

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN
MAKİNELERDE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İLKİN ONURCAN OĞUZ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK

BOLU, EKİM - 2024

BOLU, EKİM - 2024

KABUL VE ONAY SAYFASI

İlkin Onurcan Oğuz tarafından hazırlanan “**ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN MAKİNELERDE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Sabri Öztürk
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Murat Pakdil
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Fevzi Çakmak Bolat
Kocaeli Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

İLKİN ONURCAN OĞUZ

ÖZET

ORMAN ÜRÜNLERİ ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN MAKİNELERDE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İLKİN ONURCAN OĞUZ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SABRİ ÖZTÜRK)

BOLU, EKİM - 2024

XVI + 116

Günümüzde, bakım planlaması üretim hatlarındaki çeşitli sebeplerden dolayı ortaya çıkan arızaların en aza indirgenmesi için gerçekleştirilen önemli faaliyetlerdir. Tesislerin yatırım maliyetleri yüksek olduğu için sistemlerin bir an bile durması istenmemektedir. Makine parçalarında ortaya çıkan aşınmalar ve arızalar zamanla, makinelerde hasarların meydana gelmesine ve sistemlerin durmasına sebep olurlar. Tesis veya sistemlerin istenen düzeyde üretim, kalite performanslarını tutturabilmesi, tesislerin belirlediği bakım yöntemleri ile yakından ilgilidir. Bakım sebepli oluşan maliyetlerini düşürmek için koruyucu bakım yöntemleri geliştirilmiştir. Koruyucu bakım yöntemlerinden olan kestirimci bakımın temel prensipleri, makinelerin çalışma esnasında özel cihazlar yardımıyla, çalışan makinelerin verim güçlerinin izlenmesi ve elde edilen ölçüm verilerinin yardımıyla makinenin, parçanın veya donanımın bakıma gereksinim duyup duymadığının saptanarak en uygun zamanda bakım faaliyetlerin gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışmada orman ürünleri üreten bir tesiste kullanılan, yüksek devirde ve sıcaklıkta çalışan pompaların yataklarından, kestirimci bakım yöntemlerinden olan titreşim analizi yöntemi kullanılarak titreşim ölçümleri periyodik olarak alınıp, pompa parçalarının sağlık durumları kontrol edilmiş ve rulman arızaları tespit edilerek bakım planı yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Arıza, Bakım Yöntemi, Koruyucu Bakım, Kestirimci Bakım, Titreşim Analizi

ABSTRACT

PREDICTIVE MAINTENANCE APPLICATIONS ON MACHINES USED IN FOREST PRODUCTS INDUSTRY

MSC THESIS

ILKIN ONURCAN OĞUZ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. SABRİ ÖZTÜRK)

BOLU, OCTOBER 2024

XVI + 116

In today's world, maintenance planning is a significant action to minimize the malfunctions which happen due to the various reasons in production lines. Because of the high cost in investments of facilities, it is not actually desired to stop even a moment. Dilapidation and malfunctions that occur in machine parts cause damage in them and cease the systems in time. The ability of facilities or systems to achieve the desired level of production and quality performance is closely associated with the maintenance methods determined by the facilities. Preventive maintenance methods have been developed to reduce the costs in line with maintenance. The fundamental principles of predictive maintenance, which is one of the preventive maintenance methods, is to monitor the efficiency power of the working machines with the help of special devices during operation, and to determine whether the machine, part or equipment requires maintenance with the help of the measurement data obtained, and to carry out maintenance activities at the most appropriate time.

In this study, vibration measurements were taken periodically on the bearings of pumps operating at high speeds and temperatures, used in a facility producing forest products, using the vibration analysis method, which is one of the predictive maintenance methods, the quality status of the pump parts was checked, bearing failures were detected and the maintenance plan was carried out.

KEYWORDS: Break Down, Maintenance Methods, Preventive Maintenance, Predictive Maintenance, Vibration Analysis

İÇİNDEKİLER

Sayfa

<u>KABUL VE ONAY SAYFASI</u>	iii
<u>ETİK BEYAN</u>	iv
<u>ÖZET</u>	v
<u>ABSTRACT</u>	vi
<u>İÇİNDEKİLER</u>	vii
<u>TABLO LİSTESİ</u>	xii
<u>FOTOĞRAF LİSTESİ</u>	xiii
<u>KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ</u>	xv
<u>TEŞEKKÜR</u>	xvi
<u>1. GİRİŞ</u>	1
<u>2. LİTERATÜR ÖZETİ</u>	3
<u>3. YONGA-LEVHA ÜRETİMİ ve TEMEL ESASLARI</u>	6
3.1 Yonga Levha (Sunta) Üretimi	6
3.1.1 Yonga Levha Kullanım Alanları;	7
3.1.2 Yonga Levha Özellikleri;	8
3.1.3 Yonga Levha Üretim Prosesleri;	8
3.2 Yonga Levhanın Temel Esasları	11
<u>4. BAKIM VE TİTREŞİM İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR</u>	13
4.1 Onarıcı Bakım (Corrective Maintenance - Run-to-Failure)	14
4.2 Koruyucu Bakım (Preventive Maintenance)	15
4.2.1 Arıza Trendi Eğrisi (Bathtub Curve)	16
4.3 Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance)	17
4.3.1 Kestirimci Bakım Metotları	20
4.3.1.1 Vibrasyon Analizi Yöntemi	20
4.3.1.2 Yağ Analizi Yöntemi	20
4.3.1.3 Sıcaklık Analizi Yöntemi	20
4.3.1.4 Ultrasonik Ses Analizi Yöntemi	20
4.3.1.5 Enerji Analizö Yöntemi	21
4.3.1.6 Lazerli Eksen Ayarı Analiz Yöntemi	21
4.3.2 Kestirimci Bakımda Ölçme İle Veri Toplama	21
4.3.3 Kestirimci Bakımda Veri Analiz ve Değerlendirme	21
4.3.4 Kestirimci Bakım Planlaması	22
4.3.5 Kestirimci Bakım - Onarım	22
4.4 Proaktif Bakım	22
4.5 Toplam Verimli Bakım (TPM- Total Productive Maintenance)	23

4.6 Tahmini Bakım	24
4.6.1 IoT ağı	25
4.6.2 Bulut Bağlanabilirliği	26
4.6.3 Yapay Zekâ ile Makine Öğrenimi	26
4.6.4 Dijital İkizler.....	26
4.7 Risk Bazlı Bakım (RTB)	26
4.8 Titreşimin Temel Kavramları	27
4.8.1 Titreşim İncelemelerinin Tarihi.....	27
4.8.2 Titreşim Analizinin Önemi.....	29
4.9 Titreşim.....	30
4.9.1 Genlik	30
4.9.1.1 Yerdeğiştirme(Deplasman).....	30
4.9.1.2 Hız.....	30
4.9.1.3 İvme	30
4.9.1.4 TepeDeğer(Peak)	31
4.9.1.5 Tepeler Arası Değer (Peak to Peak)	32
4.9.1.6 RMS(Root Mean Square)	32
4.9.1.7 Ortalama (Average)	32
4.9.2 Periyot (T)	32
4.9.3 Frekans (f)	32
4.9.4 Açısal Frekans (ω).....	34
4.9.5 Harmonik.....	34
4.10 Titreşimin Sınıflandırılması	34
4.10.1 Serbest ve Zorlanmış Titreşim.....	34
4.10.2 Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler.....	35
4.10.3 Lineer ve Nonlinear Titreşimler	36
4.10.4 Deterministik ve Random Titreşim	36
4.11 Titreşim Standartları.....	37
4.12 Arıza İle Titreşim Arasındaki İlişki.....	39
4.13 Titreşimde Yapısal Frekans	40
5. MATERYAL VE YÖNTEM	41
5.1 Materyal	41
5.1.1 Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar	41
5.1.2 Uygulamada Ölçüm Alınan Pompalar.....	42
5.1.3 Uygulamada Kullanılan Pompaların Çalışma Prensibi	48
5.1.4 Pompaların Kızgın Yağ Akış Şeması	49
5.1.5 Kızgın Yağ Pompalarında Kullanılan Rulmanlar.....	49
5.1.5.1 Bilyeli Rulmanlar	50
5.1.5.2 Makaralı Rulmanlar	52
5.1.5.3 Yataklı Rulmanlar	53
5.1.5.4 Lineer Rulmanlar	55
5.1.5.5 C3,C4Rulmanlar	56
5.1.6 Deneyde Ölçüm Alınması	60

5.1.7 Titreşim Analizi İle Arıza Tespiti.....	65
5.2 Kestirimci Bakım Yönteminin Rulmanlarda Kullanımı.....	66
5.2.1 Rulmanlar ve Arıza İlişkileri	70
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	72
6.1 Pompalarda Yapılan Kestirimci Bakım Uygulamaları	72
6.2 Pompalarda Yapılan Tamir Çalışması	79
6.3 Melamin 2 Ünitesi Kızgın Yağ Pompasının Rotor Dinamiği Analizi	85
6.4 Melamin 2 Ünitesi Pompalarından Elde Edilen Veriler	91
6.4.1 Küçük Pompaların Değerleri ve Grafikleri	91
6.4.2 Küçük Pompaların Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	98
6.4.3 Büyük Pompaların Değerleri ve Grafikleri	101
6.4.4 Büyük Pompaların Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	107
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
8. KAYNAKÇA	112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yonga levha üretim fabrikası mamül hazırlama akış şeması	9
Şekil 3.2. Yonga levha üretim fabrikası üretim prosesi.....	10
Şekil 3.3. Yonga levha üretim fabrikası üretim hazırlık akış şeması (Thoemen, 2010).	11
Şekil 4.1. Bakım metotlarının tarihsel gelişimi (Tosun, 2007).....	14
Şekil 4.2. Onarıcı bakım yöntemi arıza giderilme prosesi.....	15
Şekil 4.3. Koruyucu bakım hasar oranı - zaman grafiği (Kaymaz, 2023)	17
Şekil 4.4. Bakım metotlarının maliyet ilişkileri (Dündar, Sarıççek & Yazıcı, 2021).	19
Şekil 4.5. Monochord (Rao, 2019)	27
Şekil 4.6. İvme, hız, yer değiştirme dalgaları (Çay, 2006)	31
Şekil 4.7. Genlik-frekans grafiği (Karadayı, 2011)	33
Şekil 4.8. Harmonik hareket (Rao, 2019)	34
Şekil 4.9. Sönümlü ve sönümsüz titreşim hareketinin grafikleri (Bilge, 2015)....	35
Şekil 4.10. Periyodik hareket (Rao, 2007).....	36
Şekil 4.11. Gelişigüzel hareket (Rao, 2007)	37
Şekil 4.12. Iso 2372 (Karadayı, 2011)	37
Şekil 4.13. Iso 10816-1 (Fluke 805/805 fc kullanım kılavuzu)	38
Şekil 5.1. Santrifüj pompa kesit görünümü (1: Pompa gövdesi, 2: Çark, 3: Kaplin, 4: Flanş, 5: Mekanik salmastra, 6: Mil)	42
Şekil 5.2. Pompalara gelen kızgın yağın akış şeması	49
Şekil 5.3. Sabit bilyeli rulman	50
Şekil 5.4. Rulman boşlukları.....	56
Şekil 5.5. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı led durumu	60
Şekil 5.6. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı ölçüm ekranı.....	61
Şekil 5.7. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı CF+ değerleri	62
Şekil 5.8. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı şiddet değerleri	63
Şekil 5.9. Kızgın yağ pompasının ölçüm noktaları.....	65
Şekil 5.10. Orman ürünleri endüstrisinde kullanılan bir makinelerde kestirimci bakım yöntemi titreşim analizi ile arıza tespiti çalışması	68
Şekil 6.1. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı genlik-frekans grafiği	75

Şekil 6.2. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı genlik-zaman grafiği	76
Şekil 6.3. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı genlik-frekans grafiği	78
Şekil 6.4. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı genlik-zaman grafiği.....	79
Şekil 6.5. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların çark-mil-rulman montajı....	85
Şekil 6.6. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların çark-mil-rulman montajı ve ölçüleri.....	86
Şekil 6.7. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların teknik resmi ve ölçüleri	87
Şekil 6.8. Statik yük altında mil.....	88
Şekil 6.9. Alt küçük kızgın yağ pompası G (RMS) grafiği (Tüm veriler dâhil)...	92
Şekil 6.10. Alt küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (RMS) grafiği (Tüm veriler dâhil)	93
Şekil 6.11. Alt küçük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği (30.11.2023 ve 04.12.2023 dâhil değil)	95
Şekil 6.12. Alt küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) grafiği (30.11.2023 ve 04.12.2023 dâhil değil)	96
Şekil 6.13. Alt küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği.....	96
Şekil 6.14. Üst küçük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği	97
Şekil 6.15. Üst küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) grafiği	97
Şekil 6.16. Üst küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği	98
Şekil 6.17. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası G (rms) karşılaştırma grafiği	99
Şekil 6.18. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) karşılaştırma grafiği	100
Şekil 6.19. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) karşılaştırma grafiği	101
Şekil 6.20. Alt büyük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği.....	104
Şekil 6.21. Alt büyük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) grafiği	104
Şekil 6.22. Alt büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği.....	105
Şekil 6.23. Üst büyük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği	105
Şekil 6.24. Üst büyük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) grafiği	106
Şekil 6.25. Üst büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği	106
Şekil 6.26. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası G (rms) karşılaştırma grafiği	107
Şekil 6.27. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) karşılaştırma grafiği	108
Şekil 6.28. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) karşılaştırma grafiği	109

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Proaktif yaklaşım ve toplam verimli bakım yaklaşımın farklılıkları ..	24
Tablo 4.2. Rms ile peak to peak farkları	32
Tablo 5.1. Rulman radyal boşluk tablosu (1)	57
Tablo 5.2. Rulman boşluk çalışma koşulları ve uygulama.....	58
Tablo 6.1. Melamin 2 alt büyük pompa kasım ayı trend değerleri.....	73
Tablo 6.2. Melamin 2 alt büyük pompa kasım ayı trend raporu ve değerlendirmesi	74
Tablo 6.3. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı trend değerleri.....	74
Tablo 6.4. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı trend raporu ve değerlendirmesi	75
Tablo 6.5. Melamin 2 alt büyük pompa mayıs ayı trend değerleri.....	76
Tablo 6.6. Melamin 2 alt büyük pompa mayıs ayı trend raporu ve değerlendirmesi	77
Tablo 6.7. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı trend değerleri	77
Tablo 6.8. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı trend raporu ve değerlendirmesi	78
Tablo 6.9. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plakaya basan küçük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s ²), m/s ² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri	91
Tablo 6.10. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plakaya basan küçük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s ²), m/s ² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri	94
Tablo 6.11. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plakaya basan büyük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s ²), m/s ² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri	102
Tablo 6.12. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plakaya basan büyük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s ²), m/s ² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri	103

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1. Yonga levha.....	6
Fotoğraf 5.1. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı	41
Fotoğraf 5.2. Alt tabaka kızgın yağ pompaları	43
Fotoğraf 5.3. Üst tabaka kızgın yağ pompası.....	43
Fotoğraf 5.4. Kızgın yağ pompası ana bileşenler.....	44
Fotoğraf 5.5. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi	46
Fotoğraf 5.6. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi	46
Fotoğraf 5.7. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi	47
Fotoğraf 5.8. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plaka küçük kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi.....	47
Fotoğraf 5.9. Bilyeli radyal rulman.....	51
Fotoğraf 5.10. Bilyeli eksenel rulman.....	51
Fotoğraf 5.11. Makaralı rulman	52
Fotoğraf 5.12. Yataklı rulman.....	54
Fotoğraf 5.13. Yataklı rulman türü	54
Fotoğraf 5.14. Lineer rulman	55
Fotoğraf 5.15. Sabit bilyeli C3 rulman	59
Fotoğraf 5.16. Sabit bilyeli C4 rulman	59
Fotoğraf 5.17. Titreşim ölçümü alma işlemi.....	63
Fotoğraf 5.18. Ölçme cihazı ekran görüntüsü.....	64
Fotoğraf 5.19. Ölçme cihazı ekranı.....	64
Fotoğraf 5.20. Çizilme tipi rulman hasarı	69
Fotoğraf 5.21. Kazınma tipi rulman hasarı	69
Fotoğraf 5.22. Kırılma tipi rulman hasarı	70
Fotoğraf 6.1. Pompa demontaj işlemi	80

Fotoğraf 6.2. Motoru sökülen pompanın demontajı	80
Fotoğraf 6.3. Demontaj edilip atölyeye getirilen pompa	81
Fotoğraf 6.4. Atölyede birleşenleri demontaj edilen pompa.....	81
Fotoğraf 6.5. Pompadan sökülen rulman görüntüsü	82
Fotoğraf 6.6. Pompadan sökülen mil görüntüsü	82
Fotoğraf 6.7. Milde oluşan hasar görüntüsü	83
Fotoğraf 6.8. Alt küçük pompa demontaj edilen parçalar.....	83
Fotoğraf 6.9. Alt küçük pompa çıkan rulman	84
Fotoğraf 6.10. Sökülen pompanın rulman yatak bölgesi	84
Fotoğraf 6.11. Sökülen pompanın çıkarılan rulman	85



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

θ	: Açısal Hız
X	: Hareket Genliği
ω	: Hareket Frekansı
t	: Zaman
v	: Hız
a	: ivme
T	: Periyot
F	: Frekans
g	: Yerçekimi ivmesi
C	: Seçilecek Rulman Boşluk Değeri
C_{op}	: İstenilen Rulman Çalışma Boşluğu
ΔC_{fit}	: Sıkı Geçme Nedeni ile Boşluk Azalması
ΔC_{temp}	: Sıcaklık Artışı nedeni ile Boşluk Azalması
RPM	: Dakikadaki Devir Sayısı
RMS	: Kare Ortalamalarının Kareköküdür.
V_{max}	: Potansiyel Enerji
T_{max}	: Kinetik Enerji

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın hazırlanmasında bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, yapıcı yorumlarıyla daima desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Habibullah BİLGE hocama teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında teknolojinin gelişimine bağlı olarak bakım planlaması, tesislerde çeşitli nedenlerden dolayı çıkabilecek arızaların önüne geçmek, üretim ve kalite performanslarını arzu edilen seviyede tutabilmek için oldukça önemlidir (Ünal, 2009).

Artan rekabetçi pazarın etkisi ile sürekli çalışan proses tipi üretim sistemlerinde yatırım maliyetleri yüksek olduğu için arıza kaynaklı üretim kayıplarının olmaması istenmektedir. Arıza sebepli üretim kayıpları ekonomik olarak maliyet artışlarına neden olur. Bundan dolayı tesislerde tamir bakımı (Corrective Maintenance), koruyucu bakım (Prevebtive Maintenance), kestirimci bakım (Predictive Maintenance), proaktif bakım (Proactive Maintenance) ve toplam verimli bakım (Total Productive Maintenance) olarak 5 temel bakım stratejisinden söz edilir.

Kestirimci bakım, uyarıcı bakım olarak da adlandırılır. Gerektiğinde özel cihazlar yardımıyla yapılan muayene, periyodik gözlem ve kayıt izleme sistemleri ile makine parçalarında, donanımlarda ve sistem içerisinde arızaların oluşmasını engellemek amacıyla bakımın ne zaman yapılması gerektiğini tahmin etmeye odaklanır. Problemler, hatalı ürünler ve oluşan zaman kayıpları gibi israfları önlemede etkin rol oynamaktadır, böylece daha az iş gücü ve bakım sebepli oluşan maliyetler azalmakta, parça ömürlerinden uzun süre yararlanılmaktadır.

Seri üretim yapan üretim bandındaki en ufak bir arızanın bile tesiste, üretim hattın tamamının durdurarak, üretim aşamasında olan ürünlerin kalitesinin bozulduğu ve hatta hurdaya çıktığı fabrikalarda, tamir bakımı yöntemlerinin terk edilerek daha oluşum aşamasında olan arızaların çeşitli analiz ve test yöntemleri kullanılarak, arızanın erkenden teşhisinin yapılabildiği koruyucu bakım yöntemlerinden olan kestirimci bakım metotlarına yönelmek zaruri bir hal almıştır.

Kestirimci bakım metotlarından titreşim ölçümünün önemi yapılan çalışmalar ve araştırmalar ışığında işletmelere maksimum kazanç sağladığı, bakım maliyetlerin yüksek olmasına rağmen dar bir vakitte yatırımı amorti eden çok faydalı bir yöntemdir.

Bu çalışmada, orman ürünleri endüstrisinde faaliyet gösteren firmanın kızgın yağ hatlarında iletimi sağlayan kızgın yağ pompalarının, kestirimci bakım yöntemiyle belirli aralıklarla pompalarda yapılan ölçümlerle, pompaların rulmanlarında oluşan problemlerin büyümesinin önüne geçilmesi ve plansız duruşların azaltılması hedeflendi. Bakım mühendislerinin ve bakım teknisyenlerinin kestirimci bakım çalışmalarına başlamasıyla, bir kestirimci bakım uygulaması olan vibrasyon analizi yönteminin kavranması ve vibrasyon analizlerinin yorumlanmasıyla problemleri zmek için hedef oluşturulmuştur.

Pompalardan elde edilen vibrasyon verilerin analizlerine dayanarak planlı bir şekilde pompalar için bir bakım planı oluşturulur. Arızaların büyümesi yapılan bu uygulama sayesinde nlenmiş oldu. Oluşan zaman kayıpları ve iş gücü minimum seviyelere indirildi.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Titreşim, bir nesnenin veya bir parçanın denge konumunda yapmış olduğu salınım hareketini tanımlayan terimdir. Titreşimin özelliği, kullanılan malzemenin elastik modülüne, yoğunluğuna, viskozitesine, şekline, boyutuna, geometrisine, makine sistemlerindeki parçaların birbirine bağlanma şekillerine, sistemlerin mekanik yapılarına ve tasarımlarına, montaj şekillerine, dengeleme ve geometrik uyumlarına, sıcaklık, nem, atmosferik basınç ve diğer çevresel faktörlere bağlı olarak malzemelerin elastik özelliklerini ve titreşim davranışını etkiler (Yıldırım, 2014).

Makine sistemlerine uygulanan dış kuvvetler ve yükler titreşimin frekansına, genliğine etki ederler. Mühendislikte, bu faktörlerin dikkatlice analiz edilmesi ve kontrol edilmesi, istenmeyen titreşimleri azaltmak veya istenen titreşim karakteristiklerini sağlamak için önemlidir.

Makinelerdeki titreşimler, genellikle istenmeyen bir durumdur ve bir dizi potansiyel zarara neden olurlar.

Günümüzde kestirimci bakım konusu akademik çalışmalarda hızlı artış göstermiştir, birçok araştırmacı tarafından farklı şekillerde isimlendirilmiş ve sınıflara ayrılmıştır.

Kestirimci bakım yöntemleri arasında en yaygın kullanılan ve büyük bir öneme sahip olan yöntem, vibrasyon analizidir. Yöntem temel olarak, makineden çalışma sırasında alınan titreşim ölçümleriyle, makinenin çalışırken belirli limitte ürettiği titreşimlerini karşılaştırarak, titreşimdeki artışlar neticesinde ne zaman bakıma gerek duyulacağına karar verip, çalışmaya kısa bir süre için ara verilerek oluşabilecek plansız duruşları engellemek için yapılan onarımdır (Belek & Toprak, 1991).

Kestirimci bakım yöntemlerinden olan titreşim analizi ile arıza teşhisi konusunda makinelerde meydana gelebilen kaçıklıklar, rezonanslar, balanslar, mekanik gevşeklikler ve yağlama yetersizlikleri gibi problemler analiz edilir ve bu problemlerin spektrum grafikleri incelenir (Mechefske, 2005).

Titreşim analizi yönteminde genelde rulmanlardaki titreşimlerin sebepleri irdelenmekte ve bir rulmanın dış bileziği, iç bileziği, kafes ve bilye elemanları üzerinde oluşan anomalinin spektrum üzerinde oluşturduğu frekanslar incelenir (Lancey, 2008).

Makine parçalarında kestirimci bakım yöntemi ile arızalar oluşmadan önce veriler analiz edilerek planlı bakım programları hazırlanması amaçlanmaktadır. Uygulama sayesinde arıza kaynaklı bakım maliyetleri minimum seviyelere indirilir (Hancı, 2009).

Bakım ve üretimin beraber ele alındığı ilk çalışma, iş atölyesi çizelgelemesi ve önleyici (periyodik) bakım konusunu literatürde yerini almıştır (Worral & Mert, 1980).

Demir çelik makinelerinde yapılan bir çalışmada titreşim analizi yöntemi yardımıyla makinelerin arıza teşhisi konusuna değinilmiştir. Çalışmanın sonucundaysa, kestirimci bakım yöntemi kullanılarak makinelerde, dış bilezik rulman hasarı ve kaymalı yatak yıpranma problemi titreşim analizi yöntemi ile tespit etmiştir (Karahana, 2005).

Bakım metotlarının genel olarak sınıflandırılması incelemiştir (Susto, 2012).

Kestirimci bakım uygulamalarının önemini vurgulayan bir çalışmada, işletmelerde bakım stratejilerinin belirlenmesi için işletmenin kompresörleri ve kaymalı yatakları olan dövme makinelerinde titreşim analizi yöntemi ile veriler alınmıştır. Alınan veriler sayesinde kaymalı yataklardaki aşınmalar ve rulman arızaları tespit edilmiştir. (Yıldırım, 2014).

İskenderun ve Osmaniye organize sanayi bölgelerinde faaliyet gösteren işletmelerde kestirimci bakım stratejilerinin işletmeye sağladığı yararlar araştırılmış ve kestirimci bakım yöntemleri kullanılarak bakım planlanmıştır (Göçülü, 2015).

Çimento sektöründe kestirimci bakım yöntemleri ve arıza analizinin temel noktaları, makine mühendisleri odası bakım teknolojileri kongresinde makale olarak yayınlamış, sunmuş ve bizlerle paylaşmıştır (Aydın, 2017).

Çanakkale’de 135 MW gücündeki bir enerji santralinde, ana ekipmanların titreşim arıza frekansları belirlenerek kestirimci bakım uygulanmıştır (Uysal, 2019).

Bir rendering tesisinde arıza bakımı yerine, kestirimci bakım yöntemlerinden olan titreşim analizi ve sıcaklık analizi yöntemleri kullanılarak arıza bakımından kestirimci bakım yöntemleri kullanılması ile kestirimci bakım yöntemlerinin üretim üzerinde etkileri ve avantajları incelenmiştir (Gücek, 2019).

Bir kâğıt fabrikasında yüksek devirde çalışan kurutma fanlarının titreşim analizi yöntemi ile ölçümleri alınmış, makine veya sistem periyodik olarak gözlemlenmiş ve titreşim analizi yöntemiyle, kestirimci bakım incelenmiştir (Dereoğlu, 2020).

Makine parçalarının veya ekipmanların geçmiş şartlarını izleme analizlerini esas alarak, parçaların sağlık durumunu gösteren özellikler, durum tahmini ve arıza tespitleri için veriye dayalı model oluşturma incelemiştir (Luo, 2020).

Kestirimci bakım metotlarında kullanılan makine öğrenmesi tekniklerinin incelenmesini gerçekleştirmiştir (Arena, 2022).

Bilyeli ve silindirik makaralı rulmanlara sahip olan motor-jeneratör sisteminin titreşimini takip edebilme amacıyla meydana gelebilecek olan rulman arızalarını tahmin eder. Rulmanların yatak iç ve dış bileziklerinde oluşabilecek olan anomalileri başarıyla tespit etmiştir (Gluzman, 2000).

Kâğıt fabrikalarında, rulmanların kalan ömrünü doğru bir şekilde belirlemek için yıllarca birçok rulmanın titreşimi gözlemlendi. Kestirimci bakım uygulamalarında titreşime dayalı bakımın metodu araştırıldı ve bazı bulgular önerildi (Najjar, 2000).

Yapacağımız bu çalışmada, orman ürünleri endüstrisinde yüksek devirde ve sıcaklıkta çalışan pompaların, rulmanlarında sık arızalar oluştuğundan ve bu arızalardan kaynaklı üretim kayıpları yaşandığı için, kestirimci bakım yöntemlerinden olan titreşim analizi yöntemi kullanılarak, pompalardan periyotlar halinde titreşim verileri alarak, pompa parçaların sağlık durumlarını kontrol ederek ve rulman arızalarını tespit ederek plansız duruşları önlemek için bakım planı yapmaktır. Sistemde kullanılan aynı tür pompaların farklı zamanlarda arızalanma sebepleri de araştırıldı.

3. YONGA-LEVHA ÜRETİMİ ve TEMEL ESASLARI

3.1 Yonga Levha (Sunta) Üretimi

Yonga levha ürününün bir karşılığı olan sunta kelimesin aslında bir markadır. Bir Türk firması tarafından piyasaya kazandırılan sunta kelimesi Suni-tahta kelimelerinin birleştirilmesiyle meydana gelmiştir. Günümüzde yonga levha ürününün gerçek tanımlaması önüne geçerek ürünle bütünleşmiş durumdadır. Yonga levha veya suntalam olarak da bilinir.

1957 yılında ülkemizde İstanbul'da yonga levha endüstrisi “Sunta Tahta Sanayi” ismiyle faaliyetine başlamıştır (Özertan, 2021).

Odun talaşı ve liflerinin sentetik reçine ile karıştırılarak basınç ve yüksek sıcaklık altında preslenmesiyle üretilen bir ahşap levhadır. Mobilya malzemelerin hammaddesi olarak en fazla tercih edilen malzemelerin başında yonga levha gelmektedir. Fotoğraf 3.1’de orman ürünleri üreten bir tesiste üretilen yonga levhaların görüntüsü yer almaktadır.



Fotoğraf 3.1. Yonga levha

Günümüzde, yonga levhaları TS EN 312 standartlarına uygun olarak sınıflandırılmaktadır.

I. Tabaka Sayılarına Göre:

- 1- Tek
- 2- Çok
- 3- Delikli Levhalar (Kalıp haline getirilmiş)
- 4- Kendi aralarında sınıflandırılmış

II. Presleme Şekillerine Göre:

- 1- Yatay presleme
- 2- Dikey presleme
- 3- Kalıp yöntemi ile şekillendirme

III. Yonga Levha Üst Yüzey Görünümlerine Göre:

- 1- Zımparalanmış
- 2- Zımparalanmamış
- 3- Yüzey Kaplanmış
- 4- Sıvı kaplama ile yüzeyi sarılmış

IV. Yonga Levhaların kullanım alanlarına göre:

- 1- Genel kullanım amacına uygun olanlar
- 2- Açık veya kuru olmayan mekânlarda kullanılanlar

3.1.1 Yonga Levha Kullanım Alanları;

Yonga levhalarının piyasada kullanımı, malzemenin özelliklerine, kullanım amacına ve yerine bağlı olarak çeşitli alanlarda farklılık göstermektedir:

- Mobilya imalatı
- Prefabrik ev yapımı
- Dekorasyon işleri
- Ses izolasyonu
- Isı izolasyonu
- Ara bölmeler
- Dış cephe kaplamaları
- Tavan kaplamaları

- Ahşap giriş üretimi
- Otomotiv sanayi
- Uçak sanayi
- Araç kasaları
- Yükseltilmiş taban
- İnşaat kalıpları
- İnşaat bölmeleri
- Mutfak tezgahı vb.

3.1.2 Yonga Levha Özellikleri;

Yonga levhanın endüstride kullanımı için aşağıdaki bazı özelliklerinin iyi olması gerekmektedir.

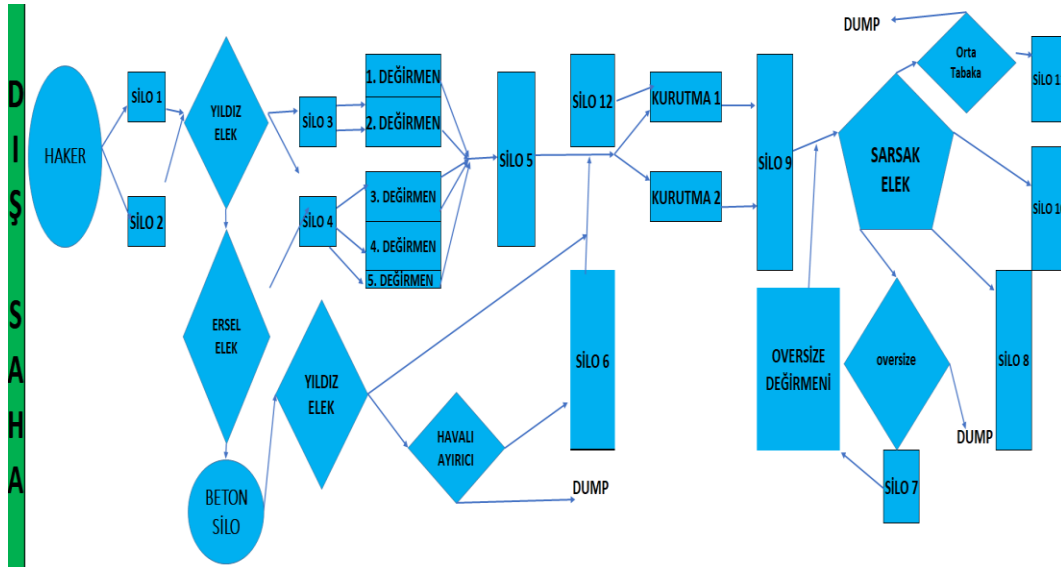
- Rutubete karşı dayanıklı olmalıdır.
- Mobilya imalatı için vida tutma kabiliyeti iyi olmalıdır.
- Malzemeyi işlemesi kolay olmalıdır.
- Boya vb. üst yüzey işlemleri için uygun olmalıdır.
- Farklı kullanım alanlarına göre istenen yoğunlukta olmalıdır.
- Malzeme içerisinde boşluklar olduğu için hafif ve kolay işlenebilir.
- Kullanım yerine uygun formaldehit oranında üretilme olasılığı bulunmaktadır.

3.1.3 Yonga Levha Üretim Prosesleri;

Üretim için yonga hazırlama aşamasında malzemende aranan nitelikleri karşılayabilmesi için özel olarak tedarik edilmiş ağaçlar, özel parçalayıcı makinelerde parçalanarak küçük parçalara ayrılır. Parçalanmış ağaçların yongalarına sektörde cips adı verilir. Cipsler ağacın özelliklerine göre iki farklı sınıfta depolanır. Alt ve üst katmanın cipsleri, beraber arzu edilen rutubet değerine kadar kurutulur.

İki ayrı sınıfa ayrılmış odun cipsleri, birbirine tutunmasını sağlayacak sentetik reçine ve diğer tutkal maddeleri ile harmanlanır. Farklı tiplerdeki yonga levhalar için ayrı, özel yapıştırıcılar ve farklı kimyasallar kullanılır.

