırt edilmesine ve her bir bileşenin katkısını anlaşılmasına olanak tanır. $x(t)$ sinyaline ait FFT dönüşümü Denklem 15'te verilmektedir.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (15)$$

Bu tezde frekans alanında kullanılan öznitelik ise tepe frekanslarıdır (T_p) ve Denklem 16'da matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$T_p = \operatorname{argmax}_{2\pi f} X(f) \quad (16)$$

Zaman-frekans analizi, sinyalin zaman ve frekans bileşenlerini aynı anda incelemek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Ortalama tepe frekans, zaman-frekans alan analizi yöntemleriyle elde edilen bir özniteliktir. Bu öznitelik, bir sinyalin zaman içindeki frekans değişimini ifade etmek için kullanılır.

Ortalama tepe frekansın hesaplanması için, sinyalin örnekleme periyodu (T_o) boyunca bir FFT uygulanır. FFT uygulandıktan sonra, elde edilen frekans spektrumu analiz edilir ve her bir zaman dilimindeki en yüksek enerjiye sahip frekans bileşeni belirlenir. Bu en yüksek enerjiye sahip frekans bileşenine "tepe frekans" denir. Ortalama tepe frekans ($\bar{T}_p$) ise bu tepe frekansların ortalamasıdır ve Denklem 17'de ifade edilmiştir.

$$\bar{T}_p = \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} T_p dt \quad (17)$$

Bu çalışmada, titreşim sinyallerinin analizi için çeşitli öznitelikler kullanılmıştır. Zaman alanında kullanılan öznitelikler arasında Ortalama, Standart Sapma, RMS (Kök Ortalaması), Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü yer almaktadır. Bu öznitelikler, titreşim sinyallerinin istatistiksel ve enerji özelliklerini yansıtmaktadır. Frekans alanında ise tepe frekansları kullanılmıştır. Tepeler, titreşim sinyalinin belirli bir zaman dilimindeki en yüksek enerjiye sahip frekans bileşenlerini temsil etmektedir. Tepelerin zaman içindeki değişimi, sinyalin frekans karakteristiğini anlamak için önemli bir bilgi sağlamaktadır. Ayrıca, zaman-frekans alanında da ortalama tepe frekans özniteliği kullanılmıştır. Bu öznitelik, sinyalin zaman içindeki tepe frekanslarının ortalamasını temsil etmektedir. Zaman-frekans analizi, sinyalin frekans değişimini zamanla ilişkilendirerek daha kapsamlı bir anlayış sunmaktadır.

4.2.3. Veri Normalleştirme

Bu tez çalışmasında, her bir zaman adımı için elde edilen öznitelikler (N_o) farklı ölçeklere sahiptir. Bu nedenle, elde edilen özniteliklerin değerlerinin aynı ölçeğe getirilmesi ve karşılaştırılabilir hale getirilmesi önemlidir. Bu amaçla, z-skoru normalizasyonu tercih edilmiştir ve matematiksel olarak Denklem 18'de ifade edilmiştir. Z-skoru normalizasyonu, özniteliklerin ortalama değerlerinin çıkarılması (μ_{N_o}) ve standart sapmalarının (σ_{N_o}) hesaplanarak, her bir özniteliğin bu ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak ölçeklendirilmesidir. Bu yöntem, öznitelikler arasındaki farklı ölçekleri ortadan kaldırır ve verilerin daha tutarlı bir şekilde karşılaştırılmasını sağlar.

$$Z_{o,i}(t) = \frac{N_{o,i}(t) - \mu_{N_{o,i}}}{\sigma_{N_{o,i}}} \quad i = 1, \dots, N_i \quad (18)$$

4.2.4. Öznitelik Seçimi

Kalan faydalı ömür (KFÖ), bir makinenin veya makine parçasının fonksiyonel olarak çalışır hali hazır mevcut durumdan arıza başlangıcı tespit edilmesine ve sonra

tam olarak kullanılamaz duruma gelmesine kadar geçen süreyi ifade eder. Güvenilir bir şekilde KFÖ tahminleri için, sistemin bozulma süreciyle bağlantılı olarak zamanla değişen, gözlemlenebilen bir durum göstergesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Öznitelik seçimi, hesaplanan öznitelikler arasından en bilgilendirici, en önemli ve en faydalı olanları seçme sürecidir. Öznitelik seçimi, birçok avantaj sağlar. İlk olarak, gereksiz veya tekrarlayan özniteliklerin çıkarılması, veri setinin boyutunu azaltır ve hesaplama süresini ve bellek gereksinimlerini azaltır. Aynı zamanda, modelin karmaşıklığını azaltır ve aşırı uydurma (overfitting) riskini azaltarak daha iyi genelleştirme yapmasını sağlar. Öznitelik seçimi sürecinde temel olarak üç unsura bakılır.

Monotonluk, bir özelliğin sistem başarısızlığa doğru olan eğilimini tanımlar. Sistem başarısızlığa doğru ilerledikçe, uygun bir öznitelik monotonik bir pozitif veya negatif eğilim göstermelidir. Prognoz edilebilirlik, bir özneliğin başarısızlık durumunda başlangıç ve son değerleri arasındaki aralığa göre değişkenliğin bir ölçüsüdür. Daha prognoz edilebilir bir özellik, başarısızlık durumunda başlangıç ve son değerleri arasındaki aralığa göre daha az varyasyon gösterir. Eğilim yeteneği, birden fazla arıza deneyinde ölçülen bir özneliğin deneyler arasındaki benzerliğidir.

Bu tez çalışmasında arızayı temsil edebilecek minimum sayıda öznitelik seçilmesi için sadece monotonluk kriteri dikkate alınmıştır ve temel olarak Denklem 19'da ifade edilmiştir.

$$Mon_i = \frac{1}{N_i - 1} \left| \left(\frac{d}{dt} Z_{o,i} \geq 0 \right) - \left(\frac{d}{dt} Z_{o,i} \leq 0 \right) \right| \quad (19)$$

4.2.5. Sağlık Göstergesi

Sağlık göstergesi, bir sistemin veya ekipmanın sağlık durumunu temsil etmek için kullanılan bir ölçüdür. Sağlık göstergesi, orijinal veri setindeki karmaşıklığı azaltarak daha az sayıda özneliği kullanarak tespit edilir. Bu amaçla Temel Bileşenler Analizi (TBA) yöntemi bu çalışmada tercih edilmiştir.

İlk olarak, tespit edilen öznitelikler arasında karşılaştırılabilirlik sağlamak için standartlaştırma işlemi uygulanmıştır. Bu adımda, her bir öznitelik için ortalama değer çıkarılması ve standart sapmanın bölünmesi kullanılmaktadır. TBA, standartlaştırılmış öznitelikler üzerinden veri setinin temel yapısal özelliklerini

yakalamak için korelasyon matrisi hesaplamasını içermektedir. Korelasyon matrisinden de özvektörler ve özdeğerler elde edilmektedir. Özvektörler, veri setindeki değişkenlerin yeni bir doğrusal kombinasyonunu temsil etmektedir.

Özdeğerler, özvektörlerin veri setindeki varyansın ne kadarını açıkladığını göstermektedir. Bu özdeğerler sıralandıktan sonra, en yüksek varyansı açıklayan özvektörler seçilmektedir. Bu özvektörler birleştirilmesiyle sağlık göstergesi oluşturulmaktadır. Bu sayede, öz niteliklerin birleştirilmesiyle sağlık göstergesi oluşturulmaktadır. Elde edilen sağlık göstergesi, temel bileşenlerin birleştirilmesiyle oluşturulduğu için, orijinal veri setindeki değişkenlerin kombinasyonunu temsil eder.

Sağlık göstergesi, bakım süreçlerinde karar verme sürecini kolaylaştırır. Önceden tanımlanmış eşik değerleri aşıldığında veya belirli bir modelin çıktısıyla karşılaştırıldığında, ekipman veya sistemlerde potansiyel sorunları tespit etmek ve kestirimci bakım eylemleri başlatmak mümkün olabilmektedir.

4.2.6. Bozulma Modeli

Bu çalışmada, üstel bozulma modelleri kullanılarak sistemin kalan faydalı ömrü tahmin edilmektedir. Bu tahminler, elde edilen sağlık göstergesi kullanılarak yapılır. Üstel bozulma modeli, zamanla bozulma sürecinin üstel olarak gerçekleştiği bir matematiksel modeldir. Bu model, bir sistem veya bileşenin performansının zamanla azaldığını ve belirli bir hızda bozulduğunu varsayar. Genellikle, sürekli zamanlı verilerin analizinde kullanılır ve sistemin kalan faydalı ömrünü tahmin etmek için önemli bir araç olarak kabul edilir. Üstel bozulma modeli, genellikle Denklem 20 ile ifade edilir.

$$h(t) = \phi + \theta \exp\left(\beta t + \epsilon - \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (20)$$

Burada, $h(t)$ zamanın bir fonksiyonu olarak sağlık göstergesini, ϕ sabit bir değer olan modelin kesme noktasını, θ lognormal dağılımlı ve β Gauss dağılımlı modelin eğimini belirleyen rastgele parametrelerdir. Her t zaman adımında, θ ve β 'nin dağılımı $h(t)$ 'nin en son gözlemine dayalı olarak posteriora güncellenir. Ayrıca ϵ terimi Gauss dağılımlı bir beyaz gürültüdür ve $\sigma^2/2$ terimi gürültünün varyansını ifade eder.

Üstel bozulma modeli, sistem veya bileşenlerin ömrü ve kullanılabilirlik durumuyla ilgili tahminler yapmak için kullanılır. Sistemlerin veya bileşenlerin bozulma süreci, çeşitli faktörlerin etkisi altında gerçekleşir ve bu faktörler üstel bozulma modelinin parametreleri tarafından temsil edilir. Bu parametreler, sistemin performans verilerinden tahmin edilir ve uygun istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilir.