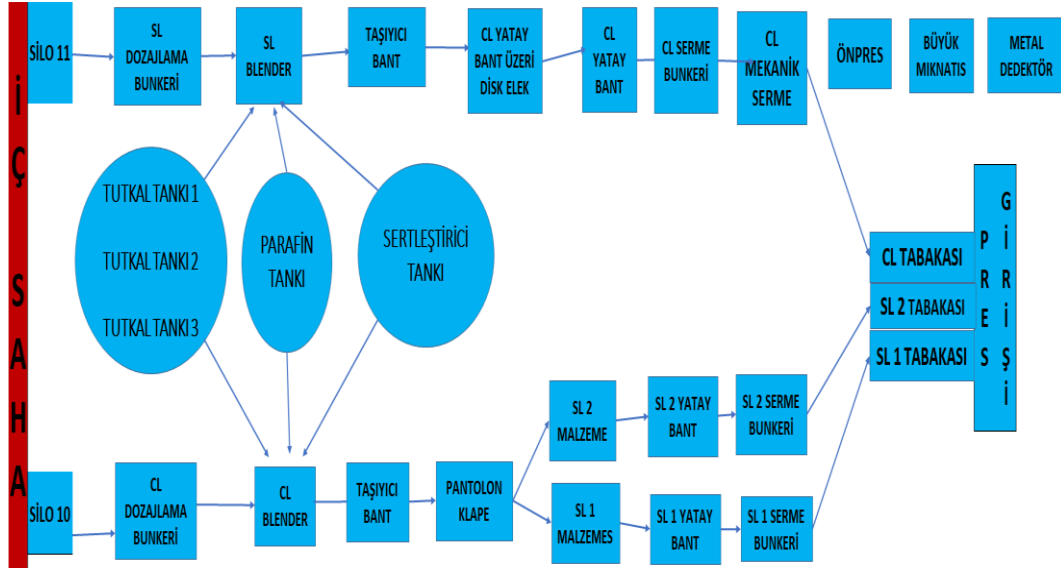
Kimyasal ilave edilmiş farklı sınıfa ait karışımlar, özel kurutucu makinelerde ısı tesiriyle oluşturulan sıcak hava ile cipsler arzu edilen rutubet değerlerine kadar kurutulur. Her farklı sınıf için farklı rutubet değerleri elde edilir. Şekil 3.1’de yonga malzemesinin üretim prosesleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yonga levha üretim fabrikası mamül hazırlama akış şeması

Üretilen yongaları birbirine karıştırma aşamasında iç saha prosese şu şekilde devam edilir.

İlk aşamada, en alt kısma çok ince olan talaş tozu parçalarına ait karışım serilir. Devam eden süreçte, alta serilen karışımın üzerine daha büyük yonga talaşı parçalarının yer aldığı bir karışım serilir. Ardından, tekrar talaş tozu parçalarının yer aldığı karışım, ortaya serilen karışımın üstüne üründe aranan özelliğine göre serilir. Oluşturulan bu pasta ilk presleme işlemiyle hatları taslak olarak oluşturulur. İkinci presleme işlemi ile pastaya uygun sıcaklık, basınç altında ve uygun sürede bu işleme tabi tutularak parçaların birbirine sağlamca yapışması sağlanır. Sonuç olarak, prestan çıkan levhalar, yapı tam anlamıyla oluşması için uygun sürede soğumaya bırakılır. Soğuma süresinin belirlenen zamanda tamamlanmasını ile istenilen pürüzsüzlüğe ve kalınlığa sahip yüzeyler olmaları için son olarak, zımparalama işlemine tabi tutularak ürünler son kullanıma hazır hale getirilir. Şekil 3.2’de üretilen yonga malzemesinin birbirine harmanlanmasını gösteren proses gösterilmiştir.

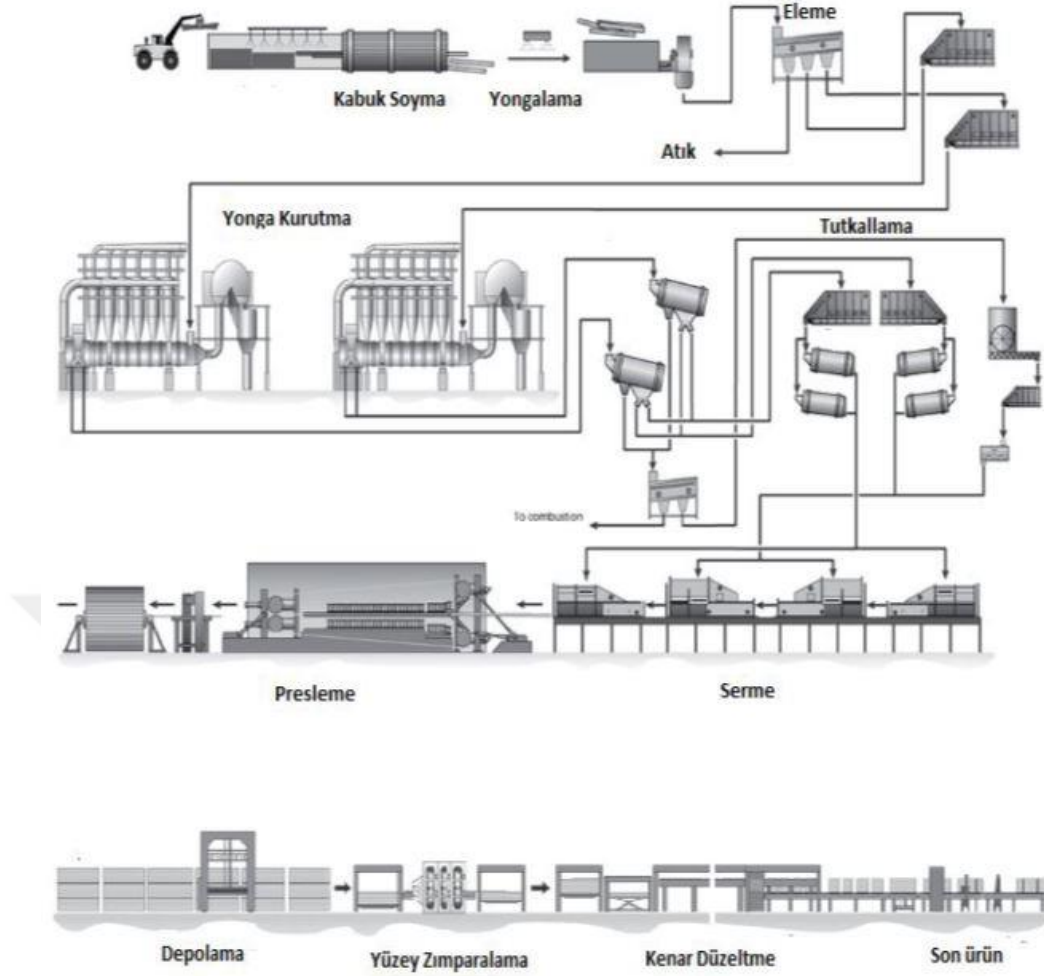


Şekil 3.2. Yonga levha üretim fabrikası üretim prosesi

Büyüyen pazar ve ilerleyen teknolojiyle birlikte, yonga levha endüstrisi için yeni tesisler kurulmaktadır. Her geçen gün sektör içerisinde sayıları artan işletmeler, gün geçtikçe sayılarının artmasıyla aralarında rekabetçi bir ortam oluşmuştur.

Mobilya endüstrilerinin temel hammaddesi olan orman ürünleri, gelişen teknolojiyle birlikte mobilya üretiminde, yonga levha (sunta), MDF (orta yoğunlukta lif levha) ve kontrplak gibi ahşap esaslı hammaddeler tercih edilmektedir. Ahşap esaslı ürünler, doğal kaynakların daha verimli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağladığı gibi ormanların sürdürülebilirliği ve gençleşmesi açısından da önem taşımaktadır (İstek, 2017).

Şekil 3.3'te yonga levha üretim fabrikasının üretim akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.3. Yonga levha üretim fabrikası üretim hazırlık akış şeması (Thoemen, 2010).

3.2 Yonga Levhanın Temel Esasları

Yonga levhalar, endüstride öz kütleye göre bir sınıflandırmaya tabidirler. Levhaların öz kütleleri baz alınarak farklı farklı kategorilendirilirler. Bu sınıflandırma;

- Öz kütlesi düşük yonga levhalar için: $< 0.59 \text{ g/cm}^3$
- Öz kütlesi orta yonga levhalar için: $0.59-0.80 \text{ g/cm}^3$
- Öz kütlesi yüksek yonga levhalar: $> 0.80 \text{ g/cm}^3$

Şeklinde olabilir (Bozkurt Y. ve Göker Y. 1996)

Yonga levhalarda yoğunluk, malzemenin mekanik, işlenme ve fiziksel özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Levhanın yoğun olması direnç özelliğinin de arttığı gösterir (Gündüz & Masraf, 2005).

Yonga levha üretiminde insan iş gücünün yanında makine iç gücünde önemlidir. Günümüz dünyasında artan maliyetler ve düşük kar sebebi ile üretim yapan tesislerin plansız duruşları, işletme maliyetlerini arttırmakta ve kar marjını düşürmektedir. Makinelerin arıza kaynaklı plansız duruşları üretilen yonga levhanın kalitesini düşürmekte, şirketlerin üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Bundan dolayıdır ki şirketler kesintisiz ve kaliteli malzeme üretebilmek için kendi belirledikleri farklı farklı bakım stratejilerine sahiptirler.



4. BAKIM VE TİTREŞİM İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

İstenilen kalitede levha üretimi, üreticilerin hedefleri doğrultusunda makinelere, depolama şartlarına ya da operatörlere bağlı olarak kaliteyi etkileyebilecek çeşitli üretim kusurlarıyla karşılaşılabilir. Makinelere kaynaklanan en temel kusur arızalardır (Tolunay & Tola, 2012).

Arıza (Break down); bir sistemin veya makinenin engel olunamayan bir nedenden durması, üretim kalitesinin veya hızının düşmesi anlamına gelmektedir.

Makinelerin bakım nedeniyle sürekli durdurulması, üretilecek olan ürün miktarını birim zamanda sınırlayan en önemli parametrelerden birisidir. Böyle bir durumda üretim maliyetlerini ve bunu direk olarak etkileyen üretim duruşu zamanının düşürülmesi için işletmelerde bakım kaynaklı harcanması gerekli sürenin minimum seviyelere indirilmesi çok fazla önem gerektirmektedir.

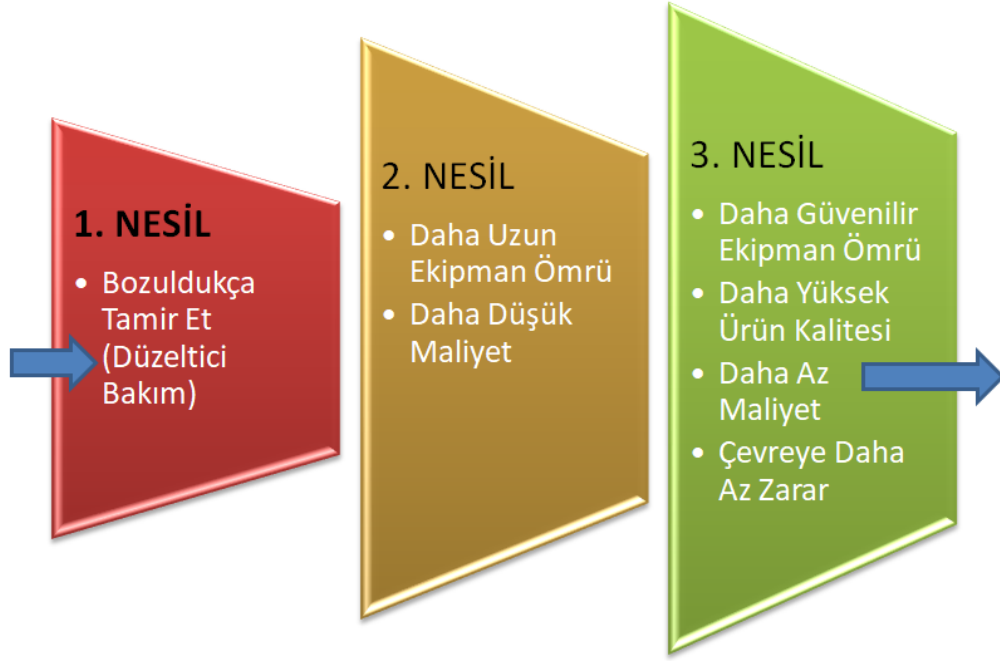
Bakım (Maintenance); üretim sistemlerinin çalışmasını plan ve programlarına uygun olmasını sağlayan, arzu edilen çalışma seviyesinde kalınmasını kontrol eden düzeltici ve önleyici bir işlemdir.

Bir sistemin fonksiyonlarının arzu edilen seviyede yerine getirebilmesi için yapılan her çeşit muayene faaliyetleri aynı zamanda onarım faaliyetleri olarak da adlandırılır. Yani, donanım veya tesisin kalite ve üretim performansını arzu edilen seviyede tutabilmek, çalışma performansını normal hale getirebilmek için gerçekleştirilen işlemlerin tümüdür.

Sistem veya makinenin beklenen kalitede ürün üretebilmesi, işlevselliğini sürdürmesi için işletmeler bakım stratejilerini genellikle aşağıdaki ana bakım stratejisi üzerinden belirlemektedir. Bu bakım yöntemleri;

- Onarıcı bakım
- Koruyucu bakım
- Kestirimci bakım
- Proaktif Bakım
- Toplam verimli bakım
- Tahmini Bakım
- Risk Bazlı bakım

İşletmeler ihtiyaçlarına göre birden fazla bakım yöntemini birlikte kullanabilirler. Geçmişten günümüze bakım metotlarının değişimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bakım metotlarının tarihsel gelişimi (Tosun, 2007)

4.1 Onarıcı Bakım (Corrective Maintenance - Run-to-Failure)

Bir tesis veya sistemin arıza sebebiyle durmasına, üretim kapasitesinin kabul edilebilir sınırın altına düşmesine neden olan arızanın etkilerinin belirlenip giderilme yollarının bulunmasıdır. Ana felsefe arıza oluştuğunda makine veya sistemin istenen kalitede ürünü üretebilmesi ya da işlevselliğini sürdürmesi için yapılan ve büyük hasarlara sebep olmaması için hemen uygulanan bakım veya tamir çalışmasıdır (Köksal, 2017).

Onarıcı bakımda, diğer bakım metotlarında olduğu gibi bakımın planlamasının yapılmasına ihtiyaç duyulmaz. Arıza oluşmadan önce arızayı tespit etmek için bir işlem yapılmaz. Beklenilmeyen bir anda oluşan arıza makineye veya sisteme büyük zararlar verebilir ve bu sebeple üretim akışında uzun süreli duruşlara sebep olabilir (Susto, 2012).

Plansız bir bakım yöntemi olması sebebi ile onarıcı bakım yönteminin bazı dezavantajlar vardır. Bu dezavantajlar;

- En pahalı bakım yöntemidir.

- Bakım personellerinin her daim oluşabilecek arızalara hızlı intikal edip, oluşan arızaları en kısa sürede düzeltmeleri için bakım ekiplerinin her zaman hazır olması gerekmektedir.

- İkincil veya daha fazla arıza çıkması durumuna karşın bakım personeli sayısının üst seviyede olması gerekir.

- Arıza oluşmasına karşın yedek parça depo stoklarının maksimum olması gerekmektedir.

- Arızanın meydana gelmesi durumunda, arıza giderilene kadar üretimde yüksek ürün kayıplarına neden olabilir.

- Arıza yüzünden oluşan ürün kayıpları sebebi ile birim başına düşen maliyetlerde artışa neden olur.

- Arıza oluşan ekipmanlarda veya makinelerde daha ciddi hasarlar oluşabilir.

Onarıcı bakım yöntemi ile arıza giderme prosesi Şekil 4.2’de belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Onarıcı bakım yöntemi arıza giderilme prosesi

4.2 Koruyucu Bakım (Preventive Maintenance)

Bir tesis veya sistemin belirli bir program dâhilinde önceden belirlenen bir zaman çizelgesinde gerçekleştirilen arıza oluşma koşulu aramaksızın yapılan muayene, yağlama, ayarlama, yenileme ve revizyon işlemleri ile işlevsellik süresini artıran planlı bir bakım metodudur (Köksal, 2017).

Bu tür zaman esaslı çalışmalar planlı bakım veya programlı bakım olarak da adlandırılır.

Koruyucu bakımın amaçları, arızaları maliyete yol açmadan ve tamir bakımına ihtiyaç duymadan önce tespit etmek, mümkün olan en yüksek seviyede üretimi sağlamak ve makinelerin duruşunu en aza indirmektir (Susto, 2012).

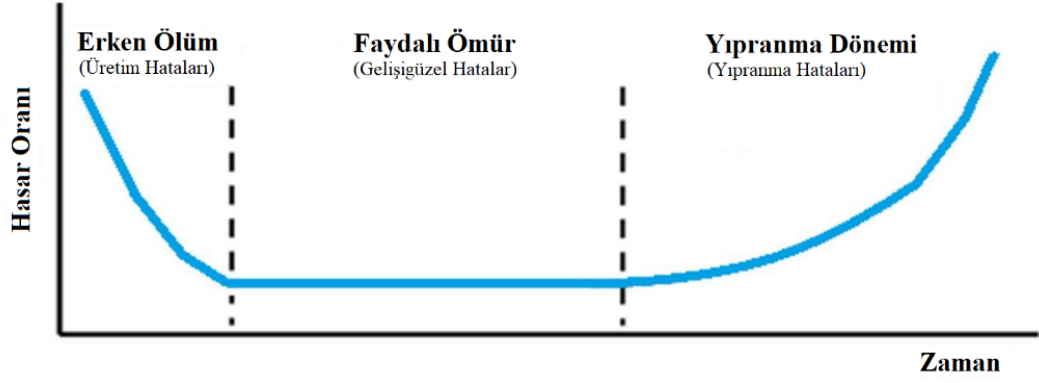
Koruyucu bakımda, makineler veya sistemler düzenli olarak kontrol edildiğinden dolayı plansız arıza yaşama riski daha azdır. Arızaların önlenmesi, üretim sürekliliği sağlar ve tesislerde verimliliği artırır. Makinelerin veya sistem ekipmanlarının doğru çalışması sağlanır bu sayede aşınmaların veya daha büyük hasarların önüne geçilir. Bu sayede, makine parçalarının daha uzun süre verimli bir şekilde çalışması sağlanır ve yeniden yatırım maliyetleri azalır. Ayrıca, ekipman arızalarının önlenmesine ve makine parçalarının ömürlerinin uzatılmasını sağladığı için maliyetleri azaltır. Plansız arızalarda, makinelerde veya sistem ekipmanlarında tamir ve üretim duruş maliyetleri meydana gelir. Fakat koruyucu bakımın düzenli olarak yapılması durumunda bu oluşabilecek maliyetler önemli ölçüde azalır.

Koruyucu bakımın dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Koruyucu bakım planı oluşturmak, gerekli ekipmanları satın almak ve eğitimli personel istihdam etmek yüksek maliyetler gerektirebilir.
- Her bir ekipman için uygun bakım aralıklarını ve prosedürlerini belirlemek karmaşık ve zaman alıcı olabilir.
- Düzenli bakım, üretimden zaman ayırmayı ve ekipmanların durdurulmasını gerektirir. Bu da üretim verimliliğini düşürebilir.
- Koruyucu bakım programları, kalifiye teknisyenler ve mühendisler tarafından yapılmalıdır. Bu da işgücü maliyetlerini artırır.
- Bakım prosedürlerinin yanlış veya eksik uygulanması ekipmanlara zarar verebilir ve arızalara neden olabilir.
- Beklenmedik Arızalar: Koruyucu bakım, tüm arızaları önleyemez. Beklenmedik arızalar yine de meydana gelebilir ve ek maliyetlere yol açabilir

4.2.1 Arıza Trendi Eğrisi (Bathtub Curve)

Karmaşık sistemlerde veya makinelerde arıza oranlarının zamanla değişimi genellikle banyo küvetine benzer bir eğri gösterir. Şekil 4.3'te banyo küveti eğrisi grafiği gösterilmiştir. Bunun adı banyo küveti eğrisi olarak bilinen grafik üzerinde erken arıza, normal arıza ve yıpranma arızaları dönemlerinde ortaya çıkan arızalar farklı olasılık dağılımları ile tanımlanırlar.



Şekil 4.3. Koruyucu bakım hasar oranı - zaman grafiği (Kaymaz, 2023)

4.3 Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance)

Kestirimci bakım aslında makinenin düzgün çalışmasının takip edildiği bir süreçtir. Kestirimci bakım metodu sistem ekipmanlarının arızalanmadan önce potansiyel arızalarını tanımlamak ve önlem almak için gerektiğinde özel izleme cihazlarından yararlanılarak yapılan muayene, periyodik gözlem ve kayıt izleme sistemiyle elde edilen verilerin düzenli olarak izlenmesine ve makine, sistem ekipmanlarının performans ölçümlerine dayanarak bakım-onarım ihtiyaçlarının tespit edilip müsait zamanda bakım faaliyetlerin gerçekleştirilmesidir. Bu sayede daha az üretim duruşu yaşanmakta ve parça ömürlerinden maksimum sürede yararlanılabilmektedir.

Kestirimci bakımın, onarıcı bakım ve koruyucu bakım metotlarından ayrılan avantajlarıyla tesislerin yeğlediği bir metottur.

Kestirimci bakım metodu, diğer bakım metotlarına oranla daha uzun çalışma ömrü sağlamaktadır. Koruyucu bakım faaliyetlerine olanak tanımaktadır. Makine veya ekipmanların durumu canlı olarak izlenebildiği için sağlıklı veri analizine imkân tanımaktadır. Bu sayede zarar oluşmadan arızanın saptanmasını ve arızalı ya da hasarlı parçanın değiştirilmesi veya onarılmasını sağlar, böylelikle arızalar ile doğabilecek parça maliyetleri ve arızaların büyümesiyle doğabilecek yüklü maliyetleri hafifletmektedir. Böylece hangi parçada arıza veya hasar olduğu bilindiği için bakım süreleri diğer bakım metotlarına oranla oldukça kısadır. Ekipman ve makine parçalarının ömrünün uzatılması sayesinde enerji tüketimini azaltır (Carnero, 2005).

Zamanında müdahale edilerek arızaların önlenmesi ve arıza kaynaklı duruş yaşanması engelleneceği için üretimin sürekliliği sağlanır (Weyerhaeuser, 2000).

Ekipman arızalarının önceden saptanmasıyla çalışanların güvenliği ve sağlığının korunmasına yardımcı olurken, iş kazalarının da önlenmesine katkı sağlar, iş güvenliği sağlanır (Christer, Wang & Sharp 1997).

Bakım duruşlarının düzenli bir şekilde programlanabilmesini sağlar (Lupinucci, Perez, Davila & Tiseyra, 2000).

Arızalı ekipmanların arızalarının önceden tespit edilmesiyle, işletmenin bakım maliyetleri azalır (Beltrán & López, 2000).

İşgücü maliyetlerini ve yedek parça azaltır (Villar, Masson & Games, 2000).

Her ekipman parçası hakkında tam tarih bilgisi sağlayarak güvenilirlik parametrelerinin belirlenmesine ve bakım planlamasını en iyi şekilde yapmaya yardımcı olur. Bu makine ve ekipmanlarla ilgili bilgiler, karar alma için mühendisler tarafından değerlendirilir (Kakkar, 1999).

Bakım-onarım için gereken yedek parçalar belirlenir ve satın alınması konusunda işletmeye ya da endüstriye yedek parça temini için süresi kazandırır (Barbera, Schneider & Watson, 1999).

Kestirimci bakım metodunun temelinde, ekipmanın performansı izlenerek veri toplanır. Bu, sensörler, veri toplama sistemleri ve diğer monitörleme araçları aracılığıyla gerçekleştirilir. Sensörler aracılığıyla ekipmanın titreşimi, sıcaklığı, basınç gibi önemli parametreleri ölçülür ve bu veriler kayıt altına alınır.

Mühendisler ve teknik ekip, toplanan verileri analiz eder ve değerlendirir. Bu, istatistiksel yöntemler, veri madenciliği teknikleri, makine öğrenimi ve yapay zekâ algoritmaları gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Anomalileri tespit etmek ve potansiyel arızaları belirlemek için veri analitiği ve karar destek sistemleri bu amaçla kullanılır.

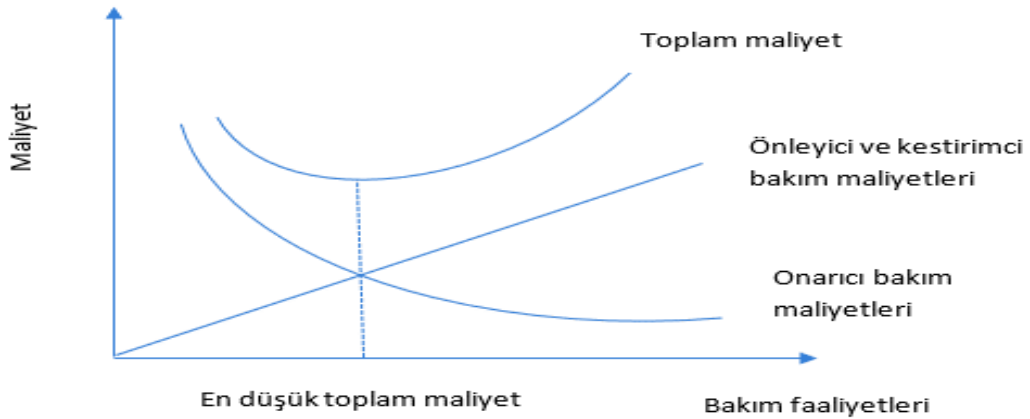
Veri analizi sonuçlarına dayanarak, ekipmanın gelecekteki arızalarını tahmin etmek mümkündür. Bu, kritik bileşenlerin veya sistemlerin ömrünün sonuna yaklaşması, anormal davranışlar veya diğer belirtilerle belirlenebilir.

Arıza tahminleri, bakım planlamasının temel yapı taşıdır. Kritik ekipmanların veya sistemlerin bakımı planlanır ve gerek görüldüğünde koruyucu veya önleyici önlemler alınır.

Kestirimci bakım alanında sürekli olarak yeni inovasyonlar ve teknolojiler ortaya çıkmaktadır. Büyük veri analizi, sensor teknolojileri, yapay zekâ gibi alanlar, kestirimci bakım metotlarını daha da geliştirmektedir. Kestirimci bakım, endüstride sürekli olarak gelişen ve önemli bir yer tutan bir bakım stratejisi olarak kabul edilir. Veri analizi ve teknolojik ilerlemeler, kestirimci bakımın faaliyetini artırmak için önemli bir rol oynamaktadır.

Dezavantajlarında bahsedecek olursa kestirimci bakımın en önemli dezavantajı yüksek yatırım gerektiren maliyetlerdir. Kestirimci bakımda kullanılacak olan sensor teknolojileri, ölçme aletleri, analiz uygulamaları, veri toplama sistemleri ve bu teknolojilerin kullanılabilmesi için personellere verilecek eğitimlerin ücretleri ciddi maliyet gerektiren yatırımlardır. Diğer bir önemli dezavantajı ise kestirimci bakım metotlarının doğru ve uygun şekilde yapılamaması sonucu doğru olmayan bilgilerin elde edilmesine makine veya ekipman arızalarının artmasına ve bakımın daha ciddi boyutlara ulaşmasına sebebiyet verir.

İşletmelerin kendi stratejileri doğrultusunda doğru analiz uygulamasının doğru ekipman için seçimi oldukça kritiktir. Şekil 4.4'te bakım metotlarının maliyet grafiği verilmiştir.



Şekil 4.4. Bakım metotlarının maliyet ilişkileri (Dündar, Sarıçiçek & Yazici, 2021).

İşletmelerde ilgili bakım metotlarından biri, ikisi ya da hepsinin bir kullanılması mümkün olabilmektedir. Kestirimci bakım, arızaları önlemek amacıyla ekipman sağlığının izlenerek doğabilecek anomalileri engellemek için

gerekli etkinlikleri kapsamaktadır. Bu etkinliklerin maliyetleri, anomali oluştuğunda meydana gelecek maliyetlerle kıyaslandığında iki maliyeti baş başa tutmak önemlidir. Şekil 4.4'te belirli bir noktaya kadar onarıcı bakım maliyetleri, kestirimci bakım maliyetlerini karşılayabilmektedir. Fakat belirli bir noktadan sonra kestirimci bakım maliyeti, onarıcı bakım maliyetini aşmakta ve toplam maliyette bir artış gözlenmektedir.

4.3.1 Kestirimci Bakım Metotları

Kestirimci bakım metodunda veri toplama amacıyla kullanılan tahribatsız ölçüm yöntemleri arasında vibrasyon analizi, yağ analizi, sıcaklık analizi, ultrasonik ses analizi, enerji analizörü ve lazerli eksen ayar cihazları yer almaktadır.

4.3.1.1 Vibrasyon Analizi Yöntemi

Kestirimci bakım metodunun uygulamalarında en çok tercih edilen analiz yöntemi olarak bilinir. Makinelerin çalışırken belirli limitler aralığında ürettiği titreşim frekanslarının değerlendirilip sınırları aşıp aşmamasının kontrolü sonucunda oluşabilecek arızaların tespit edilmesinde kullanılır.

Vibrasyon analiz ile balanssızlık arızaları, merkez kaçıklıkları, eğri, aşınmış ve hasarlı millerin arızaları, bozuk rulmanlar, kaymalı yataklarda rulman arızaları, yataklarda radyal gezinmeler, cıvata gevşeklikleri, elektrik motoru arızaları tespit edilebilir.

4.3.1.2 Yağ Analizi Yöntemi

Sistem içerisinde birbirine sürtünen parçalarda zamanla meydana gelen aşınmalar sonucunda metal parçalar yağa karışır. Bu yöntemde aşınan metal parçaların yoğunluğunu analiz etmek için sistem içerisinden alınan yağda ki metal parçacık miktarına bakılarak arıza tespit edilmesinde kullanılır.

4.3.1.3 Sıcaklık Analizi Yöntemi

Enerji hatlarında, trafolarda, motorlarda, pompalarda, buhar hatlarında kullanılan analiz yöntemidir. Temelde, termal kamera yardımı ile ısı artışı kontrol edilerek arıza tespitinde kullanılan bir yöntemdir.

4.3.1.4 Ultrasonik Ses Analizi Yöntemi

Daha çok basınçlı hava hatları üzerinde hava kaçağlarının tespitinde kullanılır. Kompresörlerden üretilen basınçlı hava hattı üzerindeki hava kaçağlarının tespitinde kullanılarak hava hattında meydana gelen basınç düşüşü arızalarının tespit edilip giderilmesinde kullanılan bir yöntemdir.

4.3.1.5 Enerji Analizör Yöntemi

Sistemde kullanılan sensörler ve analizör programı sayesinde enerji tüketimlerinin kontrol edilerek oluşabilecek arızaların tespitinde kullanılır.

4.3.1.6 Lazerli Eksen Ayarı Analiz Yöntemi

Bu yöntem daha çok döner ekipmanların olduğu yerlerde meydana gelen eksen kaçıklıkları ve hizalanamama durumlarının sebebi ile meydana gelebilecek balans arızalarının giderilmesinde kullanılır.

Kestirimci bakım dört ana unsur ile uygulanır. Bunlar;

- Ölçmeyle verilerin toplanması
- Toplanan verilerin analiz edilip değerlendirilmesi
- Bakım için planlamasının oluşturulması
- Bakım – onarım

4.3.2 Kestirimci Bakımda Ölçme İle Veri Toplama

Makinelerde veya ekipmanlarda oluşabilecek anomaliler ölçme ve kontroller sonucunda gözlemlenir. Makine durmadan canlıdan alınan ölçümlerde gürültü artışı, ısı artışı, vibrasyon artışı gibi durumlarla karşılaşılıp daha sağlıklı veri ölçümü sağlanır. Ölçme üç farklı yolla yapılır.

Manuel olarak yapılan ölçümde, ölçümler elle, gözle veya cihaz yardımı ile yapıldıktan sonra manuel olarak kayıt altına alınır.

Taşınabilir cihazla yapılan ölçümlerde gerçekleştiren ölçüm verilerini, cihaz kendi belleğine kaydeder. Cihazda kayıt altına alınan datalar analiz ve değerlendirmenin yapılacağı bilgisayara uygun bir donanım yardımı ile aktarılır.

Sabit sensörler yardımı ile yapılan ölçümlerde, ölçüm noktalarına sensörler montajlanır. Bu sensörler ile alınan veriler monitörlere aktarılır. Monitörde gelişmeler izlenir. Sesli uyarıcı veya ışıklı sistemleri ile gerekli mesajlar kullanıcılara iletilir.

4.3.3 Kestirimci Bakımda Veri Analiz ve Değerlendirme

Ekipmanlardaki kritik noktalar üzerinden alınan ölçümler frekans tabanlı genlik grafik verileri alınarak titreşimin genliğindeki artışlar gözlemlenir, zamana bağlı olarak gelişimi izlenir ve değerlendirilmesi yapılır.

Ekipmanların durumlarının belirlenmesinde en önemli kriter analiz aşamasıdır. Yapılan analize göre ekipmanlarda ya da makine parçalarında arızaların kaynakları saptanır. Analiz ve değerlendirmeler iki farklı yolla yapılır.

Manuel olarak yapılan analizlerde ölçme ve kontrol sonuçları not alınarak bir tablo veya skalaya işlenir, ekipmanın durumu bu tablolara göre takip edilir. Bilgisayar destekli yapılan analiz ve değerlendirmelerde ise ölçüm cihazı ile analiz cihazı birdir. İstenen ölçüm değerlerine ait ölçüm grafikleri ve tabloları derhal oluşturularak cihazın belleğine kaydedilir. Titreşim dalga formu ve spektrum grafikleri oluşturulur. Grafikler oluşturulduktan sonra bilgisayara aktarılır. Kullanıcı bilgisayar başına grafikleri değerlendirecek arıza teşhisini gerçekleştirir ve bakım emiri çıkarılmasını sağlar.

4.3.4 Kestirimci Bakım Planlaması

Analiz ve değerlendirme aşamasında saptanan anomalilerin nedenine ait parametrenin büyüme hızına bağlı olarak arızanın muhtemel oluşabileceği zamandan önce bakımın yapılması gerekir. Bakım planları, programlı duruşlar ve üretim programı göz önüne alınarak ihtiyaç olan yedek parça temini ile uygun zamanda söz konusu bakım planı programlanır.

4.3.5 Kestirimci Bakım - Onarım

Analiz aşamasında saptanan anomaliler, işletmenin üretim planına bağlı olarak değerlendirilir ve bakım planlamasına alınır. Bakım - onarım, üretimin yürütülememesine sebep olan bir anomalide, bozulma ya da kırılma durumlarında makine-ekipmanı çalışır haline getirmek amacıyla yapılan yenileme çalışmalarıdır. Böyle bir bakım etkinliğinin yürütülmesi sırasında ana felsefe, işi en kısa sürede tamamlamak ve ekipmanı eskisi gibi çalışır haline getirip üretim sürekliliğinin sağlanmasıdır.

4.4 Proaktif Bakım

Proaktif bakım metodu, ekipman veya sistemlerin düzenli olarak kontrol edilerek, önleyici ve öngörücü önlemlerin alındığı bir bakım metodudur. Bu bakım yaklaşımında, ekipmanın veya sistemlerin arızalanmadan önceki durumu izlenir ve analiz edilerek kök nedeninin tespit edilmesine dayanmaktadır. Her bir anomali analiz edilmiş ve ölçümler alınarak anomalilerin tekrar etmemesi sağlanır. Problemlerin önceden tespit edilmesi ve düzeltilmesi, beklenmedik duruşları ve arızaları minimize etmeyi amaçlar.

Proaktif bakım metodunda, ekipman performansının optimize edilmesi ve işletme verimliliğinin artırılması temel hedeftir. Bu strateji, belirli bakım zamanlarına veya arızaların oluşmasını beklemek yerine, sistematik bir şekilde ekipmanın durumunu izleyerek ve bakım gereksinimlerini önceden tahmin ederek

çalışır. Bu bakım stratejisi genellikle periyodik olarak yapılan bakım çalışmalarını içerir. Bu sayede, ekipmanın potansiyel arızaları önceden tespit edilebilir ve bu arızaların maliyetli duruşlara veya üretim kayıplarına yol açması önlenmeye çalışılır. Proaktif bakım, önleyici ve tahmini bakım stratejileri arasında yer alır ve işletmelerin ekipmanlarını verimli ve güvenilir bir şekilde işletmelerine yardımcı olur.

4.5 Toplam Verimli Bakım (TPM- Total Productive Maintenance)

Toplam verimli bakım metodu, bir üretim tesisinin veya işletmenin, ekipmanların etkinliğini ve verimliliğini artırmak için benimsediği bütünsel bir yaklaşımdır. TPM, sadece bakım departmanının değil, üst yönetiminden mavi yaka çalışanlara kadar tüm işletme çalışanlarının katılımını gerektirir ve ekipmanların etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için sürekli iyileştirme ve bakım faaliyetlerinin bir kombinasyonunu içerir. TPM' nin ana hedefleri arasında şunlar yer alır:

- Ekipmanların planlanmamış duruşlarını ve arızalarını en aza indirerek, üretkenlik ve verimlilik seviyelerini artırmak.
- TPM, ekipman arızalarının neden olduğu kalite sorunlarını azaltmayı ve hatta ortadan kaldırmayı amaçlar.
- TPM, tüm çalışanların ekipman bakımı ve performansı üzerinde sorumluluk almalarını teşvik eder. Bu, operatörlerin ekipmanlarını daha etkin bir şekilde kullanarak ekipmanları daha iyi anlamalarını sağlar.
- TPM, işletmede bir kültür değişikliği yaratır ve sürekli iyileştirme ve bakımın önemini vurgular.
- TPM' nin unsurları arasında planlı bakım, önleyici bakım, operatör eğitimi, ekipman düzenleme ve standartlaştırma, kalite iyileştirme faaliyetleri ve çalışan katılımı gibi stratejiler bulunmaktadır.

TPM' nin avantajlarından şöyle bahsedebiliriz;

- Yeni yatırım ve yenilikler yerine mevcut sistemin iyileştirme yaklaşımına önem verir.
- Küçük değişiklikler yaparak ilerlemek, büyük değişiklikler yaparak ilerlemek yerine daha fazla önemlidir.
- Uzun vadeli bir düşünce anlayışı ile sorunları ele alma yaklaşımı vardır.

- Üretim programları oluşturulurken bakım ve verimlilik artırıcı tadilatlar için gerekli süreleri ayırmayı öngörür.

Bu bakım metodu, işletmelerin toplam üretim verimliliklerini ve performanslarını artırmak, maliyetleri azaltmak ve rekabetçiliklerini güçlendirmek için tercih edilir.

Proaktif bakım ve toplam verimli bakım (TPM), her ikisi de işletmelerin ekipmanlarının ömrünü uzatmak, arıza süresini azaltmak ve genel verimliliği artırmak için kullandığı iki önemli bakım yöntemidir. Fakat bu iki yöntem arasında bazı temel farklar da bulunmaktadır. Tablo 4.1’de proaktif bakım ile toplam verimli bakımın temel farklılıkları gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Proaktif yaklaşım ve toplam verimli bakım yaklaşımın farklılıkları

BAKIM METODU	AMAÇ	YAKŞALIM	AVANTAJ
Proaktif Bakım	Arızaları önlemeyi ve ekipmanların optimum performansta çalışmasını sağlamayı amaçlar.	Ekipmanların geçmiş verilerine ve arıza geçmişlerine dayanan reaktif bir yaklaşımdır.	Arıza süresini ve maliyetlerini azaltır, ekipman ömrünü uzatır.
Toplam Verimli Bakım	Sadece arızaları önlemeyi değil, aynı zamanda ekipmanların tüm potansiyelini ortaya çıkararak genel verimliliği en üst düzeye çıkarmayı da amaçlar.	Ekipmanların tüm yaşam döngüsünü, işlevlerini ve arıza modlarını göz önünde bulunduran proaktif bir yaklaşımdır.	Proaktif bakımdan elde edilen faydaların yanı sıra, üretim ve kalitede iyileşme, stok seviyelerinde düşüş ve genel işletme maliyetlerinde tasarruf sağlar.

4.6 Tahmini Bakım

Tahmini bakım, makine öğrenimi, yapay zekâ ve veri analizi gibi ileri teknolojiler kullanarak arızaları önceden tahmin etmeyi ve bakım planlamayı kapsayan bir bakım yöntemidir. Bu yöntemde, geçmiş arıza verileri, sensörlerden gelen gerçek zamanlı veriler ve makine çalışmasıyla ilgili diğer bilgiler analiz

edilerek arızaların ne zaman ve hangi koşullarda oluşabileceği tahmin edilir. Bu tahminlere dayanarak, önleyici bakım faaliyetleri planlanır ve uygulanır.

Tahmini bakım ve onarım sürecinin ilk aşaması, işletme genelinde bağlı IoT ağ varlıklarından gerçek zamanlı verileri ve bilgileri toplamayı içerir. Bu veriler kolayca işlenebilecek, erişilebilir ve analiz edilebilecek şekilde saklanmalıdır. Tahmine dayalı bileşen, yapay zeka (AI) ve makine öğrenmesi teknolojilerini elde edilen verilere uygulandığında yararlı ve eyleme dönüştürülebilir bir hikaye anlatmaya başlar.

Tahmini bakımın, geleneksel bakım yöntemlerine kıyasla birçok avantajı vardır.

- Arızalar önceden tahmin edilerek önleyici bakım yapıldığı için, arıza nedeniyle üretim duruşları ve onarım maliyetleri önemli ölçüde azalır.
- Ekipmanların aşınmasını ve yıpranmasını en aza indirerek ömrünü uzatır.
- Arıza süresinin azalması ve ekipmanların daha uzun süre çalışması, genel üretim ve işletme verimliliğini artırır.
- Arızaya yol açabilecek sorunlar ortaya çıkmadan önce öngörüldüğü için, bakım kaynakları daha etkin bir şekilde kullanılır.

Toplanan verilerden eyleme dönüştürülebilir öngörüler ve öneriler sunmak için gerekli çeşitli algoritmaları ve analitik süreçleri desteklemek için gerekli yapay zekâ tabanlı yazılım çözümlerinin mevcut olması gerekir.

4.6.1 IoT ağı

İnternet üzerinden iletişim kurarak veri paylaşabilen akıllı cihazların oluşturduğu bir ağıdır. Bu ağdaki cihazlar, sensörler, yazılımlar ve diğer teknolojiler ile donatılmıştır ve sıcaklık, nem, konum, hareket gibi çeşitli verileri toplayabilir ve iletebilirler. Toplanan veriler, bulut bilişim platformları veya yerel veri tabanları gibi farklı sistemlerde depolanabilir ve analiz edilebilir. Çalışma prensibi;

- Akıllı cihazlar sensörleri aracılığıyla veri toplar.
- Toplanan veriler, kablosuz bağlantı veya kablolu bağlantı yoluyla ağ geçidine gönderilir.
- Ağ geçidi, verileri bulut bilişim platformuna veya yerel veri tabanına iletir.
- Veriler, veri analizi platformları tarafından analiz edilir ve işlenir.
- İşlenen veriler, uygulamalar tarafından kullanılır.

4.6.2 Bulut Bağlanabilirliği

Bulut bağlantısı, internet üzerinden bulut tabanlı hizmetlere ve kaynaklara erişme ve bunları kullanma yeteneğidir. Bunlar, bilgisayarlar, tabletler, akıllı telefonlar ve diğer çeşitli cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

4.6.3 Yapay Zekâ ile Makine Öğrenimi

Bu, yapay zekânın bir alt dalıdır ve bilgisayarların açıkça programlanmadan deneyimden öğrenmelerine ve performanslarını geliştirmelerine olanak tanıyan algoritmalar üzerinde odaklanır. Makine öğrenimi, sınıflandırma, tahmin, kümeleme ve anomali tespiti gibi birçok farklı görevde kullanılmaktadır.

4.6.4 Dijital İkizler

Gerçek dünyadaki bir nesnenin, sistemin veya sürecin sanal bir kopyasıdır. Bu sanal kopya, sensörlerden, IoT cihazları ve diğer veri kaynaklarından gelen veriler, gerçek zamanlı olarak işlenmektedir ve fiziksel varlığın davranışını ve durumunu simüle eder. Arızaları önceden tahmin ederek ve önleyici bakım faaliyetleri planlayarak ekipman ömrünü uzatmaya ve arıza süresini azaltmaya yardımcı olabilir. Dijital ikizler, gelişmekte olan bir teknolojidir ve önümüzdeki yıllarda daha da yaygınlaşması ve birçok yeni uygulamada kullanılması beklenmektedir.

Tahmini bakım, gelişmiş bir teknoloji olmasının yanında, uygulaması da nispeten kolaydır. Birçok yazılım ve hizmet sağlayıcısı, işletmelerin kendi tahmini bakım programlarını kurmalarına yardımcı olacak çözümler sunmaktadır. Endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti (IoT) gibi gelişmelerle birlikte daha da önem kazanacaktır. Bu gelişmeler, daha fazla veri toplanmasını ve analiz edilmesini sağlayarak tahmini bakımın daha da hassas ve etkili hale gelmesine yardımcı olacaktır. Gelecekteki bakım stratejilerinin temelini oluşturacak ve işletmelerin daha güvenilir, daha verimli ve daha sürdürülebilir bir işleyişe yardımcı olacaktır.

4.7 Risk Bazlı Bakım (RTB)

Makine parçalarının ve sistemlerin arıza riskinin ve kritikliğinin analizine dayalı bir bakım stratejisidir. Bu stratejide, bakım faaliyetleri, en yüksek arıza riski ve kritikliğe sahip varlıklara öncelik vererek planlanır ve uygulanır. RTB, geleneksel zaman bazlı bakım yöntemlerine kıyasla daha proaktif ve etkili bir bakım yaklaşımıdır. RTB, arızalar önceden tahmin edilerek ve önleyici bakım faaliyetleri planlanarak arıza süresini ve onarım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir.

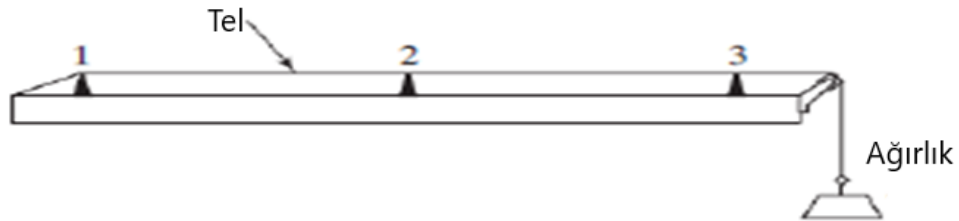
Etkili bir şekilde uygulanabilmesi için risk tabanlı bakımın gerçek zamanlı geçmiş verilerin toplanması ve analiz edilmesi gerekir. Makine parçalarının kritikliğini ve arıza riskini değerlendirmek, bakım planı ve programı oluşturmak ve verileri analiz etmek için uygun yazılım ve araçlara ihtiyaç duyar. Ayrıca başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için bakım personelinin bu strateji hakkında bilgi sahibi olması ve gerekli becerilere sahip olması gerekir.

4.8 Titreşimin Temel Kavramları

Titreşim ile ilgili temel kavramlar şu şekildedir.

4.8.1 Titreşim İncelemelerinin Tarihi

Tarihte titreşime ilgi ilk olarak müzik aletlerinin bulunduğu dönemlerde özellikle de davulun icat edildiği zamanlarda başladı. Yaklaşık ilk çağlardan itibaren müzik aletleri oldukça gelişti. Titreşimi bilimsel bir temel üzerine inceleyen ilk kişi Pisagor kabul edilir. Pisagor monochord adı verilen bir düzenek kullanarak titreşen yay üzerinde deneyler yapmıştır (Rao, 2019). Şekil 4.5’de Monochord şematik görseli gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Monochord (Rao, 2019)

Milattan önce 350 yıllarında Aristo müzik ve ses üzerine bir bilimsel yazı yazdı. Milattan önce 20 yıllarında Romalı mimar Vitruvius tiyatroların akustik özelliklerini inceleyen eser yazdı (Rao, 2019).

Milattan sonra ikinci yüzyıllarda Çinde Zhang Heng depremleri ölçmek için dünyanın ilk sismografını geliştirdi (Rao, 2019).

Galileo Galilei 1638 yılında yayınladığı ‘Discourses Concerning Two New Science’ de titreşim yapan cisimleri inceledi. Rezonans olayıyla titreşim

frekansının sarkaç uzunluğuna olan ilişkisini belirledi. Aynı zamanda frekans, uzunluk, gerilme ve yoğunluk arasındaki bağlantıları da açıkladı (Rao, 2019).

1657'de Florence'da kurulan 'Academia del Cimento' Galileo'nun çalışmalarından esinelenerek kuruldu. Daha sonra 1662'de 'Royal Society of London' ve 1666'da 'Paris Academie des Sciences' takip etti. Robert Hook (1653-1703) titreşim frekansı ile bir perde arasındaki ilişkiyi bulmak için deneyler yaptı, fakat bu deneyleri doğru yapan ve ses bilimine akustik terimini kazandıran Joseph Sauveur'dur. Sauveur yüksek frekansları harmonik ve basit titreşim frekansını da temel frekans olarak adlandırdı. Bir cismin aynı anda birkaç harmoniği ile titreşebileceğini kanıtladı (Rao, 2019).

Sır Isaac Newton (1642-1727) 1686'da açıkladığı 'Philosophiae Naturalis Principia Mathematica' adlı eserinde evrensel çekim yasası ile birlikte hareket kanunlarını ve diğer önemli buluşlarını da yayınlamıştır. Newton'un ikinci hareket yasası titreşen cisim hareket denklemlerini bulmada yaygın olarak kullanılmaktadır (Rao, 2019).

Titreşen sicim probleminin teorik çözümü Brook Taylor isimli bir İngiliz matematikçi tarafından 1685-1713 seneleri arasında keşfedildi. Taylor tarafından türetilen hareket denkleminde oluşturulan doğal titreşim frekans değeri Galileo ve Mersenne tarafından gözlenen deneysel verilerle uydu. Taylor'un oluşturduğu hareket denklemi Daniel Bernoulli (1700-1782), Jean D'Alembert (1703-1783) tarafından daha iyi hale getirildi (Rao, 2019).

Sicimin aynı anda var olan birkaç harmonikle titreşme olasılığı Daniel Bernoulli'nin 1755 yılında Berlin'de yayınlanan makalesinde dinamik denklemler aracılığıyla kanıtlandı, süper pozisyon ilkesi olarak isimlendirildi. Bu ilkenin gerçekliği J.B.J Fourier (1768-1830) 1822 yılında yayınlanan 'Analytical Theory of Heat' isimli makalede ispat edildi (Rao, 2019).

Lagrange 1759 yılında sonlu sayıda eşit aralıklı özdeş kütleli parçalardan eşit bağımsız frekansların sayısının varlığını gösterdi. Titreşim üzerine yazılmış günümüz kitaplarda, hareket diferansiyel denklemini çıkartma yöntemi D'Alembert tarafından 1750'de geliştirildi. Farklı şekillere sahip mesnetli ince kırımların titreşimi ilk olarak 1744 yılında Euler ve 1751 yılında Daniel Bernoulli tarafından incelendi ve bu yaklaşıma Euler-Bernoulli veya ince kırım teorisi olarak adlandırıldı (Rao, 2019).

Birçok mekanik ve yapısal sistemler üzerinde titreşim çalışmaları uygulandı. Rayleigh yöntemi, enerjinin korunumu ilkesi kullanılarak korunumlu bir sistemin temel titreşim frekansı bulma yöntemidir. Zor titreşim problemlerinin çözümünde kullanılan faydalı bir yöntemdir. Titreşim Teorisine katkıda bulunanlar arasında Stodola, De Laval, Timishenko ve Mindlin isimleri öne çıkmaktadır. Aurel Stodola kiriş, membranların titreşim gözlemlerinde bulundu, Türbin bıçaklarına da uygulanabilen titreşim yapan kişilerin analizinde kullanılan bir yöntem geliştirdi. C.G.P De Laval yüksek hızlı türbinlerin çelik milinde çatlaklar olduğunu fark edince rotoru montaj etmek için mil olarak bambu takviye çubuklarını kullandı. Bu sayede dengelenmemiş sistemin titreşimi azaltıldı (Rao, 2019).

Stephen Timoshenko kalın kiriş teorisi olarak bilinen kiriş titreşim teorisini buldu. 1950'li yıllara kadar kompleks mühendislik sistemleriyle alakalı titreşim uygulamaları sadece tek serbestlik dereceli kaba sistemlerde uygulanabiliyordu. Fakat gelişen teknoloji ile beraber kompleks sistemlerin incelenmesiyle yaklaşık çözümler üretilmeye başlandı. Sonlu elemanlar yönteminin gelişmesiyle mühendislik hesaplarında binlerce serbestlik derecesine sahip karmaşık mekanik ve yapısal sistemlerde detaylı titreşim analizi yapmayı mümkün kıldı (Rao, 2019).

4.8.2 Titreşim Analizinin Önemi

Son yıllarda yapılan araştırmalarda makinelerin, yapıların, motorların, türbinlerin ve kontrol sistemlerinin tasarımı gibi mühendislik uygulamalarında titreşimin önemi, tasarıma olan önemini geliştirmiştir.

Titreşime maruz kalan yapı veya makine parçalarında, gerilmelerin sürekli değişiminin sebep olduğu malzeme yorulması hasarı oluşabilmektedir. Dişli ve yatak gibi makine elemanlarının aşınmasına sebep olabilmekte ve aşırı gürültülü çalışmalarına neden olur. Makinelerde bağlantı parçaları olan civataların zamanla gevşemesine sebep olur. Titreşim metal kesme, işleme işlemlerinde yüzeyin kötü işlenmesine neden olur.

Titreşim analizlerinin önemli sebepleri özel tasarımlar ve yataklamalarla titreşimi azaltmaktır. Titreşimin olumsuz yönlerinden ziyade olumlu etkileri de endüstride kullanılmaktadır. Çalışma prensibinde titreşim olan elekler, vibrasyonlu ayırıcılar, masaj aletleri, otomatik diş fırçaları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.9 Titreşim

Titreşim, bir nesnenin düzenli veya düzensiz bir şekilde referans konumundan hareket etmesiyle oluşan mekanik bir dalgadır. Bir başka ifadeyle titreşim, belirli bir merkez etrafında bir kütlenin tekrarlanan hareketi olarak da ifade edilebilir. Titreşimin türü ve şiddeti, kaynağına ve salınım yapan cismin özelliklerine bağlı olarak değişir (Karadayı, 2011).

4.9.1 Genlik

Genlik, bir titreşim sinyalinin en yüksek noktası ile en düşük noktası arasındaki fark olarak tanımlanır. Genlik, titreşimin şiddetini gösteren bir ölçüttür. Birimi hız, ivme ve yer değiştirme birimlerinden biri olabilir. Titreşim genlik değeri dört farklı şekilde ifade edilebilir. Tepe değer, tepeler arası değer, RMS (kök ortalama kare) ve ortalama değer.

4.9.1.1 Yer değiştirme (Deplasman)

Bir titreşen cismin denge konumundan uzaklığıdır. Milimetre (mm) veya mikron metre (μm) gösterilir. Titreşim ile geçen zaman arasındaki eşitlik 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

$$\theta = \omega t \quad (4.1)$$

$$x(t) = X \sin(\omega t) \quad (4.2)$$

Eşitlikte θ açısal hız, X hareketin genliği, ω hareketin frekansı ve t zamandır.

4.9.1.2 Hız

Kütlenin kuvvet etkisi altında birim zamanda aldığı yoldur. Hız, yer değiştirmenin matematiksel olarak türevidir. Birimi m/s’dir. Eşitlik 4.3’de gösterilmiştir.

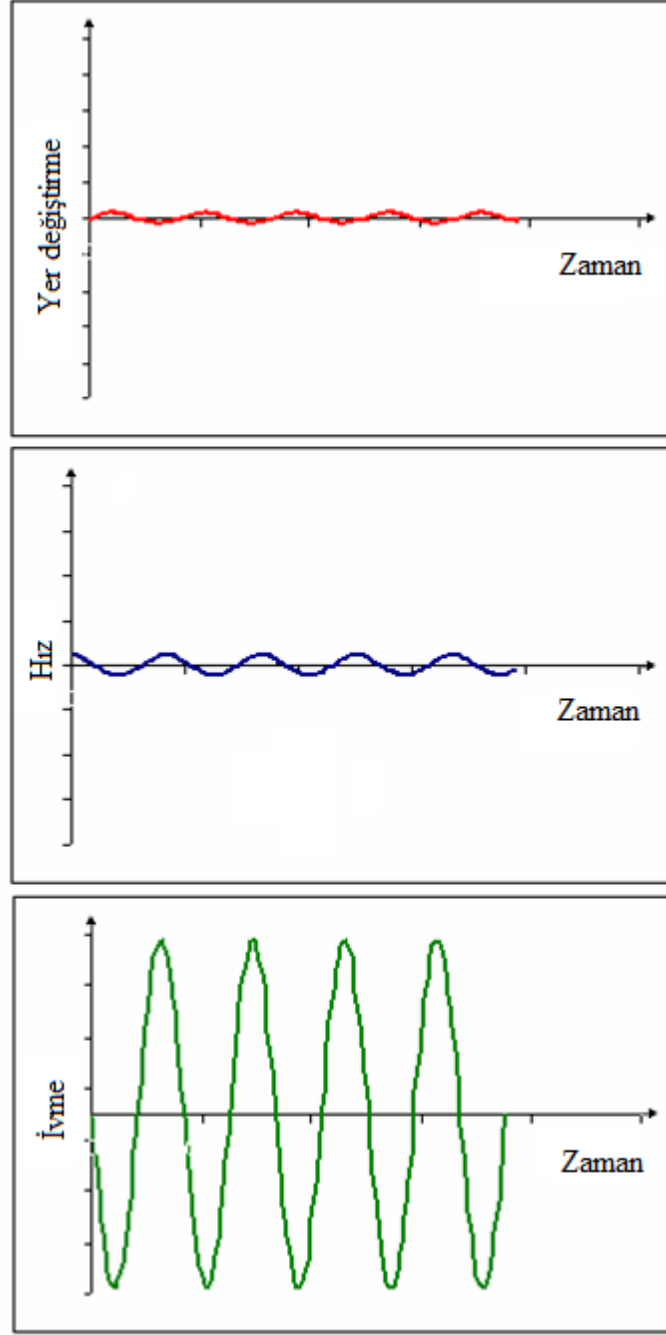
$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega X \cos(\omega t) \quad (4.3)$$

4.9.1.3 İvme

Hızın birim zamanda türevidir. Eşitlik 4.4’de ivme formülü verilmiştir.

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 X \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

Şekil 4.6’da yer değiştirme, hız, ivme dalgaları verilmiştir.



şekil 4.6. İvme, hız, yer değiştirme dalgaları (Çay, 2006)

4.9.1.4 Tepe Değer (Peak)

Titreşim sinyalinin en yüksek noktasıdır. Genlik ile aynı anlamda kullanılsa da, peak tek bir noktaya odaklanırken, genlik sinyalin tümünü kapsar. Peak değerini yorumlarken, ekipman türü, çalışma hızı ve ekipman durumu gibi

faktörler mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Peak değerinin yüksek olması her zaman bir arıza olduğuna işaret etmez (Kalyoncu, 2004)

4.9.1.5 Tepeler Arası Değer (Peak to Peak)

Titreşim sinyalinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki farktır (Kalyoncu, 2004).

4.9.1.6 RMS (Root Mean Square)

Titreşim sinyalinin gücünü ölçmek için kullanılan bir parametredir. Sinyalin zamana göre karesi alınarak ortalaması hesaplanır ve karekökü alınarak rms değeri bulunur (Kalyoncu, 2004). Tablo 4.2’de rms ile peak to peak farkları verilmiştir.

Tablo 4.2. Rms ile peak to peak farkları

RMS	Tepeler Arası Değer (Peak to Peak)
Sinyalin gücünü ölçer	En yüksek ve en düşük noktalar arasındaki mutlak fark
Sinyalin tümünü kapsar	Tek bir noktaya odaklanır
Arıza teşhisi, sinyalin gücünün değerlendirilmesi, ekipmanın durumunun izlenmesi, farklı ekipmanların karşılaştırılması	Arıza teşhisi, sinyalin genlik aralığının değerlendirilmesi, darbe ve şokların tespiti

4.9.1.7 Ortalama (Average)

Bir titreşim sinyalinin genlik değerlerinin ortalamasıdır. Bu değer, sinyalin zaman içindeki genel eğilimini gösterir (Kalyoncu, 2004).

4.9.2 Periyot (T)

Salınımın belirli bir zaman aralığında tekrar eden bir örüntüye sahip olma özelliğine sahip olması, periyodiklik olarak adlandırılır. T ile gösterilir.

4.9.3 Frekans (f)

Salınımın bir saniyede gerçekleşen tekrar sayısıdır. Titreşimin bir çevrimi için geçen süre, periyodun tersidir. Başka bir deyişle, periyot titreşimin bir dönemi boyunca tamamlanması için gereken süredir. Birimi Hertz’dir. Eşitlik 4.5’te gösterilmiştir.

$$F = \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

RPM dakikadaki devir cinsinden ölçülen titreşim verilerini analiz etme işlemidir. Frekansın birimidir. $1 \text{ Hz} = \text{RPM}/60$ ‘dır

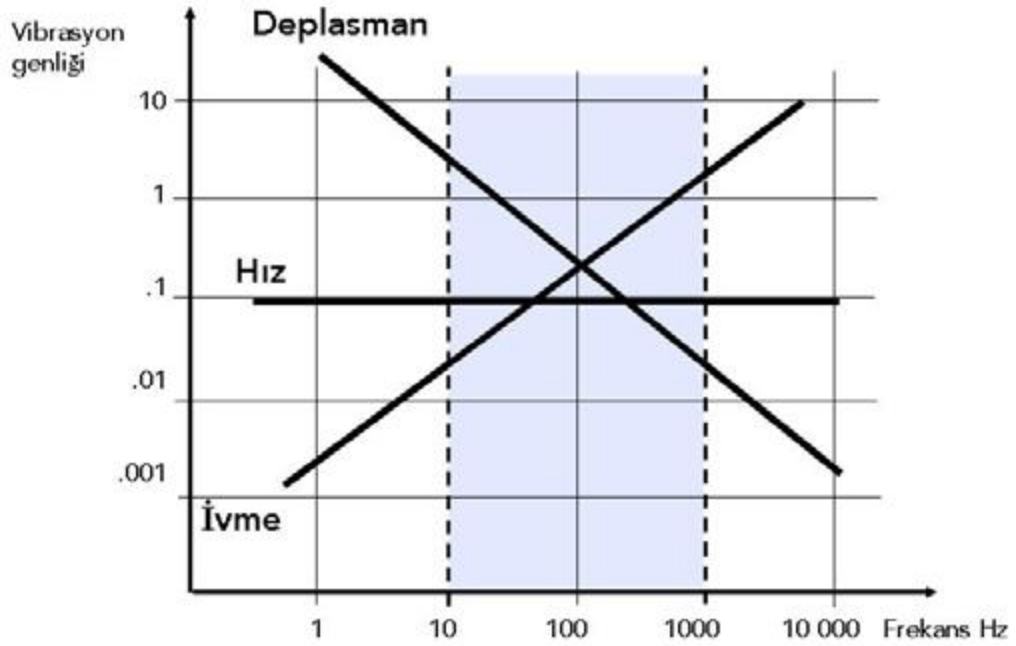
Titreşimin frekansı ve genliği, makinenin çalışma durumuna ve arıza olup olmadığına dair bilgi verir. RPM titreşim analizinde, titreşim verileri sensörler aracılığıyla toplanır ve analiz edilir. Veriler, frekans spektrumu veya zaman dalgası grafiği gibi farklı formatlarda sunulabilir (Rao, 2019).

RPM titreşim analizinde;

- Arızaların önceden haberini vermek
- Ekipmanın durumunu izlemek
- Ekipmanın ömrünü uzatmak
- Makinelerin çalışma verimliliğini artırmaya yardımcı olur

RPM motorlarda, pompalarda ve fanların dönen ekipmanlarında, dönen ekipmandaki arızaları teşhis etmek için kullanılır.

Frekans ve genlik arasındaki ilişki Şekil 4.7’de genlik-frekans grafiğinde verilmiştir.



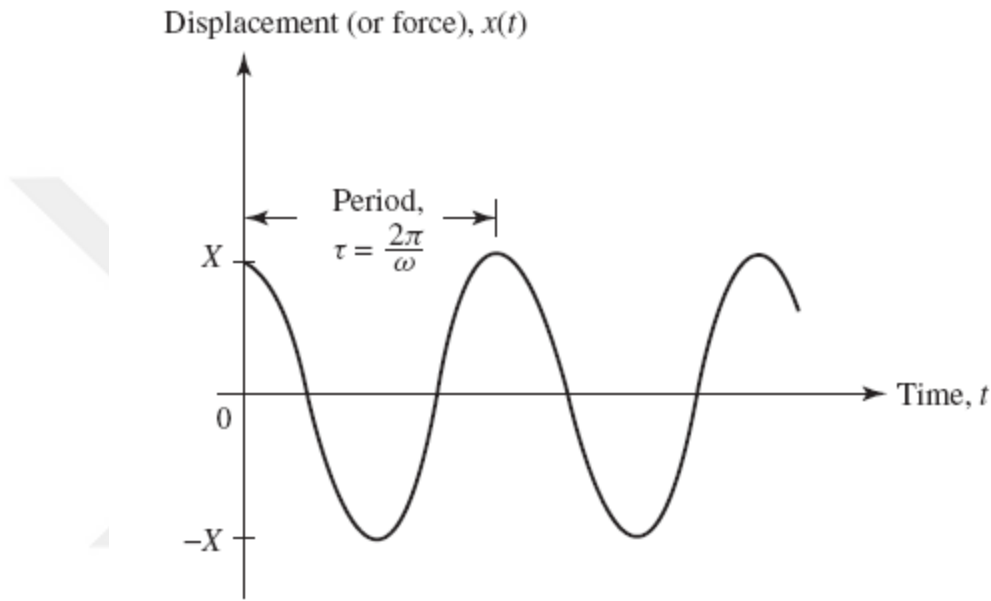
Şekil 4.7. Genlik-frekans grafiği (Karadayı, 2011)

4.9.4 Açısal Frekans (ω)

Bir saniyede tamamlanan salınım sayısını temsil eder. Açısal frekans, rad/s veya ω sembolü ile gösterilir. Birimi rad/s'dir ve $\omega=2\pi f$ ile ifade edilir (Karahan, 2005).

4.9.5 Harmonik

Salınımın sinüs veya kosinüs fonksiyonu ile ifade edilebilen bir örüntüye sahip olmasıdır. Şekil 4.8'de harmonik hareketi gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.8. Harmonik hareket (Rao, 2019)

4.10 Titreşimin Sınıflandırılması

Titreşimin önemli sınıflandırmalarından bazıları şöyledir.

4.10.1 Serbest ve Zorlanmış Titreşim

Serbest titreşim, bir sistemin dış bir kuvvet uygulanmadan veya harici bir etki olmadan hafifçe hareketlendirilip kendi başına titremeye devam ettiği bir titreşimdir. Bu tür titreşimler, sistemin doğal frekanslarında ve modlarında gerçekleşir ve genellikle dış müdahale olmaksızın devam eder. Bu durum, sistemin kendi dinamik özelliklerine dayanarak oluşur. Yani bir sisteme ilk anda bir başlangıç hızı veya yer değiştirme verilir ve sistem kendi haline bırakılır. Sistem, doğal frekansında titreşmeye başlar. Dışarıdan herhangi bir kuvvet

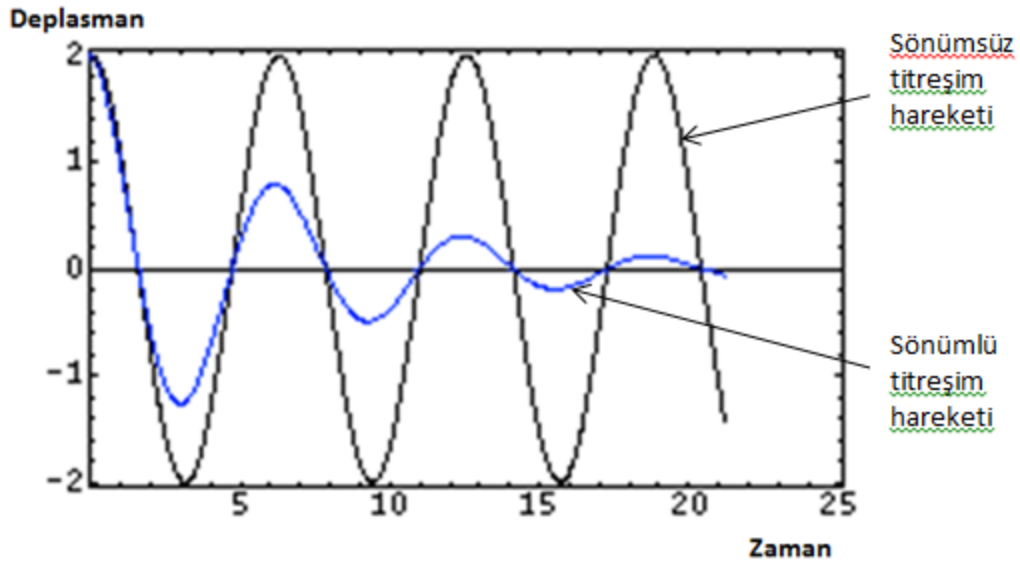
uygulanmaz. Sönümlenme olmadığı sürece titreşim sonsuza kadar devam eder. Örneğin; bir gitar telinin titremesi gibi.