Üstel bozulma modelinin parametrelerinin tahmini için çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılır. Örneğin, en küçük kareler yöntemi veya maksimum olabilirlik tahmini gibi teknikler, veri uyumu ve parametre tahmininde kullanılır. Bu tahminler, gerçek verilere dayanarak yapıldığından, veri kalitesi, örnekleme süresi ve güvenilirlik gibi faktörlere dikkat edilmelidir.

Geçmiş arıza verilerinin kullanılması, model parametrelerinin gerçek sistem davranışını yansıtmaya yardımcı olabilir. Ancak bu durumda, arıza verileri eksik olduğunda veya mevcut değilse, parametre tahminleri yapmak zorlaşır. Bu durumda, ilk iterasyon için parametrelerin keyfi olarak seçilmesi gerekmektedir. Belirlenen parametreler yüksek varyansa sahip olarak seçilmiştir ve böylece geliştirilen model başlangıçta gözlenen değerlere daha fazla adapte olduğu anlamına gelir. İlk iterasyon için kullanılan model parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Üstel bozulma modelinde kullanılan parametre değerleri

Parametre	Beklenen Değer	Beklenen Varyans
θ	1	10^6
β	1	10^6
ϕ	-1	-

4.2.7. Kalan Faydalı Ömür Tahmini

Son adımda, model kullanılarak kalan faydalı ömür tahmini yapılır. Model, yeni gelen verileri kullanarak ekipmanın gelecekteki arıza veya hata olasılığını tahmin eder. Öncelikle, eğitim veri seti kullanılarak üstel bozulma modeli oluşturulur. Bu model, ekipmanın performansını zamanla nasıl değiştirdiğini yakalamak için kullanılır. Ardından, yeni verilerin girildiği test aşamasında, ekipmanın mevcut durumu ve çalışma koşulları dikkate alınarak model parametreleri optimize edilir. Nihayetinde, verifikasyon seti için geliştirilen model kullanılarak Kalan Faydalı Ömür

(KFÖ) tahmini yapılır. Bu tahminler, ekipmanın yaklaşan arızalarını veya kullanılamaz hale gelme noktalarını önceden belirlemeye yardımcı olur. Üstel bozulma modelleri, gerçek zamanlı veri toplama ve sürekli güncelleme ile daha doğru tahminler sağlamak için de kullanılabilir. Ekipmanın çalışma durumu ve çevresel faktörler gibi değişkenlerin sürekli olarak izlenmesi, modelin güncellenmesi ve tahminlerin iyileştirilmesi için önemlidir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

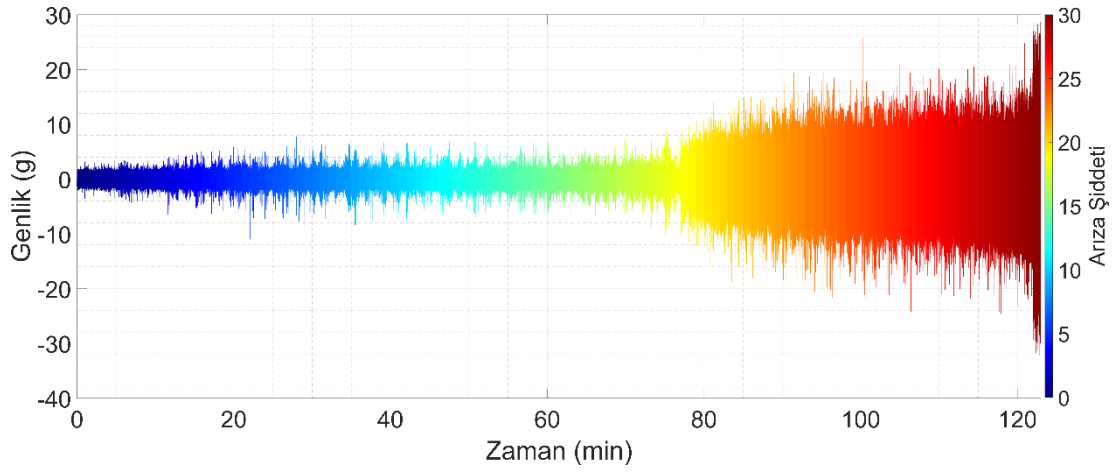
Bu tez çalışması kapsamında yalnızca 1. çalışma koşuluna ait veriler Tablo 2'de sunulan bilgilere dayanarak kullanılmıştır. Eğitim veri seti olarak, sırasıyla 123, 122 ve 52 dakikalık çalışma sürelerine sahip olan veri setleri seçilmiştir. Test veri seti olarak ise 158 dakikalık çalışma süresine sahip ve verifikasyon veri seti için 161 dakikalık çalışma süresine sahip veriler tercih edilmiştir.

İlk olarak Bölüm 4'te sunulan yönteme dayanarak tüm veri setleri için sağlık göstergeleri belirlenmiştir. Daha sonra, eğitim ve test veri setleri için hesaplanan sağlık göstergeleri kullanılarak üstel bozulma modeli ve parametreleri tespit edilmiştir. Son olarak, geliştirilen bozulma modeli kullanılarak verifikasyon veri seti için kalan faydalı ömür tahmini yapılmıştır. Kalan faydalı ömür, bir sistemin belirli bir performans seviyesini sürdürebileceği tahmini süreyi ifade eder.

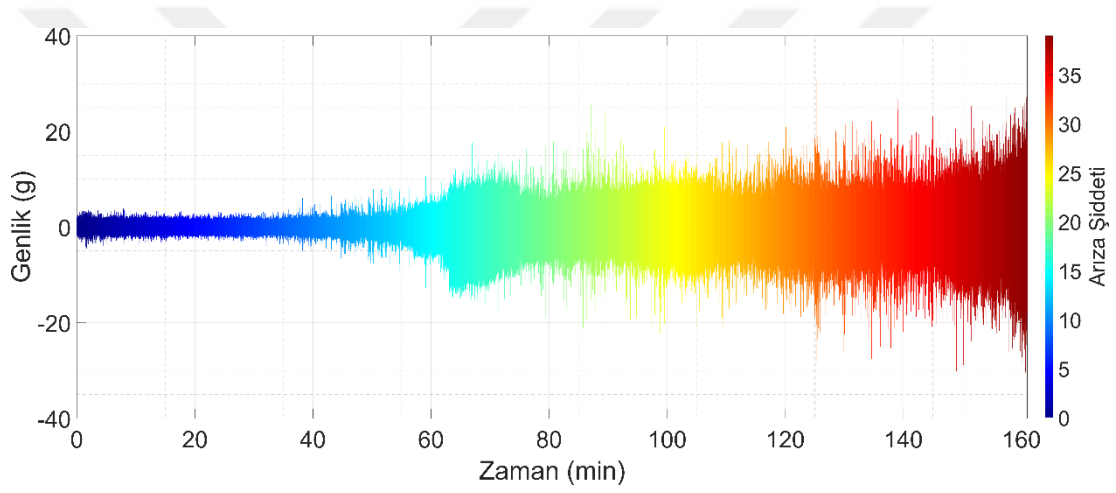
5.1. Sağlık Göstergesi

Belirtilen çalışma koşulun için tüm rulmanların sağlıklı durumdan arızaya kadar geçen süreyi kapsayan zaman alanında elde edilen genlik-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 25 – 29'da sunulmuştur.

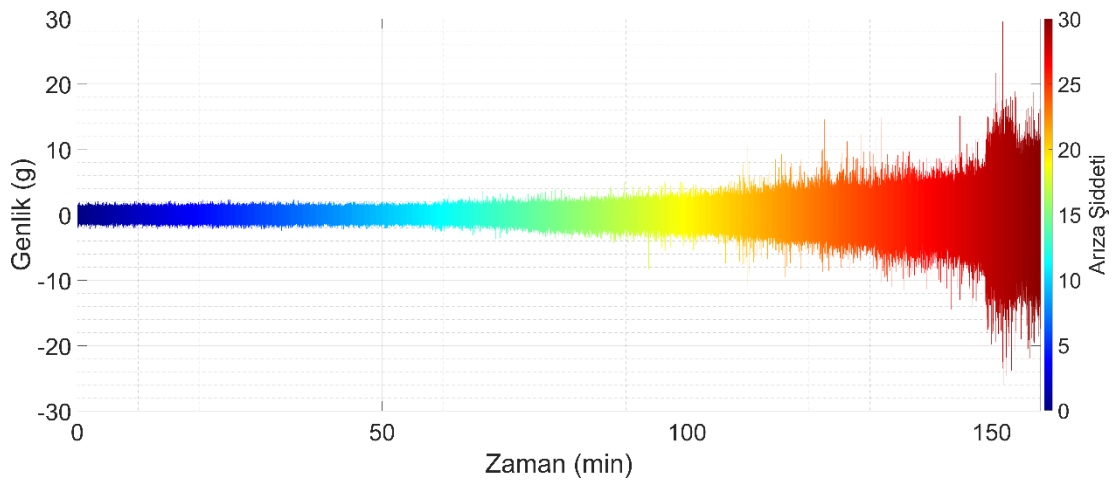
Veri setinin elde edildiği çalışmada hem yatay hem de dikey yönde yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilen titreşim verileri sunulmasına rağmen, bu tez çalışmasında yükün yatay yönde uygulandığından sadece yatay yönde yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilen titreşim verileri kullanılmıştır. Ham titreşim verileri analiz edildiğinde, rulman bozulma sürecinin belirgin bir şekilde normal çalışma aşaması ve bozulma aşaması olmak üzere iki aşamadan oluştuğu görülmektedir. Normal çalışma aşamasında, titreşim sinyalleri düşük düzeyde rasgele dalgalanmalara sahiptir ve bu nedenle test edilen yatakların bozulma belirtilerini tespit etmek zordur. Ancak, bozulma aşamasında, titreşim sinyallerinin amplitüdü çalışma süresi boyunca artan bir trend gösterir ve bu da bu aşamadaki titreşim sinyallerinin rulman bozulması hakkında önemli bilgiler içerdiği anlamına gelir. Bununla birlikte, arızadan önce zaman alanında titreşim büyüklüğünde önemli bir değişiklik olmaması ve arıza anında ani bir değişimin ortaya çıkması, titreşimin zaman alanının yanı sıra diğer alanlarda da incelenmesi gerektiğini göstermektedir.