Zorlanmış titreşim, sistem dış bir zorlamaya maruz bırakıldığında oluşan titreşim olarak bilinir. Bir sisteme, sistemin doğal frekansı ile aynı veya farklı bir frekansta periyodik bir kuvvet uygulanır. Sistem, uygulanan kuvvetin frekansında titreşmeye başlar. Sistemin doğal frekansı ile uygulanan kuvvetin frekansı eşleştiğinde rezonans meydana gelir ve titreşim genliği artar. Uçak kanatlarında, binalarda, köprülerde oluşan hasarlar rezonans ile ilişkilendirilir.

4.10.2 Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler

Bir sistemde titreşim, sürtünme ve dirençle enerjisi kaybolmadığı titreşim sönümsüz titreşimdir. Gerçekte sönümsüz titreşim yoktur, ancak bazı sistemlerde sönümleme çok azdır ve ihmal edilebilir. Sönümsüz titreşim, matematiksel modellemelerde ve teorik analizlerde kullanılır.

Sistemde sürtünme ve dirençle enerji kaybı olduğunda sönümlü titreşim olarak adlandırılır. Şekil 4.9’da sönümlü ve sönümsüz titreşim hareketinin grafiği verilmiştir.



Şekil 4.9. Sönümlü ve sönümsüz titreşim hareketinin grafikleri (Bilge, 2015)

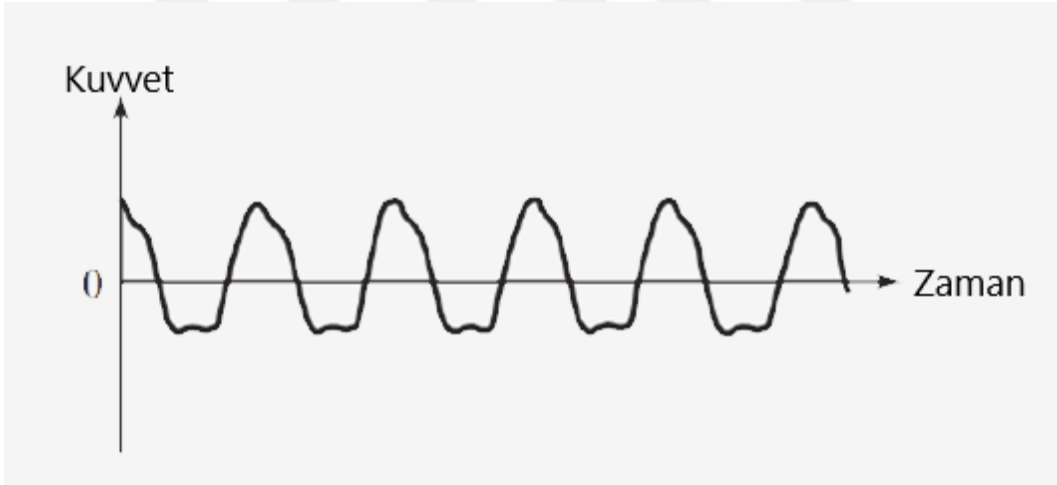
4.10.3 Lineer ve Nonlineer Titreşimler

Bir titreşim sisteminde bütün bileşenler lineer davranış gösteriyorsa ortaya çıkan titreşim lineer titreşim olarak adlandırılır. Sistemin parametreleri sabittir ve titreşim genliği ile değişmez. Rezonansta genlik, uygulanan kuvvetin genliği ile orantılı olarak artar. Çözümler analitik yöntemlerle bulunabilir.

Titreşim sisteminin bileşenleri (yay, kütle, sönümleyici) nonlineer olarak davranış göstermesi durumunda ortaya çıkan titreşim nonlineerdir. Sistemin parametreleri değişkendir ve titreşim genliği ile değişebilir. Rezonansta genlik, uygulanan kuvvetin genliği ile orantılı olarak artmaz. Çözümler genellikle sayısal yöntemlerle bulunur.

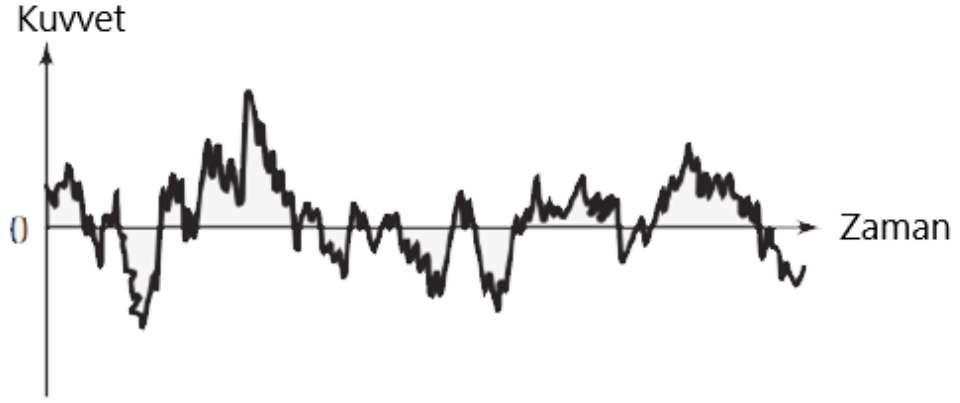
4.10.4 Deterministik ve Random Titreşim

Titreşim sistemi üzerine etki eden uyarının değeri ya da şiddeti bilindiğinde uyartı deterministik (periyodik) olarak adlandırılır. Ortaya çıkan titreşim de deterministik titreşim olarak bilinir. Şekil 4.10'da periyodik hareketin görseli mevcuttur.



Şekil 4.10. Periyodik hareket (Rao, 2007)

Bazı durumlarda etki eden uyarının değeri öngörülemez. Bu uyarıların titreşimleri random titreşim olarak adlandırılır. Şekil 4.11'de gelişigüzel hareketin zamana bağlı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.11. Gelişigüzel hareket (Rao, 2007)

4.11 Titreşim Standartları

Titreşim analizleriyle bulunan değerlerin uygun olup olmadıkları uluslararası standartlar ile kabul edilir. Uluslararası kabul edilen standart ISO 2372 no'lu standarttır. Şekil 4.12'de ISO 2372 tablosu verilmiştir.

TİTREŞİMİN DERECESESİ				RMS
Sınıf I	Sınıf II	Sınıf III	Sınıf IV	mm/s
A	A	A	A	0,28
				0,45
				0,71
B	B	B	A	1,12
1,8				
C	C	C	B	2,8
D	D	C	B	4,5
				7,1
		D	C	11,2
				18
			D	D
45				

Şekil 4.12. Iso 2372 (Karadayı, 2011)

- A: iyi
B: yeterli
C: yetersiz
D: kabul edilemez

Ölçüm cihazındaki genel titreşim şiddet ölçeğine alternatif olarak, genel titreşim seviyelerinin şiddetini değerlendirmek için ISO Standardı 10816-1'i kullanıldı. Şekil 4.13 bu standardın değerlerini içeren bir çizelgedir. Titreşim şiddetini belirlemek için, ölçüm cihazıyla ölçülen genel titreşim değeri bu tabloyla karşılaştırıldı. Standart tablosunda belirtilenler harflerin açılımları şöyledir.

Makine		Sınıf I Küçük Makineler	Sınıf II Orta Makineler	Sınıf III Büyük Sert Kaide	Sınıf IV Büyük Yumuşak Kaide
inç/sn	mm/sn				
Titreşim Hızı Vrm	0,01	0,28		İYİ	
	0,02	0,45			
	0,03	0,71			
	0,04	1,12			
	0,07	1,80			
	0,11	2,80	YETERLİ		
	0,18	4,50			
	0,28	7,10	YETERSİZ		
	0,44	11,20			
	0,70	18,00			
	1,10	28,00	KABUL EDİLEMEZ		
	1,77	45,9			

Şekil 4.13. Iso 10816-1 (Fluke 805/805 fc kullanım kılavuzu)

Standart tablosunda kullanılan makineler genellikle şu şekilde sınıflandırılır.

Sınıf I : Maksimum 15 kw'daki elektrik üretim motorları bu kategorideki makinelere örnektir.

Sınıf II : Özel kaidesi olmayan orta büyüklükteki makineler (15 kw ile 75 kw çıkışlı tipik elektrikli motorlar)

Sınıf III : Gücü 75 kw'dan yukarı ve döner kütleleri titreşim ölçümlerinin yönünde nispeten katı olan sert ve ağır kaidelere monte edilmiş büyük güç kaynakları ve diğer büyük makineler.

Sınıf IV : Gücü 75 kw'dan yukarı ve döner kütleleri titreşim ölçümlerinin yönünde nispeten yumuşak olan kaidelere monte edilmiş büyük güç kaynakları ve diğer büyük makineler. (örneğin 10 mw'dan fazla çıkışlı turbo jeneratör setleri ve gaz türbinleri) (Karadayı, 2011)

4.12 Arıza İle Titreşim Arasındaki İlişki

Makinelerde yahut sistemlerde oluşan sürekli ve yüksek seviyede vibrasyonlar, makine parçalarının aşınmasına ve hasar görmesine neden olabilir. Titreşimler sebebiyle yatak yüzeylerinde pürüzlere ve çatlaklar oluşabilmekte ve nedenden dolayı rulmanlarda erken arıza riskini artırır. Titreşimler, makine parçalarının ve bileşenlerinin birbirine bağlandığı noktalarda gevşemelere neden olurlar. Gevşek bağlantılar, parçaların yerinden oynamasına ve hatta ayrılmasına yol açmaktadır.

Bazı durumlarda makinelerde yahut sistemlerde meydana gelen titreşimler, makinelerin doğru şekilde dengelenmemiş veya ayarlanmamış olabileceğini de gösterir. Dengesizlik ve hatalı ayarlar, makinelerin performansını düşürür ve parçalarda daha hızlı aşınma gözlemlenir. Yüksek seviyedeki titreşimler, makinenin genel performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Titreşimler nedeniyle işleme hassasiyeti azalabilir ve üretim kalitesi düşer. Ayrıca, titreşimler nedeniyle üretim hızı düşebilir ve bunun sonucunda verimlilik kaybı yaşanır.

İstenmeyen titreşimler, makinedeki sürtünme ve direnç artışına sebep olur, bu da daha fazla enerji tüketimine ve işletme maliyetlerinin artmasına yol açar. İstenmeyen titreşimlerin sebep olabileceği durumlardan ötürü makinelerdeki titreşimleri izlemek, tanımlamak ve azaltmak önemlidir. Titreşim analizi, makine performansını optimize etmek ve erken arıza tespiti yapmak için önemli bir araçtır. Ayrıca, makinelerin düzenli bakımı ve dengelemesi, titreşimlerin kontrol altında tutulmasına ve olası zararların önüne geçilmesini sağlar.

4.13 Titreşimde Yapısal Frekans

Titreşim, sistemlerin performansını ve uzun ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Yapısal frekanslar, pompanın titreşim davranışını anlamada kritik bir rol oynar. Yapısal frekans, bir yapının serbest titreşimlerinde doğal olarak titreştiği frekanstır. Bu frekans, yapının kütlesi, sertliği ve şekli gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Her yapının bir veya daha fazla doğal frekansı vardır.

Santrifüj pompalar, döner parçalar içerir ve bu parçalar çalışırken titreşim üretebilir. Eğer bu titreşimler yapısal frekanslarla örtüşürse, rezonans adı verilen bir durum oluşabilir. Rezonans, titreşimlerin büyük değerlere ulaşmasına ve yapı üzerinde zarar verici etkiler yaratmasına neden olur. Yapısal frekansta rezonans, pompa ve bağlı bileşenlerde mekanik hasara yol açabilir. Bu tür hasar, pompanın ömrünü kısaltabilir ve bakım maliyetlerini artırabilir. Yapısal frekansların rezonansa girip girmediğini kontrol etmek, titreşim kaynaklı sorunları önlemeye yardımcı olur ve güvenli bir çalışma sağlar.

Rayleigh Yöntemine göre doğal frekans hesabı Eşitlik 4.6, 4.7 ve 4.8’de gösterilmiştir.

- Potansiyel Enerji= V_{max} $V_{max} = \frac{1}{2}(m_1 g \omega_1^2 + m_2 g \omega_2^2 + \dots)$ (4.6)
- Kinetik Enerji= T_{max} $T_{max} = \frac{\omega^2}{2}(m_1 \omega_1^2 + m_2 \omega_2^2 + \dots)$ (4.7)

$$V_{max} = T_{max}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g(m_1 \omega_1^2 + m_2 \omega_2^2 + \dots)}{(m_1 \omega_1^2 + m_2 \omega_2^2 + \dots)}} \quad (4.8)$$

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve yöntem bölümünde, tez çalışmasında kullanılan araçlar ve yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Vibrasyon analizinde kullanılan ölçüm cihazının özelliklerinde bahsedilmiş, ölçüm yapılan pompa ve pompada kullanılan rulmanlar hakkında bilgi verilmiştir.

5.1 Materyal

Bu bölümde materyal bölümünde kullanılan cihaz ve ölçüm alınan makine ekipmanları hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

5.1.1 Deney Esnasında Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

Fluke 805 titreşim ölçer cihazı, genel titreşim ölçümleri için üretilmiş bir tarama aracıdır. Genel titreşimin yanı sıra yatak durumu ve sıcaklık gibi belirli değişkenleri ölçmek, daha kapsamlı bir sonuç elde etmeye yardımcı olabilir. Fotoğraf 5.1’de fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı gösterilmiştir.



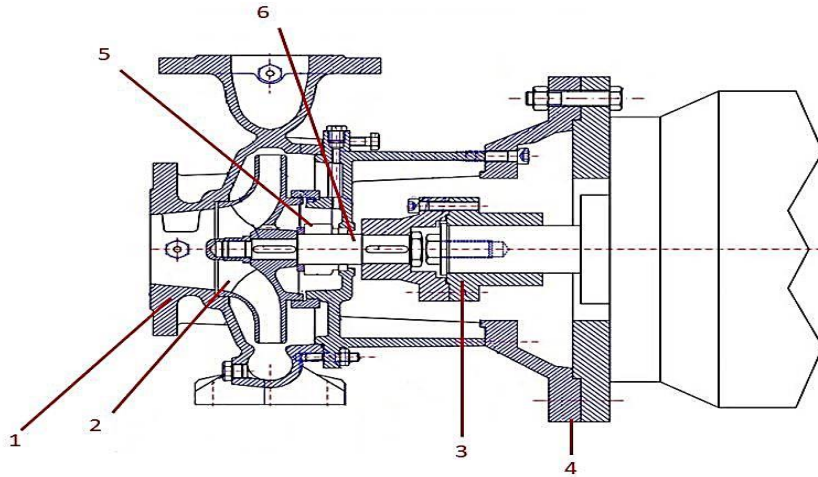
Fotoğraf 5.1. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı

5.1.2 Uygulamada Ölçüm Alınan Pompalar

Santrifüj pompalar, sıvıların alçak bir seviyeden yüksek bir seviyeye taşıyan roto-dinamik tipte pompalar olarak sınıflandırılırlar. Santrifüj pompalar, iki ana kısım olan dönme hareketi yapan bir çark ve pompa gövdesinden meydana gelir. Gövdede emme ve basma kısımlar mevcuttur (Geçit, 2006).

Çarkın göz kısmından sıvı akışkan aksel olarak girer ve çarkın dönel kanatlara ulaşır. Çarkın kanatlarının meydana getirdiği kinetik enerji transferiyle akışkan teğetsel ve radyal yönde hız kazanır. Hem basınç hem de hız kazanan akışkan, salyangoz gövdenin içerisinde, radyal olarak dışarı savrulur ve çarkı terk eder.

Santrifüj pompalar, akışkanı sürekli bir şekilde belli bir seviyeden diğer seviyeye taşır. Devir sayısı arttıkça, sıvının basıncı da artar. Santrifüj pompaların kullanımları genellikle kirli ve tortulu sıvıları pompalayabilmek için yüksek basınç oluşturabildiğinden tercih edilir. Sağlam ve dayanıklı olması, kolay kurulumu ve bakımının da kolaylığından ötürü endüstrilerde tercih edilme sebeplerindendir. Ancak santrifüj pompalar biraz maliyetli pompalardır. Şekil 5.1’de bir santrifüj pompa teknik resmi verilmiştir.



Şekil 5.1. Santrifüj pompa kesit görünümü (1: Pompa gövdesi, 2: Çark, 3: Kaplin, 4: Flanş, 5: Mekanik salmastra, 6: Mil)

Yapılan bu tez çalışmasının uygulama kısmında inceleyeceğimiz santrifüj pompalar tesiste kızgın yağ transferinde kullanılmaktadır. Fotoğraflar 5.2 ve 5.3’de inceleme yapacağımız santrifüj pompalar gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.2. Alt tabaka kızgın yağ pompaları



Fotoğraf 5.3. Üst tabaka kızgın yağ pompası

Kızgın yağda kullanılan santrifüj pompalar, genellikle 150°C ve üzeri sıcaklıklarda çalışan endüstriyel sistemlerde kullanılan özel bir türdür. Piyasada kızgın yağ pompası adı altında tanımlanmışlardır. Bu pompalar, ısı transfer yağlarını yüksek sıcaklıklarda transfer etmek ya da dolaştırmak için tasarlanmıştır. Kızgın yağ pompaları, genellikle ısı transfer sistemlerinde, termal yağ kazanlarında ve endüstriyel ısıtma uygulamalarında kullanılır. Kızgın yağ pompalarının yapısında genellikle yüksek sıcaklıklara dayanabilen paslanmaz çelik ve özel alaşımlar sıkça kullanılan malzemelerdir. Yüksek sıcaklık dayanıklılığına ek olarak, düşük viskoziteli sıvıları etkili bir şekilde taşıma kapasiteleri vardır. Termal genleşmeye karşı direnç göstermek ve kavitasyonu önlemek için özel tasarımlara sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda çalışmaları için, motor ve diğer bileşenler de yüksek sıcaklık dayanıklılığına sahip olmalıdır. Çalışma koşulları yüksek sıcaklıklarda oldukları için düzenli bakım gerektirirler. Yağ seviyeleri, contaları ve bağlantı noktaları düzenli olarak kontrol edilmelidir. Aksi takdirde bu bağlantı noktalarından kızgın yağ kaçağı oluşabilir, Böyle bir durum iş güvenliği açısından oldukça riskli bir durumdur. Fotoğraf 5.4'de orman ürünleri endüstrisinde kullanılan bir santrifüj pompanın ana bileşenleri görülmektedir.



Fotoğraf 5.4. Kızgın yağ pompası ana bileşenler

Kızgın yağ pompaları, endüstride sıcaklık kontrolü sağlamak için önemli bileşenlerdir. Bu pompaların düzenli bakımı, performansı ve güvenilirliğini için son derece önemlidir.

Yağlama sistemi, pompadaki hareketli parçaların aşınmasını azaltır ve sürtünmeyi azaltır. Düzenli aralıklarla yağ seviyeleri kontrol edilmeli ve gerektiğinde yağ eklenmelidir. Pompaların dış yüzeyi düzenli olarak temizlenmeli ve yağ, kir veya diğer kirliliklerden temizlenip arındırılması gerekmektedir.

Kızgın yağ pompalarının rulmanları, yüksek sıcaklık koşullarına dayanıklı özel rulmanlar olmak zorundadır. Eğer kızgın yağa dayanımı olmayan, standart rulman kullanılması durumunda rulman, sıcaklık ve devir etkisi ile ömrünü çok kısa sürede tamamlayarak dağılır ve pompada rulman arızası meydana gelir. Bu sebeple rulman seçerken uygun rulmanın olup olmadığı kontrol edilmelidir. Rulmanlarda aşınma, kavitasyon veya hasar oluşması durumunda, değişimler yapılmalıdır.

Kızgın yağ pompalarının düzenli bakımı için bir bakım takvimi oluşturulmalı ve bu takvim titizlikle uygulanmalıdır. Bakım işlemleri ve yapılan değişikliklerle ilgili kayıtlar tutulmalıdır. Bu, gelecekteki bakım ihtiyaçlarını belirlemek için önemli bir kayıt olmaktadır.

Kızgın yağ pompalarının düzenli bakımı, sistemin verimliliğini artırır, maliyetlerini düşürür ve en önemlisi iş güvenliğini sağlar.

Tesiste kullanılan pompaların teknik özellikler ve pompalarda kullanılan rulmanlar Fotoğraflar 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8’de gösterilmiştir.

MELAMİN ALT PLAKAYA BASAN KÜÇÜK POMPA	
	
ALLWEILER MOTOR: HMC2 132S-2 Hz:50 5,5KW 2940 rpm	
ALLWEILLER NTT 50-160 USA POMPA : P:5kw,2900rpm Q: 53m3/h H:29m	
RULMAN İSMİ: 6306 ZZ C4 WT	

Fotoğraf 5.5. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi

MELAMİN ALT PLAKAYA BASAN BÜYÜK POMPA	
	
ALLWEILER MOTOR: HMC2 180M-2 Hz:50 22KW 2940 rpm	
ALLWEILLER NTT 100-160 USA POMPA : P:23kw,2900rpm Q: 182m3/h H:36,8m	
RULMAN İSMİ: 6306 ZZ C4 WT	

Fotoğraf 5.6. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi

MELAMİN ÜST PLAKAYA BASAN BÜYÜK POMPA



ALLWEILER MOTOR: HMC2 180M-2 Hz:50 22KW 2940 rpm

ALLWEILER NTT 100-160 USA POMPA: P: 23kw, 2900rpm, Q:182m³/h H: 36,8m

RULMAN İSMİ: 6306 2Z C4 WT

Fotoğraf 5.7. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plaka kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi

MELAMİN ÜST PLAKAYA BASAN KÜÇÜK POMPA



HOYER MOTOR: DM1 132S2 Hz:50, 5,5kw 2930 rpm

ALLWEILLER NTT 100-160 USA POMPA: P:18,4kW, 2900rpm Q:180m³/h , H:35m

RULMAN İSMİ: 6306 2Z C4 WT

Fotoğraf 5.8. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plaka küçük kızgın yağ pompasının teknik özellikleri ve pompada kullanılan rulman çeşidi

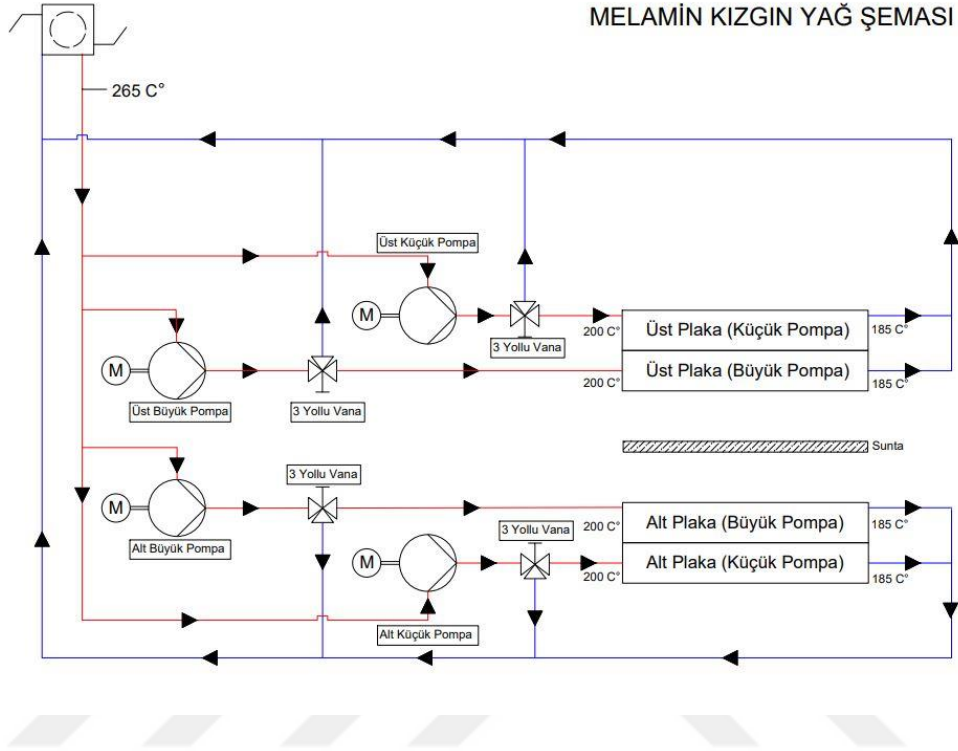
5.1.3 Uygulamada Kullanılan Pompaların Çalışma Prensipleri

Sistemde kullanılan kızgın yağ pompaları sürekli çalışma halindedir. Pompalar kızgın yağı presin alt ve üst plakalarına basmaktadırlar. Üst büyük pompa ve alt büyük pompa presin sunta ile temas eden ana plakalarına kızgın yağ basmaktadır. Üst küçük pompa ve alt küçük pompa ise sunta ile temas eden plakaların altında ve üstünde bulunan plakalara kızgın yağ basar. Bu plakalar, ana plakalardan ayrı olarak sistemde sunta sehim ayarı vermek için kullanılır. Bir başka görevi ise ana plakaların ısı kayıplarını minimuma indirmektir. Üst bloğun ağırlığı alt bloktan fazladır. Üst blok, presin pistonlarına bağlı olduğundan hareketlidir ve sunta basıncı uygulamaktadır. Bundan dolayı üst blok ile alt blok arasında basınç farkı mevcuttur. Üst blok daha ağır olduğundan üst bloğa kızgın yağ basan pompa alt bloğa kızgın yağ basan pompaya nazaran daha fazla yüke maruz kalmaktadır.

Sistemin sıcaklığının düşmemesi istendiği için pompalar sürekli olarak alt ve üst bloka kızgın yağ basarlar. Pompalara aşırı yük binmesini önlemek için, sürekli sirkülasyon olmasını sağlamak ve sıcaklığı stabil tutabilmek için pompaların prese kızgın yağ bastığı hatlarda üç yollu vanalar bulunmaktadır. Üç yollu vanalara kontrol vanası da denmektedir. Kontrolörden gelen sinyalin yönlendirdiği akışın boyutunu değiştirerek akışkanı kontrol etmek için kullanılan parça bir üç yollu vana olarak adlandırılır. Kontrol vanaları, kızgın yağın kullanıldığı tüm proseslerde basınç, sıcaklık, debi ve seviye kontrolü yapılmasını sağlar. Bu vanaların görevi pompalara ana hattan gelen fazla debiyi tahliye ederek pompanın aşırı yüklenmesini önlemek ve bloklara istenilen m^3 'te kızgın yağ pompalanmasını sağlayarak sıcaklığı stabilize etmeye yarar.

5.1.4 Pompaların Kızgın Yağ Akış Şeması

Şekil 5.2’de sistemde kullanılan pompaların kızgın yağ akış şeması verilmiştir.



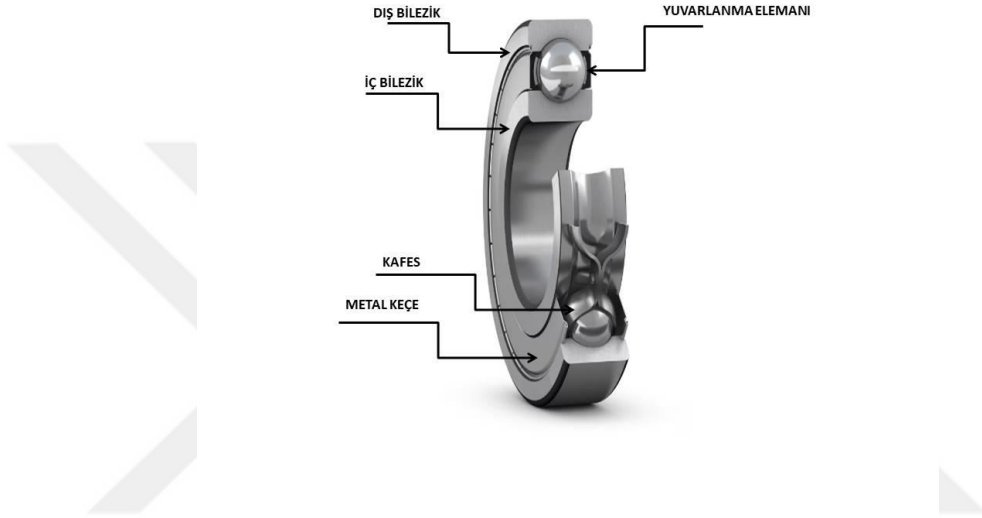
Şekil 5.2. Pompalara gelen kızgın yağın akış şeması

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere kızgın yağ pompalara geldikten sonra fazla olan debi üç yollu vanalar yardımıyla sistemden tahliye edilmektedir. Böylece alt blok ile üst bloka istenilen debide kızgın yağ gönderilmekte ve pompaların aşırı yüklenmesinin önüne geçilmektedir. Presten çıkan ısı kaybetmiş olan kızgın yağ eşanjöre giderek tekrar ısı kazanmakta ve sisteme tekrar girmektedir. Sistem kapalı çevrim bir sistemdir.

5.1.5 Kızgın Yağ Pompalarında Kullanılan Rulmanlar

Rulman, göreceli hareket halinde ki iki parça arasında dönme hareketini minimum sürtünme prensibi ile metal-metal temasını önlemeyi sağlayan, daha az güç harcanarak, yüksek devirlerde çalışabilmeyi mümkün kılan son derece hassas bir makine elemanıdır. Rulmanlar genelde dört ana parçadan meydana

gelmektedir. Şekil 5.3’de, bir rulmanın görüntüsü ve rulmanı oluşturan ana elemanların görüntüsü gösterilmiştir. Rulmanlar, boyutları ve ölçüleri farklı mil ve yataklar için değişik ölçülerde üretilerek yataklama uygulamalarında kullanılırlar. Bir aks veya mil üzerinde düzgün dönüşü sağlamak kullanım amaçlarındandır. Bunu, hareketli parçalar arasında sürtünmeyi azaltarak ve yükü dağıtarak gerçekleştirirler.



Şekil 5.3. Sabit bilyeli rulman

Rulmanlar günümüzde birçok makinede kullanılmakta olup radyal yönde ve eksen yönde gelen yüklere göre tasarlanmakta ve tasarlanan bu rulmanların çeşit çeşit rulman tipleri mevcuttur. En yaygın kullanılan rulman tipleri şu şekildedir.

5.1.5.1 Bilyeli Rulmanlar

Bilyeli rulmanlar, bir yatağın içinde bir sıra bilye bulunur ve bu bilyeler, rulmanın iç ve dış bilezikleri arasında döner. Bilyelerin yuvarlanması, sürtünmeyi önemli ölçüde azaltarak düzgün ve verimli bir dönüş sağlar. Radyal, eksenel veya her iki yönde de yükleri taşıyabilmektedir. Farklı yük kapasiteleri ve dönme hızları için çeşitli boyutlarda ve tiplerde mevcuttur. Maliyetinin düşük ve

ömrünün uzun olması sebebi ile en çok tercih edilen rulman türüdür. Fotoğraflar 5.9 ve 5.10’da bilyeli radyal ve eksenel rulmanların görüntüsü verilmiştir.



Fotoğraf 5.9. Bilyeli radyal rulman



Fotoğraf 5.10. Bilyeli eksenel rulman

Bilyeli rulmanların kullanım alanları oldukça geniştir. Otomobillerden, elektrikli el aletlerine, pompalardan, motorlara, fanlara kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Bilyeli rulmanlar sınırlı eksenel yük kapasitesine sahiptirler ve yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun değildirler. Şok ve titreşime karşı hassastırlar. Bu sebeplerden dolayı bilyeli rulmanların kullanım alanları sınırlıdır. Bu gibi durulardan bilyeli rulmanların dezavantajlarındanır.

5.1.5.2 Makaralı Rulmanlar

Makaralı rulmanlar, yuvarlanma elemanı olarak silindir makaralar veya konik makaralar kullanan bir rulman türüdür. Makaralar iç ve dış bilezikler arasında döner. Bu makaraların daha geniş temas alanı olması, daha yüksek yükleri taşıyabilmelerini sağlar.

Makaralı rulmanlar, radyal, eksenel veya her iki yönde de yükleri taşıyabilmektedirler. Farklı yük kapasiteleri ve dönme hızları için çeşitli boyutlarda ve tiplerde mevcuttur. Fotoğraf 5.11'de silindirik makaralı rulman, konik makaralı rulman ve eksenel makaralı rulman gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.11. Makaralı rulman

Makaralı rulmanlar, bilyeli rulmanlara göre daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip bir rulman türüdür. Bu sebeple makaralı rulmanlar genellikle daha fazla yük taşınan yerlerde tercih edilir. Bilyeli rulmanlara kıyasla daha düşük sürtünmeye sahiptir. Bu da daha az ısı üretimleri ve daha uzun ömürlü olmaları anlamına gelir. Makaralı rulmanların, bilyeli rulmanlara bir diğer avantajı ise daha yüksek rijitliğe sahiptir. Bu da titreşimi azaltır ve daha hassas kontrol sağlar. Aynı zamanda Makaralı rulmanlar, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir. Bu onların aşırı sıcak veya soğuk ortamlarda çalışabilmesini daha uygun hale getirir.

Kullanım alanları, ağır yük taşıyan makineler, maden ekipmanları, motorlar, rüzgâr türbinleri ve raylı sistemlerdir.

Makaralı rulmanlar, bilyeli rulmanlardan daha büyüktür, bu nedenden dolayı makaralı rulmanlar bazı uygulamalarda kullanılmaya uygun olmayabilirler. Ayrıca makaralı rulmanlar, bilyeli rulmanlardan daha fazla gürültülü çalışırlar. Makaralı rulmanlar, bilyeli rulmanlara göre daha pahalıdır.

5.1.5.3 Yataklı Rulmanlar

Yataklı rulmanlar, hareketli parçaları yataklamak ve desteklemek için kullanılan bir rulman türüdür. Bu rulmanlar, iç bilezik, dış bilezik, yuvarlanan elemanlar ve kafes olmak üzere dört ana bileşenden oluşur. Rulman ve yatağı tek bir üniteye birleştirir. Yatak, rulmanı çevreleyen ve sabitleyen bir yapıdır. Fotoğraflar 5.12 ve 5.13'te yataklı rulman gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.12. Yataklı rulman



Fotoğraf 5.13. Yataklı rulman türü

Uygulama alanları genelde mekanik güç aktarımı olan alanlardır. Bunlar konveyörler, tekstil makineleri, tarım makineleridir.