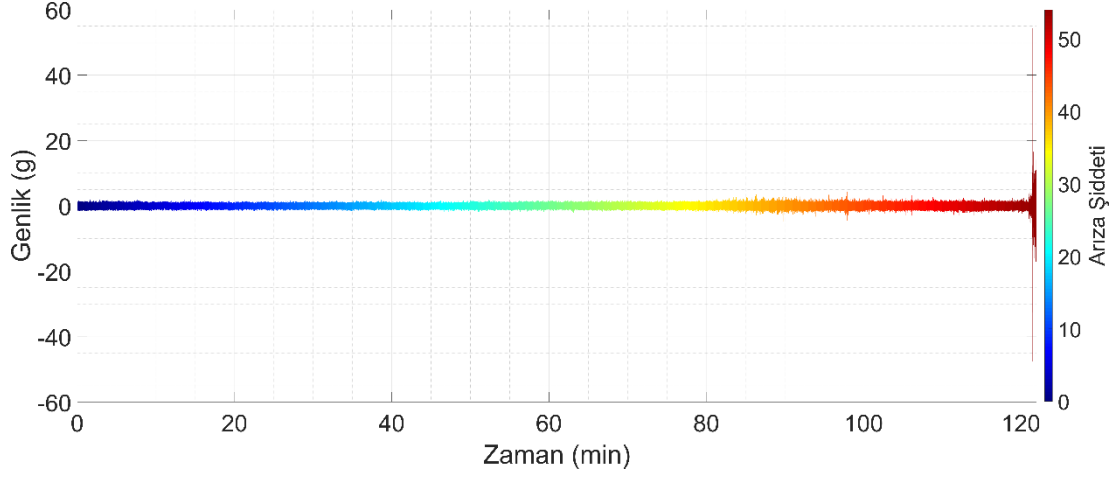
Şekil 25. 123 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği



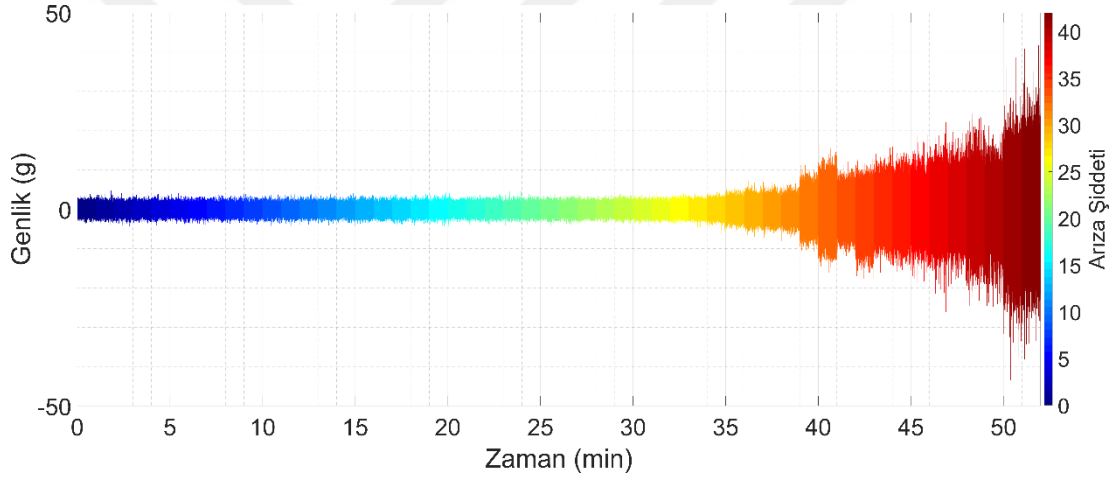
Şekil 26. 161 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği



Şekil 27. 158 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği



Şekil 28. 122 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği



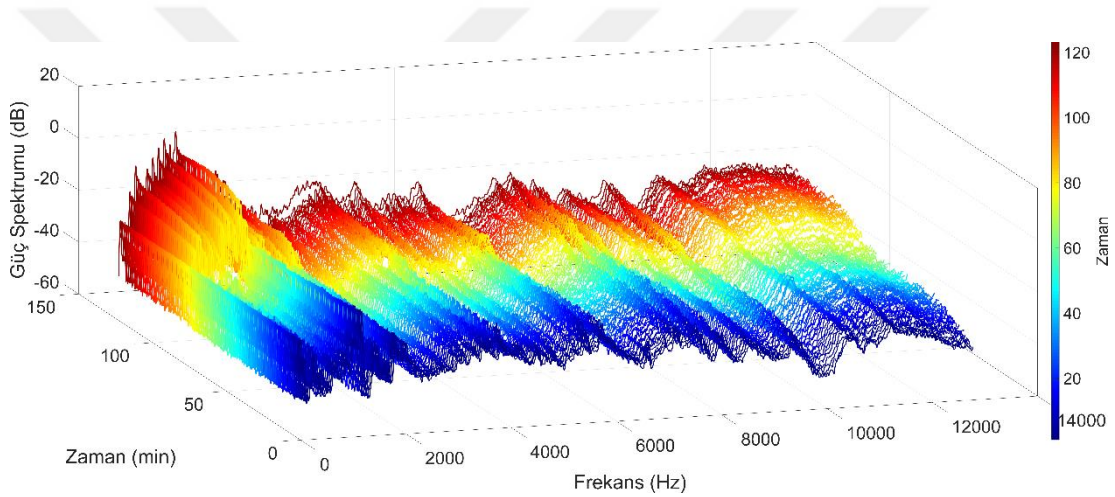
Şekil 29. 52 dakikalık veri seti için zaman genlik grafiği

Frekans alanı analizi, sistemin frekans tepkisini inceleyerek önemli bilgiler sağlar. Bu analiz yöntemi, sistemin bozulma sürecinde belirli frekans bileşenlerinin nasıl etkilendiğini ve bu bileşenlerin sistem performansına olan katkısını değerlendirmek için kullanılır.

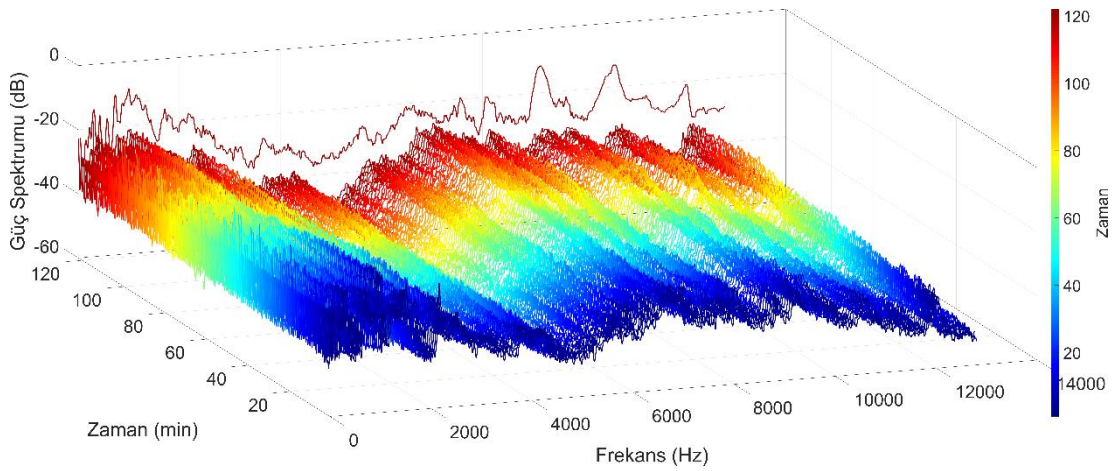
Bozulma süreci sırasında belirli frekans bileşenlerinin güçlendiği veya zayıfladığı gözlemlenebilir. Bu durum, sistemin belirli frekanslarda daha hassas veya daha dirençli olduğunu belirlemek için değerli bir araç sağlar.