5.1.5.4 Lineer Rulmanlar

Bir eksenel rulman çeşidi olan lineer rulman, bir eksen üzerinde düzgün ve doğrusal hareket sağlayan bir rulman türüdür. Makinelerde ve cihazlarda sürtünmeyi azaltmak ve hareketi kolaylaştırmak için kullanılır. Genel olarak, düz veya kavisli hareket sistemlerinde tercih edilen bir rulman çeşididir.

Lineer rulmanlar, yüksek hassasiyet, düşük sürtünme, yüksek rijitlik ve uzun ömür gibi birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, CNC makineleri, 3D yazıcılar, robotik kollar, tıbbi ekipmanlar, metal şekillendirme kalıplarında ve makine aletleri gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadırlar. Fotoğraf 5.14’de bir lineer rulman gösterilmiştir.



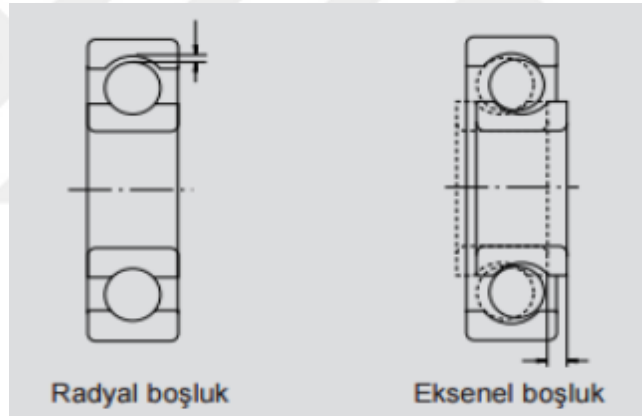
Fotoğraf 5.14. Lineer rulman

Lineer rulmanlar, radyal rulmanlardan daha pahalıdır. Montajları, radyal rulmanlara kıyasla daha karmaşıktır. Lineer rulman seçerken, yük kapasitesi, strok uzunluğu, hassasiyet, hız, çalışma sıcaklığı ve çalışma ortamı gibi faktörleri göz önünde bulundurmak önemlidir.

5.1.5.5 C3, C4 Rulmanlar

C3 ve C4 rulmanlar, aslında sabit bilyeli rulmanlardır. Burada rulmanlarda C3 ve C4 ifadeleri rulmanların iç boşluk sınıflarını ifade eder. Rulman seçimi yaparken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, rulmanlarda bulunan radyal boşluklardır. Rulmanlarda iç boşluklar bulunmaktadır. Bu boşluklar montaj edilmemiş bir rulmanın bileziğinin iç yüzeyi ile bilya veya makara arasındaki mesafeyi ifade eder. İki ayrı sınıfa ayrılırlar. Radyal boşluklar ve eksenel boşluklar.

Rulmanın merkez eksenine dik olarak ölçülen mesafe radyal boşluktur. Eksenel boşluk, bir rulmanın merkez eksen boyunca ölçülen boşluğudur. Şekil 5.4’de rulman boşlukları belirtilmiştir. İç boşluklar rulmanların performansını, ömrünü, gürültü seviyesini, vibrasyonunun ve ısı üretiminin belirlemede oldukça önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 5.4. Rulman boşlukları

C3 ve C4 rulmanlar, standart boşluk sınıflarının dışında yer alır. C3 rulmanlar, genişletilmiş iç boşluklara sahip rulmanları ifade ederken, C4 rulmanlar ise daha da genişletilmiş bir boşluğu temsil eder. Genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalan veya yüksek devirlerde çalışan uygulamalarda bu rulmanlar tercih edilir. Rulman boşluk grupları ISO 5753-1, standartlarında Tablo 5.1’de rulman radyal boşluk tablosu gösterilmiştir.

C1 : Sıkı rulmandan daha sıkı rulmandır.

C2: Normal boşluklu rulmandan daha az boşluklu (sıkı) bir rulmandır.

C0: Normal boşluklu rulmandır.

C3: Normal boşluklu rulmandan daha fazla boşluklu bir rulmandır.

C4: C3 boşluklu rulmandan daha fazla boşluklu bir rulmandır.

C5: C4 boşluklu rulmandan daha fazla boşluklu bir rulmandır.

Tablo 5.1. Rulman radyal boşluk tablosu (1)

Delik çapı		Radyal boşluk									
>	≤	C2		C0 (NORMAL)		C3		C4		C5	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
mm		µm									
14	18	10	20	20	35	35	45	45	60	60	75
18	24	10	20	20	35	35	45	45	60	60	75
24	30	15	25	25	40	40	55	55	75	75	95
30	40	15	30	30	45	45	60	60	80	80	100
40	50	20	35	35	55	55	75	75	100	100	125
50	65	20	40	40	65	65	90	90	120	120	150
65	80	30	50	50	80	80	110	110	145	145	180
80	100	35	60	60	100	100	135	135	180	180	225
100	120	40	75	75	120	120	160	160	210	210	260
120	140	50	95	95	145	145	190	190	240	240	300
140	160	60	110	110	170	170	220	220	280	280	350
160	180	65	120	120	180	180	240	240	310	310	390
180	200	70	130	130	200	200	260	260	340	340	430
200	225	80	140	140	220	220	290	290	380	380	470
225	250	90	150	150	240	240	320	320	420	420	520

Rulmanların radyal boşluk sınıflarına göre seçimini yaparken çalışma şartları göz önüne alınır. Eğer bir rulman normal çalışma koşullarında çalışacak ve rulman bileziklerinden birinin hafif bir pres geçme toleransına sahip olmasını istiyorsanız, normal (C0) boşluklu bir rulman seçilmelidir. Rulman için tatlı sıkı yataklamaya ihtiyaç varsa, azaltılmış radyal boşluk C2 seçilir.

Arttırılmış radyal boşluklara sahip C3, C4 ve C5 rulmanlarda seçim yaparken, yönleri belli olmayan yüklere maruz kalan pres geçme iç ve dış bileziklerde pres geçme, büyük yüklere maruz kalan sıkı geçmeler, iç ve dış bilezikler arasındaki ısı farkı, gövdenin soğutulması veya milin ısınması gibi özel çalışma koşulları dikkate alınarak seçim yapılmalıdır. Tablo 5.2’de C1, C2, C3, C4 ve C5 rulmanların kullanım alanları ve uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 5.2. Rulman boşluk çalışma koşulları ve uygulama

Boşluk Grubu	Tanım	Çalışma Koşulları	Uygulama
C1	<C2	Yüksek çalışma hassasiyeti gerektirir. Küçük radyan ön gerilme gerektirir.	Fener mili silindirik makaralı rulman
C2	<C0	Düşük eksenel yük İç ve dış bilezik tatlı geçme Çok sessiz ve titreşimsiz çalışma	Küçük servo elektrik motorları
C0	Normal Boşluk	Normal çalışma koşullarında Normal mil ve yuva toleransları	Konveyör ruloları
C3	>C0	Normalden yüksek sıcaklıklarda Normalden yüksek mil ve yuva toleranslarında	Elektrik motorları, endüstriyel fanlar
C4	>C3	Yüksek sıcaklıklarda Yüksek toleranslı mil ve yuvalarda	Titreşimli elek rulmanları, sürekli döküm hatlarında, vibrasyon motorlarında
C5	>C4	Çok yüksek sıcaklıklarda Çok yüksek toleranslı mil ve yuvalarda	Fırın arabalarında, tren motorlarında

Rulmanların ömrü, bir rulmanın belirli bir çalışma koşulunda ne kadar süreyle hizmet verebileceğini belirtir. Rulman ömrünü belirleyen faktörler arasında yük, hız, yağlama, titreşim ve çalışma ortamı bulunur. Bu sebeple doğru rulmanı seçme rulmanların ömürlerine etki eden en önemli faktördür.

Fotoğraflar 5.15 ve 5.16’da C3 ve C4 rulmanların görüntüsü verilmiştir.



Fotoğraf 5.15. Sabit bilyeli C3 rulman



Fotoğraf 5.16. Sabit bilyeli C4 rulman

Rulman boşluğu eşitlik 5.1’de gösterildiği gibi matematiksel olarak hesaplanabilmektedir.

$$C=C_{op}+\Delta C_{fit}+\Delta C_{temp} \quad 5.1$$

Kızgın yağ pompalarında genellikle C3 ve C4 rulmanlar kullanılmaktadır.

5.1.6 Deneyde Ölçüm Alınması

Ölçüm cihazı, ölçüm hakkında görsel geribildirim sağlayan bir durum ışığına sahiptir. Yeşil ve kırmızı led’ler ölçüm durumunu ve yapılan ölçümün iyi bir ölçüm olduğunu gösterir. Şekil 5.5’te led renk değiştirdikçe belirtilen durumların listesini içerir.



Şekil 5.5. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı led durumu

Ölçüm cihazı bir makinenin yatak sağlığını ve genel titreşim durumunu ölçer. Üç tür ölçüm mevcuttur; yatak titreşimi, genel titreşim ve sıcaklık. Titreşim ölçüm birimleri kullanıcı tarafından seçilebilir.

Ölçüm yapmak için cihazdaki measure tuşuna basılır ve ölçüm cihazı test yüzeyine dikey olarak yerleştirilir. Yeşil led yanana kadar sensör ucunu test

yüzeyine, sert metal üzerine yuvaya olabildiğince yakın bir şekilde itilir. Yeşil led kapanana kadar Ölçüm cihazını sabit güç uygulayarak olduğu yerde tutun. Test sonuçları ekranda gösterilir. Şekil 5.6'da fluke 805 fc marka vibrasyon ölçüm cihazının ekranı gösterilmiştir.

Yüksek Frekans 4,000 Hz - 20,000 Hz	17/12/2011 09:10 PM Yatak 3 CF+ GOOD	Yatak Titreşimi (CF+)
Genel Titreşimi Frekans Kademesi: 10 Hz - 1,000 Hz	Tüm Vibrasyon 0.02 ^g (pk) GOOD	Genel Titreşimi
Sıcaklık -20°C ile 200 °C	Sıcaklık 68.7 °F ID : TÜR : Kış Thrl Fm RPM : > 600	IR Sıcaklığı

Şekil 5.6. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı ölçüm ekranı

Tepe faktörü (CF+), bir zaman alanı titreşim sinyalinin pik değeri/ RMS değeri oranıdır. Titreşim analizlerinde yatak hatalarını bulmak için bu oranı kullanır. Ancak tepe faktörü yönteminin temel bir kısıtlaması mevcuttur. Tepe faktörü, ilk yatak degradasyonu sırasında pik değeri arttığında yükselir. Daha sonra yatak hasarı kötüleşip RMS değeri arttığında azalır. Düşük tepe faktörü sağlıklı bir yatağa veya önemli ölçüde alçaltılmış bir yatağa işaret ediyor olabilir. Sorun, bu ikisi arasındaki farkı anlamaktır. Ölçüm cihazı, bu sınırlamanın üstesinden gelmek için tescilli tepe faktörü (CF+) algoritmasını kullanır. Kullanıcının yorumlamasını kolaylaştırmak için, CF+ değeri bir şiddet kademesini gösterir. CF+ değeri ne kadar yüksekse, yatak hasarı o kadar fazladır. Şekil 5.7'de CF+ değerleriyle titreşim şiddeti arasındaki ilişkiyi gösterir.

CF+	Şiddeti
1 - 5	İyi
6 - 10	Yeterli
11 ile 15	Yetersiz
15 üzerinde	Kabul edilemez

Şekil 5.7. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı CF+ değerleri

Genel titreşim veya düşük frekans ölçümü şiddet ölçeğini içerir. Şiddet ölçeği, titreşim kaynaklı yıpranmayı iyi, yeterli, yetersiz veya kabul edilemez olarak yorumlayan bir ekran aracıdır. Bu ölçüm için, ölçüm cihazını, test için makine türü veya makine kategorisini tanıyacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. En yaygın kategorilerin listesi ölçüm cihazında programlanmıştır. Ölçüm cihazı bir kategoriye ayarlandığında, farklı makine türlerinin normal titreşim seviyelerini ayarlayabilir. Bu size şiddet ölçeğindeki en iyi doğruluk seviyesini verir. Bu parametreler belirlendikten sonra, ölçüm cihazı alınan her ölçüm için şiddet ölçeğiyle birlikte genel titreşim ve yatak ölçümlerini gösterir. Genel titreşim şiddet ölçeğinde, binlerce endüstriyel makineden gelen istatistiksel veri analizleri kullanılmaktadır. Cihazın şiddet ölçekleri, yalnız 600 RPM ile 10,000 RPM arası hızlardaki makinelere uygundur.

Ölçüm cihazı, daha fazla tanısal test için makine sorunlarını belirleyen bir tarama aracıdır. Ölçüm cihazı, yatak ve genel titreşim ölçümleri için bir titreşim şiddeti ölçeğine sahiptir. Ayrıca, zaman içindeki titreşim ölçümlerinin eğilimini de gösterir. Bir ölçüm yüksek titreşim şiddeti sergilediğinde veya zaman içindeki titreşim şiddetinde olumsuz bir eğilim olduğunda, makinede sorun olabilir.

Bir makine kimliği, makine kategorisi ve >600 RPM dönüş hızları ile yapılan ölçümler her iki şiddet ölçeğini kapsar. İyi bir ölçüm her zaman bir miktar titreşim algılar. Dört şiddet seviyesi mevcuttur. Bu seviyeler iyi, yeterli, yetersiz ve kabul edilemezdir. Şekil 5.8’de farklı şiddet kategorilerini içermektedir.

Ölçek	Önlem
	Onarım işlemi önerilmez.
	Anlık onarım işlemi önerilmez. Ölçümlerin sıklığını artırın ve makinenin durumunu izleyin.
	İlk fırsatta bilgili bir titreşim teknisyeninin daha gelişmiş testler yürütmesini sağlayın. Bir sonraki planlı çalışmaya süresi veya bakım süresi içinde bakım işlemi gerçekleştirmeyi düşünün.
	En kısa sürede bilgili bir titreşim teknisyeninin daha gelişmiş testler yürütmesini sağlayın. Onarım gerçekleştirmek ve hataları önlemek için makineyi hemen kapatmayı düşünün.

Şekil 5.8. Fluke 805 fc vibrasyon ölçüm cihazı şiddet değerleri

Ölçüm alma işlemi Fotoğraf 5.17’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.17. Titreşim ölçümü alma işlemi

Ölçüm alındıktan sonra cihazın ekran görüntüleri Fotoğraflar 5.18 ve 5.19’da verilmiştir.

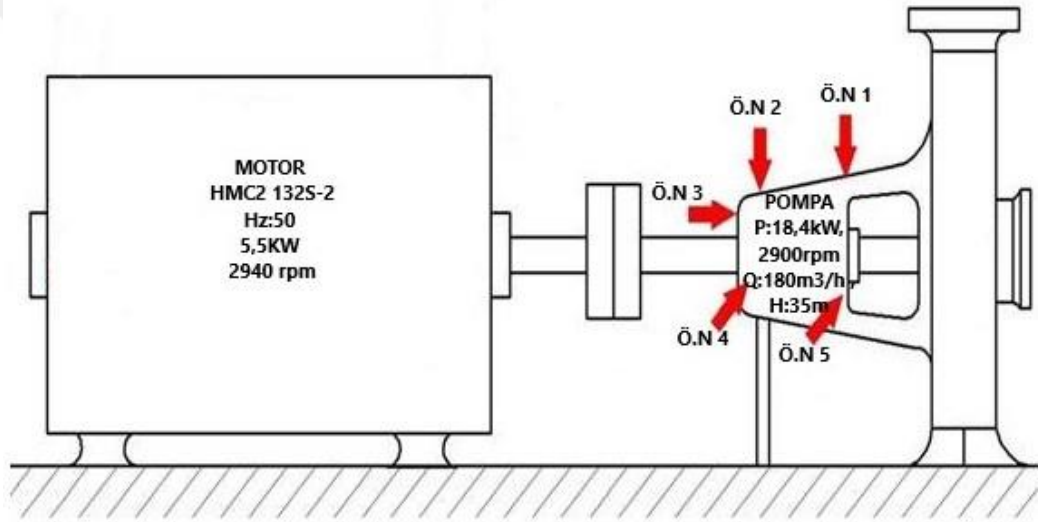


Fotoğraf 5.18. Ölçme cihazı ekran görüntüsü



Fotoğraf 5.19. Ölçme cihazı ekranı

Çalışma kapsamında, orman ürünleri endüstrisinde üretim yapan bir fabrikada bulunan melamin ünitesinde kullanılan dört adet kızgın yağ pompası olan üst plaka büyük kızgın yağ pompası, üst plaka küçük kızgın yağ pompası, alt plaka büyük kızgın yağ pompası ve alt plaka küçük kızgın yağ pompasının titreşim verileri düzenli periyotlarla her hafta pazartesi ve perşembe günleri 16:00-18:00 çalışma saatleri arasında alındı. Ölçüm alırken pompa yatağının ön, arka ve dikey noktaları olmak üzere toplam 5 farklı noktadan vibrasyon ölçümleri alınmıştır. Şekil 5.9'da pompadan ölçüm alınan yerler gösterilmiştir. Alınan ölçümler analiz edilerek pompanın rulmanlarında anomaliler tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Kızgın yağ pompasının ölçüm noktaları

Bu çalışmada, titreşim ölçümü fluke 805 fc marka vibrasyon analiz cihazı kullanılarak pompa iç yatağının eksenel ve yatay yönlerde ölçümleri alınmıştır. Eksenel yöndeki titreşim sinyalleri en güçlü titreşim sinyalleri olduğu için bu yönden ölçülen titreşim değerleri alınmıştır.

5.1.7 Titreşim Analizi İle Arıza Tespiti

Titreşim analizi yöntemi, makinelerde veya sistemlerde arızaları teşhis etmek için kullanılan bir kestirimci bakım metodudur. Bu yöntemde, makinenin

titreşim verileri alınır ve analiz edilir. Elde edilen bu titreşim verileri, arızanın türü, yeri ve hakkında bilgi sağlar.

Makinelerin çalışma esnasında kendilerine özgü bir titreşim karakteristiği bulunur. Bu mevcut titreşimler, makinedeki rulmanlar, miller ve dişli çarklar gibi fiziksel bileşenlerin periyodik hareketiyle ilişkilidir. Makinenin her bir bileşenin titreşimlerini, karakteristik frekansında sinyallerle kendini belli eder. Bu nedenle, bir makinede arıza meydana geldiğinde, titreşim dalgaları arızayı belli edecek şekilde değişir (Samuel & Pines, 2005).

Kestirimci bakım uygulamasının titreşim ölçümüne dayalı uygulanması için ilk adım, makinenin normal çalışma sırasında ürettiği titreşimlerin karakteristiklerinin belirlenmesidir. Makinenin arızasız çalışmasında, titreşim davranışında düzenli bir salınım görülür.

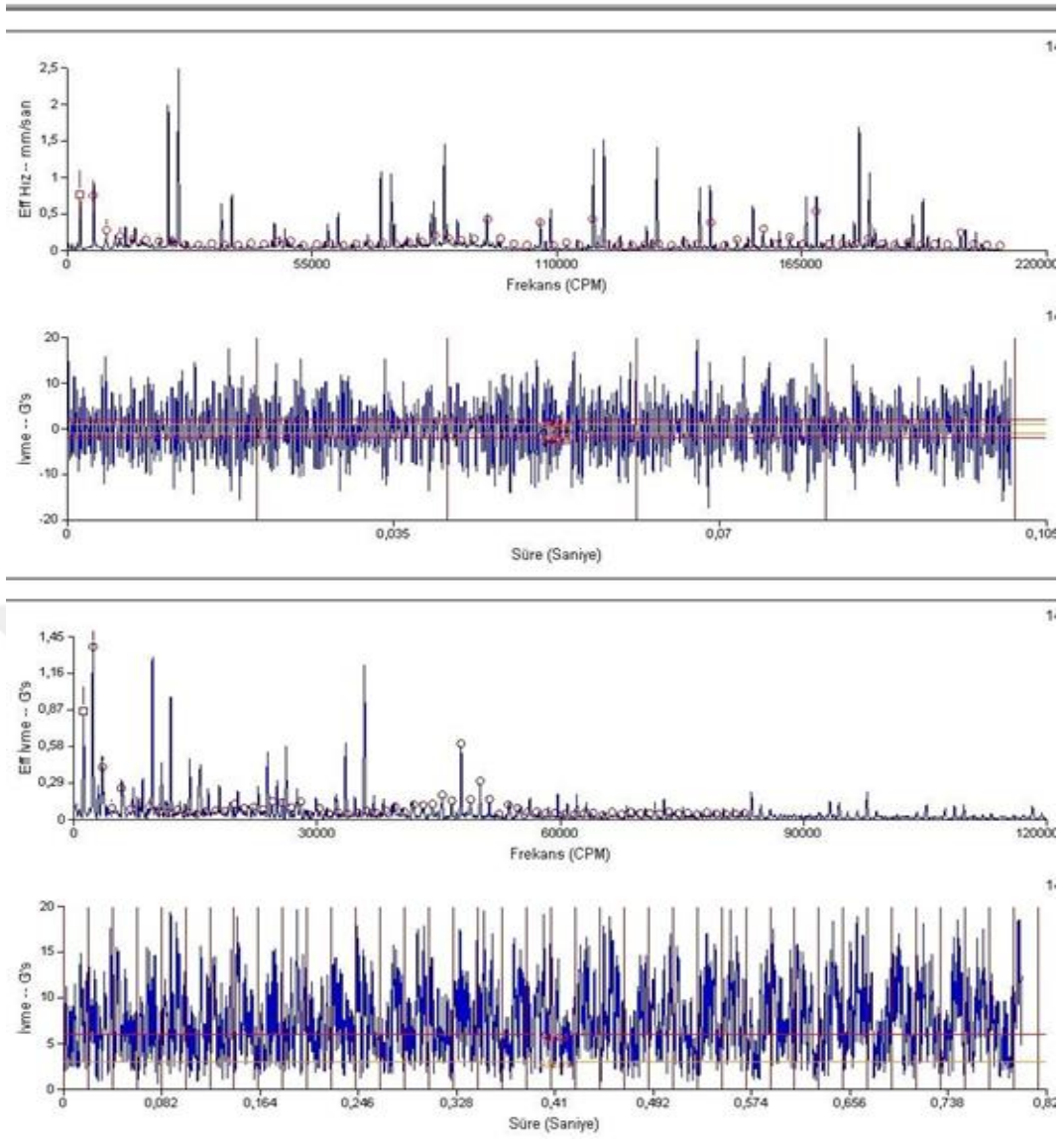
5.2 Kestirimci Bakım Yönteminin Rulmanlarda Kullanımı

Makine elemanlarından biri olan rulmanlarda meydana gelen hasarlar genellikle bölgesel ve dağınık olarak sınıflandırılır.

Bölgesel hasar genellikle rulmanların yuvarlanma yüzeylerinde meydana gelen çatlak sebepli korozyon hasarıdır. Rulmanın yuvarlanma elemanlarında yorulma sebebi ile oluşur. Dağınık hasar, dalgalılık, kir, yüzey pürüzlülüğü, çentik, eksen kaçık bilezikler, korozyon aşınmaları ve ölçü dışı yuvarlanma elemanları gibi faktörlerin bir araya gelmesiyle oluşan bir hasar türüdür (Wowk, 1991).

Çalışma koşullarına bağlı olarak zamanla artan sürtünme kuvvetinin etkisi ile aşırı ısınma gibi nedenlerden performans düşüşü ve anomaliler oluşmaya başlar. Bu anomalilerin zamanında saptanamaması ve uygun bakımın yapılmamasından kaynaklı, rulmanda hasar ve bozulma meydana gelebilir. Rulmanda meydana gelen anomali durumunda meydana gelen hasar ilk önce kendini dış bilezikte belli eder. Rulmanın dış bileziğinde meydana gelen kabarma şeklindeki anomali derinleştikçe rulmanın oluşturduğu titreşimlerin genliği artar. Anomalinin ilerlemesi ile yuvarlanma elemanları, kabarma hasarını iç bileziğe iletir ve bu durum iç bilezik frekansındaki titreşimlerin artmasına neden olur. Kısa zamanlı sık aralıklarla vuruntu sinyalleri oluşmaya başlar. Rulmanda bozulma süreci devam ettiği için iç boşluklar artmaya başlar ve rulman elemanlarının bozulması hızlandır, ilerleyen süreçte rulman yuvarlanma elemanları dağılabilir veya titreşim sebebi ile dış bileziği kırabilir (Akturk, 1993).

Rulmanlarda meydana gelen hasarları tespit etmek için kestirimci bakımda farklı yöntemler kullanılır. En yaygın kullanılan yöntem titreşim analizi yöntemidir. Titreşim analizinde en önemli öncelik verilerin sağlıklı olarak toplanmasıdır. Hasarlı rulman kısa süreli darbelere bağlı titreşimler meydana getirdiğinden bu titreşimleri algılamak ve ölçmek için titreşim algılayan cihazlar veya sensörleri makine ya da sistemin doğru yerlerine yerleştirip verileri kaydedilmeli. Ölçüm cihazını uygun bir yere yerleştirilmesi makinenin tasarımına, kullanılan rulmanın tipine ve makinenin tipine bağlıdır. Sinyal ölçme için en iyi pozisyon, yük bölgesinde yatağa, cihazı mümkün olduğu kadar yakın yerleştirmektir. Bu sayede daha sağlıklı sinyaller alınarak titreşim analizi yapılabilmektedir. Meydana gelen sinyallerin oluşturduğu spektrum grafikleri inceleyerek ölçüm yapılan grafikler analiz edilir ve bu sinyallerdeki değişiklikler rulmandaki hasarları gösterir. Şekil 5.10'da orman ürünleri endüstrisinde kullanılan bir makineden alınan titreşim verilerinin ölçüm cihazında oluşturduğu grafik görülmektedir.



Şekil 5.10. Orman ürünleri endüstrisinde kullanılan bir makinelerde kestirimci bakım yöntemi titreşim analizi ile arıza tespiti çalışması

Bir başka kestirimci bakım metodu olan yağ analizi ile rulmanlarda arıza tespiti yapmak mümkündür. Rulman yağındaki yıpranma ürünleri, rulmandaki hasarları gösterir. Yağ analizinde, rulman yağından numune alınır ve bu numunedeki yıpranma ürünleri analiz edilir.

Sıcaklık izleme ile kestirimci bakım uygulamasında rulmanlardaki aşırı ısınma, rulmandaki hasarların bir göstergesidir. Sıcaklık izleme yönteminde,

rulmanın sıcaklığı izlenir ve sıcaklıktaki değişiklikler rulmandaki hasarları belirlemeye yardımcı olur.

Görsel muayene yöntemi ile rulmanlarda gözle görülebilen hasarlar da rulmanın durumu hakkında bilgi verir. Görsel muayenede, rulman ve yataklama yüzeyleri gözle incelenerek aşınma, çizilme, çatlama gibi hasarlar kontrol edilir. Fotoğraflar 5.20, 5.21 ve 5.22’de orman ürünleri endüstrisinde kullanılan bir makinede oluşan rulman hasarları gösterilmiştir.



Fotoğraf 5.20. Çizilme tipi rulman hasarı



Fotoğraf 5.21. Kazınma tipi rulman hasarı



Fotoğraf 5.22. Kırılma tipi rulman hasarı

5.2.1 Rulmanlar ve Arıza İlişkileri

Rulmanlarda oluşan arızalar veya anomaliler sonucunda çeşitli frekanslarda vibrasyon meydana gelir. Vibrasyon, rulmanlara bir dizi zarar verebilir ve rulmanların ömrünün kısaltılmasında etkili faktörlerin başında gelmektedir. Rulmanın devri arttıkça, arıza meydana gelen noktadan geçen yuvarlanma elemanının frekansı da değişeceğinden hata frekansı da değişir. Rulmanların oluşturdukları titreşim miktarları rulmanların ömürlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Rulmanlarda ki yüksek seviyedeki titreşimler, rulmanı meydana getiren bileşenlerin hasar görmesine ve aşınmasına sebep olabilir. Titreşimler, yuvarlanma elemanlarının (bilyalar veya makaralar) ve yatak yüzeylerinin aşınmasına sebep olur. Bu durum, rulmanların ömrünü kısaltır ve arızalı çalışmalarına neden olur.

Titreşimler, rulman yatak yüzeylerinde düzgünsüzlüklere neden olabilir. Bu düzgünsüzlükler, yatak yüzeylerinin pitting denilen küçük oyuklar oluşturmaya yol açabilir. Pitting, rulman performansını düşürebilir ve arıza riskini artırabilir.

Yüksek titreşim seviyeleri, rulmanların montaj noktalarındaki bağlantıları gevşetebilir. Gevşek bağlantılar, rulmanların yerinden oynamasına ve hatta düşmesine yol açabilir. Bu durum, rulmanın hasar görmesine ve makine

arızalarına neden olabilir. Yüksek titreşim seviyeleri, rulmanlardan gelen gürültü ve titreşimi artırabilir, parçalarının hasar almasına neden olabilir.

Bu gibi sebeplerden dolayı, titreşimlerin rulmanlara zarar vermesini önlemek için rulmanların arızalarının zamanında tespit edilmeli ve uygun bakımlarının yapılması ile titreşim seviyeleri düşük tutulmalıdır. Titreşim analizi gibi teknikler kullanılarak rulmanlarda meydana gelen titreşimlerin devamlı izlenmesi elektrik akımı, sıcaklık gibi parametrelerin takibiyle arızaların erken teşhisine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, arızaların önlenmesi ve ihtiyaç duyulduğunda bakım veya onarım işlemlerinin planlanması sağlanabilir.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmasının deney sonuçları belirtilmiştir. Sonuçlar tablolar halinde eklenmiş ve tablolara göre grafikler oluşturulmuştur. Grafiklerin regresyon analizleri gösterilmiştir.

6.1 Pompalarda Yapılan Kestirimci Bakım Uygulamaları

Bu tez çalışmasında kullanılan pompalarda yapılan kestirimci bakım uygulamalarına örnek olarak, vibrasyon analizi yöntemi ile 2-3 aylık periyotlar halinde takip yapıp, titreşim görüntüleyen cihaz yardımıyla bir pompanın 8 aylık titreşim verileri verilmiştir. Oluşan grafiklerde pompanın rulmanlarında meydana gelen değişimler gösterilmiştir ve ne anlama geldikleri belirtilmiştir.

Belirtilen değerlerin anlamları aşağıdaki gibidir.

- 1: Ekipman durumu iyi.
- 2: Değişimler var. Müdahaleye gerekli bir durum yok.
- 2+: Değişimler var. Ölçümler ile takip edilmelidir.
- 3: İlk uygun zamanda bakım planlanmalıdır.
- 4: Arıza çok ileriye gitmiş, acil müdahale gereklidir.

Rulman hasarların belirtilen bölgelerdeki spektrum grafiklerindeki davranışları şu şekildedirler.

1: Rulman hasarlarının frekansları, daha yüksek frekanstaki çarpanları spektrum grafiğinde gözükür. Bu değerdeki titreşimler yüksek frekans çarpanı olmayan grafikte görünmez.

2: Spektrum grafiğinde, genellikle mil dönme hızı ile hasar frekansının modülasyonu ile ifade edilir.

2+: Yan bant genliği, hasar frekansı genliğini geçer ise hasarın önemli derecede olduğu gözlemlenir.

3: Spektrum grafiğinde, titreşim hasar frekansı ve yan bant frekansları görüntülenmeye başlar.

4: Spektrum grafiğinde, rulmanda meydana gelen hasar devam ettiği için iç boşluklar artmaya devam eder. Bundan dolayı grafikte, geniş bant görüntüsünü arttıran çok fazla vuruntunun oluşmasına neden olur.

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın kasım ayı için alınan verilerin gösterimi Tablolar 6.1 ve 6.2’te verildi.

Tablo 6.1. Melamin 2 alt büyük pompa kasım ayı trend değerleri

Makina ID	Makina	Gün	Trend Değeri
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,705 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,068 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,852 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,792 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,221 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,826 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,708 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,635 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,511 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,770 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,387 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	1,072 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,270 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,674 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP.	30.11.2023	0,605 mm/san

Tablo 6.2. Melamin 2 alt büyük pompa kasım ayı trend raporu ve değerlendirmesi

EKİPMAN	EKİPMAN BİLGİSİ	KATEGORİ				YORUMLAR VE ÖNERİLEN EYLEMLER
		1	2	3	4	
MELAMİN 2 ALT BÜYÜK POMPA	Motor:	1				Motor: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
	Yatak:	1				Yatak: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
MELAMİN 2 ALT PLAKA BÜYÜK POMPA-MOTOR	1	Ekipmanlarda müdahaleye gerekli bir duruma rastlanmadı.				

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın mart ayı için alınan verilerinin gösterimi Tablolar 6.3 ve 6.4'te verilmiştir.