Bu tezde kullanılan ham titreşim verileri, 1 dakikalık sürelerde bölünmüştür. 1 dakikalık bölümler hem pratik hem de analitik nedenlerle tercih edilmiştir. Bu tez

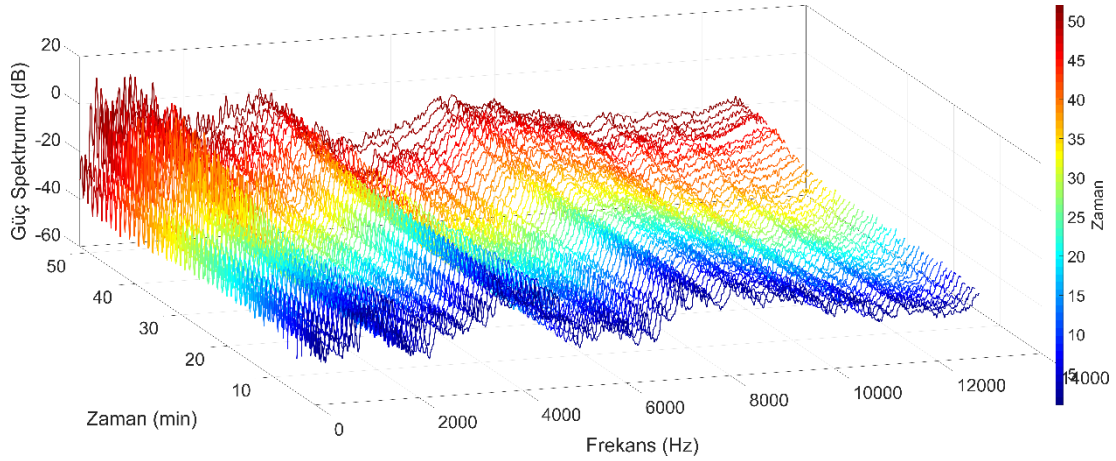
çalışması kapsamında kullanılan ham titreşim verileri, analiz amacıyla 1 dakikalık zaman dilimlerine bölünmüştür. Bu bölme yöntemi hem pratik hem de analitik açıdan avantajlıdır. Veri setindeki her bir 1 dakikalık zaman dilimindeki titreşim verileri, frekans alanında ayrıntılı bir analiz yapabilmek için FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) yöntemiyle frekans bileşenlerine dönüştürülmüştür. Şekil 30 – 32’de eğitim veri setinde kullanılan titreşim verilerinin frekans analizine ait sonuçları görselleştirmektedir. Öte yandan, frekans alanında güç spektrumunun (dB cinsinden) değişimlerini görselleştirmek için, güç spektrumunun değerleri frekansın ve zamanın (1 dakikalık bölüm süresinin) bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Bu şekilde, frekans bileşenlerindeki güç değişimleri zaman içinde açıkça görülebilir hale gelmiştir.



Şekil 30. 123 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği



Şekil 31. 122 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği

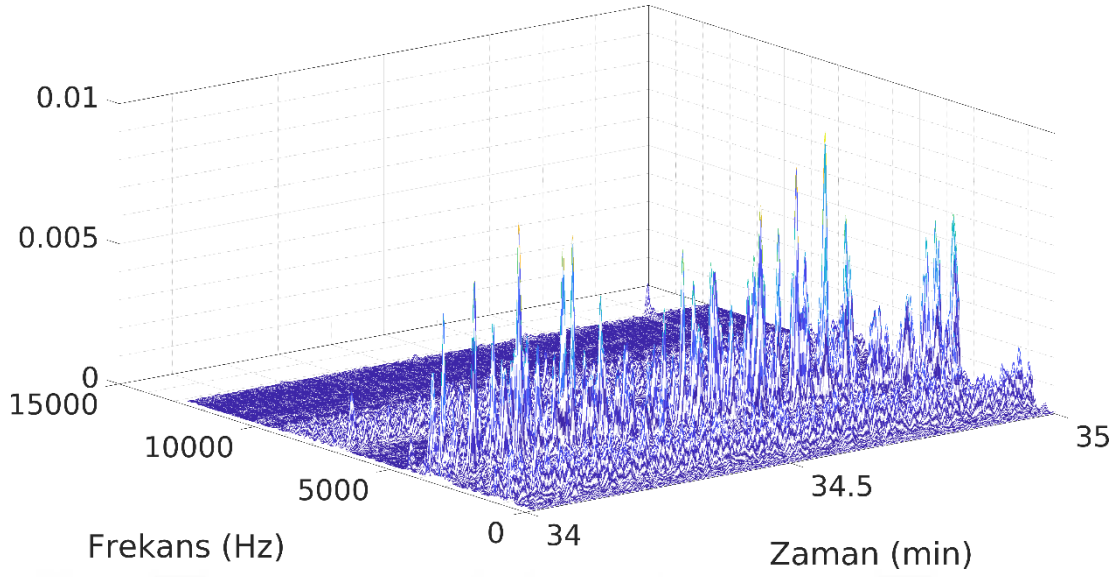


Şekil 32. 52 dakikalık veri seti için frekans alanı grafiği

Frekans spektrumunun analizi yapıldığında, her bir zaman diliminde yaklaşık olarak 15 kHz frekansında maksimum güç yoğunluğu gözlenmiştir. Ayrıca, zaman ilerledikçe güç yoğunluğunda bir artış görülmekte ve 15 kHz frekansında ve bu frekansın çarpanında tepe güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

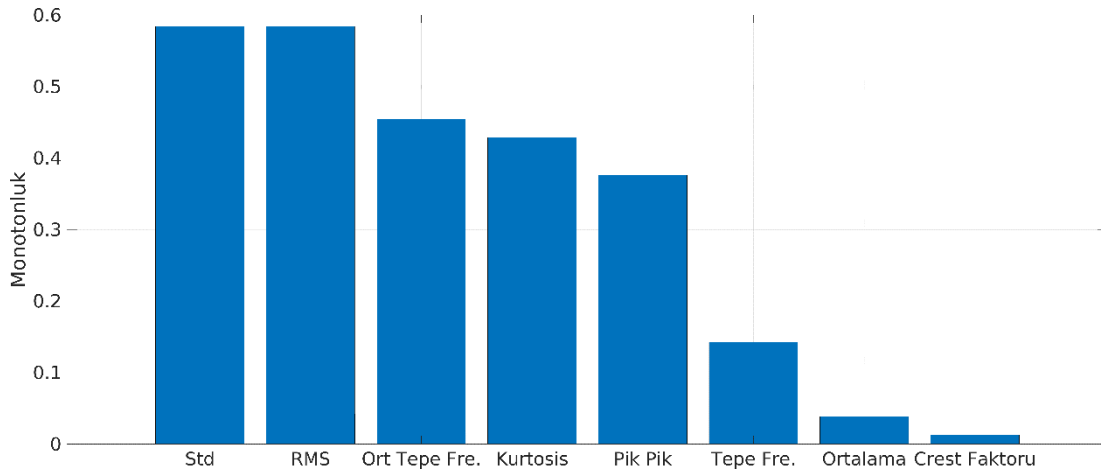
Bu bulgular, sistemdeki belirli bir frekans bileşeninin öne çıktığını ve zamanla güç yoğunluğunun arttığını göstermektedir. 15 kHz frekansı, sistemin hassas olduğu ve önemli bilgiler içeren bir frekans bölgesi olabilir. Güç yoğunluğundaki artış, sistemin bozulma sürecine işaret edebilir. Fakat, sinyallerin frekans içerikleri zamana göre değişim gösterdiği durumlarda FFT dönüşümü tek başına sinyal davranışlarını ifade etmede yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden, her 1 dakikalık titreşim sinyali ayrıca zaman-frekans alanında incelenmiştir. Şekil 33'te 52 dakikalık veri seti için 34. ve 35. dakikalar arasındaki zaman-frekans alanı grafiği sunulmuştur.

Zaman-frekans analizde elde edilen öznelitliklerinden biri de ortalama tepe frekansıdır. Ortalama tepe frekansı, titreşim verilerinin frekans spektrumu analizi sonucunda belirlenen en yüksek güç yoğunluğuna sahip frekans değerlerinin zaman içindeki ortalamasıdır. Bu değer, sistemdeki belirli frekans bileşenlerinin zamanla nasıl değiştiğini gösteren önemli bir parametredir. Bu çalışmada, en yüksek 20 tepe nokta alınmıştır ve Şekil 33'te sunulan zaman-frekans analizi için ortalama tepe frekans değeri 3.678 kHz'dir.

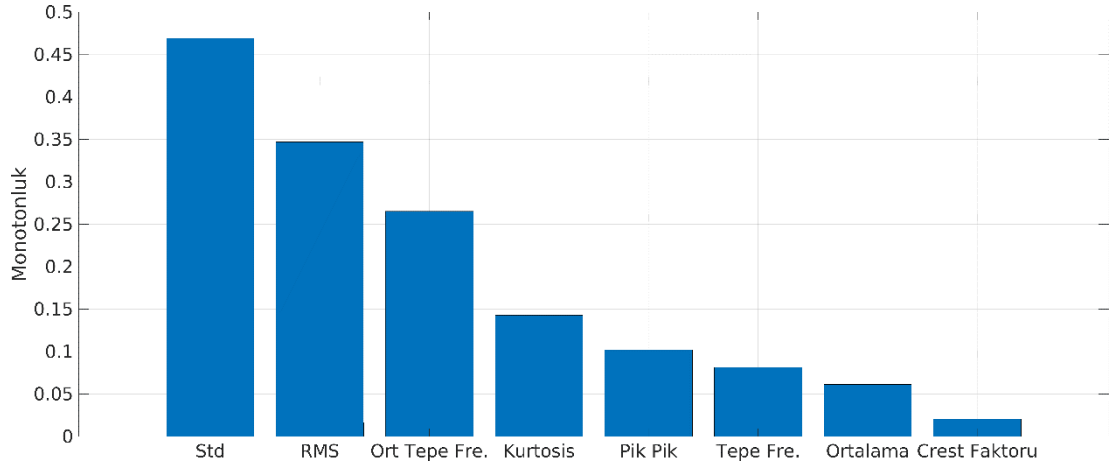


Şekil 33. 52 dakikalık veri seti için zaman-frekans alanı grafiği

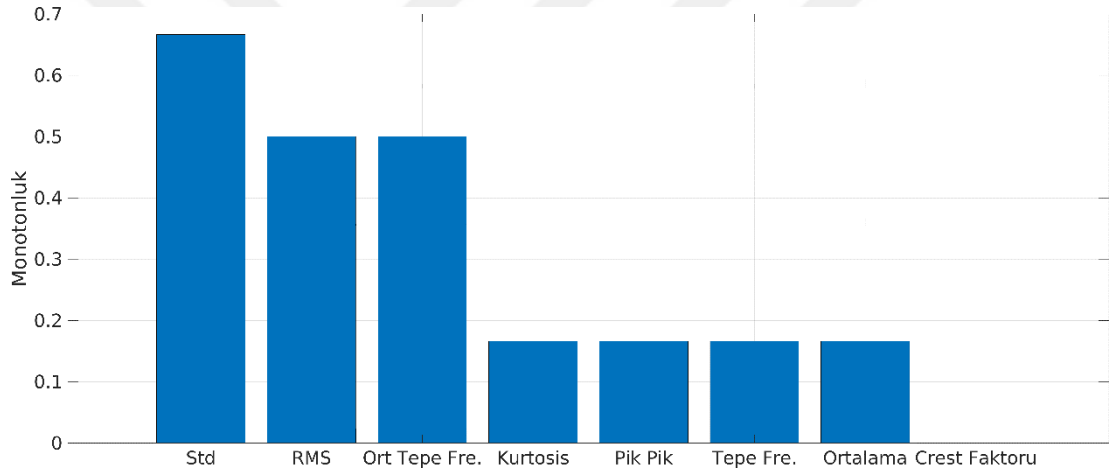
Mevcut arıza verileri üzerinden modelleme yapıldığından, elimizde bulunan verinin %70'nin kullanıldığı varsayımıyla her bir öznitelik için monotonluk hesabı yapılmıştır. Monotonluk seviyesi, KFÖ (Kalan Faydalı Ömür) tahmini için daha değerli olan öznitelikleri belirlemek amacıyla kullanılan bir kriterdir. Bu doğrultuda elde edilen monotonluk seviyeleri Şekil 34 – 36'da sunulmuştur. Eşik değeri olarak 0.3 seviyesi seçilmiş olup, bu eşik değeri üzerinde olan öznitelikler, standart sapma, RMS ve ortalama tepe frekansı, bir sonraki aşama olan öznitelik birleştirme süreci için seçilmiştir. Diğer öznitelikler artık hesaba dahil edilmeyecektir.



Şekil 34. 123 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri



Şekil 35. 122 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri

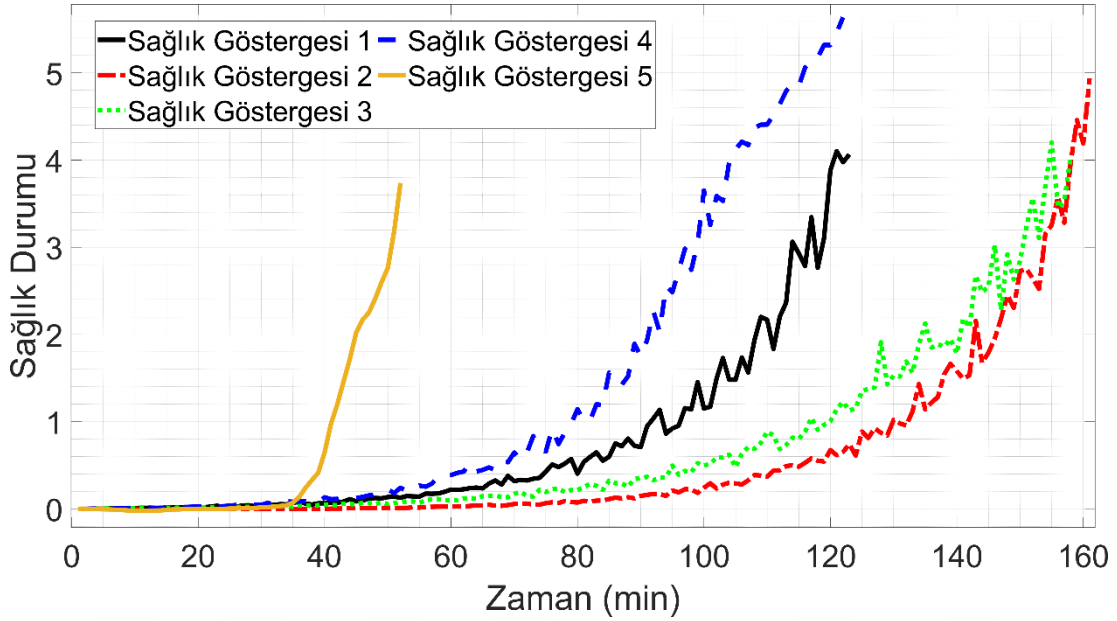


Şekil 36. 52 dakikalık veri seti için öznitelik monotonluk seviyeleri

Temel bileşen analizi, veri setindeki değişkenler arasındaki ilişkileri anlamak ve veri boyutunu azaltmak için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Bu çalışmada, monotonluk seviyesine dayalı olarak seçilen öznitelikler, temel bileşen analizi yöntemiyle birleştirilerek daha az sayıda ve daha temsilci olan sağlık göstergesine çevrilmiştir. Bu birleştirme işlemi, özniteliklerin varyansını koruyarak aynı zamanda gereksiz ve yinelenen bilgilerin ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır.

Sağlık göstergesi, asansörün genel sağlık durumunu belirlemek için kullanılan bir ölçüm değeridir. Bu gösterge, birleştirilmiş özniteliklerin ağırlıklı bir kombinasyonu olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama sürecinde, her bir öznitelikğin katkısı, temel bileşen analizi sırasında elde edilen katsayılar ve özniteliklerin

monotonluk seviyeleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu yöntemle elde edilen sağlık göstergesi, asansörün anormal durumlarını tespit etmek, arızaları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Şekil 37’de tüm titreşim sinyalleri için elde edilen sağlık göstergeleri sunulmuştur. Sağlık göstergeleri 1, 3 ve 5 eğitim setinde, 4 test setinde ve 2 verifikasyon setinde kullanılmıştır.



Şekil 37. Tüm veri seti için elde edilen sağlık göstergesi

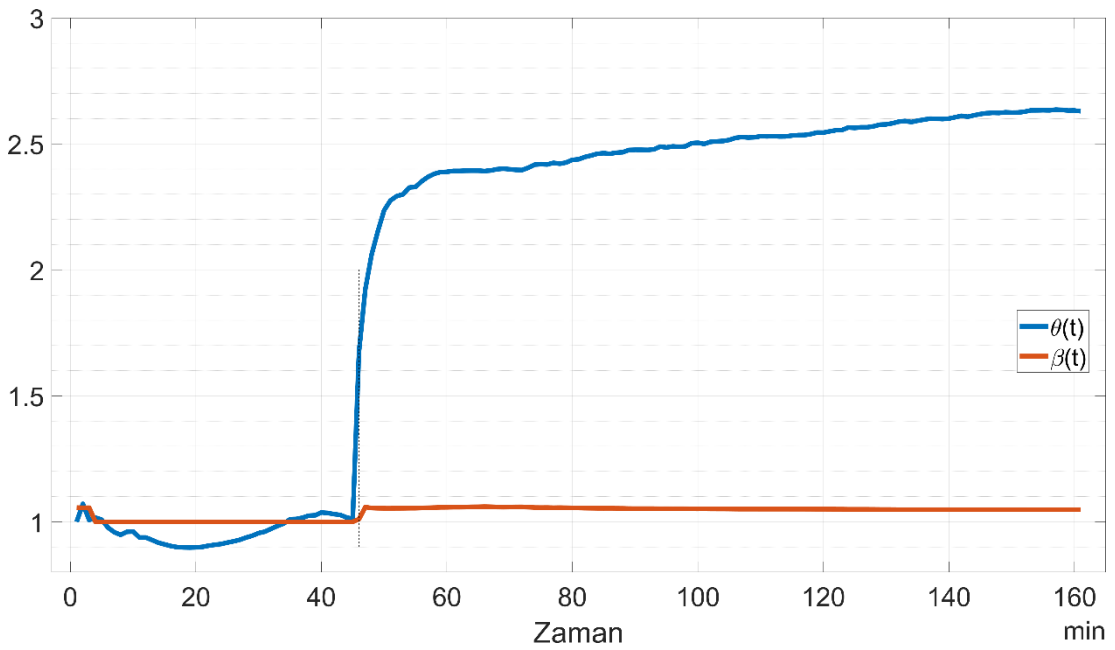
5.2. Bozulma Modeli

Üstel bir bozulma modelinde, bir sistemin bozulması genellikle Denklem 20’de ifade edilir. Burada, θ başlangıç koşulu veya başlangıç değerini ve b bozulma hızını temsil eder. θ arttığında, sistemin ilk bozulma seviyesinin daha yüksek olduğunu gösterir. Bu, bozulma sürecinin başlangıcında ($t = 0$), modellenen sistem veya olgunun daha ciddi bir bozulma veya bozulma yaşadığı anlamına gelir. Zaman ilerledikçe, bozulma, model denkleminde açıklanan üstel bozulma modelini izleyecektir. Ayrıca, θ parametresinin özel yorumunun ve etkisinin, bozulma modelinde kullanılan denkleme bağlı olabileceğini not etmek önemlidir.

β parametresi, sistemin bozulma hızını belirler. Yani, β değerinin artması, sistemin daha hızlı bir bozulma sürecine sahip olduğunu gösterir. Bu parametre, sistem veya fenomenin ne kadar hızlı bozulduğunu ve ne kadar sürede belirli bir bozulma

seviyesine ulaşacağını belirler. Daha yüksek β değerleri, daha dik bir bozulma eğrisine ve daha hızlı bir bozulma sürecine işaret eder.