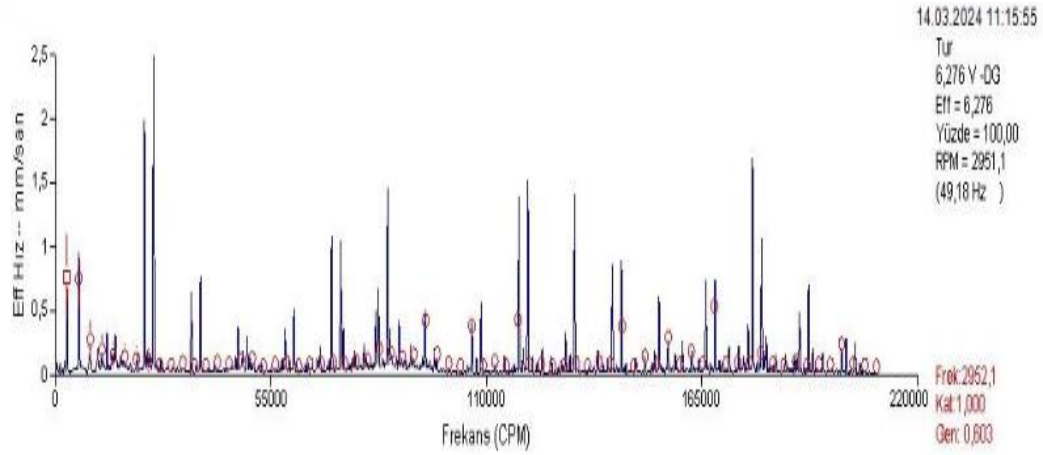
Tablo 6.3. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı trend değerleri

Makina ID	Makina	Gün	Trend Değeri
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	2,020 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	0,124 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	1,157 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	1,852 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	0,204 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	1,759 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	2,171 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	6,276 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	3,680 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	5,090 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	5,975 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	3,554 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	0,653 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	3,826 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	14.03.2024	3,580 mm/san

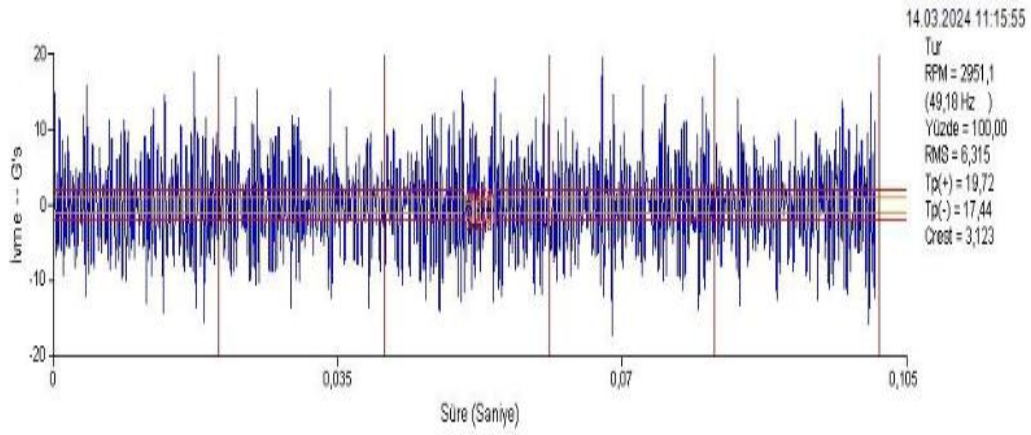
Tablo 6.4. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı trend raporu ve değerlendirmesi

EKİPMAN	EKİPMAN BİLGİSİ	KATEGORİ				YORUMLAR VE ÖNERİLEN EYLEMLER
		1	2	3	4	
MELAMİN 2 ALT BÜYÜK POMPA	Motor:	1				Motor: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
	Yatak:			3		Yatak: Pompa rulmanları arızalıdır. İlk planlı duruşta rulman değişimi yapılmalıdır.
MELAMİN 2 ALT PLAKA BÜYÜK POMPA-MOTOR		3				Pompa rulmanları arızalıdır. İlk planlı duruşta rulman değişimi yapılmalıdır.

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın mart ayı için alınan verilerin grafiklerinin gösterimleri Şekiller 6.1 ve 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı genlik-frekans grafiği



Şekil 6.2. Melamin 2 alt büyük pompa mart ayı genlik-zaman grafiği

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın mayıs ayı için alınan verilerin gösterimi Tablolar 6.5 ve 6.6’da verildi.

Tablo 6.5. Melamin 2 alt büyük pompa mayıs ayı trend değerleri

Makina ID	Makina	Gün	Trend Değeri
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	1,771 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,055 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,763 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	1,756 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,081 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,748 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	1,006 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	1,347 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,184 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	1,056 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,873 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,891 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,174 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,582 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	17.05.2024	0,470 mm/san

Tablo 6.6. Melamin 2 alt büyük pompa mayıs ayı trend raporu ve değerlendirmesi

EKİPMAN ID	EKİPMAN BİLGİSİ	KATEGORİ				YORUMLAR VE ÖNERİLEN EYLEMLER
		1	2	3	4	
MELAMİN 2 ALT BÜYÜK POMPA	<u>Motor:</u>	1				Motor: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
	<u>Yatak:</u>	1				Yatak: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
MELAMİN 2 ALT PLAKA BÜYÜK POMPA-MOTOR	1	Ekipmanlarda müdahaleye gerekli bir duruma rastlanmadı.				

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın temmuz ayı için alınan verilerin gösterimi Tablolar 6.7 ve 6.8’de verildi.

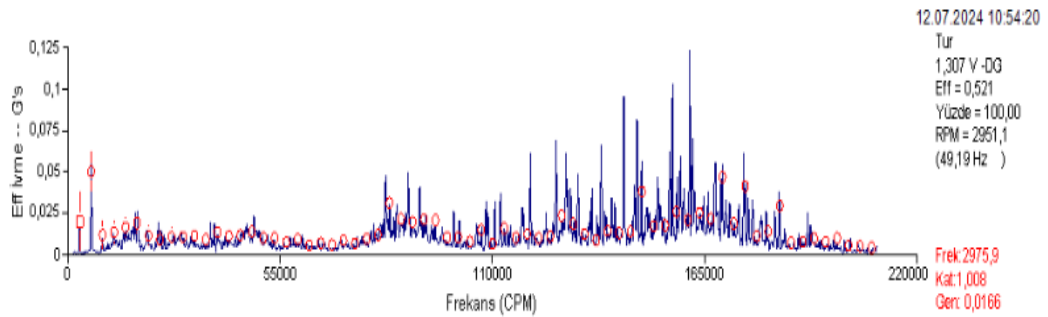
Tablo 6.7. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı trend değerleri

Makina ID	Makina	Gün	Trend Değeri
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	2,158 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,027 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,822 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	1,884 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,107 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,810 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,828 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	1,307 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,270 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	1,135 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,479 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,985 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,224 G's
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,602 mm/san
10010920	MELAMİN 2 ALT PLKA BÜYÜK POMP	12.07.2024	0,489 mm/san

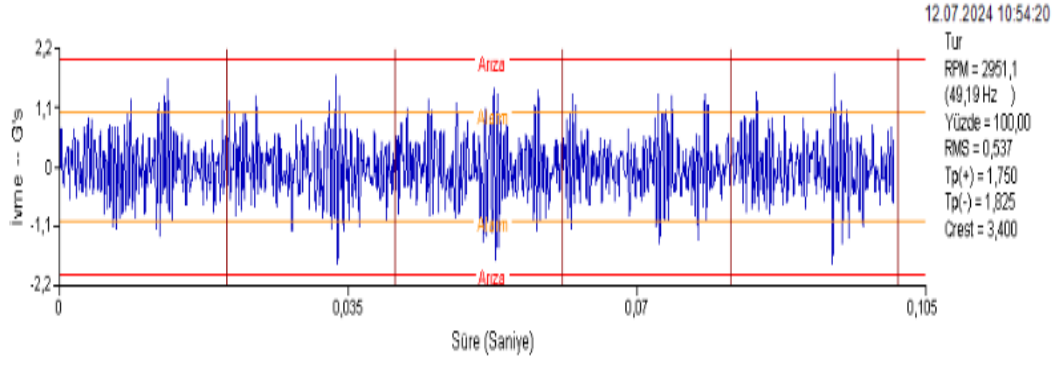
Tablo 6.8. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı trend raporu ve değerlendirmesi

EKİPMAN ID	EKİPMAN BİLGİSİ	KATEGORİ				YORUMLAR VE ÖNERİLEN EYLEMLER
		1	2	3	4	
MELAMİN 2 ALT BÜYÜK POMPA	Motor:	1				Motor: Alınan ölçümlerde müdahaleye gerekli bir durum görülmemiştir.
	Yatak:		2			Yatak: Yataklardan alınan ölçümlerde düşük genlikte rulman arıza sinyalleri görüldü. Ölçümler ile takibi yapılmalı.
MELAMİN 2 ALT PLAKA BÜYÜK POMPA-MOTOR		2				Yataklardan alınan ölçümlerde düşük genlikte rulman arıza sinyalleri görüldü. Ölçümler ile takibi yapılmalı.

Melamin 2 alt plaka büyük pompanın temmuz ayı için alınan verilerin grafiklerinin gösterimleri Şekiller 6.3 ve 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı genlik-frekans grafiği



Şekil 6.4. Melamin 2 alt büyük pompa temmuz ayı genlik-zaman grafiği

Frekans alanı, genlik değerinin kosinüs ile sinüs dalga serilerinin gösterdiği alandır. Dalgaların, frekans ile değişen bir fazı veya büyüklüğü bulunmamaktadır. Zamanla değişen genlikle zaman alanı oluşur. Ölçülen vibrasyonlar, her zaman zaman alanı biçimindedir, frekans alanına dönüştürülmesi gerekir.

Rulmanlarda hasar meydana gelmeye başladığında, hasar sebepli frekanslar spektrum grafiklerinde oluşmaya başlar. Rulmanın yuvarlanma elemanında ve iç bileziğinde hasar oluşursa titreşim frekanslar artacaktır.

6.2 Pompalarda Yapılan Tamir Çalışması

Melamin ünitesinde kullanılan kızgın yağ pompalarından alınan titreşimler kayıt edildi. Kızgın yağ pompaları periyodik olarak haftanın 2 günü alınan ölçümler ile kontrol edildi. Pompalar planlı bakım dâhilinde bakıma alınıp rulman değişimleri yapıldı. Bazı pompaların millerinde ve diğer ana parçalarında da aşınmalar olduğu için mil değişimi ve aşınan parça değişimi gerçekleştirildi.

Fotoğraflar 6.1 ve 6.2’de pompaların demontaj işlemleri sırasında çekilen görüntüleri verilmiştir.



Fotoğraf 6.1. Pompa demontaj işlemi



Fotoğraf 6.2. Motoru sökülen pompanın demontajı

Melamin ünitesinden sökülüp atölyeye getirilen pompanın görüntüsü ve atölyede bileşenlerine ayrılan pompanın görüntüsü Fotoğraflar 6.3 ve 6.4’de verilmiştir.



Fotoğraf 6.3. Demontaj edilip atölyeye getirilen pompa



Fotoğraf 6.4. Atölyede birleşenleri demontaj edilen pompa

Sökülen pompanın rulmanında oluşan hasarın görüntüsü Fotoğraf 6.5’de gösterilmiştir.



Fotoğraf 6.5. Pompadan sökülen rulman görüntüsü

Ölçümü alınan ve planlı bakım dâhilinde demontaj edilip atölyeye getirilen pompanın, sökülen ve hasar oluşan milinin görüntüleri Fotoğraflar 6.6 ve 6.7’de verilmiştir.



Fotoğraf 6.6. Pompadan sökülen mil görüntüsü



Fotoğraf 6.7. Milde oluşan hasar görüntüsü

Melamin ünitesi alt küçük pompadan demontaj edilen parçalarının görüntüsü ve çıkan rulmanın görüntüsü Fotoğraflar 6.8 ve 6.9’da gösterilmiştir.



Fotoğraf 6.8. Alt küçük pompa demontaj edilen parçalar



Fotoğraf 6.9. Alt küçük pompa çıkan rulman

Alt büyük pompa atölyede parçaları demontaj edilirken ve pompadan çıkan rulmanın görüntüsü Fotoğraflar 6.10 ve 6.11’de verilmiştir.



Fotoğraf 6.10. Sökülen pompanın rulman yatak bölgesi

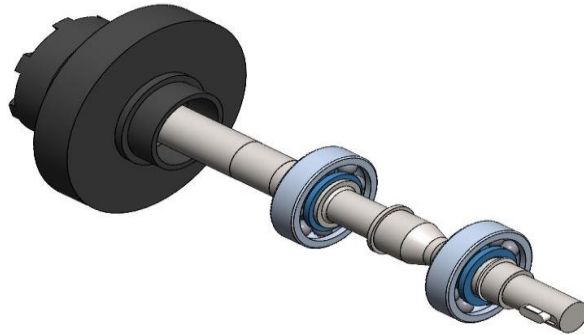


Fotoğraf 6.11. Sökülen pompanın çıkarılan rulman

6.3 Melamin 2 Ünitesi Kızgın Yağ Pompasının Rotor Dinamiği Analizi

Melamin 2 ünitesinde kullanılan pompaların mil-rulman-çark montaj sistemine göre sistemin doğal frekansı Rayleigh yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

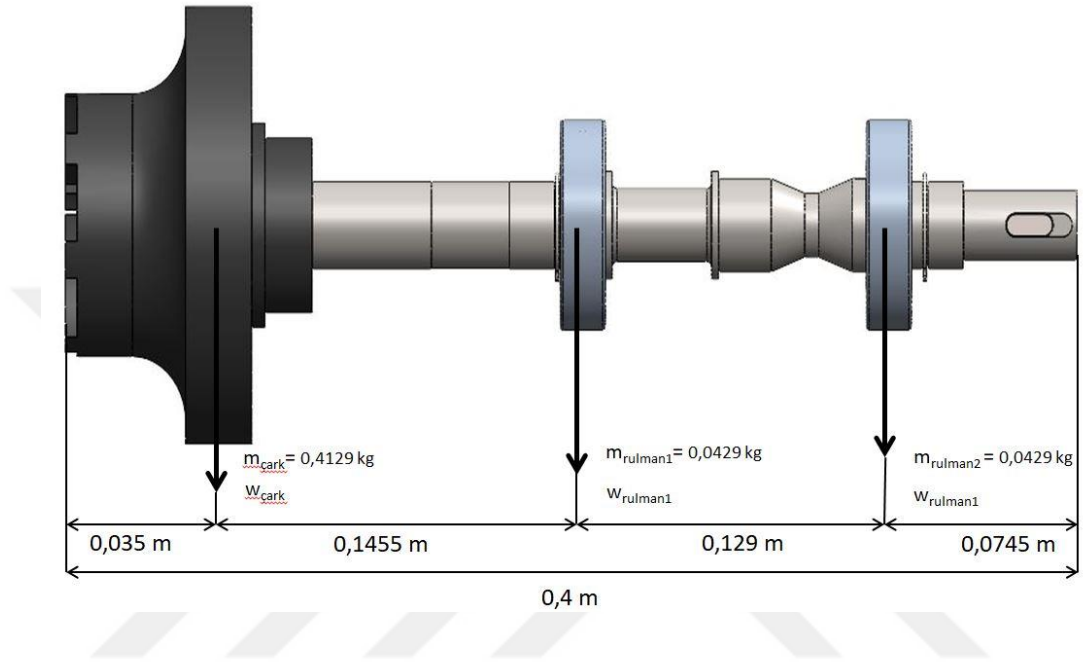
Şekil 6.5’de çark mil rulman montaj şekli verilmiştir.



Şekil 6.5. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların çark-mil-rulman montajı

Rayleigh yöntemi bir sistemin temel doğal frekansının yaklaşık değerini bulmak için kullanılır. Denge konumu etrafında titreşen korunumlu bir sistemin titreşim frekansı doğal modun civarında kararlı bir değere sahiptir. Bu kararlı değer aslında temel modun civarındaki minimum bir değerdir.

Şekil 6.6’da çark mil rulman montajının teknik resmi ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 6.6. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların çark-mil-rulman montajı ve ölçüleri

Yük taşıyan millerde yanal titreşimlerin temel frekansı için, statik çökme eğrisi dinamik çökme eğrisinin yaklaşık gösterimi olarak kullanılır.

Şekil 6.7’de gösterildiği gibi çeşitli yükleri taşıyan mil gösterilmiştir. Bu milin kütlelerinin ihmal edilebilir olduğunu varsayalım. Sistemin potansiyel enerjisi statik yükler tarafından yapılan işe eşit olan çökmüş milin uzama enerjisidir.

- Potansiyel Enerji= V_{max} $V_{\text{max}} = \frac{1}{2} (m_1 g w_1 + m_2 g w_2 + \dots)$

Harmonik salınım için, kütlelerden dolayı maksimum kinetik enerji aşağıdaki gibidir.

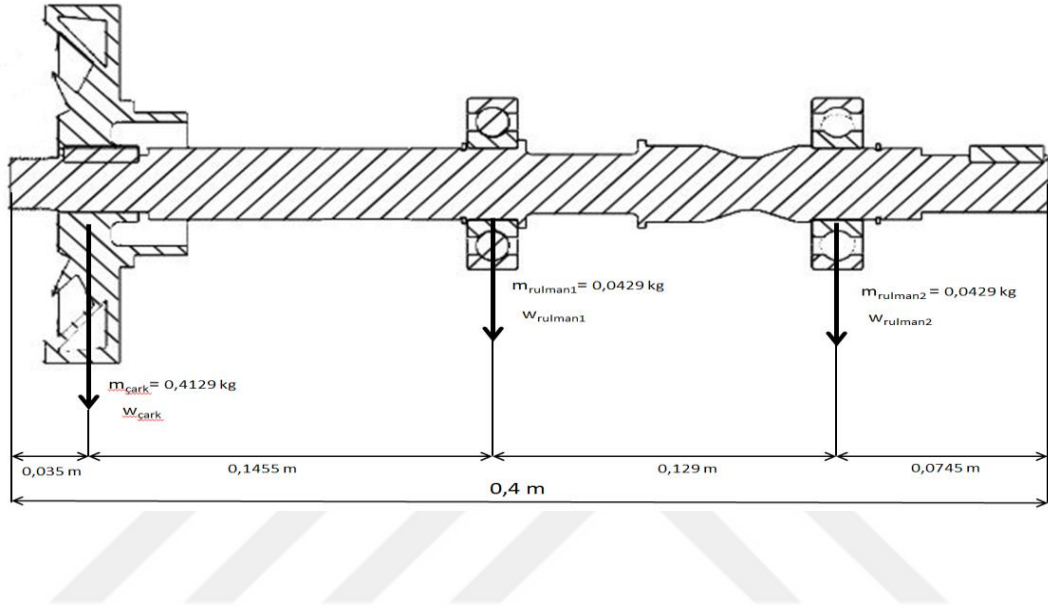
- Kinetik Enerji= T_{max} $T_{\text{max}} = \frac{\omega^2}{2} (m_1 w_1^2 + m_2 w_2^2 + \dots)$

V_{max} ve T_{max} ’ı eşitleyerek ω salınım frekansı bulunur.

$$V_{\max}=T_{\max}$$

$$\omega = \frac{\sqrt{g(m_1w_1+m_2w_2+\dots)}}{\sqrt{(m_1w_1^2+m_2w_2^2+\dots)}}$$

Şekil 6.7’de çark mil rulman montajının kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.7. Melamin 2 ünitesinde çalışan pompaların teknik resmi ve ölçüleri

Mil malzeme= 16MnCrs5,

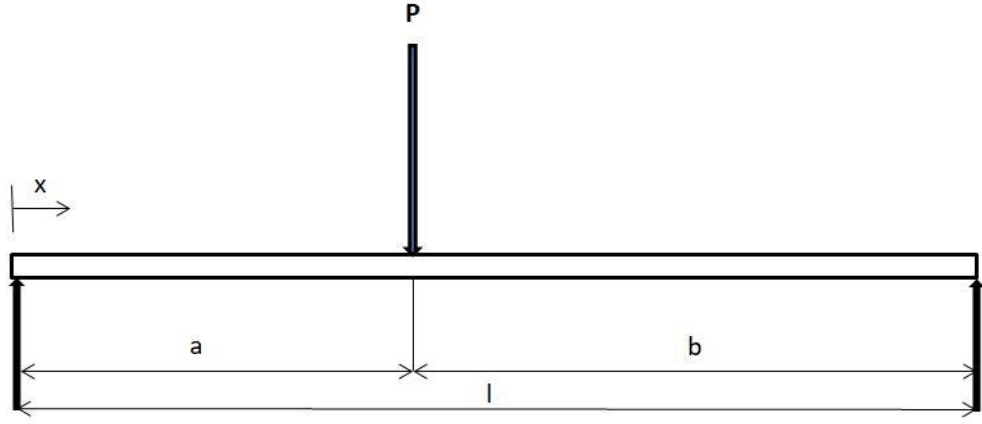
Çark malzeme= GG-20,

mil_{çap}= 30mm, mil uzunluğu= 40cm,

$$E_{\text{mil}} = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$E_{\text{çark}} = 1,2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$$

Şekil 6.8’de sistemin statik yük altındaki mesnet diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.8. Statik yük altında mil

Şekil 6.8’de gösterildiği üzere basit mesnetli kiriş diyagramının çökme eşitliği 6.1 ve 6.2’de verilmiştir.

$$w(x) = \begin{cases} \frac{Pbx}{6EI} (l^2 - b^2 - a^2) & 0 \leq x \leq a \\ -\frac{Pa(l-x)}{6EI} [a^2 + x^2 - 2lx] & a \leq x \leq l \end{cases} \quad (6.1)$$

$$(6.2)$$

- **Çarkın Ağırlığından Dolayı Olan Çökme**

1. $m_{\text{çark}}$ kütlesinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.1 eşitliğine göre $x=0,035\text{m}$, $b=0,349\text{m}$, $l=0,4\text{m}$, $P= m_{\text{çark}} * g$ değerleri ile

$$w_1' = \frac{(0,4129*9,81)(0,349)(0,035)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,349^2 - 0,035^2)$$

$$w_1' = \frac{0,0007622}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

2. m_{rulman1} kütlesinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.2 eşitliğine göre $a=0,035\text{m}$, $x=0,1805\text{m}$, $l=0,4\text{m}$, $P= m_{\text{çark}} * g$ değerleri ile

$$w_2' = -\frac{(0,4129*9,81)(0,035)(0,2195)}{6EI(0,4)} [0,035^2 + 0,1805^2 - 2(0,4)(0,1805)]$$

$$w_2' = \frac{0,0014339}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

3. m_{rulman2} kütlesinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.2 eşitliğine göre $a= 0,035\text{m}$, $x=0,3095\text{m}$, $l=0,4\text{m}$, $P= m_{\text{çark}} * g$ değerleri ile

$$w_3' = \frac{(0,4129*9,81)(0,035)(0,0905)}{6EI(0,4)} [0,035^2 + 0,3095^2 - 2(0,4)(0,3095)]$$

$$w_3' = \frac{0,00805}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

Çarkın ağırlığından dolayı meydana gelen w_1' , w_2' ve w_3' çökme değerleri bulundu.

- **Rulman 1'in Ağırlığından Dolayı Oluşan Çökme;**

1. $m_{\text{çark}}$ kütleinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.1 eşitliğine göre $x=0,035m$, $b=0,2035m$, $l=0,4m$, $P= m_{\text{Rulman1}} * g$ değerleri ile

$$w_1'' = \frac{(0,0429*9,81)(0,2035)(0,035)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,2035^2 - 0,035^2)$$

$$w_1'' = \frac{0,0014658}{EI} \text{ sonucu elde edilir.}$$

2. m_{rulman1} kütleinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.1 eşitliğine göre $x=0,1805m$, $b=0,2035m$, $l=0,4m$, $P= m_{\text{Rulman1}} * g$ değerleri ile

$$w_2'' = \frac{(0,0429*9,81)(0,2035)(0,1805)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,2035^2 - 0,1805^2)$$

$$w_2'' = \frac{0,00055397}{EI} \text{ sonucu elde edilir.}$$

3. m_{rulman2} kütleinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.2 eşitliğine göre $a=0,1805m$, $x=0,3095m$, $l=0,4m$, $P= m_{\text{Rulman1}} * g$ değerleri ile

$$w_3'' = - \frac{(0,0429*9,81)(0,1805)(0,4-0,3095)}{6EI(0,4)} [0,1805^2 + 0,3095^2 - 2(0,4)(0,3095)]$$

$$w_3'' = \frac{0,000341526}{EI} \text{ sonucu elde edilir.}$$

Birinci rulmanın ağırlığından dolayı oluşan w_1'' , w_2'' ve w_3'' çökme değerleri bulundu.

- **Rulman 2'nin Ağırlığından Dolayı Oluşan Çökme;**

1. $m_{\text{çark}}$ kütleinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.1 eşitliğine göre $x=0,035m$, $b=0,0745m$, $l=0,4m$, $P= m_{\text{Rulman2}} * g$ değerleri ile

$$w_1''' = \frac{(0,0429*9,81)(0,0745)(0,035)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,0745^2 - 0,035^2)$$

$$w_1''' = \frac{0,00070059}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

2. m_{rulman1} kütlesinin olduğu yerde oluşan çökme:

6.1 eşitliğine göre x= 0,1805m, b= 0,0745m, l=0,4m, P= m_{Rulman2} * g değerleri ile

$$w_2''' = \frac{(0,0429 \cdot 9,81)(0,0745)(0,1805)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,0745^2 - 0,1805^2)$$

$$w_2''' = \frac{0,000287371}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

3. m_{rulman2} kütlesinin olduğu yerde oluşan çökme:

Son olarak 6.2 eşitliğine göre x= 0,3095m, b= 0,0745m, l= 0,4m P= m_{Rulman2} * g değerleri ile

$$w_3''' = \frac{(0,0429 \cdot 9,81)(0,0745)(0,3095)}{6EI(0,4)} (0,4^2 - 0,0745^2 - 0,3095^2)$$

$$w_3''' = \frac{0,0002372}{EI} \text{ sonucu bulunur.}$$

İkinci rulmanın kütlesinden dolayı oluşan w_{1'''}, w_{2'''} ve w_{3'''} çökme değerleri bulundu.

m_{çark}, m_{rulman1}, m_{rulman2} kütlelerinin toplam çökmeleri

$$w_1 = w_1' + w_1'' + w_1''' \longrightarrow \frac{0,0009788}{EI}$$

$$w_2 = w_2' + w_2'' + w_2''' \longrightarrow \frac{0,002275305}{EI}$$

$$w_3 = w_3' + w_3'' + w_3''' \longrightarrow \frac{0,00138382}{EI}$$

Elde edilen sonuçları eşitlik 4.8'de yerine koyarak, temel doğal frekans

$$\omega = \sqrt{\frac{g(m_1\omega_1 + m_2\omega_2 + \dots)}{(m_1\omega_1^2 + m_2\omega_2^2 + \dots)}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{9,81[(0,4129 \cdot 0,0009788) + (0,0429 \cdot 0,002275) + (0,0429 \cdot 0,001383)]}{EI[(0,4129 \cdot 0,0009788^2) + (0,0429 \cdot 0,002275^2) + (0,0429 \cdot 0,001383^2)]}}$$

$$\omega = 2702,81 \text{ rad/s} \text{ bulunur.}$$

Buradan frekansı bulmak için frekans genlik eşitliğine göre;

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 430,16 \text{ Hz sonucu elde edilir.}$$

Rayleigh yöntemi genellikle doğru bir yaklaşımdır. Bu yöntemle elde edilen frekansın daha doğru olma olasılığı yüksektir. Rayleigh yöntemi, sistemdeki her bir kütlenin etkisini ve her kütlenin yer değiştirme miktarını (mod şekli) dikkate alır.

6.4 Melamin 2 Ünitesi Pompalarından Elde Edilen Veriler

Sonuçlar kısmı küçük pompaların değerleri ve grafikleri, küçük pompaların grafiklerinin karşılaştırılması, büyük pompaların değerleri ve grafikleri, büyük pompaların grafiklerinin karşılaştırılması bölümlerinden meydana gelmiştir.

6.4.1 Küçük Pompaların Değerleri ve Grafikleri

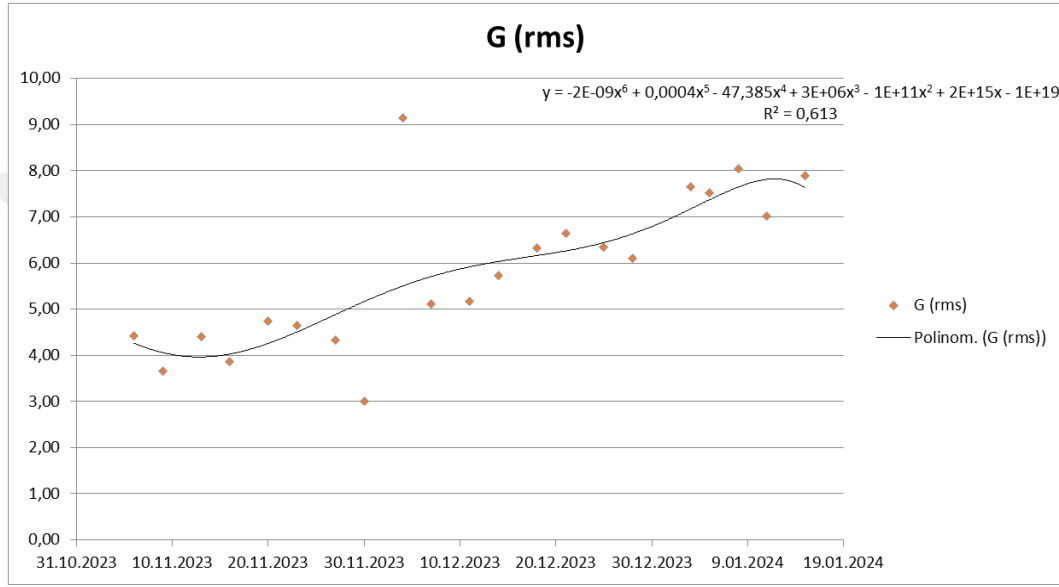
Bu çalışma kapsamında tesiste kullanılan melamin alt plaka küçük kızgın yağ pompasından periyotlar halinde alınan ölçümler Tablo 6.9’da verilmiştir.

Tablo 6.9. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plakaya basan küçük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s²), m/s² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri

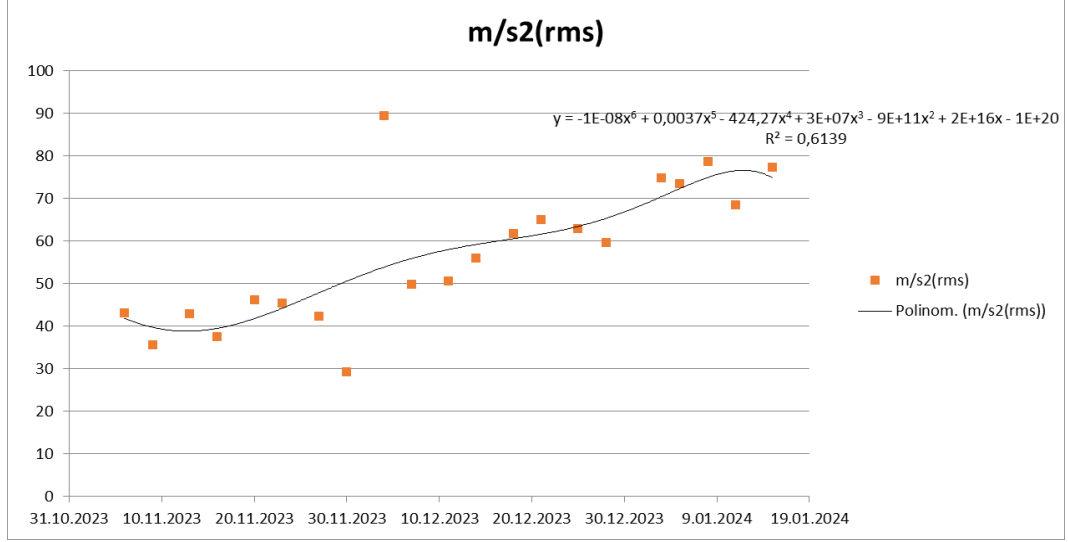
Melamin Alt Plaka Küçük Pompa						
TARİH	CF+	G (rms)	m/s ² (pk)	m/s ² (rms)	mm/s(rms)	Sıcaklık (°C)
6.11.2023	9	4,40	166,0	43,15	2,6	96,7
9.11.2023	9	3,64	145,7	35,72	3,49	86,7
13.11.2023	10	4,38	200,4	42,98	2,38	83,6
16.11.2023	10	3,84	191,5	37,65	2,87	93,4
20.11.2023	10	4,72	181,2	46,25	1,91	76,7
23.11.2023	10	4,63	190	45,41	2,55	73,7
27.11.2023	9	4,31	143	42,28	2,6	89,2
30.11.2023	10	2,99	107,2	29,31	2,07	93,6
4.12.2023	13	9,12	391,4	89,46	3,1	95,8
7.12.2023	11	5,09	249,6	49,9	3,11	96,8
11.12.2023	11	5,16	250,1	50,6	2,74	113,2
14.12.2023	11	5,72	216,7	56,07	2,72	106,1
18.12.2023	11	6,3	286,9	61,77	3,34	102,8
21.12.2023	11	6,63	293,8	65,05	3,91	98,5
25.12.2023	11	6,33	298,5	63,03	4,57	100,2
28.12.2023	11	6,09	280,2	59,76	4,46	99,8
3.01.2024	12	7,64	295,1	74,94	4,37	106,4
5.01.2024	12	7,5	310,9	73,57	5	96,4
8.01.2024	12	8,03	314,6	78,79	4,4	110,3
11.01.2024	11	6,99	284,4	68,52	4,58	105,8
15.01.2024	12	7,88	335,2	77,31	5,23	107,7
16.01.2024	pompa değişimi yapıldı.					

16.01.2024 tarihinde pompadan alınan değerlerde artış olduğu için pompa planlı bakım alınmıştır. Pompa yedeği ile değiştirilmiş ve çıkan pompanın rulman değişimi gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten sonra ölçüm alınmamıştır. Şekiller 6. ve 6.10'da oluşturulan G (rms), m/s² (rms) grafikleri ve regresyon eğrileri verilmiştir.

30.11.2023 ve 04.12.2023 tarihli ölçülen verilerde olağan dışı durumlar gözlemlenmiştir.



Şekil 6.9. Alt küçük kızgın yağ pompası G (RMS) grafiği (Tüm veriler dâhil)



Şekil 6.10. Alt küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (RMS) grafiği (Tüm veriler dâhil)

30.11.2023 ve 04.12.2023 tarihlerinde mevcut durumdan farklı veriler alındığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar grafikte olağan bir durum olarak karşılanmamaktadır. Bundan dolayı melamin alt plaka küçük kızgın yağ pompasında 30.11.2023 ve 04.12.2023 tarihli veriler G (rms) ve m/s^2 (rms) grafiklerine dâhil edilmemiştir.

Melamin ünitesinde kullanılan ölçümü alınan, üst plaka küçük kızgın yağ pompasından periyotlar halinde alınan ölçümler Tablo 6.10’da verilmiştir.