Bu tezde sunulan üstel bozulma için θ ve β parametrelerinin zamanla değişimi Şekil 38’de verilmiştir. Arıza başlangıcı olan 48 dakikadan sonra θ parametresi 1’den 2.5’a artmış ve 120 dakikadan sonra nispeten sabit kalmıştır. Aynı şekilde, β parametresi ise arıza başlangıcından sonra ilk verilen değer olan 1’den 1.05 artmıştır. Verifikasyon veri seti için kullanılacak olan üstel bozulma modeli için θ ve β parametreleri sırasıyla 2.5 ve 1.05 alınmıştır.

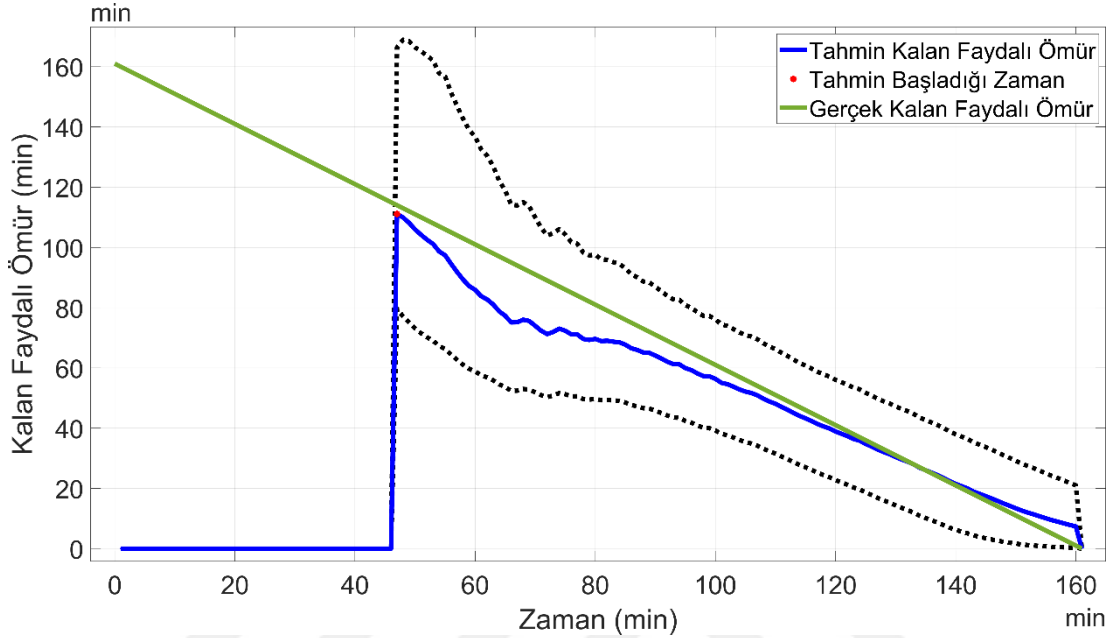


Şekil 38. Bozulma modelinde kullanılan parametrelerin belirlenmesi

5.3. Kalan Faydalı Ömür Tahmini

Geliştirilen bozulma modeli kullanılarak verifikasyon veri seti için kalan faydalı ömür tahmin yapılmıştır. Tahmin edilen ve gerçekleşen KFÖ Şekil 39’da gösterilmiştir. Arıza başlangıcı olarak 48 dakika tahmin edilmiştir. Her zaman dilinde 1 dakika azalacak şekilde gerçekleşen KFÖ gösterilmiştir. Tahmin edilen KFÖ başarılı bir tahmin performansı göstermiş ve en baştan nihai arızanın oluşma anına kadar gerçek KFÖ değerini yakın takip etmektedir. Bununla birlikte, ilk zaman diliminde gerçek KFÖ’nün altında tahmin yapmıştır. Bu bir emniyet katsayısı olarak düşünülebilir. KFÖ değeri 20 dakika olduğunda tahmin edilen değer gerçek değer

artık üstündedir. Ancak toplam tahmin süreci göz önüne alındığında hesaplanan KFÖ değeri verilen sınırların içinde olup endüstride pratik uygulama için yeterli olduğu görülmektedir.



Şekil 39. Verifikasyon veri seti için kalan faydalı ömür tahmini

Tablo 4, üstel bozulma modelinin tahmin performansını ölçmek amacıyla kullanılan metriklerin farklı zaman aralıklarında elde edilen sonuçlarını içermektedir. Bu tabloda, dört farklı zaman aralığı için Ortalama Karekök Sapması “*Root Mean Square Error*” (RMSE) ve R-kare (R^2) değerleri sunulmaktadır.

RMSE, modelin gerçek değerlerle tahminleri arasındaki farkın ölçüsünü verir iken R^2 değeri ise modelin veri setinin varyasyonunu ne kadar iyi açıkladığını ifade eder. Daha düşük bir RMSE değeri, modelin daha iyi tahmin performansına sahip olduğunu gösterir. 1'e yaklaşan bir R^2 değeri, modelin veri setindeki değişkenliğin büyük bir kısmını açıkladığını gösterir.

Tablo 4'e göre, 50 dakika ile 70 dakika arasındaki zaman aralığında RMSE değeri 14.068 olarak bulunmuştur. 50 dakika ile 100 dakika arasında RMSE değeri 12.222'ye düşmüştür. 50 dakika ile 130 dakika arasında RMSE değeri 9.972'ye indirgenmiştir. En son olarak, 50 dakika ile 161 dakika arasında RMSE değeri 8.651 olarak kaydedilmiştir. Bununla birlikte, 50 dakika ile 70 dakika arasındaki zaman

aralığında R2 değeri 0.979 olarak hesaplanmıştır. 50 dakika ile 100 dakika arasında R2 değeri 0.905'e düşmüştür. 50 dakika ile 130 dakika arasında R2 değeri 0.963 olarak kaydedilmiştir. En son olarak, 50 dakika ile 161 dakika arasında R2 değeri 0.985 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, zaman aralığı arttıkça modelin tahmin performansının iyileştiğini göstermektedir. 50 dakika ile 100 dakika arasında üstel bozulma modelinin tahmin performansında bir düşüş gözükmeyle beraber daha fazla veri ve zaman aralığıyla birlikte modelin daha iyi öğrenmesi, daha kesin tahminler yapabilmesi ve veri setinin özelliklerini daha iyi anlaması olabilir.

Sonuçlar, modelin zamana bağlı olarak daha iyi tahminler yapma yeteneğine sahip olduğunu ve zamanın artmasıyla birlikte tahmin performansının iyileştiğini göstermektedir. Bu bulgular, modelin KFÖ tahmininde kullanıldığı zaman aralığının doğru seçilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Tablo 4. Üstel bozulma modelinin KFÖ'nün tahmin performansı

Metrik	Süre			
	50 dk – 70 dk	50 dk – 100 dk	50 dk – 130 dk	50 dk – 161 dk
RMSE	14.068	12.222	9.972	8.651
R2	0.979	0.905	0.963	0.985

Rulmanların teorik olarak ömür hesabı Denklemler 21 ve 22 ile gerçekleştirilir.

$$P = xF_r + yF_e \quad (21)$$

$$L_{10} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot n} \right) \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (22)$$

Denklem 21, rulman üzerine etki eden toplam yükü temsil eden P değerinin hesaplanmasında kullanılır. Bu denkleme göre, P değeri, x ve y katsayılarıyla rulman üzerine etki eden radyal yük (F_r) ve eksenel yük (F_e) arasındaki ilişkiye dayanır.

Denklem 22 ise L_{10} olarak adlandırılan ortalama rulman ömrünü hesaplamak için kullanılır. Ortalama rulman ömrünü (L_{10}), 10^6 devirlik ömürdür ve n devir sayısını temsil eder. Bu denklemde, C temel dinamik yük kapasitesini ifade eder ve

C/P oranı ömür faktörünü ifade eden bir terimdir. p ise rulman tipine bağlı olarak farklı değerler alabilen bir üs değeridir ve bu çalışmada 3 alınmıştır.

Denklemler 21 ve 22, rulmanların teorik ömür hesaplamaları için kullanılan matematiksel ifadelerdir. Rulman tasarımı ve uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı denklemler ve parametreler kullanılabilir. Bu denklemlerin doğru şekilde uygulanması ve yorumlanması, rulmanların beklenen ömrünü tahmin etmek için önemli bir araç sağlar. Ancak, gerçek dünya koşullarında rulman ömrünü etkileyen çeşitli faktörler olduğu unutulmamalı ve denklemlerin sınırlamaları dikkate alınmalıdır.

Verifikasyon veri setinde kullanılan rulmanın teorik ömrü, Denklemler 21 ve 22 kullanılarak 240 dakika olarak hesaplandı. Bu hesaplamada, kullanılan rulmanın üzerine etki eden yükler ve çalışma koşulları Tablo 2’de verilmiştir. Fakat, yapılan deneysel çalışmaya göre ömrü 161 dakika olarak belirlenmiştir (Wang, 2018).

Ancak, gerçek dünya koşullarında rulman ömrü, çeşitli faktörlerden etkilenebileceği için teorik hesaplamaların tam bir uyum sağlaması her zaman mümkün olmayabilir. Dolayısıyla, teorik hesaplamaların sınırlamaları ve gerçek kullanım koşullarının dikkate alınması önemlidir. Bu tez çalışmasında elde edilen bozulma modeli ile KFÖ’nün tahmininde veriler gerçek zamanlı veriyle hesaplama yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu da tezin rulman ömrünü daha gerçekçi bir şekilde tahmin etme yetkinliğine sahip olduğunu gösterir.

Bu tezde elde edilen bozulma modeli gerçek dünya koşullarından elde edilen verilere dayanır ve bu verilerle yapılan KFÖ tahmini gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilebilir. Bu da elde edilen bozulma modelinin KFÖ’ü daha doğru tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koyar. Bu durum endüstriyel uygulamalarda maliyet ve verimlilik açısından önemli bir faktördür ve bakım planlamasının iyileştirilmesini destekler.

6. SONUÇ

Bu çalışma, rulman bozulmalarını tahmin etmek için bir veri setini kullanarak yapılmıştır. Veri seti, rulmanların hızlandırılmış bozulma testleri sırasında elde edilen titreşim sinyallerini içermektedir. Bu veri setinin açık kaynak olarak sunulması, araştırmacıların kendi yöntemlerini geliştirmelerine ve sonuçları paylaşımlarına olanak sağlamaktadır.

Rulman test platformu, bir AC motoru, motor hız kontrolörü, destek mili, destek yatakları, hidrolik yükleme sistemi ve ivmeölçerlerden oluşmaktadır. Bu platform ile farklı koşullar altında rulmanların hızlandırılmış bozulma testlerini gerçekleştirdik ve arızaya kadar çalışma verilerini elde ettik.

Çalışmanın temel amacı, makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak rulman bozulmalarını sağlık göstergeleriyle karakterize etmek ve kalan faydalı ömrü tahmin etmektir. Bu amaç doğrultusunda, öznitelik çıkarma, normalizasyon, öznitelik seçimi ve sağlık göstergesi gibi işlem adımları izlenmiştir. Bu çalışma ile rulmanlardaki arıza başlangıcının tespit edilmesinden tam bozulmaya kadar geçen süreyi tahmin etmek için bir kestirimci bakım modeli tasarlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan veri seti; eğitim, test ve verifikasyon (doğrulama) olmak üzere üçe ayrılarak kullanılmıştır. Eğitim seti, modelin öğrenmesi için kullanılan veri setidir. Model, bu verileri kullanarak parametreleri ve ağırlıkları öğrenir. Test seti ise modelin performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu veri seti, eğitim sürecinde kullanılmayan verilerden oluşur. Modelin doğruluğunu ve performansını bu veri seti üzerinde test edilir. Son olarak, doğrulama seti ise geliştirilen modelin gerçek dünya verilerine uygulaması ile kalan faydalı ömür tahmini için kullanılır.

Kullanılan ham titreşim verileri, 1 dakikalık sürelerde bölünmüştür. Pratik olarak, uzun süreli titreşim verileri yerine daha kısa süreli segmentler kullanmak, veri işleme ve analiz sürecini daha yönetilebilir hale getirir. Ayrıca, analitik açıdan, 1 dakikalık bölümler genellikle hata tespiti ve arıza analizi için yeterli bilgiyi sağlayabilir. Bu zaman aralığı, önemli titreşim özelliklerini yakalamak ve mekanik sistemdeki değişiklikleri izlemek için uygun bir seçenektir. 1 dakikalık bölümler kullanılarak elde edilen titreşim verileri, daha sonra analiz ve işleme adımlarına tabi

tutulabilir. Bu adımlar arasında özellik çıkarma, veri normalizasyonu, makine öğrenme algoritmalarının eğitimi ve modelin performans değerlendirmesi gibi işlemler yer alabilir. Ham titreşim sinyalleri genellikle karmaşık ve gürültülü olabilir, bu nedenle doğrudan analizleri zor olabilir. Ham titreşim sinyallerinden faydalı bilgilerin çıkarılması prosedürü, özellik çıkarmayı içerir.

Bu tezde, zaman alanında kullanılan öznitelikler arasında Ortalama, Standart Sapma, RMS (Kök Ortalaması), Pik-Pik, Kurtosis ve Crest Faktörü yer almaktadır. Bu öznitelikler, titreşim sinyallerinin istatistiksel ve enerji özelliklerini yansıtmaktadır. Frekans alanında ise tepe frekansları kullanılmıştır. Tepeler, titreşim sinyalinin belirli bir zaman dilimindeki en yüksek enerjiye sahip frekans bileşenlerini temsil etmektedir. Tepelerin zaman içindeki değişimi, sinyalin frekans karakteristiğini anlamak için önemli bir bilgi sağlamaktadır. Zaman-frekans alanında da ortalama tepe frekans özniteliği kullanılmıştır. Bu öznitelik, sinyalin zaman içindeki tepe frekanslarının ortalamasını temsil etmektedir. Zaman-frekans analizi, sinyalin frekans değişimini zamanla ilişkilendirerek daha kapsamlı bir anlayış sunmaktadır.

Bu çalışmada, her bir zaman adımı için elde edilen öznitelikleri (N_o) farklı ölçeklere sahiptir. Bu nedenle, elde edilen özniteliklerin değerlerinin aynı ölçeğe getirilmesi ve karşılaştırılabilir hale getirilmesi önemlidir. Bu amaçla, z-skoru normalizasyonu tercih edilmiştir. Z-skoru normalizasyonu, özniteliklerin ortalama değerlerinin çıkarılması (μ_{N_o}) ve standart sapmalarının (σ_{N_o}) hesaplanarak, her bir özniteliğin bu ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak ölçeklendirilmesidir. Bu yöntem, öznitelikler arasındaki farklı ölçekleri ortadan kaldırır ve verilerin daha tutarlı bir şekilde karşılaştırılmasını sağlar.

Öznitelik seçimi sürecinde temel olarak monotonluk, prognoz edilebilirlik ve eğilim yeteneğine bakılır. Bu çalışmada, arızayı temsil edebilecek minimum sayıda öznitelik seçilmesi için sadece monotonluk kriteri dikkate alınmıştır. Sonraki adımda sağlık göstergesini elde edebilmek için Temel Bileşenler Analizi (TBA) yöntemi bu çalışmada tercih edilmiştir. Sağlık göstergesi, bir sistemin veya ekipmanın sağlık durumunu temsil etmek için kullanılan bir ölçüdür. Sağlık göstergesi, orijinal veri setindeki karmaşıklığı azaltarak daha az sayıda özniteliği kullanarak tespit edilir. Sağlık göstergesi, bakım süreçlerinde karar verme sürecini kolaylaştırır. Önceden tanımlanmış eşik değerleri aşıldığında veya belirli bir modelin çıktısıyla

karşılaştırıldığında, ekipman veya sistemlerde potansiyel sorunları tespit etmek ve kestirimci bakım eylemleri başlatmak mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada, üstel bozulma modelleri kullanılarak sistemin kalan faydalı ömrü tahmin edilmektedir. Bu tahminler, elde edilen sağlık göstergesi kullanılarak yapılır. Üstel bozulma modeli, zamanla bozulma sürecinin üstel olarak gerçekleştiği bir matematiksel modeldir. Bu model, bir sistem veya bileşenin performansının zamanla azaldığını ve belirli bir hızda bozulduğunu varsayar. Bu modelde, ilk iterasyon için parametrelerin keyfi olarak seçilmesi gerekmektedir. Belirlenen parametreler yüksek varyansa sahip olarak seçilmiştir ve böylece geliştirilen model başlangıçta gözlenen değerlere daha fazla adapte olduğu anlamına gelir.

Son adımda, model kullanılarak kalan faydalı ömür tahmini yapılır. Model, yeni gelen verileri kullanarak ekipmanın gelecekteki arıza veya hata olasılığını tahmin eder. Geliştirilen bozulma modeli kullanılarak verifikasyon veri seti için kalan faydalı ömür tahmin yapılmıştır. Arıza başlangıcı olarak 48 dakika tahmin edilmiştir. Tahmin edilen KFÖ başarılı bir tahmin performansı göstermiş ve en baştan nihai arızanın oluşma anına kadar gerçek KFÖ değerini yakın takip etmiştir. Bununla birlikte, ilk zaman diliminde gerçek KFÖ'nün altında tahmin yapılmıştır. Bu bir emniyet katsayı olarak kabul edilebilir. KFÖ değeri 20 dakika olduğunda tahmin edilen değer gerçek değerinin artık üstündedir. Ancak toplam tahmin süreci göz önüne alındığında hesaplanan KFÖ değeri verilen sınırların içinde olup endüstride pratik uygulama için yeterli olduğu kabul edilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen modelin farklı bir makine elemanına uygulanması gerektiğinde, mevcut makine elemanının çalışma koşullarını dikkate alarak, uygun parametrelerle modelin yeniden programlanması gerekmektedir. Örneğin, yoğun sıcaklık altında çalışan bir makine elemanı üzerinde kestirimci bakım çalışması ele alınacak olduğunda, termal kameralar kullanılarak veri toplanacak ve elde edilen 2D (iki boyutlu) sinyaller, görüntü işleme modeline uygulanacaktır. Benzer şekilde, tozlu ortamlarda çalışan bir makine elemanı için ise akustik veriler 1D (tek boyutlu) olarak toplanacak ve titreşim verileri modelin tekrar uygulanmasıyla sonuç veya sonuçlar elde edilecektir. Ancak, bu tezde elde edilen bozulma modelinin, herhangi bir durum veya koşuldaki rulmanlara genel olarak uygulanması uygun değildir. Bozulma modeli sadece Tablo 4.1'de belirtilen şartlar ve koşullar altında kullanılabilir.

Rulmanların teorik olarak hesaplanan ömür formülasyonu ile bu çalışmadaki bozulma modeli karşılaştırıldığında, formülasyondaki sayısal değerlerin belirli kabuller içerdiği göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla, tam bir uyum beklemek gerçekçi olmayabilir. Ancak, bu çalışmada kullanılan veriler, gerçek zamanlı verilerle hesaplama yapabilme yeteneğine sahip olduğundan, rulman ömrünü gerçeğe daha yakın bir şekilde tahmin etme yetkinliğine sahiptir.