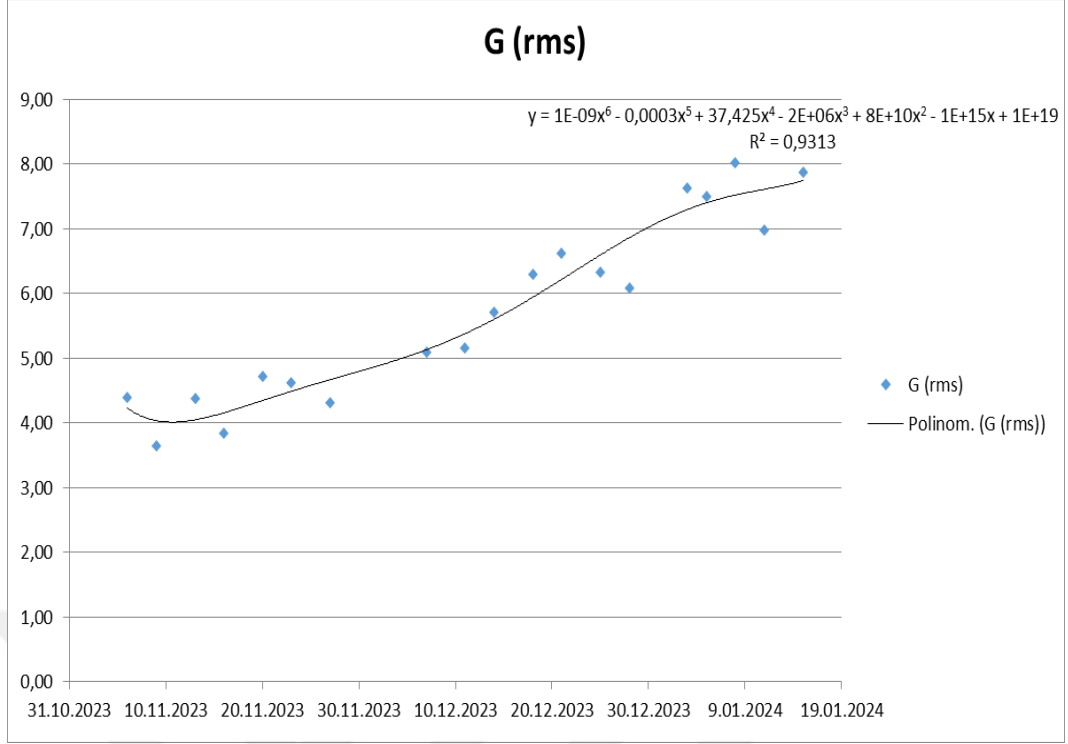
Tablo 6.10. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plakaya basan küçük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s²), m/s² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri

Melamin Üst Plaka Küçük Pompa						
TARİH	CF+	G (rms)	m/s ² (pk)	m/s ² (rms)	mm/s(rms)	sıcaklık
6.11.2023	6	2,26	85,79	22,15	1,61	95,1
9.11.2023	6	1,8	65,98	17,62	1,11	84,3
13.11.2023	6	1,87	67,95	18,34	1,53	93,2
16.11.2023	8	3,25	115,7	31,84	1,48	99,9
20.11.2023	7	2,9	110,4	28,48	1,55	93
23.11.2023	7	2,78	102,6	27,23	1,45	92,4
27.11.2023	8	3,52	136	34,53	1,64	104,2
30.11.2023	8	3,53	132,1	34,61	1,51	107,4
4.12.2023	8	3,56	126,4	34,87	1,45	96,3
7.12.2023	10	4,98	167,9	48,52	1,54	92,8
11.12.2023	9	4,61	161,1	45,18	1,72	105,7
14.12.2023	9	4,05	150,5	39,75	1,37	104,3
18.12.2023	9	4,48	159,9	43,95	1,45	107
21.12.2023	9	4,05	144,1	39,73	1,54	105,1
25.12.2023	9	4,65	158,3	45,6	1,43	106,8
28.12.2023	9	4,4	152,2	43,19	1,51	105,7
3.01.2024	20	25,25	791,2	247,7	9,46	98,1
3.01.2024	pompa değişimi yapıldı.					

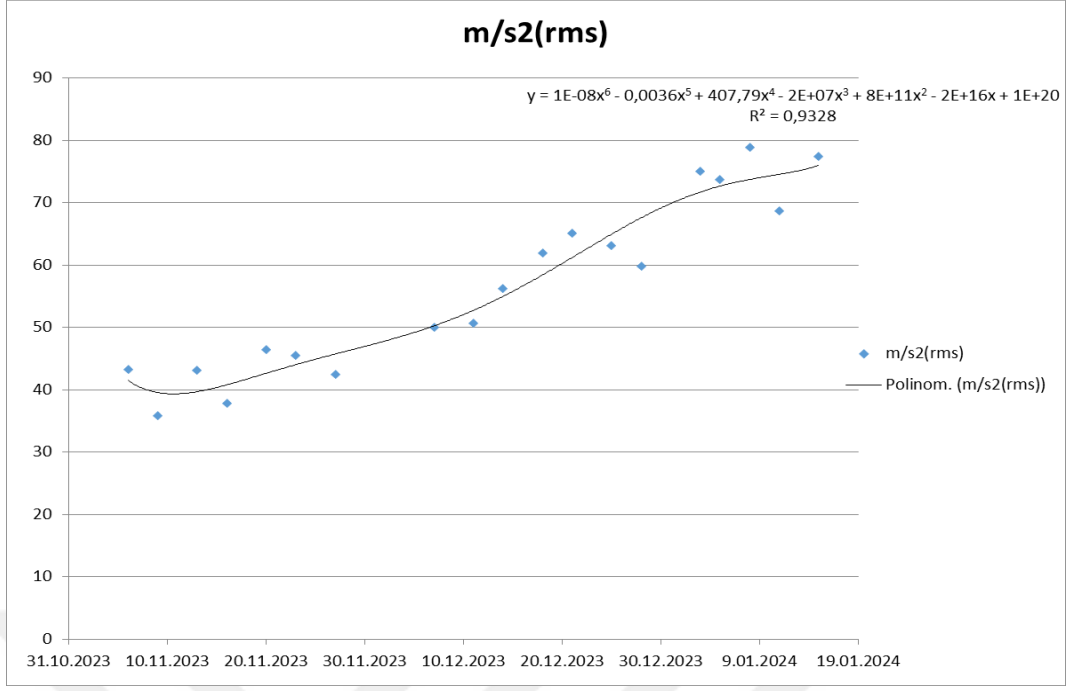
03.01.2024 tarihinde pompanın rulmanında arıza meydana geldiği için ölçülen değerler birden arttı, pompa bakıma alındı, yedeği ile değiştirilmiştir. Bu tarihten sonra ölçüm alınmamıştır.

Melamin alt küçük kızgın yağ pompasının G (rms), m/s² (rms) ve mm/s (rms) grafikleri Şekiller 6.11, 6.12 ve 6.13'te verilmiştir.

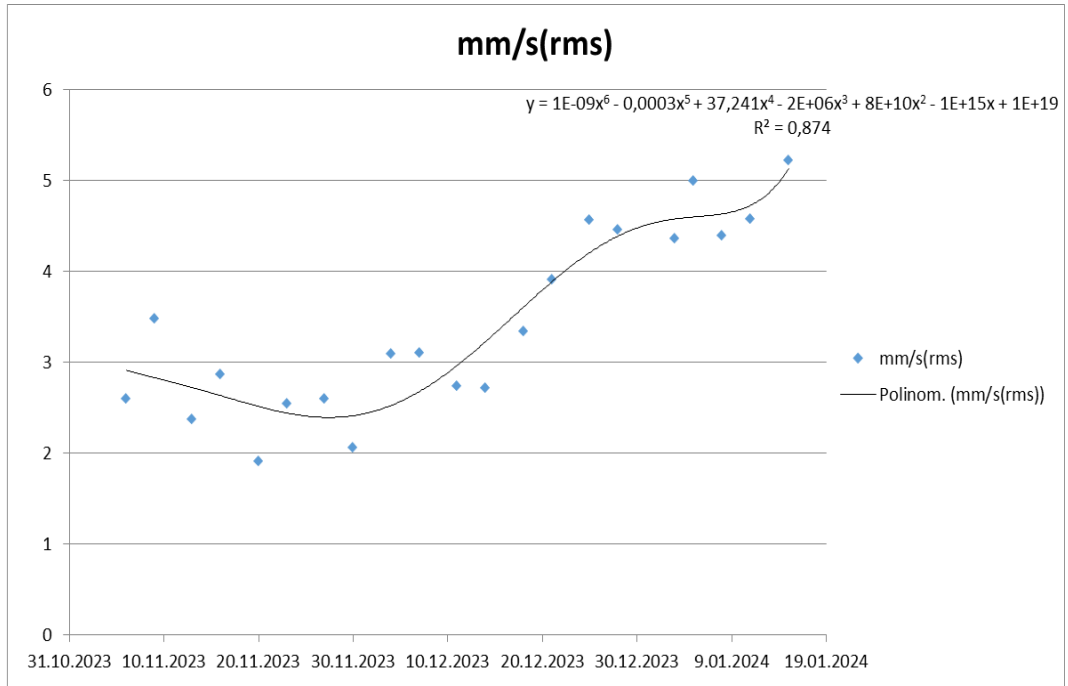
Melamin üst küçük kızgın yağ pompasının G (rms), m/s² (rms) ve mm/s (rms) grafikleri Şekiller 6.13, 6.15 ve 6.16'da verilmiştir.



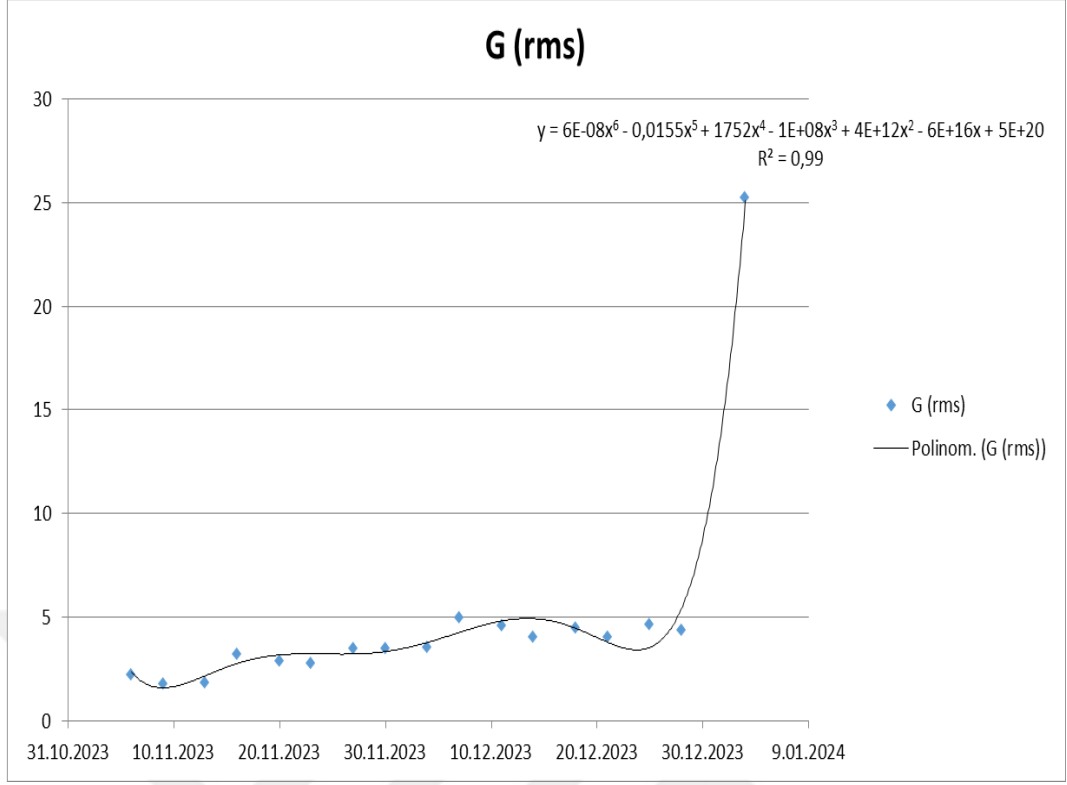
Şekil 6.11. Alt küçük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği (30.11.2023 ve 04.12.2023 dâhil değil)



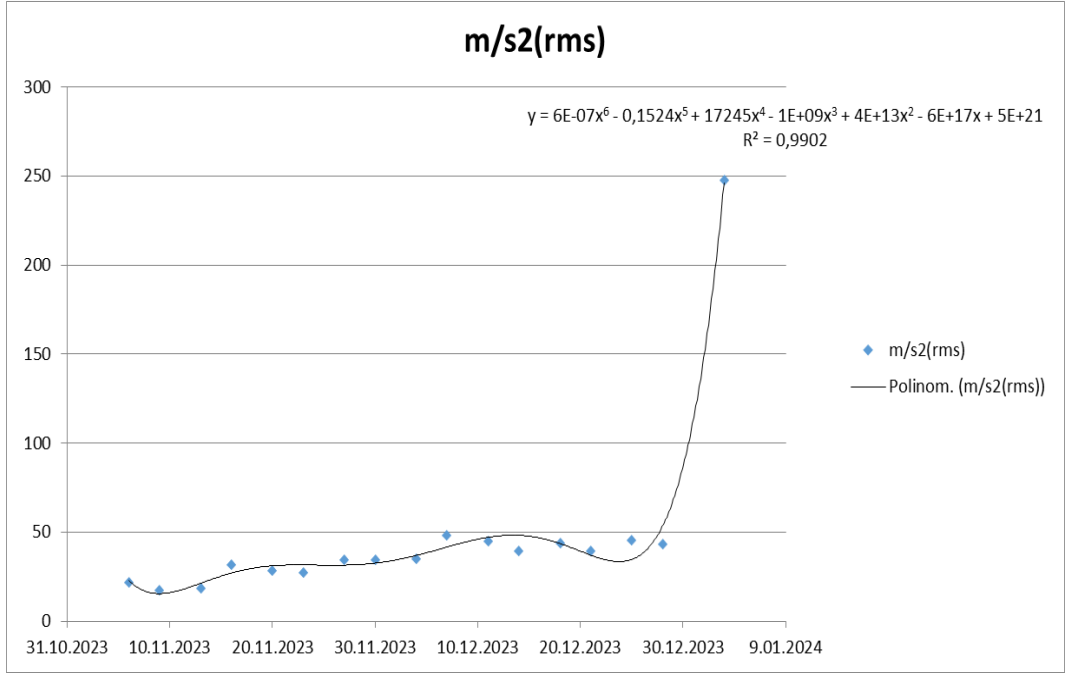
Şekil 6.12. Alt küçük kızgın yağ pompası m/s² (rms) grafiği (30.11.2023 ve 04.12.2023 dâhil değil)



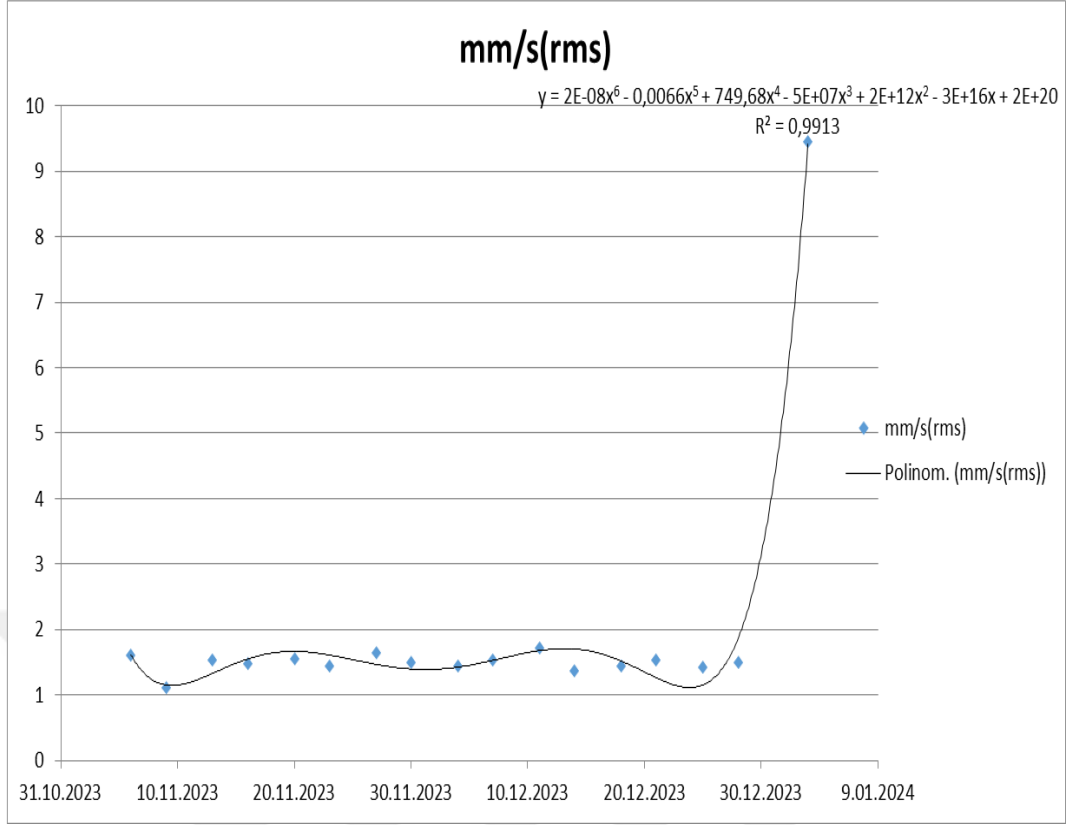
Şekil 6.13. Alt küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği



Şekil 6.14. Üst küçük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği



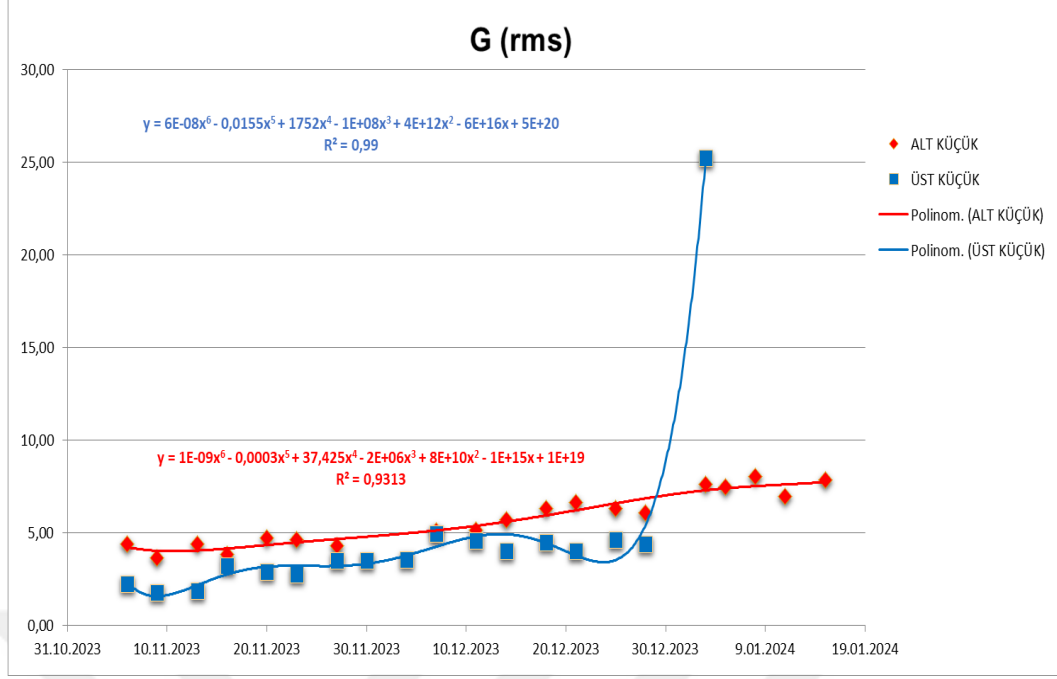
Şekil 6.15. Üst küçük kızgın yağ pompası m/s² (rms) grafiği



Şekil 6.16. Üst küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği

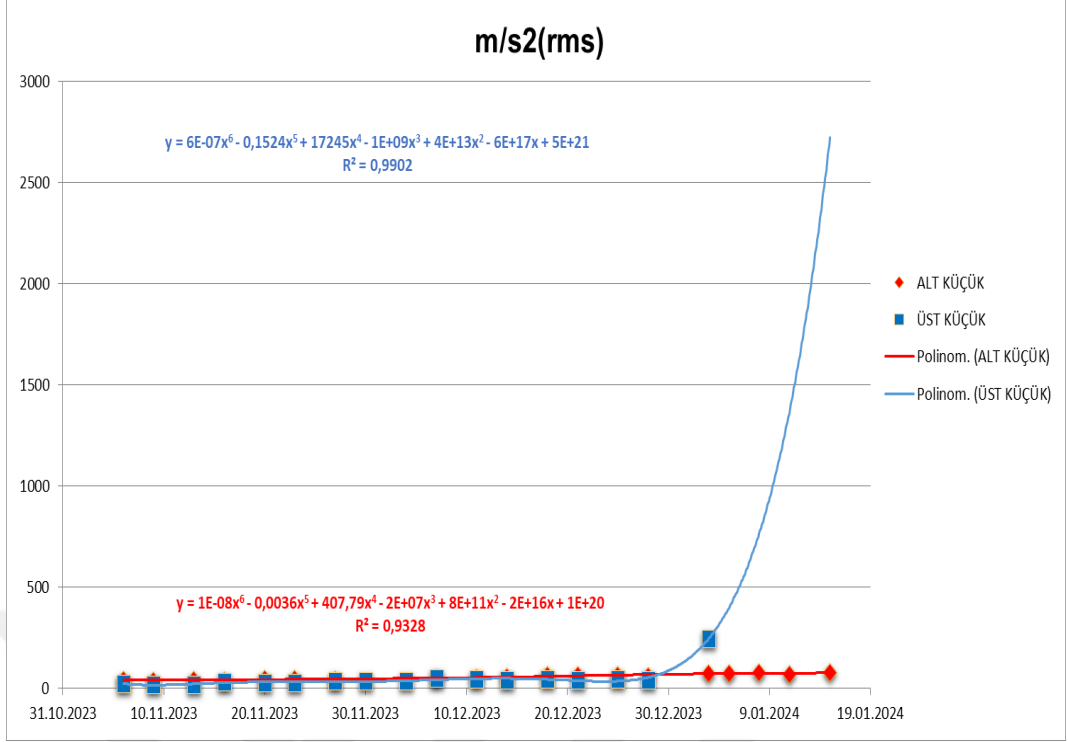
6.4.2 Küçük Pompaların Grafiklerinin Karşılaştırılması

Tesiste, melamin ünitesinde kullanılan küçük kızgın yağ pompalarının verilerinin karşılaştırması Şekiller 6.17, 6.18 ve 6.19’da verilmiştir.



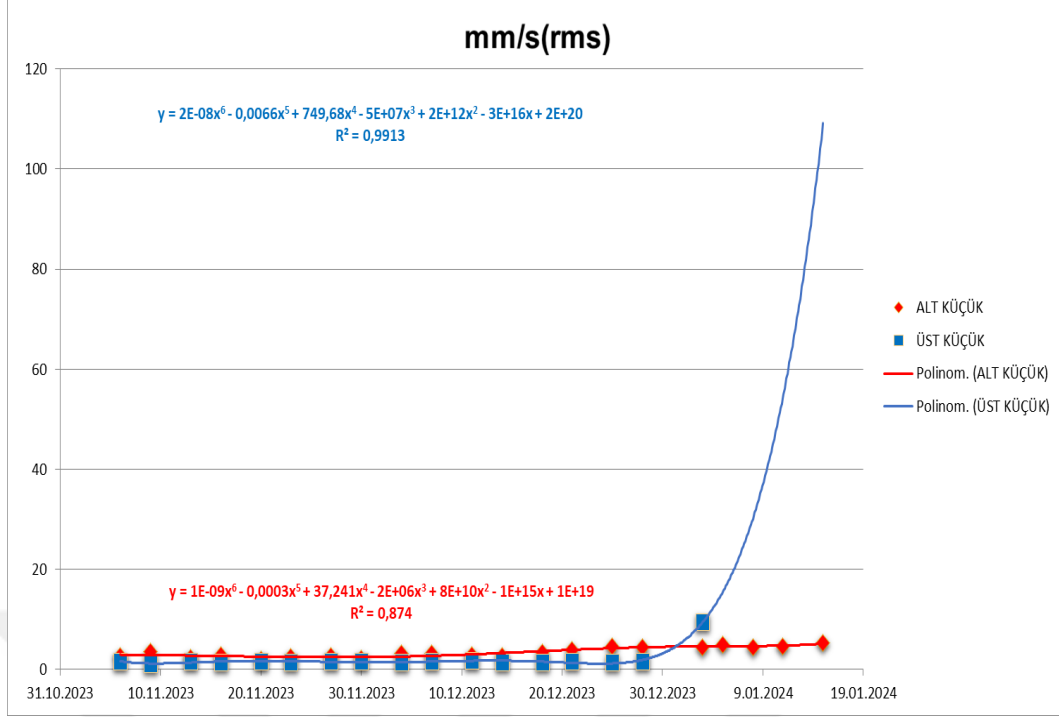
Şekil 6.17. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası G (rms) karşılaştırma grafiği

- Alt küçük pompa ve üst küçük pompanın G(rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu veriler Şekil 6.9'da görünmektedir. Alt küçük pompa ile üst küçük pompa birebir aynı pompalardır. Vibrasyon değerleri birbiri ile yaklaşık olarak yakınlık göstermektedir. Alt küçük pompa ve üst küçük pompa ana blok plakaların üstünde ve altında bulunan yardımcı bloklara kızgın yağ basmaktadır. Yardımcı bloklar sunta ile temas etmemektedir. Bu bloklar sıcaklığın stabilizesinde ve suntaya sehim ayarında kullanılmaktadırlar. Bu bloklar hareketli değildir ve bir basınç farkı da yoktur. Bu sebeplerden dolayı pompaların değerleri birbiri ile örtüşmektedir.
- Üst küçük pumpada meydana gelen yüksek vibrasyonun oluşturduğu eğri görünmektedir. Küçük pompalar, suntaya temas eden plakaların üstünde ve altında bulunan ayar için kullanılan plakalara kızgın yağ basmakla görevlidirler ve suntaya temas eden ana plakaların sıcaklık kayıplarını minimuma indirmektedirler. Yüke veya ekstra bir basınca maruz kalmadıklarından değerler birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 6.18. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) karşılaştırma grafiği

- Küçük kızgın yağ pompalarının m/s^2 (rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu veriler Şekil 6.10’da görünmektedir. Çalışma şartları aynı olduklarından, küçük pompaların değerleri birbiri ile çakışmaktadır. Üst küçük pompanın regresyon eğrisi, pompada oluşan yüksek vibrasyon sebebi ile çok yüksek artış gösterdi.



Şekil 6.19. Alt-Üst küçük kızgın yağ pompası mm/s (rms) karşılaştırma grafiği

- Küçük kızgın yağ pompalarının mm/s (rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu veriler Şekil 6.11’de görünmektedir. Küçük pompaların değerleri, alt ve üst yardımcı plakaların aynı olmasından dolayı değerler birbirleri ile örtüşmekte. Pompalar arasında herhangi bir farklılık yoktur.
- Üst küçük pompanın vibrasyon değerinde ki aşırı artış pompanın rulmanla mil arasında oluşan boşluklar neticesinde rulmanın arızalanıp vibrasyon değerlerini yükseltmesinden kaynaklanmaktadır. Pompada üretim esnasında arıza meydana geldiği için üretim duruşu yaşanılmıştır.
- Alt küçük pompada ise vibrasyon değeri üst küçük pompaya göre birden artmamıştır. Değerler belirli bir artış oranına göre artmaya devam etmiştir. Üretimde plansız duruş yaşamamak için alt küçük pompa üretimde duruş yaşatmadan planlı bir şekilde bakıma alınmıştır.

6.4.3 Büyük Pompaların Değerleri ve Grafikleri

Melamin ünitesinde kullanılan ve ölçümü alınan alt plaka büyük kızgın yağ pompasından periyotlar halinde alınan ölçümler Tablo 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.11. Tesiste kullanılan ölçümü alınan alt plakaya basan büyük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s2), m/s2 (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri

Melamin Alt Plaka Büyük Pompa						
TARİH	CF+	G (rms)	m/s2 (pk)	m/s2(rms)	mm/s(rms)	sıcaklık
6.11.2023	8	1,76	121,8	22,58	1,73	97,2
9.11.2023	7	2,30	83,89	17,29	1,3	92,1
13.11.2023	8	2,41	120,8	23,62	1,48	88,7
16.11.2023	10	2,31	173,7	22,61	1,25	93,2
20.11.2023	9	2,54	146,6	24,96	1,45	89,6
23.11.2023	10	2,08	150,2	20,37	1,13	79,9
27.11.2023	9	2,65	149,1	26,02	1,5	94,1
30.11.2023	10	2,81	177	27,56	1,28	104,8
4.12.2023	10	3,27	170,1	32,04	1,2	89,7
7.12.2023	10	3,15	177,1	30,91	1,11	86,1
11.12.2023	10	2,49	151,8	24,37	1,24	100,6
14.12.2023	10	2,7	186,8	26,5	1,15	99
18.12.2023	10	2,91	187,6	28,58	1,19	104,2
21.12.2023	10	2,75	189,6	26,97	1,18	99,6
25.12.2023	10	3,12	175,7	30,61	1,18	104,5
28.12.2023	10	2,95	166,3	28,97	1,18	105,9
3.01.2024	9	4,12	147,3	40,44	1,25	90,9
5.01.2024	11	5,98	231,9	58,55	1,78	99,7
8.01.2024	12	8,15	280,1	80,49	1,96	101,5
11.01.2024	22	28,48	840,9	279,3	6,8	88,2
11.01.2024	pompa değişimi yapıldı.					

11.01.2024 tarihinde pompada arıza meydana geldiği için bakım çalışması yapılmış, pompa yedeği ile değiştirilmiştir. Bu tarihten sonra ölçüm alınmamıştır.

Melamin ünitesinde kullanılan ve ölçümü alınan son pompa ise üst plaka büyük kızgın yağ pompasıdır. Kızgın yağ pompasından periyotlar halinde alınan ölçümler Tablo 6.12’de verilmiştir.

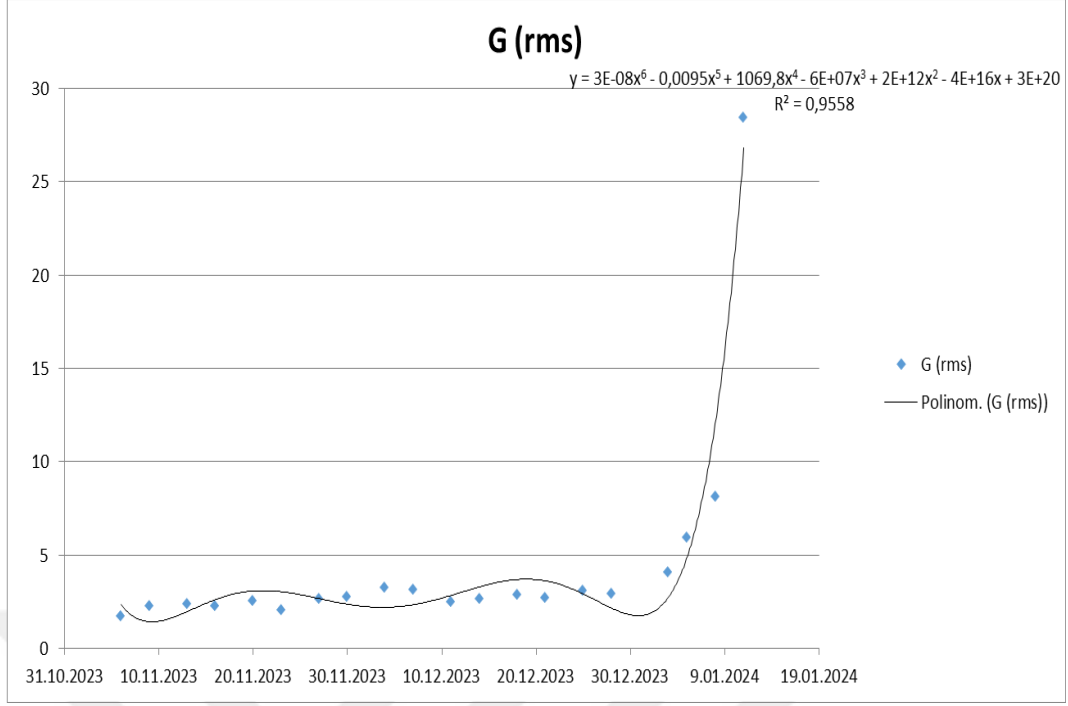
Tablo 6.12. Tesiste kullanılan ölçümü alınan üst plakaya basan büyük kızgın yağ pompasının ölçüm tarihleri ve ölçülen Cf+, G(rms), pk(m/s²), m/s² (rms), mm/s (rms), sıcaklık değerleri

Melamin Üst Plaka Büyük Pompa						
TARİH	CF+	G (rms)	m/s ² (pk)	m/s ² (rms)	mm/s(rms)	sıcaklık
6.11.2023	10	4,67	170,5	45,77	1,37	87,4
9.11.2023	10	5,42	190,1	53,14	1,48	80,6
13.11.2023	10	5,82	210,6	57,12	1,85	85,5
16.11.2023	10	4,55	180,9	44,63	1,58	88,4
20.11.2023	8	3,87	140,8	37,92	1,95	85,5
23.11.2023	10	4,89	198,1	47,95	1,39	84,3
27.11.2023	10	5,91	192,4	58	1,65	84,3
30.11.2023	11	5,32	228,7	52,18	1,87	93,2
4.12.2023	11	6,47	241,3	63,42	1,57	97,8
7.12.2023	12	8,25	315	80,93	1,65	95,2
11.12.2023	11	6,52	249,1	63,98	1,66	100,5
14.12.2023	12	7,93	304,7	77,77	1,64	98
18.12.2023	12	8,31	283,6	81,51	1,86	101,5
21.12.2023	11	7,3	258,4	71,61	1,88	96,8
25.12.2023	13	10,08	376,9	98,84	1,8	100,3
28.12.2023	12	7,77	282,4	76,24	1,96	103,6
3.01.2024	11	7,32	282,2	71,74	2,05	101,6
5.01.2024	15	13,31	513,2	130,5	2,21	93,2
8.01.2024	15	14,16	515,7	138,9	2,44	100,6
11.01.2024	17	17,72	596,4	173,8	3,44	98,4
15.01.2024	16	16,61	570,7	162,9	4,78	98,3
16.01.2024	pompa değişimi yapıldı.					