KAYNAKLAR

- Abidi, M.H., Mohammed, M.K., & Alkhalefah, H. (2022). Predictive maintenance planning for industry 4.0 using machine learning for sustainable manufacturing. *Sustainability*, 14(6), 3387.
- Alsem Asansör. “Asansör Kabini Modeli”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.alsemasansor.com/asansor-kabini-model-likya.html>
- Amini, M., Sharifani, K., & Rahmani, A. (2023). Machine Learning Model Towards Evaluating Data gathering methods in Manufacturing and Mechanical Engineering. *International Journal of Applied Science and Engineering Research*, 15(2023), 349-362.
- Arena, F., Collotta, M., Luca, L., Ruggieri, M., & Termine, F.G. (2022). Predictive maintenance in the automotive sector: A literature review. *Mathematical and Computational Applications*, 27(1), 2.
- Arena, S., Florian, E., Zennaro, I., Orrù, P. F., & Sgarbossa, F. (2022). A novel decision support system for managing predictive maintenance strategies based on machine learning approaches. *Safety science*, 146, 105529.
- Arena, S., Florian, E., Zennaro, I., Orrù, P.F., & Sgarbossa, F. (2022). A novel decision support system for managing predictive maintenance strategies based on machine learning approaches. *Safety science*, 146, 105529.
- Arkel. “Asansör Kumanda Kartları”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.arkel.com.tr/urunler/asansor-kumanda-kartlari>
- Artı+Kasnak. “Asansör Kasnak Türleri”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.asansorkasnagi.com/kasnak-turleri/yan-yataklar>
- Asansör Market. “Asansör Patenler”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.asansormarket.net/patanler>
- Bastías, O.A., Díaz, J., & López Fenner, J. (2023). Exploring the Intersection between Software Maintenance and Machine Learning—A Systematic Mapping Study. *Applied Sciences*, 13(3), 1710.
- Bekdash, O., Naundrup, J.J., & la Cour-Harbo, A. (2022). Analyzing visual imagery for emergency drone landing on unknown environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 14, 17568293221106492.

- Bektash, O.M., & la Cour-Harbo, A. (2020, November). Vibration analysis for anomaly detection in unmanned aircraft. *In Annual Conference of The Prognostics and Health Management Society 2020*. PHM Society.
- BSB Asansör. “Tamponlar”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.bsbasansor.com.tr/diger-asansor-aksamlari/kabin-tamponlar>
- Ceryan, N., Ozkat, E.C., Korkmaz Can, N., & Ceryan, S. (2021). Machine learning models to estimate the elastic modulus of weathered magmatic rocks. *Environmental Earth Sciences*, 80(12), 448.
- Chen, X., Van Hillegersberg, J., Topan, E., Smith, S., & Roberts, M. (2021). Application of data-driven models to predictive maintenance: Bearing wear prediction at TATA steel. *Expert systems with applications*, 186, 115699.
- E-asansör. “Dişli Kumanda Panosu”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.e-asansor.com/urun/arl300-adrive-5-5kw-dislili>
- Eddarhri, M., Adib, J., Hain, M., & Marzak, A. (2022). Towards predictive maintenance: the case of the aeronautical industry. *Procedia Computer Science*, 203, 769-774.
- Efeoglu, E., & Tuna, G. (2022). Machine Learning for Predictive Maintenance: Support Vector Machines and Different Kernel Functions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 51(5), 447-456.
- Eker Asansör. “Makine Motor Aksamı”. Erişim Tarihi:12.06.2023. <https://www.ekerasansor.com/>
- Elektrik Rehberiniz. “Asansör Bakım ve İşletme Yönetmeliği”. Erişim Tarihi:12.06.2023. <https://www.elektrikrehberiniz.com/category/asansor/>
- Elektrik Rehberiniz. “Asansör Nasıl Çalışır”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.elektrikrehberiniz.com/asansor/asansor-nedir-2731/>
- Fluke Corporation, *Fluke Ti Series Industrial Thermal Imagers*, 2018.
- Greener, J.G., Kandathil, S.M., Moffat, L., & Jones, D.T. (2022). A guide to machine learning for biologists. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(1), 40-55.
- Hesabi, H., Nourelfath, M., & Hajji, A. (2022). A deep learning predictive model for selective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 219, 108191.

- Karabacak, Y.E., Özmen, N.G., & Gümüşel, L. (2022). Intelligent worm gearbox fault diagnosis under various working conditions using vibration, sound and thermal features. *Applied Acoustics*, 186, 108463.
- Koca, Y.B. and Ünsal, A., 2017, Asenkron motorların elektriksel ve mekaniksel arızalarının değerlendirilmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), pp. 37–46.
- Kouadri, A., & Zemat, M. (2010). A statistical procedure based on wavelets for fault detection applied on the three-tank system. *Journal of Statistics and Management Systems*, 13(5), 949-960.
- Liang, X., Zuo, M.J., & Hoseini, M.R. (2015). Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection. *Engineering Failure Analysis*, 48, 185-200.
- Liforbis. “Asansör Regülatör Modelleri”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.liftorbis.com/tr/urunler/normal-asansor-regulatoru-modelleri>
- Liu, Z., & Zhang, L. (2020). A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings. *Measurement*, 149, 107002.
- Mohammed, O.D. (2015). Dynamic modelling and vibration analysis for gear tooth crack detection (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Moumene, I., & Ouelaa, N. (2016). Application of the wavelets multiresolution analysis and the high-frequency resonance technique for gears and bearings faults diagnosis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 1315-1339.
- Nishat Toma, R., & Kim, J.M. (2020). Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms. *Applied Sciences*, 10(15), 5251.
- Nishat Toma, R., & Kim, J.M. (2020). Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms. *Applied Sciences*, 10(15), 5251.
- Ozkat, E. C., Bektas, O., Nielsen, M.J., & la Cour-Harbo, A. (2023). A data-driven predictive maintenance model to estimate RUL in a multi-rotor UAS. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 15, 17568293221150171.

- Özkat, E.C. (2021). Makine Öğrenmesi Metodolojisi Kullanılarak Yüksek Hızlı Rulmanlarda Sağlık Göstergesinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (22), 176-183.
- Parey, A., El Badaoui, M., Guillet, F., & Tandon, N. (2006). Dynamic modelling of spur gear pair and application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect. *Journal of sound and vibration*, 294(3), 547-561.
- Paulson, N.H., Kubal, J., Ward, L., Saxena, S., Lu, W., & Babinec, S.J. (2022). Feature engineering for machine learning enabled early prediction of battery lifetime. *Journal of Power Sources*, 527, 231127.
- Pinciroli, L., Baraldi, P., & Zio, E. (2023). *Maintenance optimization in Industry 4.0. Reliability Engineering & System Safety*, 109204.
- Samuel, P.D., & Pines, D.J. (2005). A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of sound and vibration*, 282(1-2), 475-508.
- Sanayi Teknoloji Bakanlığı. “Asansör Sektörü Raporu”. Erişim Tarihi:12.06.2023. [https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/AsansorSektoruRaporu\(2020\).pdf](https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/AsansorSektoruRaporu(2020).pdf)
- Serkan Hoca Org. “Asansör Fren Testi”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. <https://www.serkanhoca.org/2020/01/asansor-fren-testi-parasut-fren-sistemi.html>
- Tandon, N., & Choudhury, A. (2005). A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Shock and vibration digest*, 37(2), 121-138.
- Thai, H.T. (2022). Machine learning for structural engineering: A state-of-the-art review. *In Structures*, 38, 448-491.
- Tibbetts, E.A., Pardo-Sanchez, J., & Weise, C. (2022). The establishment and maintenance of dominance hierarchies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1845), 20200450.
- Ulus, Ş., Erkaya, S., & Kayseri, K. (2015). Dişli çark mekanizmalarındaki hataların akustik yöntemler ve titreşim metodu ile karşılaştırmalı analizi. *Uluslararası katılımlı*, 17, 14-17.

- Vadyala, S.R., Betgeri, S.N., Matthews, J.C., & Matthews, E. (2022). A review of physics-based machine learning in civil engineering. *Results in Engineering*, 13, 100316.
- Vallim Filho, A.R.D.A., Farina Moraes, D., Bhering de Aguiar Vallim, M.V., Santos da Silva, L., & da Silva, L.A. (2022). A machine learning modeling framework for predictive maintenance based on equipment load cycle: an application in a real world case. *Energies*, 15(10), 3724.
- Wang, B., Lei, Y., Li, N., & Li, N. (2018). A hybrid prognostics approach for estimating remaining useful life of rolling element bearings. *IEEE Transactions on Reliability*, 69(1), 401-412.
- Wang, X., Mazumder, R.K., Salarieh, B., Salman, A.M., Shafieezadeh, A., & Li, Y. (2022). Machine learning for risk and resilience assessment in structural engineering: Progress and future trends. *Journal of Structural Engineering*, 148(8), 03122003.
- Wu, H., & Zheng, H. (2023). Single-machine scheduling with periodic maintenance and learning effect. *Scientific Reports*, 13(1), 9309.
- Yapı Dünyası. “Asansörün Tarihçesi”. Erişim Tarihi: 12.06.2023. http://www.yapi.com.tr/haberler/asansorun-tarihcesi_95916.html
- Zhang, X., Xiao, L., & Kang, J. (2015). Bearing fault detection based on stochastic resonance optimized by levenberg-marquardt algorithm. *International Journal of Performability Engineering*, 11(1), 61.
- Zonta, T., Da Costa, C.A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E.S., & Li, G.P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.