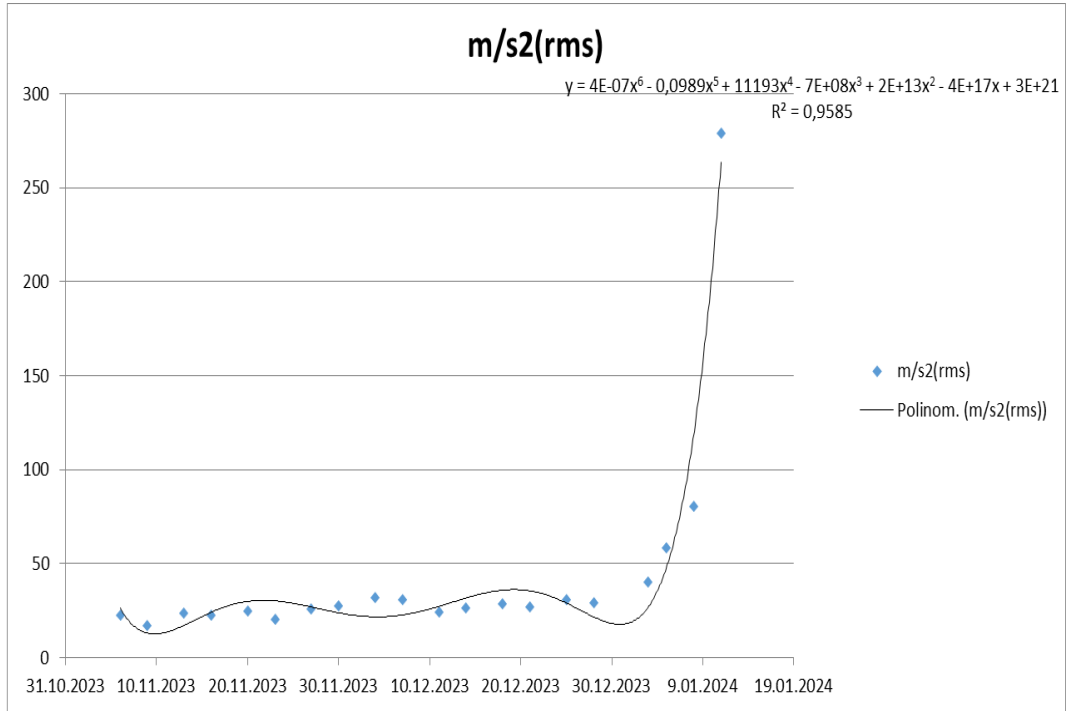
16.01.2024 tarihinde pompada planlı bakım çalışması yapılmış, pompa yedeği ile değiştirilmiştir. Bu tarihten sonra ölçüm alınmamıştır.

Melamin alt büyük kızgın yağ pompasının G (rms), m/s² (rms) ve mm/s (rms) grafikleri Şekiller 6.20, 6.20 ve 6.2'de verilmiştir.

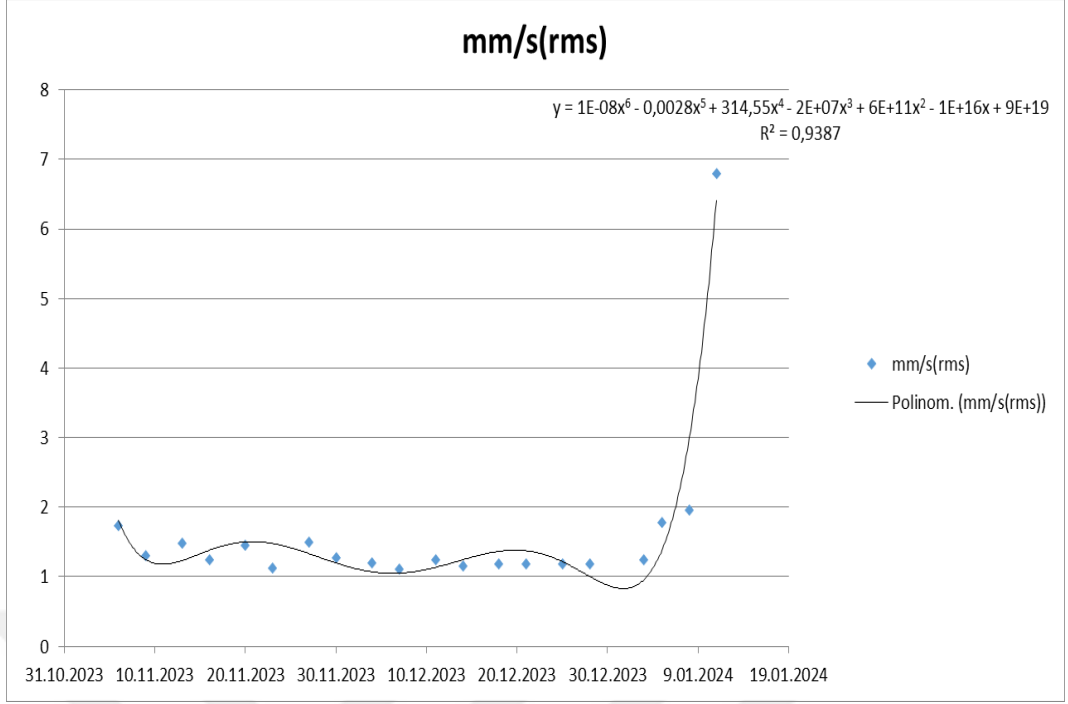
Melamin üst büyük kızgın yağ pompasının G (rms), m/s² (rms) ve mm/s (rms) grafikleri Şekiller 6.23, 6.24 ve 6.25'de verilmiştir.



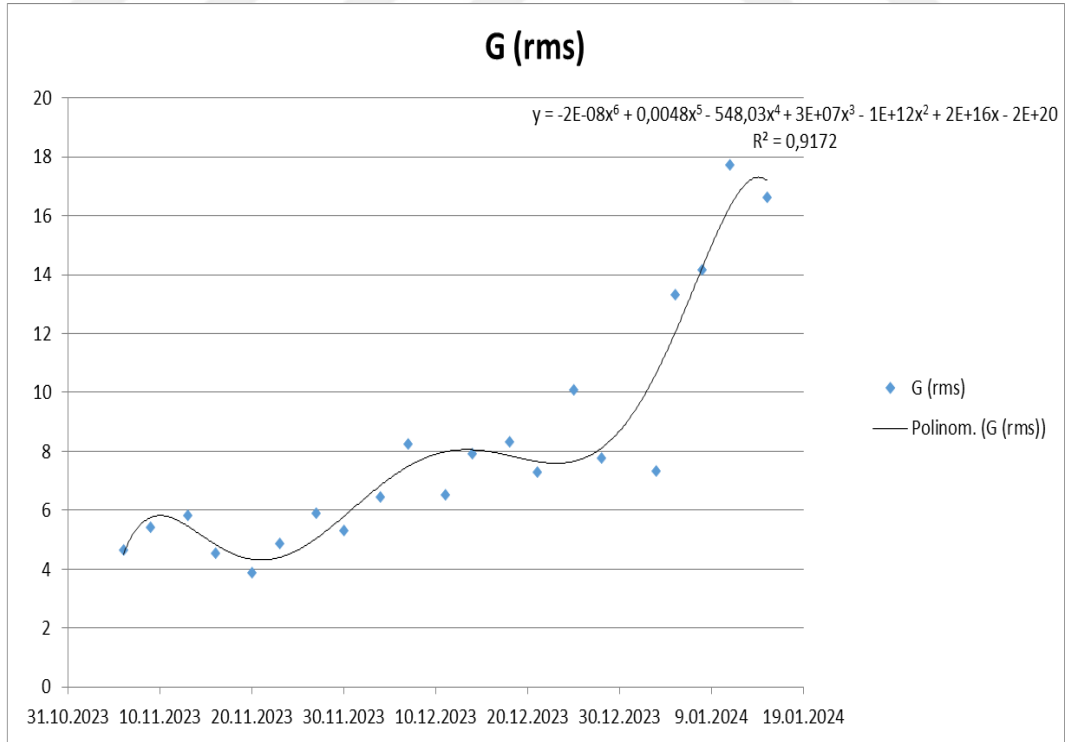
Şekil 6.20. Alt büyük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği



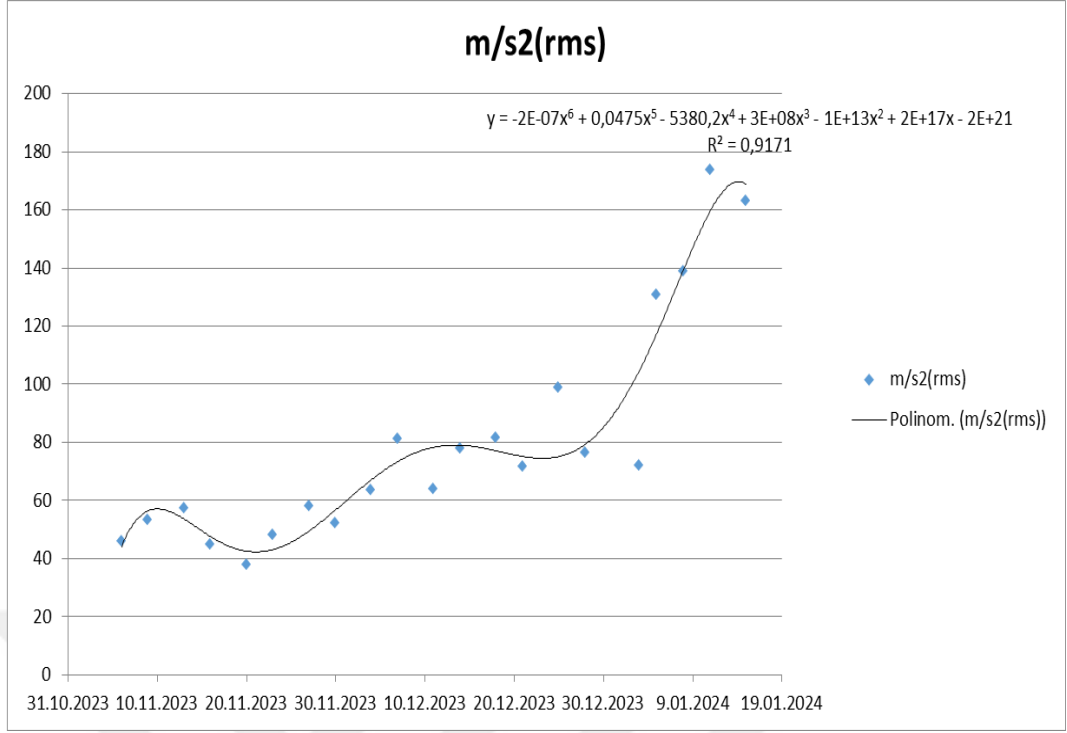
Şekil 6.21. Alt büyük kızgın yağ pompası m/s² (rms) grafiği



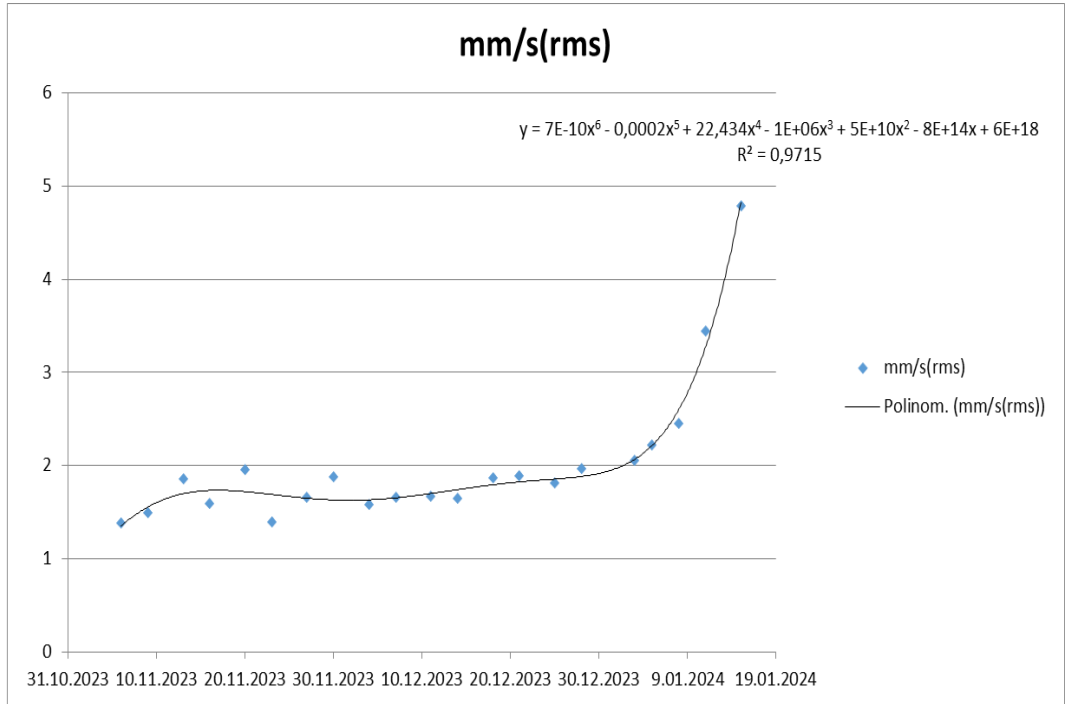
Şekil 6.22. Alt büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği



Şekil 6.23. Üst büyük kızgın yağ pompası G (rms) grafiği



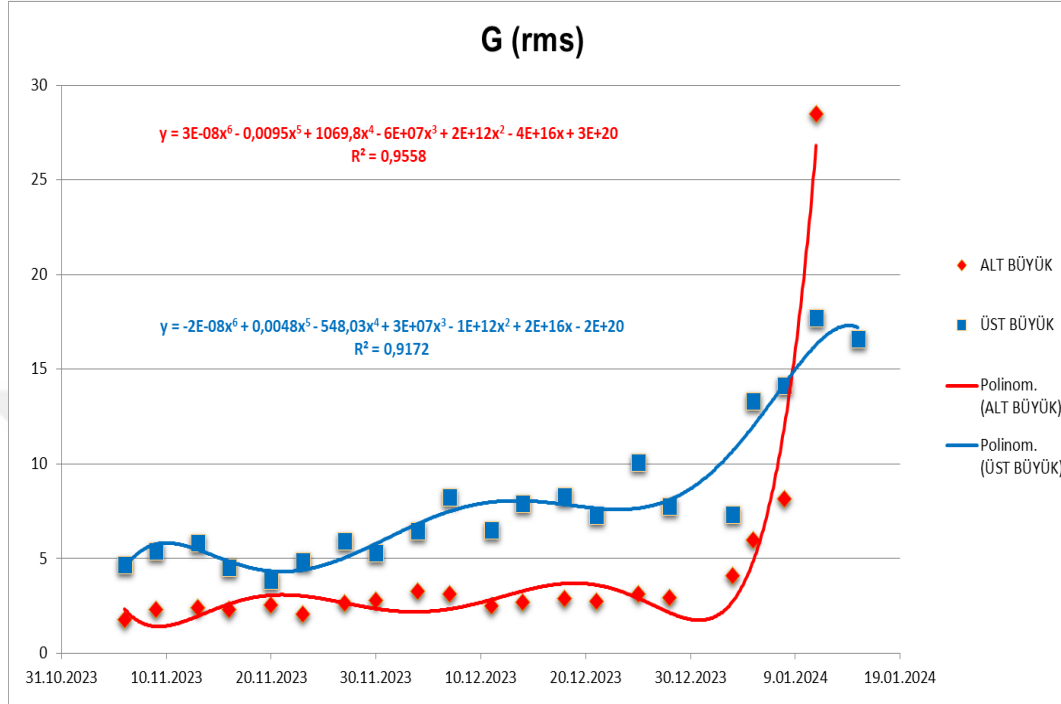
Şekil 6.24. Üst büyük kızgın yağ pompası m/s² (rms) grafiği



Şekil 6.25. Üst büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) grafiği

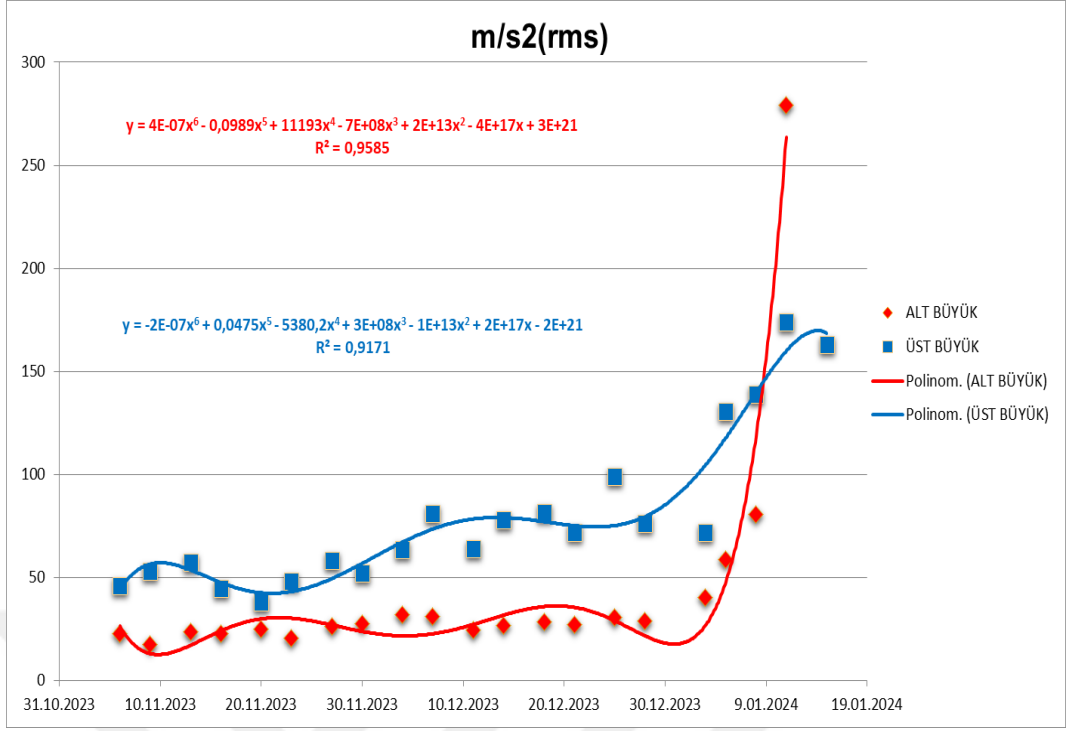
6.4.4 Büyük Pompaların Grafiklerinin Karşılaştırılması

Tesiste kullanılan büyük kızgın yağ pompalarının verilerinin karşılaştırması Şekiller 6.26, 6.27 ve 6.28’de verilmiştir.



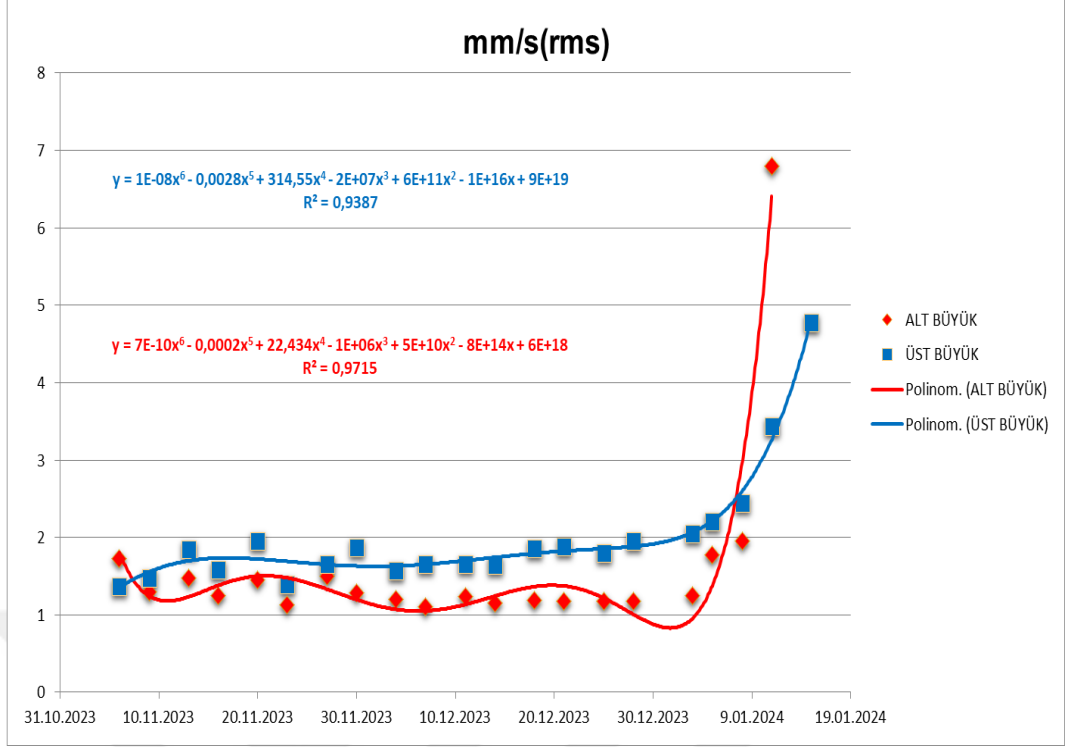
Şekil 6.26. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası G (rms) karşılaştırma grafiği

- Alt büyük pompa ve üst büyük pompanın G(rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu veriler Şekil 6.18’de görülmektedir. Alt büyük pompa ile üst büyük pompa birebir aynıdır. Fakat pompaların ölçülen vibrasyon değerleri arasındaki fark oluşan grafikte belli olmaktadır. Üst büyük pompa, daha ağır olan ve hareketli olan bloğa kızgın yağ bastığı için vibrasyon değerleri alt büyük pompaya göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum alt blok ile üst blok arasında oluşan basınç farkından kaynaklanmaktadır. Üst blok hareketli ve daha ağır olduğu için üst bloka basan pompa, alt bloğa basan pompaya göre daha fazla yüke maruz kalmaktadır. Bu sebepten dolayı üst büyük pompanın değerleri daha yüksektir.



Şekil 6.27. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası m/s^2 (rms) karşılaştırma grafiği

- Alt büyük pompa ve üst büyük pompanın m/s^2 (rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu veriler Şekil 6.19’da görünmektedir. Pompalar birebir aynı olmasına rağmen ölçülen vibrasyon değerleri arasında farklılıklar olduğu gözlemlendi. Bu durumun sebebi üst blok ile alt blok arası basınç farkında ve üst büyük pompaya binen yükün alt büyük pompaya binen yükten fazla olduğundan kaynaklı olduğu görüldü.



Şekil 6.28. Alt-Üst büyük kızgın yağ pompası mm/s (rms) karşılaştırma grafiği

- Alt büyük pompa ve üst büyük pompanın mm/s (rms) değerlerinin birlikte oluşturduğu grafik Şekil 6.20’de görünmektedir. Alt büyük pompanın 09.01.2024 tarihinden sonra vibrasyon değerlerinde artış meydana gelmesinin sebebi pompada oluşan arıza sebepli vibrasyondur. Vibrasyon fazla yükseldiği için üretim esnasında pompada arıza meydana geldi.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Günümüz dünyasında artan maliyetler sebebi ile kestirimci bakım çalışmaları önem kazanmıştır. Titreşim ölçümü ve analizi yöntemi, çalışan ekipmanların durumları bize göstererek, makinenin ne zaman arızalanacağını ya da planlı değişimin ne zaman yapılması gerektiğini tahmin etmemizi sağlar.
- Ölçümü alınan ve takibi yapılan pompalarda meydana gelen arızalar üretimde duruşlar yaşanmasına ve üretim kayıplarına sebep olmaktadır. Bu arızaların oluşmadan kontrol altında tutulup, yerinde müdahale etmenin önemli olduğu görülmüştür.
- Alt büyük ve üst büyük pompalarda yapılan incelemelerde; pompalar birebir aynıdır, her iki pompa eş zamanlı çalışmaktadır. Ancak ölçülen vibrasyon değerlerindeki farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun temel sebebinin üst büyük pompaya binen yük ile alt büyük pompaya binen yüklerin farklı olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Üst büyük pompaya binen yük fazla olduğundan pompanın vibrasyon değerleri alta göre daha yüksektir. Bu durum da pompalar arasında vibrasyon farkı oluşmasına neden olmuştur.
- Üst büyük pompaya daha fazla yük bindiğinden, pompanın kontrolleri diğer pompaların kontrollerinden daha sıklaştırılmalıdır, titreşim analizi doğru yapıp makineyi doğru okumak gerekir.
- Arızalanan pompaların rulmanlarında yapılan incelemede ise rulman kafesinin kırık olduğu görüldü (bkz. Fotoğraf 6.5). Kafeste meydana gelen kırılma, rulmanın yağının zamanla yağlama görevini yerine getirmemesi sonucu, yağ filmi istenilen seviyede oluşmadı ve yuvarlanma elemanı ile, iç ve dış bilezik arasındaki sürtünme kuvvetinin artması malzemede aşınmaya neden oldu. Aşınma sebebi ile yuvarlanma elemanı kafese vuruntular yaparak kafesin kırılmasına sebebiyet verdi.
- Milde rulmanların montajlı olduğu yerlerde çizilmeler ve aşınmalar olduğu saptandı (bkz. Fotoğraf 6.6 ve 6.7). Kırılan parça rulmanın yuvarlanma elemanları arasında sıkıştığı için rulmanın dönmesinde sorun oluşturdu. Rulmanların yuvarlanma elemanlarında başlayan hasar iç bileziğe geçti ve

iç bilezik frekansındaki artan titreşimle, rulmanın montaj edildiği milin yüzeyinde aşınmalara sebep oldu.

- Titreşim analizi ile tesiste üretim için kritik öneme sahip olan bölgenin, kontrol altında tutularak üretim kaybı yaşanmadan arızaların tespit edilmesinin mümkün olduğu bu çalışma ile de görülmüştür.
- Pompaların daha az arızalanmalar için sensör destekli uygulamalara geçilerek pompaların sürekli yükte kalmaması kontrol altında tutulmalıdır. Plakalara sıcaklık sensörleri eklenerek pompaların sürekli yüksek devirde çalışması yerine, sıcaklık düştüğünde devrini yükselterek sisteme kızgın yağ göndermesi yapılabilir.
- Pompaların rulmanlarında, hasar oluşması durumunda spektrum grafiklerinde titreşim frekansları artacaktır, bu durumda sistemde kullanılan pompalara spektrum grafiklerinin değerindeki artışları ölçmesi için sisteme program eklenerek grafiklerdeki artışlara göre rulmanda meydana gelen değişimler gözlemlenir. Bu sayede rulmanda meydana gelen bozulmaların tespit edilmesi kolaylaşır, rulmanda meydana gelen hasarın tam zamanı belirlenir.
- Pompaların millerinin çalışma frekansı ile doğal frekansı eşit olursa sistemin genliği matematiksel olarak sonsuza gider, rezonans durumuna sebep olur. Bu durum milin kırılmasına neden olur.
- Çalışma frekansı, doğal frekanstan küçük olması durumunda titreşim meydana gelmez, titreşim olsa dahi minimum seviyelerde olur, bu durumda pompaların çalışma ömürleri uzar ve hasar meydana gelmez. Çalışma frekansı, doğal frekanstan büyük ise, sistemde titreşimler meydana gelir bu durumda sistemde hasar olduğu gözlemlenir.
- Pompalardan sökülen hasarlı rulmanlar incelendiğinde, bazı rulmanların yağının katılaştığı ve bazılarında ise yağın yandığı tespit edilmiştir. Kullanılan yağın özelliklerinin yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun olmadığına karar verildi. Tesisin şartları el verdiğinde yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygun özel mineralli poliüre yağlayıcı yağ temin edilip kullanılabilir.

8. KAYNAKÇA

Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.

Akturk, N. (1993). Dynamics of a rigid shaft supported by angular contact ball bearings (Doctoral dissertation, Imperial College London (University of London)).

Al-Najjar, B. (2000). Accuracy, effectiveness and improvement of vibration-based maintenance in paper mills: case studies. *Journal of Sound and Vibration*, 229(2), 389-410.

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.

Barbera, F., Schneider, H., & Watson, E. (1999). A condition based maintenance model for a two-unit series system. *European Journal of Operational Research*, 116(2), 281-290.

Belek, T., & Toprak, T. (1991). Endüstriyel Tesislerde Makina Performansının İzlenmesi ve Bilgisayar Destekli Bakım Planlanması. *Brüel & Kjaer Teknik Personel Eğitimi Kurs Notları*, İTÜ Makina Fakültesi.

Beltrán, P., & López, A. (2000). El Mantenimiento Predictivo en aerogeneradores. Caso práctico: estudio de averías. In *Proceedings 4j-Congreso Espanol de Mantenimiento*, AEM, Barcelona.

Bilge, H. (2015). AISI 4140 çeliğinde yorulma çatlakları ilerlemesinin sistemin doğal frekansına etkisi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Bozkurt, A. Y., & Göker, Y. (1981). Orman ürünlerinden faydalanma.

Carnero, M. C. (2005). Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. *Decision support systems*, 38(4), 539-555.

Çay, C. İ. (2006). Tarım traktörleri sürücü koltukları titreşim sönümleme elemanları üzerine bir araştırma.

- Christer, A. H., Wang, W., & Sharp, J. (1997). A state space condition monitoring model for furnace erosion prediction and replacement. *European Journal of Operational Research*, 101(1), 1-14.
- Dereoğlu, F. (2020). Kağıt üretim sistemindeki kurutucu silindir ve sirkülasyon fanının kestirimci bakım tekniği ile arıza takibi ve titreşim analiziyle tespiti (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dereoğlu, F. (2020). Kağıt üretim sistemindeki kurutucu silindir ve sirkülasyon fanının kestirimci bakım tekniği ile arıza takibi ve titreşim analiziyle tespiti (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Dündar, D. R., Sarıçiçek, İ., & Yazıcı, A. (2021). Bakım Faaliyetlerini Dikkate Alan Makine Çizelgeleme: Literatür Araştırması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 737-756.
- Dündar, D. R., Sarıçiçek, İ., Çınar, E., & Yazıcı, A. (2021). Kestirimci Bakımda Makine öğrenmesi: Literatür Araştırması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 256-276.
- Geçit, C. (2006). Seri ve paralel bağlı santrifüj pompaların farklı devir ve sıcaklıklardaki performanslarının incelenmesi (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- Gücek, A. E. Rendering tesisinde kullanılan kestirimci bakım yöntemleri ve uygulamaları (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gündüz, G., & Masraf, Y. (2005). Üç Tabakalı Yatık Yongalı Yongalevha Üretiminde Üretim Şartlarının Değiştirilmesinin Levhaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 7(8), 58-71.
- Hafızoğlu, M. A., & Demir, A. Kompresör titreşimlerinin analizi ve modellenmesi.
- Hancı, G. (2009). Lastik endüstrisinde kullanılan kestirimci bakım uygulamaları (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- İstek, A., Özlüsoylu, İ., & Kızılkaya, A. (2017). Türkiye ahşap esaslı levha sektörü

- analizi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 19(1), 132-138.
- Kakkar, V. (1999). Ontario power generation's Nanticoke power plant'. Orbit, Bently Nevada, 20(4), 14-16.
- Kalyoncu, M. (2006). Titreşim analizi ile makina elemanları arızalarının belirlenmesi. Mühendis ve Makina, 47(552), 28-35.
- Karadayı, H. M. (2011). Titreşim analizi ile pompalarda arıza tespiti ve kestirimci bakım uygulamaları (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Karadayı, H. M. (2011). Titreşim analizi ile pompalarda arıza tespiti ve kestirimci bakım uygulamaları (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Karahan, M. F. (2005). Titreşim analizi ile makinelerde arıza teşhisi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Kaymaz, H. (2023). Otomotiv ömür testlerinin Arrhenius yöntemiyle hızlandırılması, Elektrikli güç aktarma sistemleri üzerine deneysel bir çalışma. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi, 6(1), 87-101.
- Köksal, M. (2017). Bakım Planlaması, Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Köksal, S. E., & Kelleci, O. (2020). Yonga levha (sunta) ve mdf kullanan mobilya-dekorasyon firmalarının sorunları; bolu örneği. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 22(1), 133-143.
- Lacey, S. J. (2008). An overview of bearing vibration analysis. Maintenance & asset management, 23(6), 32-42.
- Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 65, 101974.
- Lupinucci, M., Perez, J., Davila, G., & Tiseyra, L. (2000). Improving sheet metal quality and product throughput with Bently's machinery management system. Orbit, Bently Nevada, 21(3), 37-41.

- Orhan, S., Aktürk, N., & Celik, V. (2006). Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. *Ndt & E International*, 39(4), 293-298.
- Rao, S. S. (2019). *Vibration Of Continuous Systems*. John Wiley & Sons.
- 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.
- Sancak, A., Candaş, A., Kocabal, Y., & İmrak, C. Yoğun Yolcu Kullanımına Açık Yürüyen Merdivenlerin Güvenlik Seviyesini Artırmaya Yönelik Koruyucu Bakım Esasları.
- Soylu, B., Yiğiter, H., Sarıkaya, V., Sandıkçı, Z., & Asena, U. T. K. U. (2022). Kestirimci Bakım Planlama İçin Makine Öğrenmesi Temelli Bir Karar Destek Sistemi ve Bir Uygulama. *Verimlilik Dergisi*, 48-66.
- Susto, G. A., Beghi, A., & De Luca, C. (2012). A predictive maintenance system for epitaxy processes based on filtering and prediction techniques. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 25(4), 638-649.
- Susto, G. A., Beghi, A., & De Luca, C. (2012). A predictive maintenance system for epitaxy processes based on filtering and prediction techniques. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 25(4), 638-649.
- Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), 469-480.
- Thoemen, H. (2010). *Wood-based panels: an introduction for specialists*. Brunel University Press.
- Tola, M., & Tolunay, A. (2012). Yonga levha endüstrisi işletmelerinde ekonomik açıdan başarı düzeyinin belirlenmesi: Orman Mahsulleri Entegre Sanayi ve Ticaret AŞ (ORMA) örneği.
- Tola, M., & Tolunay, A. (2013). Determination of economic success level of particleboard industry: Forest Integrated Products Industry and Trading

- Ltd. Co.(ORMA) example. Turkish Journal of Forestry, 14(2), 102-112.
- Tosun, Ö. (2007). Tamir-bakım planlaması ve bir uygulama (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Tosun, Ö. (2007). Tamir-bakım planlaması ve bir uygulama (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Ünal, G. (2009). Güvenilirlik merkezli bakım ve bir endüstriyel uygulama (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Uysal, V. (2019). Enerji santrallerinde titreşim analizi ile kestirimci bakım (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- Villar, J. M., Masson, L. O., & Games, J. A. (2000). Proactive maintenance-a successful history. Orbit, Bently Nevada, 21(3), 33-41.
- Weyerhaeuser, J. W. (2000). Bearing failures dry up at Weyerhaeuser. Practicing Oil Analysis, 2(5), 36-41.
- Worrall, B. M., & Mert, B. (1980). Application of dynamic scheduling rules in maintenance planning and scheduling. International Journal of Production Research, 18(1), 57-71.
- Wowk, V. (1991). Machinery Vibration Measurement and Analysis, McGraw-Hill.
- Yaman, G., & Karadayı, H. M. (2014). Titreşim analizi ile pompalarda arıza tesbiti ve kestirimci bakım için örnek bir çalışma. Tesisat Mühendisliği, 140(140), 37-51.
- Yildirim, E. Makinelerde titreşim analizi ile kestirimci bakım (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yildirim, E. Makinelerde titreşim analizi ile kestirimci bakım (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- (1) <https://www.timkenrulman.com.tr/wp-content/uploads/2023/08/TIMKEN-RULMAN-SABIT-BILYALI-KATALOG.pdf>